

#### Dottorato di Ricerca

in

Ingegneria Elettronica

Scuola Dottorale EDEMOM – European Doctorate in Electronic
Materials, Optoelectronics and Microsystems

XXV Ciclo

# Studio di dispositivi LED e loro applicazioni nel settore del segnalamento

Ing. Donato Papalillo

Docente Guida

Prof. Giuseppe Schirripa Spagnolo

Coordinatore

Prof. Giuseppe Schirripa Spagnolo

A Zio.

### Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Professore Giuseppe Schirripa Spagnolo per i suoi preziosi insegnamenti durante i tre anni di dottorato e le per le numerose ore trascorse insieme a lavorare nell'Escher Lab.

Non potrò mai dimenticare le sere passate a tentare di mettere insieme il setup di misura che è presentato in questa tesi (noto a noi come "Strumentopolo"). E le volte che, in fase di creazione di un nuovo circuito o di un nuovo setup sperimentale, sentivo riecheggiare nella mia mente il noto motivetto di MacGyver; mai visto applicare le nozioni e le leggi della fisica in modo così pratico e semplice.

Lo ringrazio per avermi consentito di crescere, di fare esperienze nuove e soprattutto stimolanti.

Ma soprattutto lo ringrazio per essersi dimostrato in questi anni un mio secondo padre, disponibile e sempre presente nel darmi una mano, anche in momenti difficili al di fuori dell'ambiente accademico.

Un grazie importante va a RFI, solo grazie alla collaborazione intrapresa con la nostra università si è potuto realizzare il lavoro che questa tesi cerca di riassumere. Naturalmente un grazie va anche a tutti i costruttori dei segnali semaforici, che mi hanno permesso di giocare con i loro sistemi di illuminazione.

Un ringraziamento particolare va anche ad Azzurra, mia compagna ormai da troppi anni (mi merito un schiaffo...), soprattutto per essermi stata vicino in questi ultimi mesi, nei quali neanche io riuscivo a sopportarmi. So che la stesura di questa tesi l'ha fatta sentire molto spesso messa da parte...

Un caro ringraziamento va a tutte le persone conosciute in questi anni a Roma Tre con le quali ho condiviso gioie e dolori di questa affascinante e bellissima avventura.

Un ringraziamento sentito va a Lorenzo, Carla, Andrea e Giuseppe (non sono in ordine di importanza...) che hanno condiviso con me in maniera attiva, senza di loro non sarei giunto sino a qui, il mio piccolo contributo al mondo della ricerca.

Naturalmente non posso non citare il Professore Paolo Del Vecchio, le sue competenze e il suo sapere, condite da una spiccata simpatia, mi hanno permesso di affacciarmi a nuove e importanti competenze.

Infine ma non meno importate, un grosso ringraziamento va alla mia famiglia, i miei genitori e la mia sorellina che, anche se distanti poche centinaia di km, hanno dovuto subirsi estenuanti chiamate di: "si ho mangiato"..."si sto bene"..."sono incasinato"..."va bene, buona notte". Chiamate che duravano molto meno del tempo che ho impiegato a descrivere.

Sperando di non aver tralasciato nessuno, grazie a tutti voi per aver reso questa esperienza unica e indimenticabile.

### **Abstract**

Questa tesi rappresenta l'attività di ricerca, svolta durante la scuola Dottorale EDEMOM, che ha prevalentemente interessato lo studio dei dispositivi LED e le loro applicazioni nel settore illuminotecnico. Di fatto tale settore è stato rivoluzionato negli ultimi anni grazie alla nascita di nuovi dispositivi a stato solido con efficienze, rese luminose e caratteristiche meccaniche superiori ai tradizionali metodi d'illuminazione.

I vantaggi principali dell'utilizzo dei LED nell'illuminazione generica, cui sia il mondo dell'industria sia gli utenti finali sono interessati, sono l'efficienza di trasduzione elettrica/luminosa e i minor costi di manutenzione degli apparati che ne fanno uso. Il processo di produzione della luce nelle sorgenti a LED è più efficiente delle classiche tecnologie; ad esempio nelle lampade a filamento una buona porzione dell'energia è utilizzata per riscaldare il filamento e non direttamente utilizzata per la produzione di radiazione luminosa. Inoltre le lampade a LED durano molto più a lungo delle lampade realizzate in tecnologia classica, con minor costi di manutenzione e maggior sicurezza d'impianto.

Nel nostro lavoro, partendo da un settore di "nicchia" come il segnalamento ferroviario, anche questo interessato dallo sviluppo di nuove lampade, si sono osservate le problematiche macroscopiche di sistemi complessi che fanno uso di sorgenti luminose a LED. Di fatto, la nuova tecnologia benché sia già matura, in ambienti tecnici come il segnalamento presenta ancora limiti e criticità.

Shift colorimetrico, variazione d'intensità e tempo di vita sono state, dunque, le tematiche al centro del nostro studio.

Com'è noto, i diodi emettitori di luce presentano un'importante dipendenza delle proprie caratteristiche ottiche in funzione della temperatura. La qualità dell'emissione luminosa (intesa come combinazione fra cromaticità e intensità del fascio), e il tempo di vita presentano una variabilità in relazione alla temperatura d'esercizio. Questa dipendenza è più o meno marcata a seconda del tipo di realizzazione del dispositivo.

La criticità risiede nello stesso principio fisico che è alla base del loro funzionamento, la *ricombinazione radiativa*: passaggio di un elettrone dalla banda di conduzione alla banda di valenza attraverso l'emissione di un fotone. Nello specifico, nei LED, allo scopo di massimizzare la probabilità che tale processo fisico avvenga, si realizzano strutture microelettroniche "ad hoc", modellizzando le bande energetiche del materiale che lo definisce. Tuttavia la conformazione delle bande energetiche di un semiconduttore è fortemente influenzata dalla temperatura, causando un'eguale dipendenza nelle caratteristiche emissive di questi stessi dispositivi.

La dipendenza dalla temperatura delle proprietà elettro/ottiche dei LED rende necessaria nello sviluppo degli apparati, che ne fanno uso, una nuova metodologia di progettazione che tenga conto della temperatura stessa. Di fatto nei sistemi ottici a semiconduttore non sempre si dà la giusta importanza a tale dipendenza, realizzando apparati che al variare della temperatura presentano instabilità sia dal punto di vista cromatico sia di intensità di emissione.

Nel settore illuminotecnico di cui ci siamo interessati, il segnalamento, tale problematica è molto sentita. Le normative di riferimento cercano di correlare in modo oggettivo le caratteristiche della luce alla percezione visiva dell'uomo, ricercando la "sicurezza della sensazione" stimolata nell'osservatore (in altre parole i limiti imposti cercano di definire sorgenti luminose prive di ambiguità e visibili). La definizione di apparati dalle prestazioni fotometriche "instabili" non è ammessa e, di fatto, le norme cui fa riferimento la segnaletica, risultano essere molto stringenti.

Infatti, è possibile individuare in letteratura accorgimenti tecnici che permettono di realizzare sorgenti a LED che presentano caratteristiche ottiche stabili. Tecniche di color mixing e nuovi metodi di alimentazione sono proposti allo scopo di realizzare sistemi d'illuminazione non solo efficienti ma anche rispettosi delle specifiche e norme tecniche.

In quest'ambito, il nostro lavoro indica due nuove possibilità d'intervento che permettono di realizzare segnali rispettosi sia delle norme d'intensità sia di cromaticità al variare della temperatura.

La prima soluzione da noi proposta parte da tecniche di color mixing sino a giungere allo sviluppo di nuovi sistemi di alimentazione per i cluster di LED, che realizzano la sorgente luminosa all'interno degli apparati semaforici. La nostra idea consiste nell'utilizzo per un unico "colore" (o più propriamente "aspetto" nei semafori) di un "doppio" cluster a LED alimentato con due indipendenti driver di alimentazione. Questi ultimi sono dei generatori di corrente variabili dipendenti dalla temperatura sentita dai LED. Note, dunque, le dipendenze elettro-ottiche dalla temperatura dei diodi luminosi è possibile far in modo che i driver agiscano sul punto di lavoro dei cluster controbilanciando sia lo shift cromatico sia la variazione di efficienza. Si ottiene così un sistema con caratteristiche fotometriche globali stabili.

È importante evidenziare a tal proposito che si sono sviluppate diverse tipologie di driver di alimentazione, dando notevole importanza alla facilità della soluzione tecnica proposta e all'efficienza energetica. Inoltre si è cercato di sfruttare le stesse dipendenze dalla temperatura delle caratteristiche elettriche dei LED, in modo tale da avere una facile corrispondenza tra il segnale di riferimento e il punto di lavoro ottico dell'apparato realizzato.

Nel secondo metodo d'intervento, invece, si è ipotizzato di limitare l'influenza della variabilità della temperatura ambiente sulla temperatura sentita dai LED,

formanti l'apparato ottico del sistema di segnalamento. La criticità di tali sistemi è dovuta alla notevole escursione termica, indicata dalle norme e rappresentante la variabilità climatica di una regione, nella quale si deve assicurare stabilità di comportamento. La soluzione proposta ipotizza l'utilizzo di accorgimenti tecnici, coadiuvati dall'impiego di materiali innovativi, che permettano di isolare termicamente la componente ottica dei segnali. Si è ipotizzato, dunque, un intervento sulle caratteristiche meccaniche e fisiche dei case degli apparati di segnalamento, che definiscono l'iterazione tra temperatura ambiente e temperatura sentita dai LED. In questo modo, oltre ad ottenere un sistema che consente la stabilità ottica, si è definito anche un metodo attraverso il quale agire su sistemi preesistenti migliorandone le caratteristiche.

Nel nostro studio ci si è inoltre interessati a un importante parametro qualitativo degli impianti di segnalamento: il tempo di vita. Attraverso la realizzazione di un innovativo test sperimentale sugli apparati a nostra disposizione si è cercato di fornire una risposta a una delle domande più speculate in questo settore, dove logiche commerciali avvolte hanno la meglio sui processi divulgativi.

La definizione del tempo di vita di sistemi complessi si ottiene attraverso un'analisi delle logiche di guasto che possono subire le singole parti che realizzano un apparato. La base di partenza di questa analisi è la conoscenza del tempo di vita dei singoli componenti.

Tuttavia, negli apparati semaforici a LED il tempo di vita delle sorgenti luminose utilizzate non è noto a priori. Di fatto, solo negli ultimi anni e con le nuove applicazioni l'interesse verso questo parametro ha determinato studi e norme che permettono di definire la vita utile delle sorgenti a LED.

A differenza delle lampade tradizionali, i LED non tendono a spegnersi improvvisamente esaurita la loro vita utile: i diodi LED nel tempo diminuiscono gradualmente il loro flusso luminoso iniziale, fino a esaurirsi completamente in un

periodo molto lungo (a meno di rotture improvvise). Per i segnali luminosi, se da una parte, tale proprietà consente di avere un apparato più sicuro in quanto non avremo mai l'istantanea perdita dell'informazione segnaletica, dall'altra, rende difficile la valutazione del momento in cui il sistema risulta fuori norma e quindi guasto.

A tale ambiguità, inoltre, si legano anche le condizioni operative non certo stabili dei sistemi di segnalamento, i quali sono sottoposti all'azione e alla variabilità del clima, tale da non permettere il facile legame tra i tempi di vita definiti nei datasheet dei LED e il tempo di vita del sistema ottico di un segnale.

Infatti, la diminuzione nel tempo dell'efficienza di trasduzione elettro/ottica è dovuta a un degrado delle strutture microelettroniche che definiscono i LED stessi. Queste, infatti, definiscono all'interno del dispositivo delle regioni disomogenee. Tuttavia, i processi diffusivi impongono che con il trascorrere del tempo il sistema tenda a omogenizzarsi (nel caso dei dispositivi a semiconduttore nascono campi elettrici che rallentano "enormemente" questo fenomeno di "omogeneizzazione"). In altre parole nel tempo si ha un fenomeno di equalizzazione che tende a far degradare quelle strutture utili al funzionamento del dispositivo stesso. Il progredire di tale processo, anche se molto lento, degrada le prestazioni dei LED.

Tale degrado è anch'esso fortemente influenzato dalla temperatura cui operano i dispositivi, di fatto quest'ultima è un catalizzatore dei fenomeni diffusivi. Nel caso di nostro interesse, dunque, la variabilità delle condizioni operative a cui gli impianti semaforici sono sottoposti durante la propria vita, rende estremamente difficoltosa la stima del loro tempo di vita.

In particolare, non ci sono studi in letteratura di tipo dinamico rispetto alla temperatura del tempo di vita sia dei LED sia degli apparati che ne fanno uso. Il nostro lavoro è da questo punto di vista un pioniere in questo campo.

Nello studio effettuato, abbiamo fatto rifermento alle norme IES LM-80-08 e IES TM-21-11 che forniscono un'ottima procedura per la stima sperimentale della vita del LED come componente, e sono attualmente il riferimento principale per la maggior parte dei produttori e degli enti di ricerca. Queste norme, orientate ai costruttori dei LED, prevedono test con durata compresa tra 6'000÷10'000 ore su un campione statisticamente significativo.

Purtroppo tali normative sono di difficile applicazione per gli apparati che utilizzano i LED come sorgente di luce. In particolare queste normative non sono applicabili, in toto, alla segnaletica che abbiamo studiato. Le normative prevedono, infatti, la stima a specifiche temperature d'esercizio, non permettendo una semplice corrispondenza dei dati così ottenuti al tempo di vita dei segnali durante la loro operatività in campo.

Tuttavia, anche se non completamente applicabili queste normative sono risultate molto utili per scegliere gli intervalli di tempo necessari per le prove (maggiori di 6000 ore), le procedure di misura e le tecniche di interpolazione/estrapolazione dei dati.

Nel nostro lavoro si è cercato, dunque, di fornire una caratterizzazione del tempo di vita degli apparati che utilizzano i LED come unica sorgente luminosa, e che al contempo sono sottoposti a stress climatici ad ampio range di temperatura.

Allo scopo, si è realizzato in collaborazione con RFI (Rete Ferroviaria Italiana) un sistema di misura e test dei nuovi segnali "alti" che ci ha consentito di definire e individuare il tempo di vita medio delle tecnologie attualmente reperibili per il mercato di consumo.

Poiché lo scopo del nostro studio è stato la valutazione del tempo di vita delle sorgenti luminose dei segnali sotto test, il setup sperimentale realizzato ha avuto l'unico scopo di legare il decadimento del flusso luminoso agli stress di

temperatura ambientali che i segnali subiscono durante la propria operatività in campo.

Gli apparati semaforici a nostra disposizione, quindi, sono stati istallati sul tetto dell'edificio del Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università degli Studi "Roma Tre" (Roma, via della Vasca Navale n. 84), sottoponendoli agli stress termici che derivano dalla variabilità del clima. Prima di essere collocati in esercizio, i segnali sono stati strumentati così da poter monitorare le temperature d'esercizio. In particolare, all'interno dei segnali sono stati inseriti dei sensori di temperatura così da controllare la temperatura dei LED.

Per il pilotaggio dei segnali è stato realizzato un sistema di controllo che provvede alle corrette alimentazioni; alla gestione delle sequenze degli aspetti, al monitoraggio delle temperature di esercizio; al monitoraggio della corretta accensione dei segnali; al monitoraggio della tensione di alimentazione.

La misura del decadimento quindi è stata realizzata attraverso misurazioni dell'intensità luminosa emessa da ciascun aspetto per ogni segnale, eseguite a intervalli irregolari per tutta la durata del test.

Attraverso, dunque, una campagna di misure che è durata oltre un anno, i dati raccolti ci hanno permesso di stimare in oltre 60'000 ore di funzionamento continuativo la vita utile dei segnali, in accordo con le normative internazionali vigenti.

Le misure sperimentali, quindi, ci hanno permesso di apprezzare la bontà delle caratteristiche di questi dispositivi, verificando come il tempo di vita sia una delle caratteristiche migliori di questa nuova tecnologia illuminotecnica, ma evidenziando ulteriormente come le instabilità delle proprietà ottiche dei LED possano determinare comportamenti globali degli apparati non accettabili.

In conclusione, la presente ricerca ha permesso di individuare e "sperimentare" i grandi punti di forza della tecnologia LED e come un'attenta realizzazione tecnica può permettere di realizzare apparati illuminotecnici performanti e con prestazioni nettamente migliorative rispetto alle classiche metodologie di realizzazione.

### Bibliografia dell'Autore

La seguente bibliografia elenca tutti i lavori svolti dall'autore durante la ricerca relativa al lavoro di dottorato, suddivise in due sezioni: i lavori strettamente inerenti alla ricerca di dottorato e i lavori collegati alla propria formazione dottorale.

#### Pubblicazioni relative alla ricerca

Schirripa Spagnolo G., **Papalillo D.**, Martocchia A.; "LED Applications in Railway Signals: Wavelength and Intensity vs Temperature Variation", Journal of Transportation Technologies, Vol.2 No.1, January 2012, PP.78-83. doi: 10.4236/jtts.2012.21010

**Papalillo D.**, Del Vecchio P., Schirripa Spagnolo G.; "LED applications in road and railway signals: is it possible to fit specifications?", Proc. SPIE 8306, 83061N (2011); doi:10.1117/12.912384

Schirripa Spagnolo G., **Papalillo D.**, Martocchia A.; "Light emitting diode in stationary transportation applications: wavelength response to varying temperature", Proc. SPIE 8278, 82781P (2012). doi: 10.1117/12.909490

Schirripa Spagnolo G., **Papalillo D.**, Martocchia A., Makary G.; "Application of LEDs to Traffic Signal," Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference. doi: 10.1109/EEEIC.2012.6221497

Schirripa Spagnolo G., **Papalillo D.**; "Problemi nell'Utilizzo di LED come Sorgenti di luce in Segnali Stradali Ferroviari Aeronautici Navali," "Fotonica 2010", Pisa 25-27 Maggio, 12° Congresso Nazionale delle tecnologie Fotoniche.

Schirripa Spagnolo G., **Papalillo D.**, Martocchia A.; "Sorgenti luminose a LED per semafori: Rispetto delle norme," "Fotonica 2012", Firenze 15-17 Maggio, 124° Congresso Nazionale delle tecnologie Fotoniche.

#### Altre Pubblicazioni

Schirripa Spagnolo G., **Papalillo D.**, Martocchia A., Makary G.; "Solar-Electric Boat", Journal of Transportation Technologies, Vol.2 No.2, April 2012, PP. 144-149. doi: 10.4236/jtts.2012.22015

Schirripa Spagnolo G., Martocchia A., **Papalillo D.**, Cozzella L.; "Simple educational tool for digital speckle shearography", European Journal of Physics, 2012 33 733. doi: 10.1088/0143-0807/33/4/733

Schirripa Spagnolo G., **Papalillo D.**, Martocchia A.; , "An educational tool for DC-DC converter," Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on , vol., no., pp.1-4, 8-11 May 2011. doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874790

Schirripa Spagnolo G., **Papalillo D.**, Martocchia A.; "Eco friendly electric propulsion boat," Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011 10th International Conference on , vol., no., pp.1-4, 8-11 May 2011. doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874699

Cozzella L., Simonetti C., **Papalillo D.**, Schirripa Spagnolo G.; "Designing of binary diffractive optical elements for beams performing", Proc. SPIE 8306, 83060X (2011); doi:10.1117/12.912311

Schirripa Spagnolo G., Del Vecchio P., Makary G., **Papalillo D.**, Martocchia A., "A Review of IR Thermography applied to PV systems," Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference. <u>doi:</u> 10.1109/EEEIC.2012.6221500

Schirripa Spagnolo G., Del Vecchio P., **Papalillo D.**; Progetto mobilità sostenibile: "Vaporetto Elettrico", Festival dell'Energia 2010: spazio all'innovazione (Lecce 20-23 Maggio, 3° edizione).

### **Indice**

RIN	GRAZIAMENTI	<u>I</u>
<u>ABS</u>	TRACT	IV
BIBI	LIOGRAFIA DELL'AUTORE	XII
PUBB	BLICAZIONI RELATIVE ALLA RICERCA	XII
ALTF	RE PUBBLICAZIONI	XIII
<u>IND</u>	ICE	XV
LIST	TA DELLE FIGURE	XXI
LIST	TA DELLE TABELLE	XXXIV
<u>CAP</u>	PITOLO 1 MOTIVAZIONI	1
1.1	Introduzione	2
1.2	PROBLEMI NELL'UTILIZZO DEI LED NEL SEGNALAMENTO	4
1.2.1	STABILITÀ DEL COLORE VS. TEMPERATURA	6
1.2.2	Intensità di Emissione vs. Temperatura.	8
1.2.3	PERDITA D'INTENSITÀ IN FUNZIONE DEL TEMPO.	10
1.3	ORIGINI DEL NOSTRO LAVORO	14
<u>CA</u> P	PITOLO 2 LED	15

	XV
2.1 UN SECOLO DI LIGHT-EMITTING DIODES	17
2.1.1 PRIMO NOVECENTO	18
2.1.2 NASCITA DEL PRIMO LED: GAAS E ALGAAS	19
2.1.3 LED VISIBILE A TEMPERATURA AMBIENTE: GAASP	21
2.1.4 LED-IMPURITÀ COME CENTRI ATTIVI: GAP E GAASP	21
2.1.5 NASCITA DI BLU-LED : GAN	22
2.1.6 BLU-LED: GAINN	23
2.1.7 POWER LED: ALINGAP	23
2.1.8 Stato dell'Arte	24
2.2 FISICA DEI LED	26
2.2.1 Introduzione alla fisica dei semiconduttori	26
2.2.2 GENERAZIONE E RICOMBINAZIONE	29
2.2.2.1 Ricombinazione	34
2.2.2.1.1 Tempo di vita delle cariche minoritarie	35
2.2.2.1.2 Regola d'Oro di Fermi	38
2.2.2.2 Ricombinazione Radiativa	39
2.2.2.3 Ricombinazione non-radiativa	46
2.2.2.3.1 Ricombinazione Shockley-Read-Hall	46
2.2.2.3.2 Ricombinazione Auger	50
2.2.2.3.3 Ricombinazione alle superfici	51
2.2.3 SPETTRO DI EMISSIONE	52
2.2.3.1 Principio di conservazione del momento	52
2.2.3.2 Principio di conservazione dell'energia	54
2.3 STRUTTURA DEI LED	58
2.3.1 GIUNZIONE <i>P-N</i>	58
2.3.1.1 Polarizzazione di una giunzione P-N	61
2.3.1.2 Deviazione dalla caratteristica ideale	65
2.3.2 GIUNZIONE <i>P-N</i> NEI LED	66
2.3.2.1 Resistenze parassite nelle etero-giunzioni	69
2.3.2.2 Dipendenza dalla temperatura delle etero-giunzioni	70
2.4 CARATTERIZZAZIONE DEI LED	72
2.4.1 Temperatura di Giunzione	74
2.4.1.1 Intensità di emissione	76
2.4.1.2 Spettro di emissione	77

2.4.1.	3 Tensione di funzionamento	79
2.5	ARCHITETTURA DEL LED	82
2.5.1	ARCHITETTURA DELLE ETERO-GIUNZIONI	82
2.5.2	Drogaggio	84
2.5.3	SPOSTAMENTO DELLA REGIONE ATTIVA	85
2.5.4	STRATI DI "DILATAZIONE" DELLA CORRENTE	86
2.5.5	ARCHITETTURE PER FAVORIRE L'USCITA DELLA LUCE	90
2.6	PACKAGING	91
2.7	LED VISIBILI	93
2.7.1	LEGHE $GAAS_{1-x}P_x$ E $GAAS_{1-x}P_x$ : N	95
2.7.2	LEGHE AL <sub>x</sub> GA <sub>1-x</sub> As/GAAs	96
2.7.3	Leghe $\left(Al_{x}Ga_{1-x}\right)_{1-y}In_{y}P$	97
2.7.4	Leghe $In_xGa_{1-x}N$	99
2.7.5	Proprietà ottiche dei LED visibili nel segnalamento	101
2.8	PERDITA DI LUMINOSITÀ NEL TEMPO	103
2.8.1	MECCANISMI FISICI DI DEGRADO	104
2.8.2	La normativa IES LM-80-08	107
2.8.3	La normativa TM 21-11	109
CAF	PITOLO 3 NORME	113
3.1	INTENSITÀ LUMINOSA	114
3.1.1	FOTOMETRIA	116
3.1.2	SCELTA DEI VALORI DI LUMINOSITÀ PER I VARI ASPETTI DEI SEGNALI	119
3.1.3	Valori d'intensità dei singoli aspetti	120
3.2	COLORE NELLA SEGNALETICA LUMINOSA	123
3.2.1	LEGGE DEL BARICENTRO	128
3.2.2	DETERMINAZIONE DEL COLORE DI UN SEGNALE LUMINOSO	129
3.2.3	AREE DI CROMATICITÀ DI UN SEGNALE LUMINOSO	130
3.3	EFFETTO FANTASMA	132
3.3.1	DETERMINAZIONE DELL'EFFETTO FANTASMA	134
3.4	SPECIFICHE NORMATIVE	135

		xviii
3.4.1	ENI12368	136
3.4.2	UNI9296	140
3.4.3	ITE-LED	144
<u>CAP</u>	PITOLO 4 LED NEI SEGNALI FERROVIARI	148
4.1	STRUTTURA DI UN APPARATO CLASSICO	149
4.2	CRITICITÀ NEGLI APPARATI DI SEGNALAMENTO A LED	151
4.2.1	REALIZZAZIONE DI UN BOX-TERMICO	152
4.2.2	Procedure di misura	154
4.2.3	COLORE DI EMISSIONE VS TEMPERATURA	155
4.2.4	STABILITÀ DELL'INTENSITÀ DI EMISSIONE VS TEMPERATURA	159
4.3	VITA UTILE DELLA SEGNALETICA A LED	162
4.3.1	CALCOLO DELLA VITA MEDIA DI UN SISTEMA DI SEGNALAMENTO	165
CAP	PITOLO 5 STATO DELL'ARTE	168
5.1	COLOR MIXING	169
5.1.1	STABILIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ OTTICHE: LED RGB	172
5.2	PATENT SULLA SEGNALETICA A LED	174
5.2.1	FOTOSENSORE DI FEEDBACK	175
5.2.2	SENSORE DI TEMPERATURA	177
5.2.3	LED COME SENSORE DI TEMPERATURA	179
CAP	PITOLO 6 SOLUZIONI PROPOSTE	183
6.1	CONTROLLO ATTIVO ELETTRONICO	185
6.1.1	COMPENSAZIONE CROMATICA	186
6.1.1.	I Calcolo della corrente di polarizzazione	192
6.1.1.	2 Prove sperimentali	195
6.1.2	COMPENSAZIONE DELL'EFFICIENZA	197
6.1.2.	1 LED retroazionato	198

	xix
6.1.2.1.1 LED retroazionato: Resistenza variabile.	201
6.1.2.1.2 LED retroazionato: Buck Converter.	206
6.1.2.2 LED/NTC	209
6.1.2.3 LED di riferimento	213
6.1.2.4 Prove sperimentali	216
6.2 CONTROLLO SULLA TEMPERATURA	219
6.2.1 SISTEMA "SEGNALE-CUFFIA"	220
6.2.1.1 Segnale alto luminoso	221
6.2.1.2 Cuffia per gruppo semaforico	223
6.2.2 CATENA METROLOGICA	224
	225
1	
	227
6.2.2.3 Software di Acquisizione	228
6.2.3 CARATTERIZZAZIONE TERMICA DEL SEGNALE	230
6.2.3.1 Transitori termici per corpi a temperatura quasi uniforme	232
6.2.3.2 Modello Termico e analogia elettrica RC	235
6.2.3.2.1 Modello "Ambiente"	238
6.2.3.2.2 I Prova sperimentale: verifica delle ipotesi	243
6.2.3.2.3 II Prova sperimentale: Funzionamento Normale 6.2.3.2.4 III Prova sperimentale: Funzionamento senza Zavorra	245 246
6.2.3.2.4 III Prova sperimentale: Funzionamento senza Zavorra 6.2.3.3 Modello matematico	240
6.2.4 SISTEMI DI CONDIZIONAMENTO	253
6.2.4.1 Cella peltier 6.2.4.1.1 IV Prova sperimentale: Funzionamento con Peltier	254 256
	258 258
	236 261
<ul> <li>6.2.4.2.1 PCM – Phase Change Material</li> <li>6.2.4.2.2 V Prova sperimentale: Funzionamento con aumento inerzia termica</li> </ul>	262
6.2.4.2.3 VI Prova sperimentale: Funzionamento con PCM	265
6.2.4.2.4 Previsione di funzionamento in campo aperto con PCM	267
	,
CAPITOLO 7 LIFE TIME	271
7.1 APPARATO SPERIMENTALE	273
7.1 ATTAKATO STERIMENTALE 7.1.1 STRIMENTAZIONE DEI SEGNALI	276

BIBLIOGRAFIA	345
CAPITOLO 8 CONCLUSIONI	342
7.3 CONSIDERAZIONI	340
·	
7.2.2.3 Segnali Costruttore 3	327
7.2.2.2 Segnali Costruttore 2	314
7.2.2.1 Segnali Costruttore 1	303
7.2.2 MISURE DI INTENSITÀ IN FUNZIONE DEL TEMPO	302
7.2.1.1 Tempo di vita nella segnaletica	300
7.2.1 METODO DI PREVISIONE	298
7.2 PROVA SPERIMENTALE	291
7.1.3 MISURE DI INTENSITÀ	289
7.1.2.2 Software di controllo	285
7.1.2.1.3 Schede di acquisizione	285
7.1.2.1.2 Elettronica di condizionamento	280
7.1.2.1.1 Elettronica di alimentazione	279
7.1.2.1 Elettronica di interfaccia	278
7.1.2 SISTEMA DI CONTROLLO	277

## Lista delle Figure

Figura 1-1 Tipologie di LED reperibili in commercio.
Figura 1-2 Variazione della lunghezza d'onda dominante in funzione delle variazioni
della temperatura ambiente ed in funzione della corrente di pilotaggio8
Figura 1-3 Intensità vs. Temperatura di due tipici LED
Figura 1-4 Intensità relativa di emissione in funzione delle ore di funzionamento. In tale
grafico si assume come tempo di vita il numero di ore necessario affinché l'intensità
si riduca al 70%. In figura sono mostrate le curve ricavate facendo variare la
temperatura di giunzione di +10 °C e di +20 °C11
Figura 1-5 Modello termico del singolo LED – T <sub>J</sub> temperatura di Giunzione – T <sub>A</sub>
temperatura ambiente12
Figura 1-6 Tempo di vita di un LED SMD ad alta intensità di emissione prodotto dalla
OSRAM13
Figura 2-1 (a) struttura del primo LED visibile: la regione attiva viene realizzata
attraverso l'accostamento di semiconduttori a diversa costante reticolare, all'epoca si
pensava che questo tipo di struttura non consentisse di realizzare dispositivi stabili
per le ovvie imperfezioni che ne derivano. (b) immagine LED in funzionamento: si
nota la netta distinzione tra regione attiva (parte luminosa) e il substrato GaP scelto
per la sua proprietà di trasparenza alla frequenza luminosa emessa
Figura 2-2 Evoluzione dell'efficienza luminosa.
Figura 2-3 Attuali campi di applicazione dei dispositivi LED: decorativi, nel
segnalamento, illuminazione generica, televisori
Figura 2-4 a) Le interazioni elettriche fra gli elettroni di un atomo e quelli degli atomi
vicini moltiplicano i livelli energetici possibili. La tipologia e la forma dei livelli
energetici dipendono dalla distanza interatomica d tra gli atomi. b) Modello a bande: i livelli energetici vengono classificati secondo la possibilità delle cariche di
muoversi o no all'interno del solido, definendo la banda di conduzione e la banda di
valenza rispettivamente
Figura 2-5 Processi fisici di ricombinazione: a) ricombinazione Shockley-Read-Hall; b)
ricombinazione Auger; c) ricombinazione radiativa
Figura 2-6 (a) Luminescenza per basso ed alto livello di eccitazione. (b) Andamento del
tempo di vita per basso ed alto livello di eccitazione. (b) Andamento del tempo di vita per basso ed alto livello di eccitazione
Figura 2-7 Rappresentazione schematica dell'andamento dei livelli energetici di una
struttura a "buca di potenziale"; in rosso gli elettroni, in celeste le lacune

Figura 2-8 Confronto tra le dipendenze paziali del campo elettrico e l'elettrone nel caso di
iterazione luce-elettrone41
Figura 2-9 La presenza di un imperfezione reticolare determina la creazione di un nuovo
livello energetico. L'accostamento di semiconduttori a diversa costante reticolare è la
prima causa di realizzazione di dislocazioni47
Figura 2-10 Rappresentazione schematica delle bande energetiche di valenza e
conduzione di due semiconduttori a gap diretto e a gap indiretto rispettivamente 53
Figura 2-11 Nelle strutture interne dei LED non si ha la possibilità di selezionare un unico
salto energetico, i livelli interessati dal fenomeno di emissione saranno selezionati in
base all'energia posseduta dalle cariche. Sarà dunque possibile il verificarsi di
ricombinazioni radiative per più livelli energetici, con la definizione di uno spettro
emissivo non propriamente monocromatico
Figura 2-12 Spettro emissivo teorico di un LED. L'ampiezza a metà altezza è pari a 1.8
kT, direttamente proporzionale alla temperatura57
Figura 2-13 Schematizzazione di una giunzione P-N brusca. La figura mostra gli
andamenti della densità di carica spaziale, del campo elettrico e della tensione lungo
l'interfaccia60
Figura 2-14 Moto delle cariche in una giunzione P-N in caso di polarizzazione diretta62
Figura 2-15 Caratteristica corrente-tensione al variare del semiconduttore utilizzato. a)
Ge: $E_g=0.7$ eV; b) Si: $E_g=1.1$ eV; c) GaAs: $E_g=1.4$ eV; d) GaAsP: $E_g=2.0$ eV; e)
GaInN: E <sub>g</sub> =2.9 eV; In particolare quest'ultima caratteristica si discosta dalle altre per
motivi tecnologici. La banda proibita così pronunciata definisce una tensione di
soglia additiva e inoltre i substrati a nitruro risultano avere conducibilità basse64
Figura 2-16 Non idealità nella caratteristica I-V di un LED. La presenza di resistenze
parassite modifica le caratteristiche elettriche: a) effetto della presenza di resistenze
serie/parallelo; b) modifica della tensione di soglia per la presenza di difetti
reticolari
Figura 2-17 In caso di polarizzazione le strutture ad etero-giunzione permettono la
concentrazione dei portatori di carica in regioni spazialmente localizzate.a) e b)
Andamento delle bande energetiche in una struttura a omo-giunzione nel caso di non
polarizzazione e in polarizzazione rispettivamente; c) Andamento delle bande
energetiche in una struttura a etero-giunzione nel caso di polarizzazione
Figura 2-18 Confronto tra gli andamenti delle bande energetiche nel caso di etero-
giunzione "brusca" (a) e etero-giunzione realizzata con le tecniche di grading70
Figura 2-19 Le etero-giunzioni definiscono dei livelli trappola per cariche che possegono
un livello di energia inferiore alla differenza tra i gap energetici dei due
semiconduttori utilizzati. I portatori di carica ad alta energia possono facilmente
sfuggire alla buca di potenziale71

Figura 2-20 Rappresentazione scematica della tecnica electron blockers. a) caso non
dopato, b) caso dopato72
Figura 2-21 Andamento dei gap proibiti al variare della temperatura per i semiconduttori:
arsenurio di gallio (AsGa); silicio (Si); germanio (Ge)
Figura 2-22 Shift dello spettro di radiazione emesso da un LED realizzato un AlInGaP al
variare della temperatura di giunzione
Figura 2-23 Dipendenze dalla temperatura delle proprietà elettro-ottiche di un classico
LED reperibile in commercio.
Figura 2-24 Schematizzazione planare di una architettura a doppia etero-giunzione83
Figura 2-25 Effetto Stark in una struttura ad eterogiunzione. La buca di potenziale
deformandosi per l'applicazione di un campo elettrico perde la propria efficienza di
confinameto e selezione dello spettro emissivo
Figura 2-26 Current-spreading e window layer. (a) Struttura LED senza strati di
dilatazione della corrente, mentre (b) con la presenza di tale accorgimento: si nota
come la regione interessata dal passaggio di corrente sia notevolmente aumenta. (c) e
(d) esempi di realizzazione
Figura 2-27 Effetto dell'utilizzo di strati adibiti alla dilatazione della corrente. (a) Visone
dall'alto di un LED che non utilizza tali strati. (b) visione dall'alto di un LED con
utilizzo di tale accorgimento
Figura 2-28 Schematizzazione di LED che fa uso della tecnica del current-blocking layer.
88
Figura 2-29 (a) Current-crowing effect all'interno di LED a sviluppo laterale. (b)
Equivalente elettrico delle diverse regioni che definiscono un LED89
Figura 2-30 (a) Schematizzazione delle strutture interne di un LED a sviluppo laterale in
cui si cerca di limitare il fenomeno di current-crowung. (b) e (c) visione dall'alto
schematica e reale rispettivamente di un LED.
Figura 2-31 Schematizzazione di classiche geometrie realizzativie utilizzate nei LED. (a)
LED parallelepipedo, in cui si individuano 6 coni di uscita della luce. (b) LED
cilindrico con un unico cono di uscita
Figura 2-32 LED Osram "Aton". (a) Foto; (b) Illustazione schematica dell'estrazione
della luce
Figura 2-33 Packaging dei classici LED, solitamente utilizzati per svolgere la funzione di
segnalazione all'interno dei circuiti stessi. Si riconoscono le classiche capsule tonde
di materiale plastico di diametro 3 o 5 millimetri
Figura 2-34 Packaging per i LED di ultima generazione, Power-LED. La gestione termica
delle potenze a cui sono sottoposti ha reso necessario una nuova concezione
dell'involucro contenitivo dei LED.
Figura 2-35 Salto energetico del gap proibito in funzione delle costanti reticolari delle
leghe formanti le regioni attive dei LED. Le linee continue indicano le leghe a gap

diretto, mentre le linee tratteggiate gap indiretti e le linee puntiformi sono stime
dovute alla relativa incertezza derivante dal dopaggio con indio (In) e azoto (N)94
Figura 2-36 Conformazione delle bande energetiche delle regioni attive definite per le
leghe GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> e GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> :N al variare delle concentrazioni dei droganti95
Figura 2-37 Salto energetico del gap proibito e lunghezza d'onda dominante al variare
della composizione della lega che realizza la regione attiva. $E_{\Gamma}$ identifica il gap
diretto, mentre E <sub>X</sub> e E <sub>L</sub> il gap indiretto secondo le 3 differenti direzioni
cristallografiche96
Figura 2-38 Salto energetico del gap proibito e lunghezza d'onda dominante al variare
della composizione della lega che realizza la regione attiva. $E_{\Gamma}$ identifica il gap
diretto, mentre E <sub>X</sub> il gap indiretto98
Figura 2-39 Confronto delle efficienze ottiche al variare della temperatura tra LED
realizzati con la lega (Al <sub>2</sub> Ga <sub>1-x</sub> ) <sub>1-y</sub> In <sub>y</sub> P ma a differente lunghezza d'onda dominate. Il
LED che emette nel giallo ( $\lambda \approx 550$ nm) è maggiormente dipendente alla
temperatura
Figura 2-40 Difetti reticolari all'interno della regione attiva realizzata in In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N. Le
imperfezioni determinano un gap proibito spazialmente non costante
Figura 2-41 Stato dell'arte dell'efficienza dei power-LED visibili (Tj = 25°C)
Figura 2-42 (Sinistra) Intensità di emissione di LED blue/verdi/gialli InGaN and
gialli/rossi AlInGaP in funzione della temperatura ambiente da -40 °C a +80 °C.
L'intensità è normalizzata a 25°C. (Destra) Spettro di emissione di un LED giallo
InGaN e un LED giallo AlInGaP alimentati ad una corrente di 20 mA
Figura 2-43 Degrado del flusso luminoso di LED bianchi durante prove sperimentali di
stress a diverse correnti di polarizzazione e temperature. Ogni punto rappresenta la
media tra 8 diversi dispositivi, mentre le barre di errore rappresentano la deviazione
standard dei dati sperimentali
Figura 2-44 Degrado del flusso luminoso di LED bianchi registrato nell'attuazione di
prove sperimentali conformi alla norma IES LM-80-08 [46]
Figura 2-45 Estrapolazione della vita media di un LED con differenti modelli
Figura 2-46 Prescrizioni sulla vita media delle sorgenti luminose a stato secondo il
programma Energy Star112
Figura 3-1 Spetto elettromagnetico corrispondente alla regione del visibile117
Figura 3-2 Standard della sensibilità dell'occhio umano. Curva continua: visione fotopica
(visione diurna); Curva tratteggiata: visione scotopica (visione notturna). La
sensibilità tuttavia dipende dall'intensità della luce irradiante117
Figura 3-3 Tipiche luminanze di sfondo
Figura 3-4 Funzioni di corrispondenza colore CIE (CIE XYZ color-matching functions).
124

Figura 3-5 Rappresentazione schematica di come si ricavano i valori tristimolo CIE <i>X, Y,</i> Z
Figura 3-6 Rappresentazione grafica della colorimetria di una sorgente luminosa. (Sinstra) Spazio Tristimolo 1931; (Destra) Diagramma colorimetrico CIE 1931126 Figura 3-7 Rappresentazione grafica della legge del baricentro
una sorgente luminosa
Figura 3-9 Limiti delle aree di cromaticità per gli aspetti Rosso, Giallo e Verde definiti dalle specifiche tecniche: UNI9296, EN12368, ICAO-Aeronautical Ground Light Colors, MIL-C250550 e ITE-LED
Figura 3-10 Effetto Fantansma. La luce del Sole penetrando nelle unità ottiche del segnale può esser riemessa inducendo un errore unterpretativo all'utente finale 133
Figura 3-11 Classiche strutture a nido d'ape utilizzate per limitare l'effetto fantasma134 Figura 3-12 Disposizione strumentale per la determinazione dell'effetto fantasma135 Figura 3-13 Limiti colorimetrici per gli aspetti Rosso, Giallo e Verde definiti dalla norma
ENI12368
Figura 3-14 Segnali luminosi "alti" utilizzati in campo ferroviario
Figura 3-15 Limiti colorimetrici per gli aspetti Rosso, Giallo e Verde definiti dalla norma UNI9296
Figura 3-16 Limiti colorimetrici per gli aspetti Rosso, Giallo e Verde definiti dalla norma ITE-LED
Figura 4-1 Schematizzazione di un apparato di segnalamento a tecnologia LED 149
Figura 4-2 Schema circuitale della matrice di LED che realizza la sorgente luminosa in un apparato di segnalamento
Figura 4-3 Box per il riscaldamento/raffreddamento del segnale
Figura 4-4 Disposizione strumentale utilizzata per la determinazione delle caratteristiche fotometriche e colorimetriche dei segnali a nostra disposizione
Figura 4-5 Variazione delle coordinate cromatiche in funzione delle variazioni della
temperatura ambiente: Costruttore 1
temperatura ambiente: Costruttore 2
Figura 4-7 Intensità vs. Temperatura del segnale LED prodotto dal Costruttore 2 160 Figura 4-8 Intensità vs. Temperatura del segnale LED prodotto dal Costruttore 1 161
Figura 4-9 I tempi di vita disponibili nei datascheet dei LED sono definiti a costanti condizioni operative
Figura 4-10 Esempi di sistemi idraulici composti da serbatoi e valvole. (a) Sistema
ridondante: il sistema è composto sia da 3 serbatoi sia da 3 valvole posti in logica
parallela; la rottura di uno di loro non pregiudica il funzionamento del sistema. (b)
Sistema serie: il serbatoio e le valvole sono connessi in logica serie; la rottura di un

unico componente del sistema ne pregiudica il funzionamento. (c) Sistema misto: il sistema è composto da 1 serbatoio e da 3 valvole poste tra loro in logica parallela; la
rottura di un'unica valvola non pregiudica il funzionamento del sistema, tuttavia la
rottura del serbatoio determina lo stato di guasto
Figura 5-1 (a) Schematizzazione delle tecniche additive di color mixing basate sui tre
colori primari. (b) Esempio di tecniche di color mixing nella tecnologia LED 170
Figura 5-2 Illustrazione del principio delle tecniche di color mixing. La mescolanza
additiva di due sorgenti $(x_1, y_1)$ e $(x_2, y_2)$ permette di ottenere, secondo la legge del
baricentro, una qualsivoglia sorgente con caratteristiche colorimetriche poste sul
segmento che congiunge le sorgenti inziali. Inoltre si mostra come l'utilizzo di
sorgenti RGB, sfruttando sempre la legge del baricentro, permette di ricreare la quasi
totalita delle colorazioni possibili
Figura 5-3 Schematizzazione di un classico driver di alimentazione "attivo". Sfruttando i
segnali provenienti da fotosensori selettivi è possibile definire un sistema di
controreazione capace di controllare e stabilizzare l'emissione di un cluster RGB. 172
Figura 5-4 (Sinistra) Schemi a blocchi logici del driver di alimentazione ipotizzato nel
patet [73]. (Destra) Schema elettrico del driver di alimentazione del patent [75] 176
Figura 5-5 (Sinistra) Schema elettrico del driver ipotizzato nel lavoro [74]. (Destra)
Andamento della tensione di alimentazione del cluster al variare della temperatura.
Figura 5-6 Due delle possibili realizzazioni del driver ipotizzato nel patent [76] 178
Figura 5-7 (Sinistra) Schema elettrico del driver ipotizzato nel patent [77]. (Destra)
Schema elettrico del controllore switching ipotizzato nel patent [77]. (Desta)
Figura 6-1 Variabilità della lunghezza d'onda dominante del LED commerciale Lx E6SF,
estratto del datasheet [79]. A causa delle tolleranze dei processi di produzione,
utilizzati nella realizzazione dei LED, le proprietà elettro-ottiche del dispositivo
commercializzato possono differire da quelle dichiarate all'interno del datasheet di
riferimento
Figura 6-2 Doppia cluster a LED per la realizzazione di un sigolo aspetto della
segnaletica
Figura 6-3 Simulazione numerica, considerando uno shift colorimetrico pari a 0.2 nm/°C
per ogni LED. Temperatura ambiente (25 °C $\approx$ 298 K); LO E6SF – 605 nm (arancio)
con intensità pari al 20% dell'intensità totale, e LY E6SF – 594 nm (giallo) con 80%.
Il colore risultante è centrato nella norma di riferimento.
Figura 6-4 Simulazione numerica, considerando uno shift colorimetrico pari a 0.2 nm/°C
per ogni LED. Temperatura (-25 °C $\approx$ 246 K); LO E6SF – 605 nm (arancio) con
intensità pari al 50% dell'intensità totale, e LY E6SF – 594 nm (giallo) con 50%. Il
colore risultante rispetta la norma di riferimento

Figura 6-5 Simulazione numerica, considerando uno shift colorimetrico pari a 0.2 nm/°C
per ogni LED. Temperatura (+70 °C ≈ 346 K); LO E6SF – 605 nm (arancio) con
intensità pari al 0% dell'intensità totale, e LY E6SF – 594 nm (giallo) con 100%. Il
colore risultante rispetta la norma di riferimento
Figura 6-6 Proprietà ottiche dei LED LY E6SF e LO E6SF. (a) Efficienza luminosa vs
temperatura. (b) Intensità luminosa vs corrente di polarizzazione
Figura 6-7 Correnti di polarizzazione che permettono di ottenere stabilità cromatica e di
intensità al variare della temperatura: equazioni (6.5). Sono specifiche per la nostra
ipotesi di sistema compensato
Figura 6-8 Sistema sperimentale utilizzato durante le prove in laboratorio
Figura 6-9 Caratterizzazione delle proprietà ottiche del LED LY E6SF al variare della
temperatura. (Sinistra) Spettro di emissione vs temperatura. (Destra) Efficienza di
emissione vs temperatura
Figura 6-10 Risultati sperimentali ottenuti in laboratorio. (Sinistra) Stabilizzazione
dell'intensità al variare della temperatura. (Destra) Rispetto delle norme
colorimetriche della sorgente realizzata a doppio cluster LED
Figura 6-11 Dipendenze della tensione diretta dei LED LY E6SF e LO E6SF alla corrente
di polarizzazione (sinistra) e alla temperatura (destra)
Figura 6-12 Approssimazione con un funzione esponenziale di secondo ordine della
caratteristica I-V dei LED di interesse
Figura 6-13 Approssimazione con un funzione esponenziale di primo ordine della
caratteristica I-V dei LED di interesse
Figura 6-14 Driver di compensazione per il cluster LY E6SF: LED Retroazionato202
Figura 6-15 Retta di lavoro dei LED definita dal driver di alimentazione denominato
"LED Retroazionato"
Figura 6-16 Calibrazione e simulazione del circuito "LED Retroazionato" per cluster
Giallo. La curva Blu rappresenta la curva teorica di riferimento, equazione 6.5. La
curva Rossa rappresenta la simulazione effettuata con il software Orcad Pspice. La
curva Verde il "fitting", ottenuto via software Matlab, che ci ha permesso di calibrare
il circuito: Rs = 1 $\Omega$ ; Vref=2.06 V
Figura 6-17 Driver di compensazione per il cluster LO E6SF: LED Retroazionato205
Figura 6-18 Calibrazione e simulazione del circuito "LED Retroazionato" per cluster
Arancio. La curva Blu rappresenta la curva teorica di riferimento, equazione 6.5. La
curva Rossa rappresenta la simulazione effettuata con il software Orcad Pspice. La
curva Verde il "fitting", ottenuto via software Matlab, che ci ha permesso di calibrare
il circuito: Rs = 90 $\Omega$ ; Vref=1.5 V
Figura 6-19 Driver di compensazione per il cluster LY E6SF: LED Retroazionato – Buck
Converter

Figura 6-30 Comportamento dinamico del driver "LED retroazionato". In rosso la
variazione teorica nel tempo della corrente che scorre nel cluster. In blu l'andamento
reale della corrente di polarizzazione217
Figura 6-31 Misure sperimentali ottenute con i driver per cluster Arancio e cluster Giallo
in configurazione "Led retroazionato"
Figura 6-32 Misure sperimentali ottenute con i driver per cluster Arancio e cluster Giallo
in configurazione "LED NTC"
Figura 6-33 Misure sperimentali ottenute con i driver per cluster Arancio e cluster Giallo
in configurazione "Led riferimento"219
Figura 6-34 Apparato di segnalamento ferroviario: Segnali "Alti" categoria 1. Il segnale
vero è proprio è posto all'interno della "Cuffia" di protezione
Figura 6-35 Schema a blocchi dell'apparato di segnalamento, in rosso il gruppo di
alimentazione, in blu il gruppo ottico.
Figura 6-36 Cuffia di alloggio della segnaletica "Alta" della Rete Italiana Ferroviaria. 223
Figura 6-37 Catena di misura utilizzata per la caratterizzazione del sistema segnale-cuffia.
225
Figura 6-38 Schema elettrico Sensori di temperatura-Scheda di acquisizione LabView.
226
Figura 6-39 Scheda di acquisizione LabView: NI myDAQ
Figura 6-40 Interfaccia grafica del programma di misura realizzato229
Figura 6-41 Modellizzazione Termica del sistema Segnale-Cuffia232
Figura 6-42 Modello Termico dell'apparato di segnalamento
Figura 6-43 Modello Termico della Cuffia
Figura 6-44 Analogia elettrica del modello termico segnale-cuffia
Figura 6-45 Analogia elettrica del modello termico segnale-cuffia con irraggiamento
solare
Figura 6-46 Alloggiamento degli 8 sensori di temperatura all'interno della cuffia244
Figura 6-47 I Prova sperimentale: Verifica delle ipotesi del modello termico. Andamento
delle temperature all'interno del sistema Segnale-Cuffia
Figura 6-48 II Prova sperimantale. Raccolta dati per la caratterizzazione del modello
termico
Figura 6-49 III Prova sperimentale: Raccolta dati per la caratterizzazione del modello
termico. Segnale privato del carico termico derivante dalla zavorra
Figura 6-50 Modello Termico del dissipatore utilizzato dal segnale ferroviario sotto test.
Figura 6-51 Caratterizzazione del modello termico. Nelle misure presentate nella seconda
e terza prova si ricosce una fase transitoria, a cui sono legate le capacità termiche del
sistema, e una fase a regime, a cui sono legate le adduttanze globali del sistema 250
Figura 6-52 Confronto dati sperimentali-soluzioni del modello (II prova)250
11gula 0-52 Comfonto dan sperimentan-soluzioni dei modeno (11 piova)

Figura 6-53 Confronto dati sperimentali-soluzioni del modello (III prova)252
Figura 6-54 Cella Peltier. In alto a sinistra come si presenta ai nostri occhi, in alto a destra
si mostra il suo funzionamento ed in basso la sua schematizazione elettrica254
Figura 6-55 Caratteristiche prestazionali della cella scelta. In rosso il punto di lavoro
scelto per il sistema da noi ipotizzato
Figura 6-56 Montaggio della cella peltier sul dissipatore del segnale ferroviario256
Figura 6-57 IV prova sperimentale: Cella peltier. Andamento delle temperature del
sistema Segnale-Cuffia
Figura 6-58 Confronto dati sperimentali-soluzioni del modello (IV prova)258
Figura 6-59 Sfasamento tra la temperatura ambientale esterna e la temperatura registrata
all'interno della cuffia (giallo) e all'interno del segnale (verde)260
Figura 6-60 Andamento delle temperature al passaggio di stato solido-liquindo261
Figura 6-61 V prova sperimentale: Aumento dell'inerzia termica con acqua. Andamento
delle temperature nel sistema Segnale-Cuffia262
Figura 6-62 Confronto dati sperimentali-soluzioni del modello (V prova)264
Figura 6-63 V prova: Sfasamento tra la temperatura ambientale esterna e la temperatura
registrata all'interno della cuffia (giallo) e all'interno del segnale (verde)264
Figura 6-64 VI prova sperimentale: Utilizzo di materiali PCM. Andamento delle
temperature nel sistema Segnale-Cuffia265
Figura 6-65 Confronto dati sperimentali-soluzioni del modello (VI prova)266
Figura 6-66 Confronto tra funzionamento senza PCM e con PCM267
Figura 6-67 Confronto tra previsione di funzionamento senza PCM e con PCM270
Figura 6-68 Confronto tra previsione di funzionamento senza PCM e con PCM più
l'utilizzo della peltier270
Figura 7-1 Segnali oggetto del nostro studio; i segnali si trovano montati sul tetto
dell'edificio del Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università degli Studi
"Roma Tre"
Figura 7-2 Posizionamento geografico dei segnali sul tetto dell'edificio275
Figura 7-3 Alloggiamento dei sensori di temperatura e dei fototransistor nei segnali
studiati276
Figura 7-4 Sistema di controllo per la gestione dei segnali
Figura 7-5 Schema logico della elettronica adibita alla realizzazione delle alimentazioni
utili al nostro setup sperimentale
Figura 7-6 Elettronica di interfaccia per la realizzazione delle sequenze di linea e
stazione281
Figura 7-7 Impedenza di misura per i sensori di temperatura utilizzati nel setup
sperimentale
Figura 7-8 Classica configurazione di convertitore tensione/corrente282

Figura 7-9 Elettronica di interfaccia digitale per i fototransistor di sensing utilizzati all'inteno dei segnali
Figura 7-10 Elettronica di interfaccia per fornire i corretti segnali di cambio aspetto a
segnali di tipologia Relè Schermo
Elettronica dell'Università degli Studi "Roma Tre". Si mostra l'alloggiamento dell'elettronica d'interfaccia per i segnali a Relè Schermo e una cassetta di degli pri pri proprie de l'alloggiamento dell'elettronica d'interfaccia per i segnali a Relè Schermo e una cassetta degli pri pri proprie de l'alloggiamento dell'elettronica dell'Università degli Studi "Roma Tre". Si mostra l'alloggiamento dell'elettronica d'interfaccia per i segnali a Relè Schermo e una cassetta degli Studi "Roma Tre".
derivazione per le connessioni elettriche necessarie ai segnali
Figura 7-13 File di memorizzazione dello stato dei segnali sotto test. (Sinistra)
Memorizzazione delle temperature registrate dai sensori. (Destra) File di LOG dello
stato degli aspetti di ogni segnale e della tensione di alimentazione
Figura 7-14 Pannello di controllo del software di gestione dei segnali
luminosa
Figura 7-16 Segnali montati sul tetto dell'edificio del Dipartimento di Ingegneria
Elettronica dell'Università degli Studi "Roma Tre" e sistema di mascheramento
dell'emissione. Nonostante tutti i segnali siano correttamente attivati, appare
luminoso soltanto il segnale cui è stato rimosso il sistema di "mascheratura"293
Figura 7-17 Tipiche misurazioni relative a giornata piovosa e senza sole296
Figura 7-18 Tipiche misurazioni relative a giornata calda e serena
Figura 7-19 Tempo di vita di alcuni LED SMD ad alta intensità di emissione prodotti dalla OSRAM
Figura 7-20 Intensità di emissione in funzione del tempo. Emissione iniziale pari a 900 cd
Figura 7-21 Intensità di emissione in funzione del tempo. Emissione iniziale pari a 600
cd301
Figura 7-22 Segnale Costruttore 1 (Stazione) - Intensità di emissione in funzione de tempo
Figura 7-23 Segnale Costruttore 1 (Linea) - Intensità di emissione in funzione del tempo
Figura 7-24 : Segnale Costruttore 1 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.
Figura 7-25 Segnale Costruttore 1 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25
°C, in funzione del tempo.
Figura 7-26 Segnale Costruttore 1 (Stazione) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo
termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo
Стро

Figura 7-27 Segnale Costruttore 1 (Stazione) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del
tempo
Figura 7-28 Segnale Costruttore 1 (Stazione) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo
Figura 7-29 Segnale Costruttore 1 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25 °C,
in funzione del tempo
Figura 7-30 Segnale Costruttore 1 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25 °C,
in funzione del tempo
Figura 7-31 Segnale Costruttore 1 (linea) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo termine
dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo312
Figura 7-32 Segnale Costruttore 1 (linea) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine
dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo313
Figura 7-33 Segnale Costruttore 1 (linea) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine
Tigura 7-55 Segnale Costrutiole 1 (finea) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine
dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo314
Figura 7-34 Segnale Costruttore 2 (Stazione) - Intensità di emissione in funzione del
tempo315
Figura 7-35 Segnale Costruttore 2 (linea) - Intensità di emissione in funzione del tempo.
317
Figura 7-36 Segnale Costruttore 2 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25
°C, in funzione del tempo
Figura 7-37 Segnale Costruttore 2 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25
°C, in funzione del tempo.
Figura 7-38 Segnale Costruttore 2 (Stazione) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo
termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del
tempo
*
Figura 7-39 Segnale Costruttore 2 (Stazione) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo
termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del
tempo321
Figura 7-40 Segnale Costruttore 2 (Stazione) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo
termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del
tempo322
Figura 7-41 Segnale Costruttore 2 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25 °C,
in funzione del tempo
Figura 7-42 Segnale Costruttore 2 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25 °C,
in funzione del tempo.
Figura 7-43 Segnale Costruttore 2 (Linea) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo termine
dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo325

Figura 7-44 Segnale Costruttore 2 (Linea) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo
Figura 7-45 Segnale Costruttore 2 (Linea) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo327
Figura 7-46 Segnale Costruttore 3 (Stazione) - Intensità di emissione in funzione del tempo
Figura 7-47 Segnale Costruttore 3 (linea) - Intensità di emissione in funzione del tempo.
Figura 7-48 Segnale Costruttore 3 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo
Figura 7-49 Segnale Costruttore 3 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo
Figura 7-50 Segnale Costruttore 3 (Stazione) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo
Figura 7-51 Segnale Costruttore 3 (Stazione) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo
Figura 7-52 Segnale Costruttore 3 (Stazione) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo
Figura 7-53 Segnale Costruttore 3 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.
Figura 7-54 Segnale Costruttore 3 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo
Figura 7-55 Segnale Costruttore 3 (Linea) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo337
Figura 7-56 Segnale Costruttore 3 (Linea) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo
Figura 7-57 Segnale Costruttore 3 (Linea) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo339

# Lista delle Tabelle

Tabella 2-1 TM 21-11: equazioni analitiche utilizzabili per estrapolare i valori d'intensità
con il tempo110
Tabella 3-1 Principali grandezze fotometriche
Tabella 3-2 Disposizione dell'intensità luminosa consentita per distinte classi di
performance, norma ENI12368
Tabella 3-3 Segnali ad apertura molto ampia (Tipo E) combinazioni possibili B 1/1, B
2/2. Norma ENI12368
Tabella 3-4 Rapporti massimi consentiti tra l'intensità emessa in funzionamento normale
e l'intensità dovuta all'effetto fantasma. Norma ENI12368
Tabella 3-5 Coordinate dei punti di intersezione delle linee limite delle aree di
cromaticità. Norma ENI12368
Tabella 3-6 Range termici di funzionamento definiti nella norma ENI12368
Tabella 3-7 Disposizione dell'intensità luminosa consentita per "segnali alti" di categoria
1, norma UNI9296
Tabella 3-8 Geometria del fascio luminoso emesso, norma UNI9296
Tabella 3-9 Coordinate dei punti di intersezione delle linee limite delle aree di cromaticità. Norma UNI9296.
Tabella 3-10 Range delle intensità luminose secondo il diametro della lampada, norma ITE-LED
Tabella 3-11 Coordinate dei punti di intersezione delle linee limite delle aree di
cromaticità. Norma ITE-LED
Tabella 6-1 Intensità I $\left[ \text{W/m}^2 \right]$ della radiazione solare al 21 luglio per latitudine 40
gradi Nord (Fonte: http://www.solaritaly.enea.it)
Tabella 6-2 Valori tipici del coefficiente di adduzione $\alpha$ ( $\omega_a$ velocità dell'aria in m/s)242
Tabella 6-3 Caratterizzazione del modello termico: Capacità e adduttanze del sistema
Segnale-Cuffia251
Tabella 6-4 Caratterizzazione termica del sistema Segnale-Cuffia nel caso di utilizzo della
potenza della zavorra per alimentare una cella peltier, allo scopo di diminuire la
temperatura sentita all'interno del segnale
Tabella 6-5 Caratterizzazione termica del sistema Segnale-Cuffia nel caso di aumento
della massa del sistema Segnale-Cuffia

Tabella 6-6 Caratterizzazione	termica del	sistema	Segnale-	Cuffia	nel	caso	di	utilizzo	di
materiali PCM								2	66

# Capitolo 1 Motivazioni

1.1	Introduzione	2
1.2	PROBLEMI NELL'UTILIZZO DEI LED NEL SEGNALAMENTO	4
1.2.1	STABILITÀ DEL COLORE VS. TEMPERATURA	6
1.2.2	INTENSITÀ DI EMISSIONE VS. TEMPERATURA.	8
1.2.3	PERDITA DI INTENSITÀ IN FUNZIONE DEL TEMPO.	10
1.3	ORIGINI DEL NOSTRO LAVORO	14

In questo capitolo, che rappresenta l'introduzione alla tesi, cercheremo di inquadrare l'ambito in cui si muove il lavoro di ricerca svolto.

Come si evince dal titolo della tesi, parleremo dei LED e della loro applicazione in un importante settore illuminotecnico: il segnalamento. Le motivazioni che ci hanno spinto ad intraprendere una ricerca in questo settore si compiono nel grande fermento che lega trasversalmente ambienti solitamente distanti tra loro: industria, mondo della ricerca e mondo legislativo.

Le grandi potenzialità che sembrano offrire i nuovi dispositivi LED in un settore immobile da più di un secolo non hanno lasciato indifferente sia gli utenti finali sia i produttori di un bene di consumo così importante.

Tuttavia, benché la tecnologia LED sia già matura, in ambienti tecnici come il segnalamento presenta ancora limiti e criticità.

Introduzione 2

## 1.1 Introduzione

I dispositivi LED (Light Emitting Diode) nascono intorno al 1960 ma solo di recente hanno raggiunto livelli significativi di resa luminosa consentendo l'ampliamento del loro mercato di applicazione. Grazie alla loro versatilità d'impiego attualmente sono utilizzati in moltissime applicazioni illuminotecniche, dove l'affidabilità, il colore, la visibilità e il tempo di vita sono caratteristiche importanti.

Ad esempio, l'evoluzione della tecnologia dei LED è ben visibile nel settore "automotive", dove il loro utilizzo ha permesso notevoli progressi tecnici (tra i quali: la migliore qualità dei prodotti, l'affidabilità e la riduzione dei prezzi) consentendo alla tecnologia di espandersi in molteplici applicazioni al di là delle semplici spie di segnalazione [1].

Recentemente l'industria dei trasporti ha generato una serie di sviluppi che coinvolgono le tecnologie della segnalazione che utilizzano i LED come fonte luminosa. La nuova tecnologia è molto allettante grazie all'apporto migliorativo di caratteristiche come l'efficienza, la manutenzione, e il tempo di vita dell'impianto che si viene a realizzare.

A differenza delle classiche tecniche illuminotecniche dove è necessario l'utilizzo di filtri e dove parte dell'energia è persa in calore, i LED permettono di realizzare sorgenti di luce "direttamente" colorate e in maniera efficiente (secondo le proprie caratteristiche interne questi dispositivi emettono piccole porzioni dello spettro visibile). Le lampade a LED consumano circa il 10% della potenza assorbita da un'equivalente lampada a incandescenza.

Inoltre, le lampade realizzate con questa nuova tecnologia rendono l'attività di segnalamento intrinsecamente più sicura. A differenza delle classiche tecnologie, la lampada a LED non "brucia" ma diminuisce nel tempo la propria intensità di emissione, eliminando dunque la possibilità d'istantanea perdita della funzione.

Il tempo di vita delle nuove sorgenti luminose, dai 5 ai 10 anni a fronte dei soli 2 anni delle omologhe tecnologie convenzionali, è uno dei punti cardine del loro rapido sviluppo [2].

I vantaggi dell'utilizzo dei LED nella segnaletica possono essere riassunti nei seguenti due punti:

- Efficienza di trasduzione elettrica/luminosa: il processo di produzione della luce nelle sorgenti a LED è più efficiente; ad esempio nelle lampade a filamento una buona porzione dell'energia è utilizzata per riscaldare il filamento e non direttamente utilizzata per la produzione di radiazione luminosa [3].
- Minor costi di manutenzione: le lampade a LED durano molto più a lungo delle lampade realizzate in tecnologia classica, con minor costi di manutenzione e maggior sicurezza d'impianto [4], [5].

Tuttavia, le proprietà ottiche dei LED dipendono fortemente dalla temperatura (calore), parametro critico per il tipo di applicazione: gli impianti di segnalamento, utilizzati quasi esclusivamente all'esterno, sono sottoposti alla variabilità del clima con possibili escursioni termiche giornaliere anche di 20-30 °C. Come vedremo, la dipendenza alla temperatura dell'impianto ottico si traduce in comportamenti potenzialmente non idonei che possono determinare il non

rispetto delle disposizioni normative cui questi dispositivi devono fare riferimento, [6]-[7].

La ricerca di soluzioni e la volontà di capire quali fenomeni fisici siano legati ai comportamenti macroscopici osservati sono le motivazioni della ricerca portata avanti con il lavoro illustrato nella presente tesi.

# 1.2 Problemi nell'utilizzo dei LED nel Segnalamento

Negli attuali sistemi semaforici e di segnalazione uno dei problemi principali risiede nell'obbligatoria, e costosa manutenzione necessaria per la sostituzione periodica delle sorgenti luminose. Ad esempio, i tradizionali segnali utilizzano per l'emissione della luce la tecnologia a filamento incandescente. Le sorgenti di luce a incandescenza hanno il grosso limite della breve durata (in genere compresa tra 2.000 e 8.000 ore di funzionamento). Questo comporta costi di manutenzione elevati e potenziali rischi: la rottura del filamento della lampada impedisce al segnale di fornire la corretta informazione. Per evitare situazioni di pericolo è indispensabile avere a disposizione squadre di tecnici che provvedano, in caso di rottura, alla "rapida" sostituzione delle lampade andate fuori servizio.

Progettare e realizzare sistemi semaforici che utilizzano come sorgente di luce i LED potrebbe portare a un notevole abbattimento dei costi di manutenzione. Infatti, una delle caratteristiche fondamentali delle sorgenti a LED è il "tempo di vita" (lifetime) enormemente più elevato rispetto a quello delle lampade a incandescenza (si possono raggiungere tempi di vita superiori alle 50.000 ore). Inoltre, al contrario delle lampade a incandescenza, che alla fine della loro vita

cessano immediatamente di emettere luce (bruciatura del filamento), i LED non si "spengono" immediatamente ma perdono progressivamente e lentamente la loro luminanza. Infine, da non sottovalutare l'efficienza luminosa<sup>1</sup> più elevata delle altre sorgenti luminose così come del basso impatto ambientale necessario al loro smaltimento [8].

Come abbiamo già evidenziato, la tecnologia LED si è rapidamente evoluta negli ultimi anni raggiungendo uno stadio che può competere con le tradizionali fonti di luce. Tuttavia, la gestione termica è una delle questioni più importanti da risolvere; il calore limita le prestazioni e l'affidabilità dei sistemi d'illuminazione a LED. La qualità dell'emissione luminosa, intesa come combinazione fra cromaticità e intensità del fascio, e il tempo di vita dei LED presentano una variabilità in relazione alla temperatura d'esercizio. In particolare, come vedremo in seguito, l'emissione dei LED è dipendente dalla temperatura. Inoltre, questa dipendenza è più o meno marcata secondo il tipo di realizzazione del dispositivo.

Prove sperimentali hanno evidenziato come il parametro fondamentale da controllare sia la temperatura di giunzione. Infatti, è a livello della giunzione che risiede il fenomeno fisico alla base dell'emissione di luce in un LED.

La temperatura di giunzione di un LED dipende: dalla corrente che scorre nel diodo, dalla tensione di funzionamento, dal tipo di alimentazione utilizzata

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Negli impianti di vecchia generazione i sistemi di controllo di efficienza utilizzano apparati di misura basati sulla potenza assorbita dalle lampade. Quando l'assorbimento è al di fuori del range impostato mandano un allarme alle centraline di controllo, che avvisano della rottura della lampada. In questi impianti, la sostituzione delle vecchie lampade con le nuove non permette lo sfruttamento della maggior efficienza dei LED, in quanto per mantenere lo stesso controllo di efficienza si realizzano lampade a LED con consumi identici alle lampade di vecchia generazione.

(corrente costante, tensione costante, PWM, ecc.), dal percorso termico tra giunzione e ambiente (resistenza termica), e di conseguenza dalla temperatura ambiente. L'effetto joule determina quanto calore è generato in base alla potenza dissipata, mentre le resistenze termiche e le condizioni ambientali determinano in che modo il calore è rimosso dalla giunzione.

Importante è notare che tutta la luce e il calore prodotto da un LED sono generati nella giunzione del dispositivo. Poiché la giunzione è molto piccola, il tasso di generazione di calore per unità di volume è molto grande.

Queste caratteristiche rendono necessaria una "buona" progettazione, che tenga conto della dipendenza delle caratteristiche fotometriche dei LED dalla temperatura, e la realizzazione di sistemi di smaltimento del calore generato nella giunzione.

Come vedremo in seguito, nei sistemi di segnalamento realizzati non sempre si dà la giusta importanza alle dipendenze dei LED dalla temperatura, realizzando apparati che non rispettano sia dal punto di vista cromatico che d'intensità le norme di riferimento per tutto il range di temperatura prescritto (si veda capitolo 4).

## 1.2.1 Stabilità del colore vs. temperatura

Uno dei problemi che si riscontra nell'uso dei LED come sorgenti di luce risiede nel fatto che la lunghezza d'onda dominante varia con la temperatura. In generale i LED hanno un picco di radiazione che si sposta di 0.15 nm -0.02 nm per °C. Tipici valori sono:

- per i LED Rossi 0.05 nm/°C
- per i LED Gialli 0.13 nm/°C
- per i LED Verdi 0.027 nm/°C

Attualmente possono essere usati diversi tipi di materiali semiconduttori e diverse tecnologie realizzative. Secondo il materiale semiconduttore utilizzato e della tecnologia realizzativa, si possono ottenere LED con diversa lunghezza d'onda (e quindi colore), e diversa efficienza di conversione. La Figura 1-1 mostra alcune tipologie di LED reperibili in commercio.

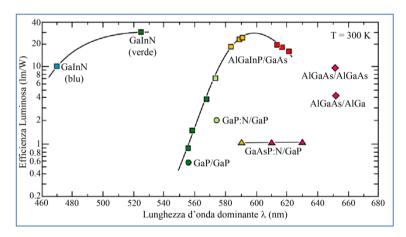


Figura 1-1 Tipologie di LED reperibili in commercio.

Inoltre, secondo il materiale semiconduttore utilizzato e dei processi di fabbricazione, si hanno spostamenti della lunghezza d'onda dominante più o meno influenzati dalle variazioni della temperatura di giunzione (si veda § 2.4.1.2). La Figura 1-2 mostra, a titolo di esempio, come cambia la lunghezza d'onda dominate di un LED "Rosso" in funzione della corrente di pilotaggio e della temperatura ambiente.

In particolare, la figura mostra che la temperatura ambiente (che incide sulla temperatura di giunzione) influenza le coordinate cromatiche emesse dal LED (modifica la lunghezza d'onda dominante della radiazione emessa). Per tale motivo, in fase di progettazione della segnaletica a LED, è indispensabile valutare come le variazioni della temperatura ambiente si ripercuotono sul "colore" dei segnali.

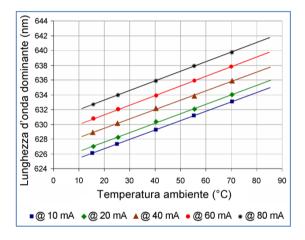


Figura 1-2 Variazione della lunghezza d'onda dominante in funzione delle variazioni della temperatura ambiente ed in funzione della corrente di pilotaggio.

Come evidenzieremo in seguito, gli aspetti colorimetrici della segnaletica (rosso, giallo, verde, ecc.) devono rispettare rigide norme colorimetriche per ampi range di temperatura.

# 1.2.2 Intensità di Emissione vs. Temperatura.

Nei segnali con tecnologia a LED, abbiamo già visto che al variare della temperatura vi è uno spostamento della lunghezza d'onda dominante.

Oltre a questo fenomeno, al variare della temperatura varia anche l'intensità di emissione dei LED. In particolare l'intensità di emissione decresce con l'aumentare della temperatura. La diminuzione dell'intensità di emissione è dovuta ad alcuni fenomeni fisici dipendenti dalla temperatura che avvengono all'interno di tali dispositivi (vedi § 2.4.1.1). In particolare:

- Ricombinazioni non radiative;
- Ricombinazioni superficiali;
- Perdita di cariche sopra la barriera dell'eterogiunzione.

Per il funzionamento nell'intorno delle temperature ambientali (300 K), l'intensità di emissione dei LED è, in genere, descritta dalla seguente equazione empirica [9]:

$$I = I \Big|_{300K} \exp \left[ -\frac{T_j - 300K}{T_1} \right]$$
 (1.1)

Nell'equazione (1.1)  $T_j$  è la temperatura di giunzione e  $T_1$  rappresenta la temperatura caratteristica del LED.

La Figura 1-3 mostra la temperatura caratteristica per due tipici LED.

La proprietà dei LED, appena presentata, può determinare comportamenti macroscopici non idonei per un apparato di segnalamento. L'intensità di emissione dell'impianto di segnalamento viene a dipendere dalla temperatura esterna, ad esempio in un range di variabilità della temperatura di 100 °C potremo avere una variabilità relativa tra il minimo e il massimo del 300% dell'intensità emessa.

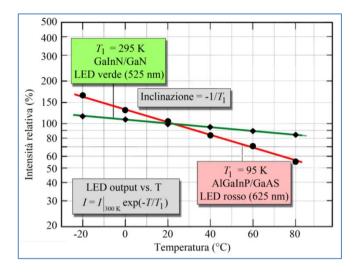


Figura 1-3 Intensità vs. Temperatura di due tipici LED.

## 1.2.3 Perdita d'intensità in funzione del tempo.

Un nuovo aspetto, derivante dai nuovi campi di applicazione dei dispositivi LED, soggetto di ricerca ma soprattutto di definizione è il tempo di vita. Questo parametro è critico nell'ambito del segnalamento. Per il funzionamento in sicurezza di un sistema di segnalazione si deve avere una stima della manutenzione "preventiva" necessaria. Solo recentemente sia i produttori sia gli enti di ricerca hanno intrapreso uno studio sistematico del tempo di vita dei LED.

Com'è noto, i LED sono dispositivi a semiconduttore realizzati attraverso l'accostamento di due semiconduttori a diverso drogaggio realizzante una giunzione *PN* definendo all'interno del dispositivo delle regioni disomogenee, la struttura è simile a quella di un diodo raddrizzatore. I processi diffusivi impongono che con il trascorrere del tempo qualsiasi sistema tenda a

omogenizzarsi (nel caso di giunzioni tra semiconduttori nascono campi elettrici che rallentano "enormemente" questo fenomeno di "omogeneizzazione"). Nello specifico significa che i drogaggi tendono a uniformarsi facendo sparire quelle strutture utili al funzionamento del dispositivo stesso.

Nelle giunzioni dei semiconduttori tali processi sono molto lenti (centinaia di anni). Comunque il progredire di tale processo, anche se molto lento, degrada le prestazioni dei LED.

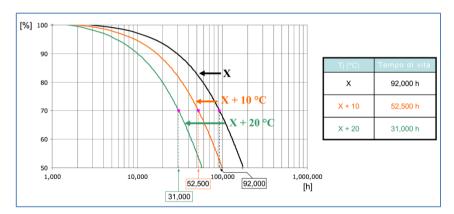


Figura 1-4 Intensità relativa di emissione in funzione delle ore di funzionamento. In tale grafico si assume come tempo di vita il numero di ore necessario affinché l'intensità si riduca al 70%. In figura sono mostrate le curve ricavate facendo variare la temperatura di giunzione di  $+10^{\circ}$ C e di  $+20^{\circ}$ C.

Tale degrado è fortemente influenzato dalla temperatura cui operano i dispositivi, di fatto quest'ultima è un catalizzatore della diffusione. Certamente la temperatura di giunzione è uno dei parametri critici, essendo la regione dove si ha il maggior gradiente diffusivo ed essendo per il LED la regione dove risiedono i fenomeni alla base del suo funzionamento.

Per un LED questi processi di degrado modificano nel tempo la capacità del dispositivo di emettere luce (con il trascorrere del tempo, l'intensità di radiazione

tende a decrescere). La Figura 1-4 mostra come decresce l'intensità di radiazione di un LED in funzione del tempo e della temperatura di giunzione. In particolare, la Figura 1-4 mostra che un aumento della temperatura di giunzione di 10 °C, in sostanza, dimezza il tempo di vita del LED.

La durata di vita dei LED è dunque assicurata da una corretta progettazione termica dell'apparato illuminante. Il calore generato nella giunzione del LED deve essere gestito in modo tale da garantire il corretto funzionamento del segnale.

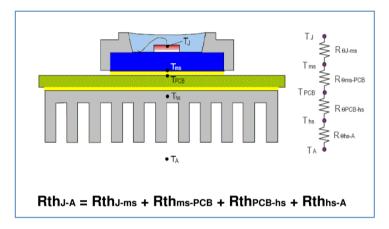


Figura 1-5 Modello termico del singolo LED –  $T_{\rm J}$  temperatura di Giunzione –  $T_{\rm A}$  temperatura ambiente.

I principali produttori di LED offrono tutta la documentazione necessaria per ottimizzare l'installazione e l'uso dei LED. I costruttori, di solito assumono che il tempo di vita di un LED sia compreso tra le 50.000 e 100.000 ore. In tale stima, essi ipotizzano che i LED lavorino con un corretto sistema di dissipazione e in ben determinate condizioni della temperatura ambiente.

Tuttavia per la natura stessa del degrado, il LED non cessa completamente di emettere luce e la comunità scientifica considera i dispositivi "rotti" quando i LED raggiungono il 70% dell'emissione iniziale.

In Figura 1-6 è riportata, per un LED OSRAM, la stima del tempo di vita al variare della temperatura ambiente e della corrente che scorre nel diodo.

dauer für mittle	durchschnittlic re Helligkeitsgr lian Lifetime <sup>2) pa</sup> htness Group mittlere	uppe <sup>2) Seite 17</sup>
Conditions	Lebensdauer median Lifetime	Unit
I <sub>F</sub> = 100 mA T <sub>A</sub> = 25°C	50.000	Betriebsstunden operating hours
I <sub>F</sub> = 140 mA T <sub>A</sub> = 85°C	10.000	Betriebsstunden operating hours
I <sub>F</sub> = 200 mA T <sub>S</sub> = 125°C T <sub>J</sub> = 150°C	7.000*	Betriebsstunden operating hours
I <sub>F</sub> = 200 mA T <sub>S</sub> = 150°C T <sub>J</sub> = 175°C	500*	Betriebsstunden operating hours
but slight packag	exhibits excellenge discoloration one median lifetime	ccurs at highest

Figura 1-6 Tempo di vita di un LED SMD ad alta intensità di emissione prodotto dalla OSRAM.

Tuttavia per un sistema complesso, che fa uso di questa tecnologia, la stima del tempo di vita è difficoltosa; è necessario l'uso di modelli di previsione che tengano conto delle dipendenze dei LED dalla temperatura e dal sistema di alimentazione. Inoltre, per i sistemi che devono funzionare in campo aperto, è indispensabile considerare le condizioni climatiche ambientali. Negli ultimi anni per far fronte a questi problemi sono nate numerose norme che definiscono i metodi con i quali stimare sia il tempo di vita del singolo LED che di un sistema più complesso.

# 1.3 Origini del nostro lavoro

Le proprietà dei LED, brevemente accennate in precedenza, mostrano come l'utilizzo di questa nuova tecnologia nel settore illuminotecnico pone all'attenzione dei costruttori, in fase di progettazione di un apparato, un nuovo fattore esterno che agisce sulle caratteristiche fotometriche di emissione dell'apparato stesso: la temperatura.

Le tradizionali tecniche di costruzione dei segnali, prive di tale dipendenza, hanno delineato in questa fase di transizione la realizzazione di nuovi impianti di segnalamento a LED che presentano le stesse dipendenze alla temperatura dei singoli componenti. Shift colorimetrico e instabilità dell'intensità emessa possono essere individuate in molte installazioni presenti già nelle nostre città (a temperature basse, ad esempio nelle ore notturne, è facile incontrare semafori "abbaglianti" o con colorazioni leggermente diverse da quelle "solite"). Inoltre, data la recente installazione di tali sistemi e la recente richiesta di parametri di programmazione manutentiva, non esistono ancora dati che permettano la corretta conoscenza del tempo di vita.

In quest'ambito si pone il nostro lavoro di ricerca, accanto allo studio delle proprietà microscopiche dei LED, si è cercato di sviluppare un nuovo approccio progettuale che consenta di ottenere un sistema immune alle variazioni della temperatura, tentando di far luce sui tanti punti ancora aperti presenti in questo settore.

LED 15

# Capitolo 2 LED

2.1	UN SECOLO DI LIGHT-EMMITTING DIODES	17
2.1.1	PRIMO NOVECENTO	18
2.1.2	NASCITA DEL PRIMO LED: GAAS E ALGAAS	19
2.1.3	LED VISIBILE A TEMPERATURA AMBIENTE: GAASP	21
2.1.4	LED-IMPURITÀ COME CENTRI ATTIVI: GAP E GAASP	21
2.1.5	NASCITA DI BLU-LED : GAN	22
2.1.6	BLU-LED: GAINN	23
2.1.7	POWER LED: ALINGAP	23
2.1.8	STATO DELL'ARTE	24
2.2	FISICA DEI LED	26
2.2.1	INTRODUZIONE ALLA FISICA DEI SEMICONDUTTORI	26
2.2.2	GENERAZIONE E RICOMBINAZIONE	29
2.2.2.	1 Ricombinazione	<i>34</i>
2.2.2.1	.1 Tempo di vita delle cariche minoritarie	35
2.2.2.1	1.2 Regola d'Oro di Fermi	38
2.2.2.	2 Ricombinazione Radiativa	39
2.2.2.	3 Ricombinazione non-radiativa	46
2.2.2.3	3.1 Ricombinazione Shockley-Read-Hall	46
2.2.2.3	3.2 Ricombinazione Auger	50
2.2.2.3	3.3 Ricombinazione alle superfici	51
2.2.3	SPETTRO DI EMISSIONE	52
2.2.3.	1 Principio di conservazione del momento	52
2.2.3.	2 Principio di conservazione dell'energia	54

LED 16

2.3 STRUTTURA DEI LED	58
2.3.1 GIUNZIONE <i>P-N</i>	58
2.3.1.1 Polarizzazione di una giunzione P-N	61
2.3.1.2 Deviazione dalla caratteristica ideale	65
2.3.2 GIUNZIONE <i>P-N</i> NEI LED	66
2.3.2.1 Resistenze parassite nelle etero-giunzioni	69
2.3.2.2 Dipendenza dalla temperatura delle etero-giunzioni	70
2.4 CARATTERIZZAZIONE DEI LEDS	72
2.4.1 TEMPERATURA DI GIUNZIONE	74
2.4.1.1 Intensità di emissione	76
2.4.1.2 Spettro di emissione	77
2.4.1.3 Tensione di funzionamento	79
2.5 ARCHITETTURA DEL LED	82
2.5.1 ARCHITETTURA DELLE ETERO-GIUNZIONI	82
2.5.2 Drogaggio	84
2.5.3 SPOSTAMENTO DELLA REGIONE ATTIVA	85
2.5.4 STRATI DI "DILATAZIONE" DELLA CORRENTE	86
2.5.5 ARCHITETTURE PER FAVORIRE L'USCITA DELLA LUCE	90
2.6 PACKAGING	91
2.7 LED VISIBILI	93
2.7.1 LEGHE GAAS <sub>1-x</sub> $P_x$ E GAAS <sub>1-x</sub> $P_x$ :N	95
2.7.2 LEGHE AL <sub>x</sub> GA <sub>1-x</sub> AS/GAAS	96
2.7.3 LEGHE $\left(Al_xGa_{1-x}\right)_{1-y}In_yP$	97
2.7.4 LEGHE IN <sub>x</sub> GA <sub>1-x</sub> N	99
2.7.5 PROPRIETÀ OTTICHE DEI LED VISIBILI NEL SEGNALAMENTO	101
2.8 PERDITA DI LUMINOSITÀ NEL TEMPO	103
2.8.1 MECCANISMI FISICI DI DEGRADO	104

2.8.2	LA NORMATIVA IES LM-80-08	107
2.8.3	LA NORMATIVA TM 21-11	109

Dopo una breve ma interessante descrizione storica del LED, ci addentreremo nella fisica alla base del funzionamento dei diodi emettitore di luce, allo scopo di individuare i processi che causano la dipendenza dalla temperatura delle proprietà elettro-ottiche.

Poi il capitolo si apre alla descrizione dell'architettura e delle strutture interne utili al funzionamento che oggi noi tutti conosciamo, con grande attenzione per i LED che emettono nel visibile e il loro attuale stato dell'arte.

Infine si è cercato di esporre ciò che oggi rappresenta una branca rilevante della ricerca in questo campo, lo studio del tempo di vita dei dispositivi a LED.

# 2.1 Un secolo di Light-Emitting Diodes

Nel nostro lavoro di ricerca è stata sorprendente la scoperta di come una tecnologia definita "nuova" ed "emergente", che sta rivoluzionando il mondo dell'illuminazione, possa esser nata a soli pochi anni di distanza dalla famosa e più celebre lampada ad incandescenza (1878 – lampada ad incandescenza; 1907 – primo diodo emettitore di luce) [10], [11]. Qui cercheremo di ripercorrere quella che è stata la storia di un LED. In particolare per renderla più leggibile si è divisa per tipo di materiale attivo, cioè per tipo di semiconduttore utilizzato nella regione radiativa. Si deve, infatti, considerare che dopo il 1960 molti gruppi di ricerca

lavoravano in concorrenza su diversi materiali e, anche se con obiettivi differenti (molti di loro lavoravano sui LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), hanno dato un importante impulso alla realizzazione del dispositivo che oggi noi tutti conosciamo.

#### 2.1.1 Primo Novecento

Nel 1907 Henry Joseph Round (1881-1966) crea il primo diodo emettitore di luce (LED) e come ogni scoperta, degna di nota, è semplicemente il classico incidente. Round lavorando su un nuovo materiale, sintetizzato solo pochi anni prima, il carbonato di silicio (SiC), stava cercando di realizzare un "Crystal detectors"; una struttura metallo-cristallo che in quegli anni veniva studiata come possibile alternativa alle costose e poco efficienti valvole, utilizzate per la demodulazione dei segnali a radiofrequenza.

La struttura *elettrodo metallico/semiconduttore* realizzata da Round non è altro che un semplice diodo *Schottky* (come oggi lo conosciamo) che in condizioni lontane dall'equilibrio, alta polarizzazione diretta o indiretta, si comporta come diodo emettitore di luce. Round riporta come tensioni di esercizio tra i 10 – 110 V.

In quegli anni le ragioni alla base del fenomeno osservato da Round non erano ben comprese e forse per questo motivo la comunità scientifica non diede peso allo strano fenomeno evidenziato. Difatti dopo 20 anni si tornò a parlare dell'emissione di luce da semiconduttore grazie a Lossev, che cercò di investigare

sul fenomeno di luminescenza osservato nelle strutture metallo-semiconduttore con *SiC*, ma riuscì solo a escludere il fenomeno dell'incandescenza.

Solo alla fine degli anni '60, raggiunta la maturità delle nozioni della fisica quantistica, si giunse a una conoscenza e a una tecnologia tale da permettere lo sviluppo applicativo di questa nuova tecnologia. Tuttavia il materiale utilizzato da Round era già stato soppiantato da nuovi tipi di semiconduttori.

## 2.1.2 Nascita del primo LED: GaAs e AlGaAs

Il 1950 vede la nascita di nuovi composti (III-V gruppo della tavola periodica) e di una maggiore consapevolezza della natura fisica dei solidi e delle loro proprietà. Infatti, questi anni sono i più importanti per l'elettronica, si tracciano, di fatto, le basi della nostra attuale tecnologia (1947 – realizzazione del primo BJT).

Di questo fermento tecnologico beneficia lo stesso LED di cui stiamo parlando: la sua storia si mescola con le più importanti scoperte fisiche e con le più importati aziende tecnologiche e gruppi di ricerca (General Electric, IBM, MIT, ecc.).

Nel 1962 le proprietà ottiche del composto arseniuro di gallio (GaAs) consentono di ottenere il primo dispositivo LED che emette nell'infrarosso 870 nm – 980 nm (primo, poiché la luminescenza era il fenomeno ricercato e non un effetto inaspettato) e il primo LASER.

Negli anni seguenti l'evoluzione e le migliorie delle tecniche di drogaggio consentono di provare e verificare nuovi composti. Nel 1968 viene sviluppato il primo LED nel visibile utilizzando un nuovo composto (AlGaAs). Oltre all'importanza di aver ottenuto una luminescenza stabile nel range del visibile, la

LED 20

realizzazione di questo dispositivo dimostra l'inconsistenza di alcuni limiti ipotizzati dalla comunità scientifica in quegli anni (differenze reticolari tra i diversi composti messi a contatto e reattività all'ossigeno si pensavano insormontabili all'epoca per definire un dispositivo stabile ed efficiente).

Questo primo dispositivo rappresentò anche la prima occasione di applicazione pratica: indicatori luminosi sui circuiti stessi.

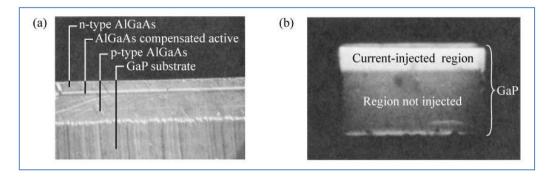


Figura 2-1 (a) struttura del primo LED visibile: la regione attiva viene realizzata attraverso l'accostamento di semiconduttori a diversa costante reticolare, all'epoca si pensava che questo tipo di struttura non consentisse di realizzare dispositivi stabili per le ovvie imperfezioni che ne derivano. (b) immagine LED in funzionamento: si nota la netta distinzione tra regione attiva (parte luminosa) e il substrato GaP scelto per la sua proprietà di trasparenza alla frequenza luminosa emessa.

Negli ultimi anni questi tipi di composti attivi sono ritornati nuovamente al centro della ricerca scientifica grazie alla realizzazione dei cosiddetti RCLED (*Resonant-Cavity LED*) nei quali, a differenza dei comuni LED, si seleziona la lunghezza d'onda di emissione attraverso la realizzazione di una micro cavità risonante all'interno del LED stesso (si utilizza lo stesso approccio dei LASER), sono utilizzati nel campo delle comunicazioni.

#### 2.1.3 LED visibile a temperatura ambiente: GaAsP

Nel 1962 nasce il primo LED a luce visibile a temperatura ambiente, è l'inizio di un nuovo composto GaAsP, che ancora oggi viene utilizzato nei dispositivi a basso costo.

Il lavoro, da cui prende forma il primo LED, aveva come obiettivo la realizzazione di un LASER che lavorasse a temperatura ambiente. In particolare l'importanza di questo lavoro scaturisce dall'evidenza di una corrispondenza biunivoca tra lo spettro di emissione e la concentrazione di fosforo (P). Per la prima volta si ha la prova pratica di poter selezionare lo spettro emissivo agendo sulle concentrazioni degli elementi che realizzano la lega del semiconduttore che definisce la regione attiva del LED (metodo che oggi ha raggiunto la piena consapevolezza).

Inoltre questo lavoro mostrò criticità che solo negli anni successivi troveranno risposte: all'aumentare della concentrazione del fosforo l'efficienza ottica scendeva al di sotto dello 0,005%. Solo nel 1969 fu ben chiaro che l'efficienza del dispositivo era legata alla presenza di dislocazioni (imperfezioni del materiale attivo) e alle transizioni dirette-indirette definite dalle bande energetiche stesse del materiale.

# 2.1.4 LED-impurità come centri attivi: GaP e GaAsP

Nei primi anni del 1960 si cominciò a intuire come massimizzare l'emissione spontanea all'interno di una struttura a semiconduttore e nel 1965 venne

pubblicato il primo lavoro su un LED a regione attiva GaP, che sfrutta i livelli energetici definiti dal drogaggio con azoto (N). Per la prima volta si parla di *centri* di ricombinazione radiativa.

Nei primi anni del 1970 vengono commercializzati i primi LED realizzati con questa nuova tecnica. In particolare dopando con azoto il materiale attivo GaAsP si riesce a ottenere l'emissione nel rosso, nell'arancio, nel giallo e nel verde. Ancora oggi tale tecnica è utilizzata per realizzare dispositivi a basso costo.

#### 2.1.5 Nascita di blu-LED: GaN

A metà degli anni '60 si era in grado di realizzare solo due dei tre colori primari (giallo e rosso), mancava solo il blu per aprire le porte ad applicazioni più complesse delle semplici spie.

La spinta verso la realizzazione di un dispositivo LED che emettesse nel blu fu data dalla società RCA (*Radio Corporation of America*) che già nel lontano 1960 aveva intuito la possibilità di realizzare un televisore piatto basato sui LED. Nel 1971 il primo dispositivo a semiconduttore che emette nel blu fu annunciato dalla stessa società.

Il dispositivo realizzato era una giunzione *P-N* realizzata in GaN, con un contatto isolato metallico fatto da una regione drogata in zinco (Zn) e un contatto in indio (In).

Questo dispositivo era in grado di emettere dal verde al blu, tuttavia le efficienze ottenute furono davvero basse. Il problema principale riscontrato era la bassa

conduttività della regione di tipo p che limitava la resa ottica del dispositivo stesso. Per questo motivo questa strada fu abbandonata sino ai giorni nostri.

#### 2.1.6 Blu-LED: GaInN

Nei primi anni del 1990 attraverso nuove tecniche di drogaggio si riuscì a riprendere il lavoro realizzato dalla RCA ottenendo un nuovo dispositivo LED a substrato GaN drogato con In, si parlò del nuovo composto GaInN. Questo nuovo composto è il vero motivo della rivoluzione nell'illuminazione.

Benché non ancora si sia in grado di spiegare le efficienze raggiunte da questi dispositivi (già nel 1994 si ottenne un'efficienza del 10%) alla presenza di un materiale con un'alta densità di dislocazioni, tale dispositivo aprì le porte alla realizzazione dei nuovi televisori e permise l'ingresso del LED nel mercato dell'illuminazione generica con la creazione dei LED bianchi.

#### 2.1.7 Power LED: AlInGaP

Nel 1985 si realizza in Giappone il primo Laser in  $(Al_xGa_{1-x})_{1-y}$  In<sub>y</sub>P dando la nascita alla lega che attualmente viene utilizzata per i LED ad alta brillanza. Definendo le composizioni degli elementi (x = y) si ottengono emissioni nel visibile dal rosso al giallo (650 nm - 590nm).

Come vedremo nel § 2.7.3, la perfetta corrispondenza reticolare con il composto GaAs, che ricoprire il ruolo di substrato, ha permesso nei primi anni '90 di

LED 24

ottenere dispositivi ad alta efficienza, aprendo ai LED il mercato illuminotecnico della segnaletica, oggetto del nostro studio.

#### 2.1.8 Stato dell'Arte

Oggigiorno l'illuminazione a LED è una tecnologia ormai matura, e attualmente definisce il sistema d'illuminazione più efficiente, si sono superati oramai i 100lm/W [12].

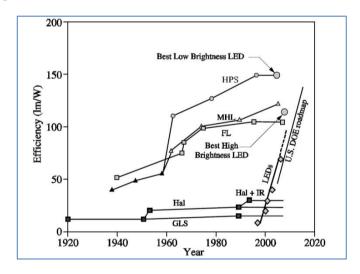


Figura 2-2 Evoluzione dell'efficienza luminosa.

I campi principali di sviluppo su cui attualmente si sta lavorando sono:

- la performance: ai fini del superamento di quella delle sorgenti tradizionali;
- l'ottimizzazione delle applicazioni: per consentire l'adattamento di sorgenti e apparecchi a tutte le situazioni in cui si usano sistemi d'illuminazione;

• la facilità d'uso: ovvero la creazione di apparecchi di facile montaggio, messa in opera e manutenzione.

In particolare oltre a prodotti commerciali di nuova concezione, nati grazie alle caratteristiche intrinseche dei LED (proprietà meccaniche), gli ultimi anni hanno visto la nascita di retrofit che consentono l'inserimento di questa tecnologia anche nell'illuminazione casalinga. La Figura 2-3 mostra le nuove soluzioni illuminotecniche nate negli ultimi anni, dove i LED consentono risparmio energetico, maggior resistenza agli stress meccanici, miglior resa di colore e minor manutenzione.



Figura 2-3 Attuali campi di applicazione dei dispositivi LED: decorativi, nel segnalamento, illuminazione generica, televisori.

#### 2.2 Fisica dei LED

In questo paragrafo presentiamo i processi fisici alla base del funzionamento dei diodi a emissione di luce, molti dei fenomeni descritti sono una prima risposta ai comportamenti critici evidenziati nel primo capitolo.

In particolare ci soffermeremo sulle teorie di emissione di fotoni all'interno di un semiconduttore.

#### 2.2.1 Introduzione alla fisica dei semiconduttori

Com'è noto all'interno di un semiconduttore si possono distinguere due diversi tipi di carica elettrica: elettrone e lacuna. Mentre la prima è una vera e propria particella subatomica, la seconda è un'astrazione fisica che indica la mancanza di un elettrone; è utilizzata in fisica e in elettronica per semplificare le spiegazioni di molti fenomeni fisici. Entrambe, nella trattazione che andremo a effettuare, possono essere considerate come vere e proprie particelle cariche che si muovono all'interno del semiconduttore (elettrone: negativa; lacuna: positiva).

Nella nostra trattazione faremo riferimento al **modello a bande** che descrive in maniera semplificata la soluzione della *relazione di dispersione delle cariche* nel caso in cui si muovo all'interno di un campo elettromagnetico periodico (modello di Kronig-Penney [13]), caso riconducibile a una struttura cristallina. In particolare tale modello è una descrizione semplificata dei livelli energetici quantizzati all'interno dei solidi, derivanti dalla degenerazione dei singoli livelli degli atomi formanti il solido (Figura 2-4).

Fisica dei LED 27

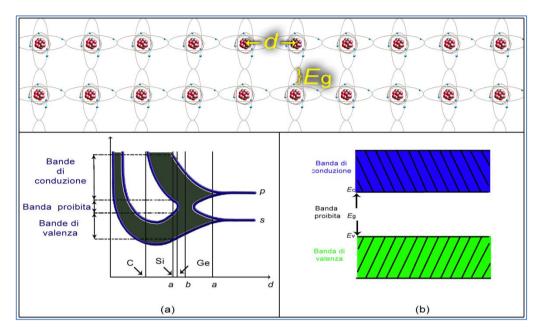


Figura 2-4 a) Le interazioni elettriche fra gli elettroni di un atomo e quelli degli atomi vicini moltiplicano i livelli energetici possibili. La tipologia e la forma dei livelli energetici dipendono dalla distanza interatomica d tra gli atomi. b) Modello a bande: i livelli energetici vengono classificati secondo la possibilità delle cariche di muoversi o no all'interno del solido, definendo la banda di conduzione e la banda di valenza rispettivamente.

Secondo la proprietà delle cariche di muoversi o no liberamente nel solido, il modello a bande definisce la *banda di conduzione* e la *banda di valenza* rispettivamente.

La banda di valenza è dunque caratterizzata da elettroni aventi energia non sufficiente a muoversi all'interno del solido stesso, cioè elettroni legati all'atomo di appartenenza. La banda di conduzione invece è formata da elettroni che possiedono un'energia tale da permettergli di muoversi liberamente all'interno del solido, questi contribuiscono alla corrente di conduzione. Queste due bande energetiche sono divise da una banda proibita che definisce l'energia non

LED 28

ammessa, cioè le energie che non possono essere associate agli elettroni all'interno del solido (*quantizzazione*).

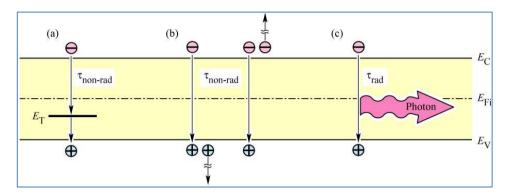


Figura 2-5 Processi fisici di ricombinazione: a) ricombinazione Shockley-Read-Hall; b) ricombinazione Auger; c) ricombinazione radiativa.

Il passaggio da una banda all'altra di un elettrone è naturalmente legato all'acquisizione o alla cessione di energia: nel primo caso si parla di **generazione** di una coppia elettrone-lacuna (l'elettrone passando alla banda di conduzione determina la mancanza di un elettrone nella banda di valenza); nel secondo caso si parla di **ricombinazione** di una coppia elettrone-lacuna (l'elettrone passa nella banda di valenza riempiendo una lacuna-mancanza di elettrone). Secondo il metodo con cui avvengono, si distinguono diversi fenomeni fisici che possono intervenire contemporaneamente (Figura 2-5).

Il fenomeno fisico cui fa capo il funzionamento dei LED è la *ricombinazione radiativa*; passaggio di un elettrone da banda di conduzione a banda di valenza attraverso la perdita di energia nell'emissione di un fotone, il quale avrà energia pari al gap proibito (Figura 2-5 c):

Fisica dei LED 29

$$hv = E_e - E_h \approx E_{\varphi} \tag{2.1}$$

dove la (2-1) rappresenta la nota legge di Planck,  $\nu$  è la frequenza del fotone mentre  $E_{\nu}$  è il gap proibito.

Tuttavia accanto alla *ricombinazione radiativa* abbiamo numerose forme di *ricombinazioni non radiative* che all'interno di un semiconduttore possono definire il passaggio tra una banda e l'altra. Tra di queste abbiamo la **ricombinazione Shockley-Read-Hall** (Figura 2-5 a) e la **ricombinazione Auger** (Figura 2-5 b) tra le più importati.

#### 2.2.2 Generazione e Ricombinazione

Come abbiamo già detto, la *generazione* è il fenomeno di creazione di una coppia elettrone-lacuna mentre la *ricombinazione* è il processo opposto, l'annichilazione di una coppia elettrone-lacune. Nel primo caso avremo un'acquisizione di energia da parte dell'elettrone nel secondo caso una cessione, con tutte le tipologie di processi che inseguito presenteremo. All'equilibrio i due fenomeni naturalmente si equivalgono. Tuttavia, in questo breve paragrafo, esaminiamo più affondo il fenomeno fisico della ricombinazione al di fuori dell'equilibrio, essendo questo il processo base del funzionamento dei LED. In particolare ci rifacciamo a una trattazione semplificata che ci permette di comprendere alcuni comportamenti dei dispositivi stessi [14].

Il **tasso di ricombinazione** R dipende dalla probabilità che un elettrone in *banda* di conduzione ricombini con una lacuna ed è dunque proporzionale alla

concentrazione delle lacune e alla concentrazione degli elettroni,  $R \propto np$ , in altre parole:

$$R = -\frac{dn}{dt} = -\frac{dp}{dt} = Bnp \tag{2.2}$$

dove la (2-2) definisce l'*equazione del tasso bimolecolare* e, la costante *B* prende il nome di coefficiente di *ricombinazione bimolecolare*. Nel *caso stazionario*, l'equazione precedente può esser riscritta:

$$R = B \left[ n_0 + \Delta n(t) \right] \left[ p_0 + \Delta p(t) \right]$$
 (2.3)

dove vale  $\Delta n(t) = \Delta p(t)$ .

Nel *caso non-stazionario*, derivante ad esempio da una sollecitazione esterna limitata nel tempo come un impulso di corrente, possiamo distinguere due diversi casi: tasso di ricombinazione con **basso livello di eccitazione** e tasso di ricombinazione con **alto livello di eccitazione**.

• Per un basso livello di eccitazione avremo  $\Delta n(t) \ll (n_0 + p_0)$  da cui possiamo riscrivere l'equazione (2.3):

$$R = Bn_i^2 + B(n_0 + p_0)\Delta n(t) = R_0 + R_{ecc}$$
 (2.4)

dove  $R_0$  è il *tasso di ricombinazione all'equilibrio*, mentre  $R_{ecc}$  è il tasso di ricombinazione in eccesso. La concentrazione dei portatori di carica nel tempo diviene:

$$\frac{dn(t)}{dt} = G - R = (G_0 + G_{ecc}) - (R_0 + R_{ecc})$$
 (2.5)

dove  $G_0$  e  $R_0$  sono i tassi di generazione e ricombinazione all'equilibrio.

Ipotizzando che la sollecitazione cessi al tempo t = 0, avremo dunque che  $G_{ecc}(t=0) = 0$  ed essendo sempre valida  $G_0 = R_0$ , l'equazione diviene:

$$\frac{d}{dt}\Delta n(t) = -B(n_0 + p_0)\Delta n(t)$$
(2.6)

La cui soluzione è:

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 e^{-B(n_0 + p_0)t}$$
 (2.7)

Che può essere riscritta

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 e^{-t/\tau} \tag{2.8}$$

dove  $\tau$  identifica il **tempo di vita** (tempo medio dopo il quale le cariche ricombinano) dei portatori di carica nel caso di basso livello di eccitazione:

$$\tau = \frac{1}{B(n_0 + p_0)} \tag{2.9}$$

Nel caso di semiconduttori drogati il tempo di vita delle cariche minoritarie diviene:

$$\tau_n = \frac{1}{BN_A} \qquad e \qquad \tau_p = \frac{1}{BN_D} \tag{2.10}$$

Mentre per le cariche maggioritarie il tempo di vita può essere considerato infinito, poiché la concentrazione dei portatori di carica è imposta dal tipo e dal livello di drogaggio.

Possiamo quindi definire le equazioni del tasso monomolecolari secondo il tipo di semiconduttore:

$$\frac{d}{dt}\Delta n(t) = -\frac{\Delta n(t)}{\tau_n}$$
 per semiconduttore di tipo p (2.11)

e

$$\frac{d}{dt}\Delta p(t) = -\frac{\Delta p(t)}{\tau_p}$$
 per semiconduttore di tipo n (2.12)

• Per alto livello di eccitazione  $\Delta n(t) \gg (n_0 + p_0)$ , l'equazione del tasso bimolecolare (2-2) diviene:

$$\frac{d}{dt}\Delta n(t) = -B\Delta n^2 \tag{2.13}$$

Risolvendo per  $\Delta n(0) = \Delta n_0$  avremo:

$$\Delta n(t) = \frac{1}{Bt + \Delta n_0^{-1}} \tag{2.14}$$

La soluzione (2-14) a differenza della (2-7) non ha un andamento esponenziale e per di più il tempo di vita dei portatori di carica dipende dal tempo stesso, ottenendo un allungamento del tempo di vita dei portatori, che è nocivo per le caratteristiche ottimali di un LED (Figura 2-6).

Infatti, come sarà più chiaro in seguito, questo comportamento dinamico del tempo di vita dei portatori di carica influisce in maniera rilevante sul comportamento del dispositivo. Di fatto a un aumento d'iniezione di cariche (es. aumento della corrente) il tempo di vita tende ad aumentare e quindi la probabilità che le cariche possano attraversare il LED senza ricombinarsi è non nulla influenzando direttamente l'efficienza del dispositivo.

Inoltre questo tipo di trattazione ci consente di evidenziare come la scelta di realizzare una giunzione *P-N* come struttura fondamentale del LED scaturisce dalla caratteristica del tempo di vita delle cariche maggioritarie tendente a infinito. Questa impone, di fatto, la scelta di realizzare un'iniezione di cariche minoritarie all'interno di una regione localizzata.

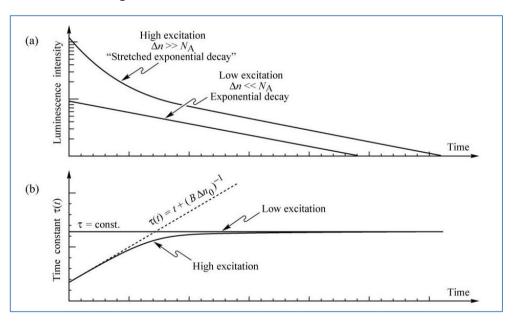


Figura 2-6 (a) Luminescenza per basso ed alto livello di eccitazione. (b) Andamento del tempo di vita per basso ed alto livello di eccitazione.

#### 2.2.2.1 Ricombinazione

In questo breve paragrafo cercheremo di dare una visione più completa del fenomeno di ricombinazione, in modo tale da rendere più chiare le scelte di design dei LED che presenteremo in seguito.

Il fenomeno della ricombinazione può essere suddiviso in due diverse macro categorie. La prima è la *ricombinazione radiativa*, definita dal passaggio dell'elettrone dalla banda di conduzione alla banda di valenza con l'emissione di un fotone di energia pari alla banda proibita ( $E_g = hv$ ). La seconda è la *ricombinazione non-radiativa*, definita dal passaggio di un elettrone dalla banda di conduzione alla banda di valenza senza l'emissione di alcun fotone ma con la cessione di parte della sua energia o al reticolo cristallino (iterazione elettronefonone), o a un altro elettrone (iterazione elettrone-elettrone) oppure per suo intrappolamento da imperfezioni reticolari. Per entrambe le tipologie di ricombinazione si può definire un tempo di vita medio:  $\tau_{rr}$  radiativo e  $\tau_{nr}$  non radiativo.

Allo scopo di favorire la ricombinazione radiativa all'interno del dispositivo si dovranno creare le condizioni affinché sia  $\tau_{rr} \ll \tau_{nr}$ , in modo tale che nel tempo si abbia maggior probabilità di ricombinazione radiativa. Infatti, un modo per definire l'**efficienza quantica interna** di un LED è rappresentata dalla seguente espressione:

$$\eta_{\rm int} = \frac{1}{1 + \tau_{rr} / \tau_{nr}} \tag{2.15}$$

"interna" in quanto, come vedremo, non tutti i fotoni emessi riescono a uscire dal semiconduttore.

Il tempo di vita delle cariche rappresenta il tempo medio dopo il quale la carica decade a un livello energetico inferiore, ed è caratteristico di ogni livello energetico. Tuttavia creando opportune strutture (si veda § 2.3.2) è possibile agire su di esso. Il tempo di vita dipende da diversi fenomeni fisici e può esser definito come:

$$\frac{1}{\tau} = \sum_{i} \frac{1}{\tau_i} \tag{2.16}$$

dove  $\tau_i$  è il tempo di vita caratteristico del singolo processo fisico di ricombinazione.

## 2.2.2.1.1 Tempo di vita delle cariche minoritarie

Consideriamo un solido e consideriamo i suoi livelli energetici j-esimo e i-esimo, popolati rispettivamente da  $N_j$  e  $N_i$  numero di elettroni. Il numero di transizioni dal livello energetico j-esimo al livello i-esimo sarà dato dal prodotto:

$$P_{ii}N_i = P_{ii}N_j \tag{2.17}$$

dove  $P_{ji}$  e  $P_{ij}$  sono le probabilità di transizione dal livello energetico j-esimo al livello i-esimo e nel verso opposto, si avrà  $P_{ji} = P_{ij}$  poiché abbiamo la stessa probabilità che l'elettrone si muova nelle due direzioni (si veda § 2.2.2.1.2).

In particolare se il livello j sarà a maggior energia del livello i, nel caso di transizione  $j \rightarrow i$  avremo ricombinazione, nel caso  $i \rightarrow j$  generazione.

Per definire il tempo di vita  $\tau_{ji}$  caratteristico di ogni livello consideriamo un solido all'equilibrio termico per il quale varrà la seguente relazione:

$$P_{ji}N_i = P_{ji}N_j + \frac{N_j}{\tau_{ji}} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\tau_{ji}} = \left(\frac{N_i}{N_j} - 1\right)P_{ji}$$
 (2.18)

dove  $P_{ji}N_i$  rappresenta la ricombinazione,  $P_{ji}N_j$  la generazione e  $N_j/\tau_{ji}$  un fattore denominato *ricombinazione spontanea* (decadimento spontaneo di una carica a un livello inferiore). Ipotizzando la non iterazione tra gli elettroni (ipotesi di atomi isolati), la distribuzione degli elettroni sui livelli energetici segue la legge di Boltzmann  $N_i = \exp(-E_i/k_BT)$  da cui:

$$\frac{N_i}{N_j} - 1 = \exp\left(\frac{E_j - E_i}{k_B T}\right) - 1 \tag{2.19}$$

quindi otteniamo che il tempo di vita è pari:

$$\frac{1}{\tau_{ji}} = P_{ji} \left[ \exp\left(\frac{E_j - E_i}{k_B T}\right) - 1 \right] = \left(\frac{N_i}{N_j} - 1\right) P_{ji}$$
(2.20)

L'espressione così ottenuta ci permette di comprendere una delle più importanti scelte implementative nei LED attuali. Infatti, la (2-19) ci dice che il tempo di vita dipende dalle popolazioni dei portatori di carica, agendo su quest'ultime siamo in grado di operare direttamente sul tempo di vita.

Ad esempio, se ipotizziamo di voler ottimizzare l'efficienza di un diodo emettitore di luce, l'espressione (2-15) ci dice che se riuscissimo a diminuire il tempo di vita del livello energetico, in cui la probabilità di ricombinazione

radiativa è massima, otterremmo l'ottimizzazione voluta. La 2-19 di fatto mostra che realizzando una struttura che faccia accumulare cariche nel livello energetico considerato  $(N_i)$  si ottiene una diminuzione del tempo di vita.

Tale procedimento si ottiene in modo abbastanza soddisfacente con una giunzione *P-N* opportunamente realizzata con una buca di potenziale, nella quale intrappolare le cariche (Figura 2-7).

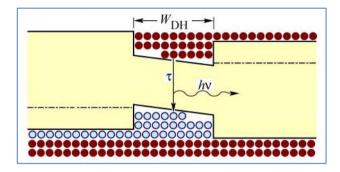


Figura 2-7 Rappresentazione schematica dell'andamento dei livelli energetici di una struttura a "buca di potenziale"; in rosso gli elettroni, in celeste le lacune.

Inoltre, l'espressione 2-19 descrive una delle dipendenze macroscopiche dalla temperatura dei LED: a un aumento della temperatura avremo un aumento del tempo di vita. Questo è uno dei primi parametri, anche se non il più critico, dipendente da essa e in questo caso influisce sia nel comportamento dinamico del dispositivo sia lievemente nella sua efficienza ottica (tutti i tempi di vita caratteristici dei livelli interni del reticolo del LED subiranno la stessa identica deviazione e di fatto non si avrà un'apprezzabile cambiamento dell'efficienza).

## 2.2.2.1.2 Regola d'Oro di Fermi

La probabilità di transizione tra due livelli vista nel paragrafo precedente ( $P_{ji}$ ) è definita attraverso la **Regola d'Oro di Fermi**. Quest'ultima definisce la probabilità per unità di tempo della transizione di un elettrone dallo stato quantico j-esimo allo stato quantico i-esimo come:

$$W_{j \to i} = \frac{d}{dt} |a'_{m}(t)|^{2} = \frac{1}{\hbar^{2}} |\mathcal{F}\{h_{ji}\}|^{2}$$
 (2.21)

È pari, al netto della costante ridotta di Planck, al modulo quadro della trasformata di Fourier della funzione  $h_{ji}$  centrata sul salto energetico  $E_j - E_i$ . Dove in particolare  $h_{ji}$  è definita come:

$$h_{ji} = \int_{\Omega} \omega_j^* \hat{H} \omega_i d^3 r \tag{2.22}$$

dove  $\omega_i$  e  $\omega_j$  sono le autofunzioni derivanti dall'equazione di Schrödinger che definiscono gli stati energetici j-esimo e i-esimo,  $\Omega$  è la regione delimitata dal solido considerato e  $\hat{H}$  è l'Hamiltoniano perturbato. Quest'ultimo dipende dal fenomeno fisico che interagisce con l'elettrone determinando la transizione.

Senza addentrarci in complessi calcoli superflui (bisogna considerare che l'equazione di Schrödinger dipende dalla struttura reticolare), tale trattazione ci permette di intuire la dipendenza del tempo di vita dalla struttura/tipo di semiconduttore utilizzato, ma soprattutto che nello stesso semiconduttore avremo una varietà di livelli energetici ognuno dei quali contraddistinto da un tempo di vita caratteristico (a parità di popolazione).

Questa qualità ben nota ai ricercatori nell'ambito LASER, dove la scelta del materiale/elemento è effettuata proprio in base alle caratteristiche dei livelli energetici, viene sfruttata anche nei LED. In particolare si esegue una vera e propria modellizzazione delle bande energetiche agendo direttamente sul reticolo del semiconduttore in modo che una transizione presenta una maggior probabilità rispetto alle altre. Altra tecnica (derivata dai LASER) è invece l'utilizzo d'impurezze (introduzione di atomi sostituzionali diversi al semiconduttore principale) che vanno a definire un nuovo livello energetico con un tempo di vita notevolmente più basso rispetto ai livelli energetici del materiale intrinseco.

Benché non in modo esplicito, bisogna notare che anche la probabilità di transizione è influenzata dalla temperatura di funzionamento del dispositivo. L'aumento di temperatura determina in prima approssimazione un cambiamento della periodicità del reticolo (dilatazione dei corpi, aumento della moto vibrazionale degli atomi - fononi), agendo direttamente sulla probabilità di transizione (sia mutando le autofunzioni sia l'hamiltoniano perturbato) e favorendo la ricombinazione attraverso diversi livelli (un esempio sono i laser accordati in temperatura).

### 2.2.2.2 Ricombinazione Radiativa

Consideriamo la regola d'oro di Fermi nel caso d'iterazione fotone – elettrone. In particolare per semplificare la trattazione scomponiamo la radiazione elettromagnetica attraverso Fourier e consideriamo l'interazione con una singola componente frequenziale (in seguito integrando su tutte le frequenze otterremo l'espressione generale della probabilità di ricombinazione).

Ipotizziamo un'interazione limitata nel tempo  $(0 < t < t_p)$  e una velocità dell'elettrone nel solido pari a u. Avremo che l'iterazione elettrone campo elettromagnetico (essendo la luce rappresentabile come un campo elettromagnetico) è definita dalla  $forza\ di\ Lorentz$ :

$$F = -q(\mathcal{E} + u \wedge B) \tag{2.23}$$

dove -q è la carica dell'elettrone,  $\mathcal{E}$  e B sono il campo elettrico e il campo magnetico rispettivamente. In particolare la componente magnetica può essere trascurata; all'interno di un solido è sempre verificata  $u \ll c$ , dove c è la velocità della luce.

Infatti, se consideriamo un'onda piana nel vuoto, il suo campo elettrico è legato al campo magnetico attraverso le seguenti relazioni:

$$\sqrt{\varepsilon_0} \mathcal{E} = \sqrt{\mu_0} H = \frac{1}{\sqrt{\mu_0}} B \tag{2.24}$$

$$|u \wedge B| \le uB = u\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \mathcal{E} = \frac{u}{c} \mathcal{E}$$
 (2.25)

poiché nel vuoto vale  $c=1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$  . La 2-24 dunque verifica l'ipotesi fatta.

Quindi dalle *equazioni di Maxwell* avremo che sull'elettrone agisce la seguente forza:

$$F \simeq -q\mathcal{E} = q \text{ grad } \varphi \tag{2.26}$$

dove  $\varphi$  è il potenziale elettrico.

L'Hamiltoniano di perturbazione diviene:

$$\hat{H} = -q\varphi \tag{2.27}$$

Naturalmente il potenziale elettrico sottintende una dipendenza dallo spazio e dal tempo; tuttavia nella nostra trattazione si può considerare il campo elettromagnetico costante nello spazio. Infatti nell'iterazione *elettrone* – *luce visibile* se consideriamo le grandezze fisiche in gioco avremo per l'elettrone dipendenze dell'ordine di  $1\text{Å} = 10^{-4} \, \mu m$  mentre per la luce di  $0.4 \, \mu m \div 0.7 \, \mu m$  (spettro visibile); una differenza dell'ordine di  $10^3$  che ci permette di trascurare la dipendenza dallo spazio del potenziale elettrico senza perdere di generalità nella nostra trattazione (Figura 2-8).

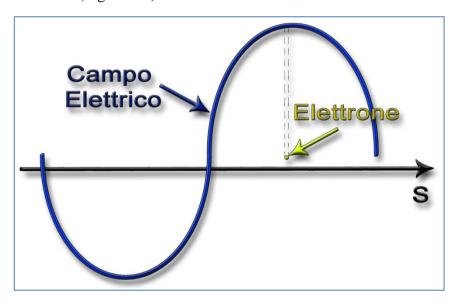


Figura 2-8 Confronto tra le dipendenze paziali del campo elettrico e l'elettrone nel caso di iterazione luce-elettrone.

Quindi il nostro Hamiltoniano perturbato diviene, a meno di una costante arbitraria posta uguale a zero:

$$\hat{H} \simeq q x_1 \mathcal{E}_1(t) + q x_2 \mathcal{E}_2(t) + q x_3 \mathcal{E}_3(t). \tag{2.28}$$

Allo scopo di stimare le autofunzioni dell'equazione di Schrödinger si è soliti ipotizzare un atomo formato da un solo protone ed elettrone (*configurazione idrogenoica* [15]). In particolare, tale configurazione viene utilizzata anche per studiare il comportamento di atomi complessi; com'è noto dalla chimica, l'elettrone più "attivo" è quello più esterno, per cui ogni configurazione atomica può essere ricondotta a una struttura simil idrogeno.

Saltando il calcolo delle autofunzioni e valutando dunque l'equazione (2-21), possiamo scrivere:

$$h_{ji} = \int_{\Omega} \omega_j^* \sum_{n=1}^3 q x_n \mathcal{E}_n(t) \omega_i d^3 r = q \sum_{n=1}^3 \lambda_{ji}^n \mathcal{E}_n(t)$$
 (2.29)

dove  $\lambda_{ji}^n = \int_{\Omega} \omega_j^* x_n \omega_i d^3 r$  è detto momento del dipolo elettrico. Eseguendo ora la

trasformata di Fourier si ottiene la probabilità di transizione:

$$\mathcal{F}\left\{h_{ji}\right\} = q \sum_{n=1}^{3} \lambda_{ji}^{n} \int_{0}^{t_{p}} \mathcal{E}_{n}\left(t\right) \exp(-j\varpi_{ji}t) dt$$
 (2.30)

dove  $\varpi_{ji} = (E_j - E_i)/\hbar$  essendo  $E_j$  e  $E_i$  gli autovalori di  $\omega_j$  e  $\omega_i$ . Tuttavia bisogna ancora considerare le diverse tipologie di orbitali, ognuno dei quali a sua volta può contenere due elettroni a spin opposto (i e j indicano semplicemente il numero quantico principale  $\mathbf{n}$ ), dobbiamo dunque integrare tale funzione sui diversi tipi di orbitali e spin (numeri quantici  $\mathbf{l}$  e  $\mathbf{m}$ ):

$$\mathcal{F}\left\{h_{ji}\right\} = \frac{q^2}{\hbar^2} \sum_{n=1}^{3} \left(\lambda_{ji}^n\right)^* \lambda_{ji}^s k_{ji}^{ns}$$
 (2.31)

dove  $k_{ii}^{ns}$  è:

$$k_{ji}^{ns} = \int_{0}^{t_p} \int_{0}^{t_p} \mathcal{E}_n(t) \mathcal{E}_s(t') \exp\left[-j\varpi_{ji}(t'-t)\right] dt' dt$$
 (2.32)

Attraverso semplici trasformazioni matematiche e ipotizzando un campo elettrico incorrelato, si può esprimere l'equazione (2.30) attraverso una funzione di autocorrelazione, ottenendo una nuova rappresentazione della probabilità di transizione:

$$P_{ji} = t_p \frac{q^2}{\hbar^2} \sum_{n=1}^{3} \left| \lambda_{ji}^n \right|^2 \int_{-t_p}^{+t_p} C_{nn}(\tau) \exp(-j\varpi_{ji}\tau) \quad \text{dove} \quad \tau = t' - t$$
 (2.33)

e

$$C_{nn}(\tau) = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \mathcal{E}_n(t) \mathcal{E}_n(t+\tau) dt$$
 (2.34)

Combinando infine il teorema di Wiener e Khinchin col più celebre teorema di Parseval otteniamo:

$$2\pi \int_{0}^{t_{p}} \mathcal{E}_{n}^{2} dt = \int_{0}^{+\infty} \left| \mathcal{F} \mathcal{E}_{n} \right|^{2} d\varpi = 2t_{p} \int_{0}^{+\infty} \left| \mathcal{F} \mathcal{C}_{nn} \right|^{2} d\varpi$$
 (2.35)

Per l'analisi completa è ora necessario definire la dipendenza nel tempo del campo elettrico. Assumiamo che il campo elettrico sia polarizzato lungo l'asse  $x_3$  imponendo  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 0$ , da cui avremo:

$$h_{ji} = q\lambda_{ji}^3 \mathcal{E}_3 \int_{\Omega} \omega_i^* x_3 \omega_j d^3 r$$
 (2.36)

e consideriamo un campo di tipo armonico:

$$\mathcal{E}_{3} = \begin{cases} \mathcal{E}_{30}/2 \Big[ \exp(j\varpi_{0}t) + \exp(-j\varpi_{0}t) \Big] & 0 < t < t_{p} \\ 0 & t < 0 ; t > t_{p} \end{cases}$$
(2.37)

avremo per t=0,  $h_{ji}=q\lambda_{ji}^3 \mathcal{E}_{30}/2$  e nell'ipotesi di  $\varpi_0 t \gg 1$  possiamo esprimere la probabilità di transizione come:

$$P_{ji} = 2\pi \frac{q^2 \left| \lambda_{ji}^3 \right|^2 \mathcal{E}_{30}^2}{4\hbar^2} \left[ \delta \left( \boldsymbol{\varpi}_{ji} + \boldsymbol{\varpi}_0 \right) + \delta \left( \boldsymbol{\varpi}_{ji} - \boldsymbol{\varpi}_0 \right) \right] t_p$$
 (2.38)

Considerando ora il teorema di Pointing, che ci definisce l'energia del campo elettromagnetico per unità di volume:

$$W_{em}(r,t) = \frac{1}{2} \left( \varepsilon_0 \mathcal{E}^2 + \mu_0 H^2 \right)$$
 (2.39)

e che, nel caso armonico, la media temporale di tal energia è composta in egual maniera dalla parte elettrica e dalla parte magnetica, possiamo scrivere:

$$\frac{1}{t_{p}} \int_{0}^{t_{p}} w_{em}(r,t) dt = \frac{1}{2t_{p}} \int_{0}^{t_{p}} (\varepsilon_{0} \mathcal{E}^{2} + \mu_{0} H^{2}) dt = 
= \frac{\varepsilon_{0}}{t_{p}} \int_{0}^{t_{p}} \mathcal{E}^{2} dt = \frac{\varepsilon_{0}}{t_{p}} \sum_{n=1}^{3} \int_{0}^{t_{p}} \mathcal{E}_{n}^{2} dt = 3 \frac{\varepsilon_{0}}{t_{p}} \int_{0}^{t_{p}} \mathcal{E}_{n}^{2} dt$$
(2.40)

con la quale sfruttando l'equazione (2-34) avremo:

$$\frac{1}{t_{p}} \int_{0}^{t_{p}} w_{em}(r,t) dt = \frac{3\varepsilon_{0}}{\pi} \int_{0}^{+\infty} \left| \mathcal{F} \mathcal{C}_{nn} \right|^{2} d\varpi$$
 (2.41)

Ora, sfruttando l'uguaglianza tra la media nel tempo dell'energia del campo elettromagnetico e la sua densità spettrale:

$$\frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} w_{em}(r,t) dt = \int_0^\infty \tilde{u}(\varpi) d\varpi$$
 (2.42)

troviamo l'espressione  $\mathcal{FC}_{nn} = \pi \tilde{u}(\varpi)/(3\varepsilon_0)$  da cui la probabilità di transizione diviene:

$$P_{ji} = t_p \frac{\pi q^2}{3\varepsilon_0 \hbar^2} \sum_{n=1}^{3} \left| \lambda_{ji}^n \right|^2 \tilde{u}(\varpi) = t_p \frac{\pi q^2 \Lambda_{ji}^2}{3\varepsilon_0 \hbar^2} \tilde{u}(\varpi)$$
 (2.43)

$$\operatorname{con} \Lambda_{ji}^2 = \sum_{n=1}^3 \left| \lambda_{ji}^n \right|^2.$$

Infine utilizzando la definizione della densità di energia del campo elettromagnetico all'equilibrio termico:

$$u(v) = \frac{8\pi h v^3/c^3}{\exp\left[hv/(k_B T)\right] - 1} \quad \Rightarrow \quad \tilde{u}(w) = \frac{\hbar |w|^3/(\pi^2 c^3)}{\exp\left[\hbar |w|/(k_B T)\right] - 1}$$
(2.44)

Otteniamo una probabilità di ricombinazione radiativa per  $t_p \to \infty$  pari :

$$P_{ji} = \frac{\pi q^2 \Lambda_{ji}^2}{3\varepsilon_o \hbar^2} \tilde{u}(\varpi)$$
 (2.45)

Infine utilizzando l'equazione (2.19) avremo che il tempo di vita di ricombinazione radiativa è:

$$\frac{1}{\tau_{ii}} = \frac{q^2 \varpi_{ji}^3}{3\pi \varepsilon_0 \hbar c^3} \Lambda_{ji}^2 \tag{2.46}$$

In particolare è importante fare due osservazioni: la prima è l'esplicita dipendenza, sia del tempo di vita sia della probabilità di transizione, dalle caratteristiche intrinseche del semiconduttore; la seconda, più importate per il nostro studio, è la mancanza di dipendenza dalla temperatura.

Nel successivo paragrafo sarà più chiaro quanto questa caratteristica influenzi il comportamento dei diodi emettitori di luce.

#### 2.2.2.3 Ricombinazione non-radiativa

Ci sono molteplici meccanismi non radiativi che possono determinare *ricombinazione*: un elettrone può cedere parte della sua energia al reticolo sotto forma di fonone, oppure scambiare energia con un altro elettrone, o ancora può rimanere intrappolato all'interno di un'imperfezione del reticolo (la cattura di un elettrone è considerata un processo di ricombinazione poiché priva di una carica la banda di conduzione). Nei prossimi paragrafi presenteremo e descriveremo quelli maggiormente impattanti nel funzionamento dei LED.

#### 2.2.2.3.1 Ricombinazione Shockley-Read-Hall

Uno dei più noti meccanismi di ricombinazione fu per la prima volta analizzato nel 1952 da Shockley, Read e Hall e da loro prende il nome. Questo tipo di ricombinazione è dovuta alla presenza di difetti nelle strutture cristalline che

definiscono il semiconduttore (dislocazioni, mancanze di atomi e cambiamento della costante reticolare). Tali difetti definiscono dei nuovi livelli energetici all'interno del semiconduttore ed è abbastanza comune che questi si pongano all'interno del *gap proibito*. Questi livelli energetici divengono così dei centri di ricombinazione molto efficienti, diventando il tipo di ricombinazione dominante.

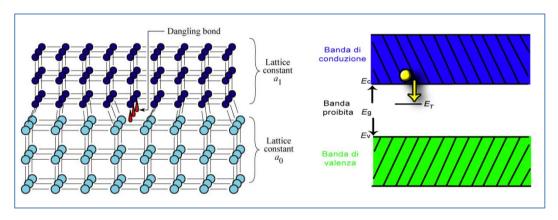


Figura 2-9 La presenza di un imperfezione reticolare determina la creazione di un nuovo livello energetico. L'accostamento di semiconduttori a diversa costante reticolare è la prima causa di realizzazione di dislocazioni.

Ipotizziamo la presenza di un livello energetico "trappola" di energia  $E_T$  a concentrazione  $N_T$ . Il tasso di ricombinazione è proporzionale alla concentrazione delle trappole  $(N_T)$ , ai portatori di carica  $(p_0 + \Delta p; n_0 + \Delta n)$  e alla capacità di cattura dei difetti. Mentre questo è inversamente proporzionale alla concentrazione dei portatori di carica nel livello trappola stesso.

Attraverso dei semplici passaggi matematici il tasso di ricombinazione può essere espresso come:

$$R_{SR} = \frac{p_0 \Delta n + n_0 \Delta p + \Delta n \Delta p}{\left(N_T v_p \sigma_p\right)^{-1} \left(n_0 + n_1 + \Delta n\right) + \left(N_T v_n \sigma_n\right)^{-1} \left(p_0 + p_1 + \Delta p\right)}$$
(2.47)

dove  $\Delta n = \Delta p$  (caso stazionario);  $v_p$  e  $v_n$  sono le velocità termiche delle lacune e degli elettroni, e  $\sigma_p$  e  $\sigma_n$  sono le sezioni di cattura delle trappole stesse. Mentre le quantità  $p_1$  e  $n_1$  sono le concentrazioni delle lacune e degli elettroni:

$$n_1 = n_i \exp\left(\frac{E_T - E_{Fi}}{kT}\right) \quad e \quad p_1 = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_T}{kT}\right)$$
 (2.48)

dove  $E_{Fi}$  è il livello di Fermi in un semiconduttore intrinseco.

Allora il tempo di vita dei portatori di carica può essere espresso:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{p_0 + n_0 + \Delta n}{\left(N_T v_p \sigma_p\right)^{-1} \left(n_0 + n_1 + \Delta n\right) + \left(N_T v_n \sigma_n\right)^{-1} \left(p_0 + p_1 + \Delta p\right)}$$
(2.49)

Nel caso di semiconduttore drogato di tipo  $\,p\,$ , essendo  $\,p_0\gg n_0^{}$ , il tempo di vita diviene:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{n_0}} = N_T v_n \sigma_n \tag{2.50}$$

Mentre se consideriamo un semiconduttore drogato di tipo n , essendo  $n_0 \gg p_0$  avremo:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{p_0}} = N_T v_p \sigma_p \tag{2.51}$$

Le espressioni (2-49) e (2-50) mostrano che il tasso di ricombinazione è limitato dal tasso di cattura delle cariche minoritarie ( $v_p \sigma_p$  e  $v_n \sigma_n$ ).

L'equazione (2-48) può essere riscritta come:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{p_0 + n_0 + \Delta n}{\tau_{p_0} (n_0 + n_1 + \Delta n) + \tau_{n_0} (p_0 + p_1 + \Delta p)}$$
(2.52)

In particolare se ipotizziamo che le trappole abbiano la stessa probabilità di catturare sia di elettroni sia di lacune  $(v_p\sigma_p=v_n\sigma_n\to\tau_{p_0}=\tau_{n_0})$  e che siamo poco lontani dall'equilibrio  $(n_0\gg\Delta n\,;\,p_0\gg\Delta p)$ , l'equazione può essere ulteriormente semplificata:

$$\tau = \tau_{n_0} \left( 1 + \frac{p_0 + p_1}{p_0 + n_0} \right) \tag{2.53}$$

Nel caso di un semiconduttore intrinseco (  $p_0 = n_0 = n_i$  ) in particolare avremo:

$$\tau_{i} = \tau_{n_{0}} \left( 1 + \frac{p_{1} + n_{1}}{2n_{i}} \right) = \tau_{n_{0}} \left[ 1 + \cosh\left(\frac{E_{T} - E_{Fi}}{kT}\right) \right]$$
(2.54)

dove  $E_{Fi}$  in questo caso è posto a metà del gap proibito.

Analizzando l'espressione ottenuta si nota che il tempo di vita minimo si avrà quando il livello energetico della trappola sarà uguale al livello di Fermi ( $E_T = E_{Fi}$ ). In altre parole, più le trappole definiranno livelli energetici vicino alla metà del gap proibito, più esse saranno degli efficienti centri ricombinativi.

L'equazione (2-53) rivela una dipendenza dalla temperatura; a un aumento della temperatura il tempo di vita della ricombinazione radiativa decresce. Questo

significa che all'aumentare della temperatura questo tipo di ricombinazione aumenta la propria efficienza a discapito della probabilità di ricombinazione radiativa. In generale, dunque, abbiamo che a un aumento della temperatura corrisponde una diminuzione dell'efficienza del dispositivo.

Tuttavia come abbiamo visto nel capitolo precedente in alcuni casi si utilizzano proprio le impurità per definire i livelli energetici adibiti all'emissione (vedi 2.1.4), in questo caso a un aumento della temperatura coincide un aumento dell'efficienza. Lo stesso comportamento lo hanno anche i dispositivi che utilizzano la transizione inter-banda tra *gap-indiretti*, infatti in questo caso è necessaria l'iterazione elettrone-fonone, i quali sono fortemente legati alla temperatura.

## 2.2.2.3.2 Ricombinazione Auger

La ricombinazione Auger descrive il processo fisico dello scambio di energia elettrone-elettrone, in *banda di conduzione*, o lo scambio di energia lacuna-lacuna, in *banda di valenza*, nel quale le particelle si scambiano energia in modo tale che una delle due passi nell'altra banda energetica (Figura 2-5 b).

In questo caso il tasso di ricombinazione è proporzionale al quadrato della concentrazione della particella considerata, lacuna o elettrone (abbiamo bisogno di due particelle che interagiscano), e alla concentrazione dell'altro tipo di portatore di carica (es.: un elettrone cede energia a un altro elettrone nella banda di conduzione e passa in banda di valenza, dove ricombina con una lacuna). L'equazione (2.55) rappresenta la formulazione matematica classica:

$$R_{Auger} = C_p n p^2 + C_n n^2 p \tag{2.55}$$

dove i due coefficienti  $C_p$  e  $C_n$  tengono conto della differente incidenza della ricombinazione Auger tra banda di conduzione e valenza.

La ricombinazione Auger diviene importante solo in caso di funzionamento del dispositivo ad alte correnti; solo in questo caso si avranno concentrazioni tali da rendere probabile l'iterazione tra due particelle nella stessa banda.

### 2.2.2.3.3 Ricombinazione alle superfici

Un ulteriore tipo di ricombinazione non radiativa è la ricombinazione dovuta alla presenza di un'interruzione del reticolo in caso di un'interfaccia, *ricombinazione alle superfici*. In tali regioni l'interruzione della periodicità del reticolo del semiconduttore e di conseguenza delle bande energetiche genera la formazione di aggiuntivi livelli energetici che divengono centri di ricombinazione non radiativa.

Per questo tipo di ricombinazione non si ha una trattazione rigorosa poiché le strutture delle superfici dipendono dallo specifico dispositivo e dal semiconduttore considerato, per cui i centri di ricombinazione che si realizzano sono di difficile predizione.

Questo tipo di processo, tuttavia, influenza di molto le prestazioni dei dispositivi, sia attraverso la riduzione dell'efficienza luminosa sia attraverso un particolare processo termico che s'instaura nella regione dell'interfaccia. Di fatto l'interfaccia localizza le imperfezioni in un'esigua regione nella quale il verificarsi di numerose ricombinazioni determina sviluppo di calore.

In particolare, è importante notare che per far sì che si verifichi la *ricombinazione* alle superfici devono esser presenti entrambe le tipologie di cariche, elettrone e lacuna. Nota questa caratteristica, ecco spiegato il motivo per cui in un dispositivo LED si cerca di evitare la presenza di discontinuità prossime alla regione attiva. Poiché in quest'ultimo caso ci sarebbe un predominio della ricombinazione alle superfici a discapito dell'efficienza luminosa, con un ulteriore effetto termico che come vedremo influenza notevolmente le prestazioni.

# 2.2.3 Spettro di emissione

In questo breve paragrafo consideriamo la ricombinazione radiativa dal punto di vista energetico descrivendo l'iterazione elettrone-fotone attraverso la **relazione** di dispersione delle cariche approssimata al secondo grado (approssimazione parabolica [13]).

La fisica quantistica descrive le iterazioni particellari tramite il principio di conservazione dell'energia e il principio di conservazione del momento.

# 2.2.3.1 Principio di conservazione del momento

Per una particella avente energia  $k_BT$  e massa  $m^*$  il momento è pari:

$$p = m^* v = \sqrt{2m^* \frac{1}{2} m^* v^2} = \sqrt{2m^* k_B T}$$
 (2.56)

dove v è la velocità posseduta dalla particella. Mentre il momento del fotone secondo la relazione di de Broglie è pari a:

$$p = \hbar k = \frac{hv}{c} = \frac{E_g}{c} \tag{2.57}$$

È facile notare come utilizzando le formule (2-56) e (2-57) per il calcolo rispettivamente del momento di un elettrone e di un fotone il primo risulta di qualche ordine maggiore del secondo. In pratica nella ricombinazione radiativa il momento dell'elettrone non varia e quindi saranno ammesse solo transizioni verticali dalla banda di conduzione alla banda di valenza. Gli elettroni ricombinano radiativamente solo con lacune che possiedono lo stesso vettore d'onda (k).

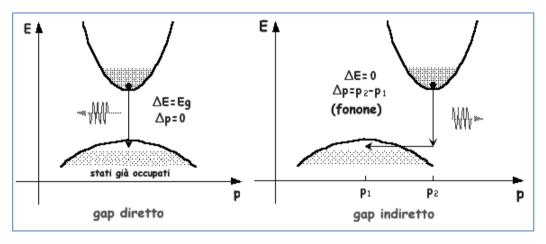


Figura 2-10 Rappresentazione schematica delle bande energetiche di valenza e conduzione di due semiconduttori a gap diretto e a gap indiretto rispettivamente.

Tale indicazione ci chiarifica come mai la prima tipologia di materiale che ha consentito la realizzazione di un diodo emettitore di luce sia stato l'arseniuro di gallio AsGa. Infatti questo tipo di materiale ha il caratteristico **gap diretto**, cioè la valle minima della banda di conduzione è posta in corrispondenza della valle minima della banda di valenza favorendo la ricombinazione di tipo radiativo, in

quanto la transizione può avvenire in accordo al principio appena enunciato (Figura 2-10).

Nei semiconduttori a **gap indiretto** invece la transizione non può avvenire direttamente in quanto per la conservazione del momento è necessario l'intervento di un'altra particella con energia piccola ma grande quantità di moto (ad esempio un fonone).

Nei semiconduttori a gap indiretto è quindi meno probabile che avvenga la transizione, e infatti per favorire processi radiativi vengono realizzati speciali centri di ricombinazione ottenuti inserendo nel reticolo impurezze utili a modellizzare le bande energetiche. In quest'ultime si creano dunque dei livelli "trappola", come quelli visti nella ricombinazione Auger, che permettono di ottenere configurazioni simili al gap diretto (centri isoelettronici).

# 2.2.3.2 Principio di conservazione dell'energia

Consideriamo l'energia di un elettrone in banda di conduzione e di una lacuna in banda di valenza:

$$E_{e} = E_{C} + \frac{\hbar^{2}k^{2}}{2m_{e}^{*}}$$
 per gli elettroni  

$$E_{h} = E_{V} - \frac{\hbar^{2}k^{2}}{2m_{h}^{*}}$$
 per le lacune (2.58)

dove  $m_e^*$  e  $m_h^*$  sono le masse effettive, mentre k è il vettore d'onda delle cariche. Imponiamo quindi la conservazione dell'energia ottenendo la relazione già vista:

$$hv = E_e - E_h \approx E_g \tag{2.59}$$

che ci afferma che la frequenza del fotone emesso è direttamente proporzionale al salto energetico e cioè alla banda proibita del semiconduttore. Pertanto, per selezionare la frequenza di emissione si sceglie un semiconduttore a band gap adatto allo scopo. Tuttavia questa semplice relazione è valida solo nel caso in cui l'energia termica posseduta dalle cariche risulta molto piccola  $(k_BT \ll E_g)$ .

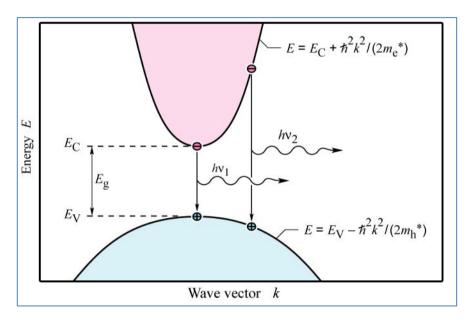


Figura 2-11 Nelle strutture interne dei LED non si ha la possibilità di selezionare un unico salto energetico, i livelli interessati dal fenomeno di emissione saranno selezionati in base all'energia posseduta dalle cariche. Sarà dunque possibile il verificarsi di ricombinazioni radiative per più livelli energetici, con la definizione di uno spettro emissivo non propriamente monocromatico.

Nel caso generale invece bisogna considerare come le cariche si dispongono all'interno dei livelli energetici del semiconduttore, in prima approssimazione si può passare a considerare le concentrazioni delle cariche attraverso la **statistica di Fermi** e alla **densità degli stati**.

In particolare dalle relazioni (2-58) e (2-59) otteniamo:

$$hv = E_C + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} - E_V + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_r^*}$$
 (2.60)

dove i termini  $\hbar^2 k^2/2m_{e,h}^*$  corrispondono all'energia cinetica dei portatori di carica all'interno del reticolo e definiscono i livelli energetici quantizzati. Definendo una massa "ridotta"  $m_r^*$  possiamo riferire la densità degli stati a un'unica particella. In particolare abbiamo posto:

$$\frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \tag{2.61}$$

La densità degli stati diviene dunque:

$$N(E) = \frac{1}{2\pi^2} \frac{(2m_r)^{3/2}}{\hbar^3} (E - E_g)^{1/2}$$
 (2.62)

Come abbiamo detto le cariche si disporranno su tali livelli secondo la statistica di Fermi:

$$F(E) = \frac{1}{1 + \exp(E - E_F/k_B T)} \cong e^{-E/(k_B T)}$$
 (2.63)

Otteniamo dunque che l'intensità spettrale di emissione risulta proporzionale al prodotto della densità degli stati per la probabilità di occupazione:

$$I(E) \propto e^{-\frac{E}{k_B T}} \sqrt{(E - E_g)}$$
 (2.64)

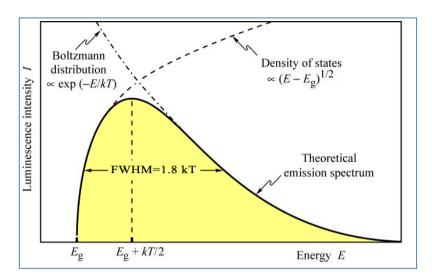


Figura 2-12 Spettro emissivo teorico di un LED. L'ampiezza a metà altezza è pari a 1.8 kT, direttamente proporzionale alla temperatura.

Com'è visibile dalla figura sovrastante avremo un'emissione dipendente dalla temperatura e non monocromatica. Come sarà meglio chiarito in seguito, la temperatura influenza notevolmente le caratteristiche elettrico-ottiche dei diodi LED, tuttavia l'aspetto di non monocromaticità è legato all'incapacità di selezionare un singolo salto energetico all'interno del dispositivo senza dover complicare eccessivamente l'architettura del dispositivo. Ad esempio gli RCLED sono una risposta a questo tipo di problema, si realizza una cavità risonante a singola frequenza come nei LASER, ciò nonostante la nostra trattazione è rivolta ad altri tipi di dispositivi più economici.

# 2.3 Struttura dei LED

Dopo aver presentato gli aspetti fisici alla base del funzionamento dei LED, vediamo come i ricercatori e gli attuali produttori realizzano questi dispositivi. Dopo una breve introduzione sul funzionamento di una giunzione P-N e sulle caratteristiche elettriche che ne derivano, ci soffermeremo sul design e sul packaging.

## **2.3.1** Giunzione *P-N*

Alla base del funzionamento dei LED abbiamo la giunzione P-N, una delle più semplici strutture ideate dalla microelettronica, realizzata tramite l'accostamento di due regioni a drogaggio opposto: p e n [16].

Le regioni di tipo P sono realizzate attraverso l'introduzione d'impurità, detti **accettori**, che introducono nella banda proibita un livello prossimo all'estremità superiore della banda di valenza, realizzando un livello "trappola" per gli elettroni, che non saranno disponibili alla conduzione ma che tuttavia avranno lasciato posti vacanti in banda di valenza accrescendo la concentrazione delle lacune. Quindi in definitiva nella regione di tipo P le lacune risulteranno le cariche maggioritarie e gli elettroni le cariche minoritarie.

Mentre le regioni di tipo N sono realizzate attraverso l'introduzione di atomi **donatori** che introducono un livello prossimo all'estremità inferiore della banda di conduzione rendendo disponibile un nuovo elettrone alla banda di conduzione

Struttura dei LED 59

stessa. In questo caso gli elettroni risulteranno le cariche maggioritarie mentre le lacune le cariche minoritarie.

Consideriamo, dunque, una giunzione P-N brusca con una concentrazione di donatori pari a  $N_D$  e di accettori pari a  $N_A$ . Tutti i droganti vengono considerati completamente ionizzati in modo che la concentrazione di elettroni liberi è data da  $n=N_D$  e la concentrazione di lacune libere è data da  $p=N_A$ . Si assume inoltre che nessuna variazione delle concentrazioni delle cariche libere è determinata da impurità e/o difetti involontari.

All'atto della formazione della giunzione, all'interfaccia viene a crearsi una forte discontinuità delle concentrazioni dei portatori di carica, lacune ed elettroni. Infatti, nella regione di tipo p avremo un'alta concentrazione di lacune, dovuto al drogaggio, mentre nella regione di tipo p gli elettroni saranno in maggior numero. All'interfaccia avremo dunque un flusso di cariche che per diffusione si muoveranno verso le regioni a più bassa concentrazione; gli elettroni dalla regione di tipo p a quella di tipo p, le lacune dalla regione di tipo p a quella di tipo p. Questo evento determina un intenso fenomeno di ricombinazione essendo i portatori di carica libera in eccesso rispento alla condizione di equilibrio. Tale processo se non intervenisse un ulteriore fenomeno fisico determinerebbe l'equalizzarsi delle concentrazioni.

Infatti in prossimità dell'interfaccia il fenomeno di ricombinazione determina una diminuzione delle cariche libere che non eguagliando più le cariche fisse dei droganti ionizzati determinando l'instaurarsi di un potenziale elettrico che ostacola il flusso delle cariche libere derivante dalla diffusione. Si vengono a

creare due **regioni di svuotamento** o **carica spaziale**. Nella regione P avremo cariche negative, nella regione N cariche positive (Figura 2-13). Le regioni lontane dalla giunzione non risentono dell'interfaccia e per tale motivo sono dette **neutre**.

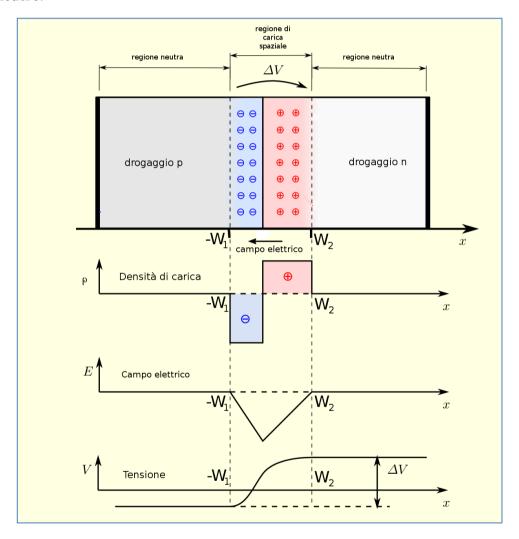


Figura 2-13 Schematizzazione di una giunzione P-N brusca. La figura mostra gli andamenti della densità di carica spaziale, del campo elettrico e della tensione lungo l'interfaccia.

Struttura dei LED 61

Il potenziale elettrico derivante dalle cariche spaziali all'interfaccia può essere espresso:

$$V_D = \frac{k_B T}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \tag{2.65}$$

essa rappresenta anche la barriera di potenziale che le cariche mobili devono superare per muoversi attraverso l'interfaccia *p-n*. Mentre la lunghezza della regione di svuotamento è data:

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left( V_D - V \right) \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$
 (2.66)

dove  $\varepsilon$  è la permettività elettrica del semiconduttore e V è l'eventuale tensione di polarizzazione esterna della giunzione.

# 2.3.1.1 Polarizzazione di una giunzione P-N

L'applicazione di una tensione esterna a una giunzione permette di modificare le regioni di svotamento modificando l'andamento del potenziale lungo il semiconduttore, stiamo parlando di **polarizzazione della giunzione**. Si ha *polarizzazione diretta* quando una tensione positiva viene applicata al semiconduttore di tipo P mentre al semiconduttore di tipo N è applicata una tensione negativa; la prima respinge le lacune della regione P verso il semiconduttore di tipo N mentre la seconda respinge gli elettroni della regione N verso il semiconduttore di tipo P.

Nel LED è proprio questa configurazione che definisce il suo funzionamento, all'interfaccia della giunzione le due tipologie di cariche s'incontreranno realizzando un intenso fenomeno di ricombinazione (Figura 2-14). In particolare per i LED la regione nei pressi dell'interfaccia viene detta **regione attiva**, essendo questa l'area dove si ha l'emissione dei fotoni per ricombinazione radiativa.

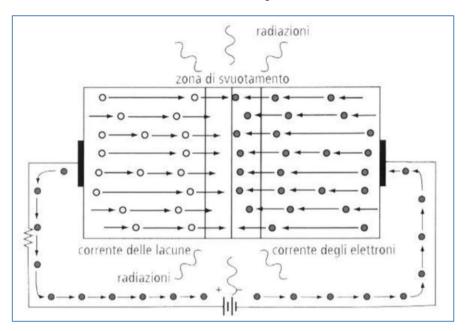


Figura 2-14 Moto delle cariche in una giunzione P-N in caso di polarizzazione diretta.

La *polarizzazione indiretta* invece si ha quando una tensione negativa viene applicata al semiconduttore di tipo P mentre al semiconduttore di tipo N è applicata una tensione positiva; in questo caso le lacune nella regione P vengono attirate verso il proprio contatto elettrico e contemporaneamente gli elettroni nella regione N sono attirati verso il contatto della regione stessa.

Nel caso di polarizzazione diretta si ha una diminuzione della regione di svuotamento e del potenziale, per cui le cariche riusciranno a muoversi da una regione all'altra, mentre nel caso opposto si ha un aumento sia della regione a Struttura dei LED 63

carica fissa che del potenziale, e le cariche risulteranno relegate nella propria regione di appartenenza (relazione 2-66).

In polarizzazione diretta s'instaura una corrente elettrica definita da una componente diffusiva e una componente di deriva. Per tensioni di polarizzazioni basse la corrente sarà quasi esclusivamente di tipo diffusivo, cioè dovuta alla differenza di concentrazione delle cariche tra le due regioni. Per tensioni alte la corrente sarà quasi esclusivamente di deriva, cioè di natura ohmica.

Nella polarizzazione inversa invece si ha l'instaurarsi di una piccola corrente di saturazione dovuta all'estrazione di cariche dalla regione di svuotamento a causa dell'aumento del potenziale di giunzione.

L'equazione seguente descrive la caratteristica *corrente-tensione* (I-V) di una giunzione p-n:

$$I = qA \left( \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right) \left( e^{eV/k_B T} - 1 \right)$$
 (2.67)

dove  $D_{p,n}$  e  $\tau_{p,n}$  sono le costanti di diffusione e i tempi di vita rispettivamente delle lacune e degli elettroni. In particolare l'equazione (2-67) può essere riscritta nella sua forma più nota definendo la *corrente di saturazione*, di fatto per polarizzazioni inverse la (2-67) diviene:

$$I_{\underline{V<0}} = -qA \left( \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} \frac{n_i^2}{N_A} \right) = I_S$$
 (2.68)

Mentre per polarizzazioni dirette, essendo  $V \gg k_B T$  possiamo porre  $\exp(eV/k_B T) - 1 \approx \exp(eV/k_B T)$ . Quindi riprendendo l'equazione (2-65) avremo:

$$I_{\underline{\hspace{1cm}} V>0} \rightarrow qA \left( \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} N_A + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} N_D \right) e^{e(V-V_D)/k_B T}$$
 (2.69)

L'esponente della funzione esponenziale in (2-69) mostra che la corrente aumenta fortemente quando la tensione del diodo si avvicina alla tensione di diffusione, cioè quando  $V \approx V_D$ . La tensione alla quale la corrente aumenta fortemente è detta anche **tensione di soglia**  $V_{th}$ .

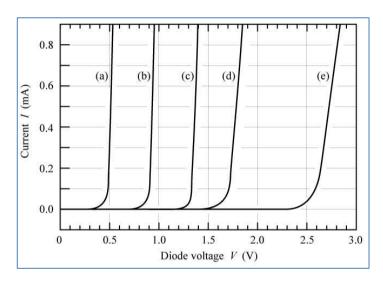


Figura 2-15 Caratteristica corrente-tensione al variare del semiconduttore utilizzato. a) Ge:  $E_g$ =0.7 eV; b) Si:  $E_g$ =1.1 eV; c) GaAs:  $E_g$ =1.4 eV; d) GaAsP:  $E_g$ =2.0 eV; e) GaInN:  $E_g$ =2.9 eV; In particolare quest'ultima caratteristica si discosta dalle altre per motivi tecnologici. La banda proibita così pronunciata definisce una tensione di soglia additiva e inoltre i substrati a nitruro risultano avere conducibilità basse.

Struttura dei LED 65

#### 2.3.1.2 Deviazione dalla caratteristica ideale

Le equazioni viste in precedenza rappresentano il funzionamento ideale di una giunzione, tuttavia all'interno di un dispositivo LED numerosi fattori allontanano il funzionamento reale da quello ideale. La corrente che scorre all'interno dei dispositivi può essere espressa come:

$$I = I_{s} \exp(qV/n_{ideale}k_{B}T) \tag{2.70}$$

dove  $n_{ideale}$  rappresenta il *fattore correttivo*. In un diodo ideale tale fattore assume valore pari a 1, mentre per un diodo reale tale fattore dipende dalle caratteristiche microscopiche del diodo stesso (es.  $n \gg 2.0$  per LED realizzati in AlGaN/GaN [17]).

Un importante fattore che allontana la caratteristica I-V dall'idealità sono la presenza di resistenze parassite. In particolare possiamo avere resistenze parassite in serie, dovute alle resistenze di contatto o a imperfezioni delle superfici, o in parallelo, dovute a canali conduttivi paralleli alla giunzione. In questo caso la relazione (2.70) diviene:

$$I - \frac{\left(V - IR_S\right)}{R_P} = I_S e^{q\left(V - IR_S\right)/n_{ideale}k_BT}$$
(2.71)

Inoltre le equazioni viste in precedenza non tengono conto dei fenomeni di generazione e ricombinazione. Infatti a basse tensioni di polarizzazione diretta la ricombinazione è il fenomeno dominante e di fatto interviene modificando la corrente attraverso il *fattore correttivo*. Mentre in polarizzazione inversa l'aumento della regione di svuotamento comporta l'instaurarsi di un importate

fenomeno di generazione che, di fatto, aumenta la corrente di saturazione. Inoltre la corrente di saturazione può essere alimentata anche da importanti fenomeni di generazione dovute all'assorbimento di fotoni.

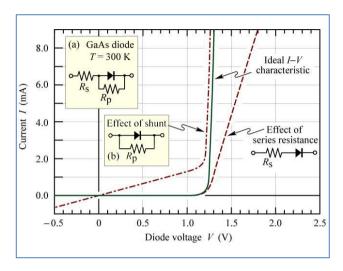


Figura 2-16 Non idealità nella caratteristica I-V di un LED. La presenza di resistenze parassite modifica le caratteristiche elettriche: a) effetto della presenza di resistenze serie/parallelo; b) modifica della tensione di soglia per la presenza di difetti reticolari.

#### 2.3.2 Giunzione *P-N* nei LED

I LED ad alta brillanza non sono realizzati con le semplici **omo-giunzioni** sin qui presentate ma con **etero-giunzioni**, le quali hanno dei chiari vantaggi che in questo paragrafo brevemente presenteremo (le caratteristiche elettriche e fisiche presentate sin ora continuano a rimaner valide) [18], [19].

I dispositivi a etero-giunzione sono realizzati con due diversi tipi di semiconduttori, di solito uno a piccolo gap proibito e l'altro a grande gap. Se una struttura è definita da due sole barriere di potenziale allora la struttura è detta Struttura dei LED 67

double heterostructure (da cui deriva il nome *DH*). La Figura 2-17 descrive l'andamento delle bande energetiche all'interno di un dispositivo LED sia che esso sia di tipo omo-giunzione che etero-giunzione.

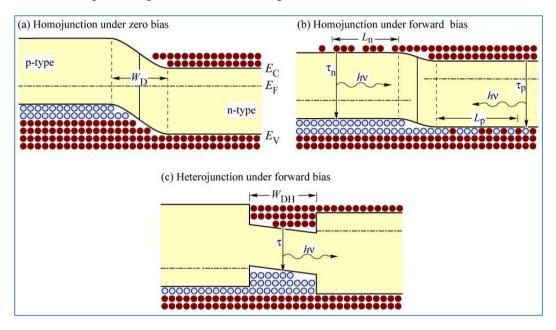


Figura 2-17 In caso di polarizzazione le strutture ad etero-giunzione permettono la concentrazione dei portatori di carica in regioni spazialmente localizzate. a) e b) Andamento delle bande energetiche in una struttura a omo-giunzione nel caso di non polarizzazione e in polarizzazione rispettivamente; c) Andamento delle bande energetiche in una struttura a etero-giunzione nel caso di polarizzazione.

Si può facilmente notare come una struttura del secondo tipo sia molto più efficiente.

Infatti, consideriamo le constanti di diffusione e le relative lunghezze di diffusione derivanti dalle relazioni di Einstein:

$$D_{n} = \frac{k_{B}T}{q} \mu_{n}$$

$$D_{p} = \frac{k_{B}T}{q} \mu_{p}$$

$$L_{n} = \sqrt{D_{n}\tau_{n}}$$

$$L_{p} = \sqrt{D_{p}\tau_{p}}$$

$$(2.72)$$

dove  $\mu_n$  e  $\mu_p$  sono le mobilità degli elettroni e delle lacune. Le lunghezze di diffusione rappresentano la media distanza che le cariche libere riescono a percorrere prima che si ricombinino. In un dispositivo LED a omo-giunzione esse definiscono la regione attiva nella quale avviene l'emissione spontanea.

Nelle strutture a etero-giunzione invece attraverso la creazione di una doppia barriera di potenziale si riesce a confinare le cariche libere all'interno di buche di potenziale, determinando il confinamento spaziale della regione attiva. Questo permette di ottenere delle alte concentrazioni localizzate dei portatori di carica con un'importante miglioria della probabilità di ricombinazione radiativa.

Infatti, se consideriamo il tasso di ricombinazione e consideriamo un'eterogiunzione di lunghezza  $L_{\rm W}$  l'equazione (2-3) presentata precedentemente può essere riscritta:

$$R = B \frac{n}{L_w} \frac{p}{L_w} \tag{2.73}$$

Questa mostra che, diminuendo la lunghezza dell'etero-giunzione si può ottenere un aumento del tasso di ricombinazione. Di fatto si aumenta l'efficienza del dispositivo ottico. Struttura dei LED 69

#### 2.3.2.1 Resistenze parassite nelle etero-giunzioni

La criticità nella realizzazione delle etero-giunzioni è data dall'introduzione di resistenze parassite causate dall'interfaccia tra i due o più semiconduttori. Come abbiamo visto le etero-giunzioni consistono nella realizzazione di una struttura P-N nella quale una delle due regioni (solitamente quella di tipo P) è realizzata da due semiconduttori a differente gap proibito.

All'interno di tale struttura i portatori di carica si muoveranno dal semiconduttore a maggiore gap verso quello a gap minore cercando di popolare livelli energetici a più bassa energia. Tale tipo di processo causa la realizzazione di un dipolo elettrico dovuto agli ioni fissi (i droganti) nel primo semiconduttore e alle cariche libere, che saranno in eccesso, nel secondo tipo di semiconduttore. Avremo, dunque, la creazione di un potenziale elettrico che ostacola il passaggio delle cariche libere da una regione all'altra.

Tale potenziale elettrico è proprio la causa della resistenza parassita che si viene a creare all'interno della regione attiva limitando le prestazioni del dispositivo. In pratica le cariche libere si muoveranno da una regione all'altra esclusivamente per *effetto tunnel* causando un ulteriore danno alla regione attiva stessa (com'è noto l'effetto tunnel provoca un deterioramento del semiconduttore) [20], [21].

Per evitare tali inconvenienti si utilizza di solito delle tecniche di *grading* che permettono di eliminare la resistenza parassita (Figura 2-18). Queste consistono nel realizzare in modo graduale il passaggio tra i due semiconduttori.

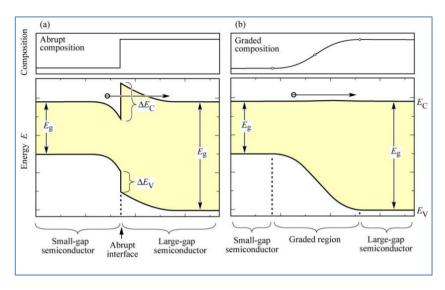


Figura 2-18 Confronto tra gli andamenti delle bande energetiche nel caso di etero-giunzione "brusca" (a) e etero-giunzione realizzata con le tecniche di grading.

#### 2.3.2.2 Dipendenza dalla temperatura delle etero-giunzioni

La distribuzione delle cariche sui livelli energetici, all'interno di un semiconduttore, segue la distribuzione di Fermi che, come abbiamo visto, dipende dalla temperatura. In particolare a un aumento della temperatura corrisponde un aumento dell'energia media posseduta dai portatori di carica concedendo a questi ultimi la capacità di muoversi verso livelli a energia maggiore.

Se consideriamo la conformazione delle etero-giunzioni, tale dipendenza dalla temperatura comporta la possibilità che le cariche possano uscire dalla buca di potenziale, comportando in questo caso la perdita della funzione di confinamento spaziale. Un aumento della temperatura di fatto determina una diminuzione dell'efficienza ottica del dispositivo.

Struttura dei LED 71

Simile ragionamento si può seguire per alte densità di correnti. Infatti un amento della densità della corrente che attraversa il dispositivo determina una perdita di efficienza del dispositivo stesso. Si parla di saturazione del dispositivo, in quanto nella regione attiva per alte iniezioni di correnti il livello di Fermi si sposta verso i livelli energetici superiori sino a eguagliare il livello energetico che definisce la buca di potenziale determinando la saturazione dei livelli energetici. In queste condizioni un ulteriore aumento della corrente non comporterà alcun aumento di emissione luminosa.

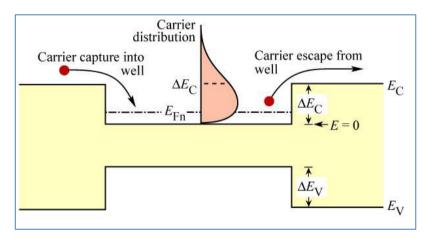


Figura 2-19 Le etero-giunzioni definiscono dei livelli trappola per cariche che possegono un livello di energia inferiore alla differenza tra i gap energetici dei due semiconduttori utilizzati. I portatori di carica ad alta energia possono facilmente sfuggire alla buca di potenziale.

Per eliminare queste problematiche di perdita di efficienza, all'interno di dispositivi a etero giunzioni multiple si utilizza una tecnica detta *electron blockers*, che consiste nel definire un sottile strato ad alto band gap in modo tale da confinare l'intera regione attiva.

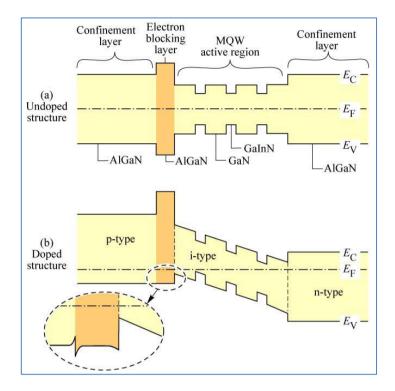


Figura 2-20 Rappresentazione scematica della tecnica electron blockers. a) caso non dopato, b) caso dopato.

# 2.4 Caratterizzazione dei LED

I diodi emettitori di luce vengono caratterizzati attraverso dei semplici parametri che ne descrivono la bontà di conversione elettro-ottica. Una prima definizione, che abbiamo già incontrato in precedenza è l'**efficienza quantica interna** definita come:

$$\eta_{\text{int}} = \frac{\text{numero di fotoni emessi dalla regione attiva}}{\text{numero di elettroni iniettati nel LED/s}} = \frac{P_{\text{int}}/(hv)}{I/q}$$
(2.74)

dove  $P_{\text{int}}$  è la potenza ottica emessa dalla regione attiva e I la corrente iniettata. Questo parametro dipende esclusivamente dalla bontà della regione attiva realizzata e pertanto dal semiconduttore utilizzato.

Come capiremo meglio nella sezione del design e del packaging, non tutti i fotoni emessi dalla regione attiva riescono a uscire dal LED stesso. Infatti nella costituzione del dispositivo si affrontano importanti problematiche come:

- Assorbimento dei fotoni emessi dal semiconduttore stesso.
- Regioni di semiconduttore opache.
- Problemi di riflessione semiconduttore/package/aria.

Di fatto è difficile ottenere efficienze di estrazioni superiori al 50%. A tale scopo si definisce l'**efficienza di estrazione**:

$$\eta_{est} = \frac{\text{numero di fotoni emessi dal LED}}{\text{numero di fotoni emessi dalla regione attiva}} = \frac{P/(h\nu)}{P_{int}/(h\nu)}$$
(2.75)

L'**efficienza** invece è definita come:

$$\eta = \frac{\text{numero di fotoni emessi dal LED}}{\text{numero di elettroni iniettati nel LED}} = \frac{P/(hv)}{I/q} = \eta_{\text{int}}\eta_{est}$$
(2.76)

Mentre un importante parametro, che negli ultimi anni ha rappresentato uno dei motivi della conquista da parte dei LED di nuovi importanti campi nell'illuminazione è l'**efficienza di conversione**:

$$\eta_{conv} = \frac{P}{IV} \tag{2.77}$$

Nei prossimi paragrafi mostreremo le dipendenze delle caratteristiche elettroottiche alla temperatura che rappresenta il comportamento dinamico che abbiamo osservato nel nostro studio.

## 2.4.1 Temperatura di giunzione

L'emissione di luce dei diversi LED colorati reagisce in maniera diversa ai cambiamenti di temperatura, i tassi di risposta rispetto la temperatura possono provocare cambiamenti di colore evidenti. La criticità risiede, come abbiamo visto, nello stesso principio fisico che è alla base del loro funzionamento.

Prove sperimentali hanno evidenziato come il parametro fondamentale da controllare sia la **temperatura di giunzione** [22]-[24]. A livello della giunzione, infatti, risiede il fenomeno di ricombinazione radiativa che è responsabile dell'emissione di luce in un diodo *P-N* LED. La temperatura di giunzione altera direttamente le prestazioni e l'affidabilità in una serie di forme:

- Un aumento della temperatura di giunzione riduce la potenza ottica di uscita e la tensione. Per ogni aumento di 10 °C di temperatura di giunzione si ha una diminuzione di efficacia luminosa di circa il 5 % (a corrente costante).
- Per ogni aumento di 10 °C della temperatura di giunzione si riduce la tensione di funzionamento di circa 20mV.
- A questo stesso aumento di temperatura di giunzione la lunghezza d'onda dominante si sposta di circa 2nm.

- La temperatura di giunzione determina anche le prestazioni dei LED spostando la temperatura di colore. Ad esempio i LED bianchi sono più sensibili ai cambiamenti della temperatura di giunzione avendo variazioni significative della temperatura di colore. I LED emettono luce bianca combinando l'emissione standard blu con uno strato di fosforo: lo strato assorbe il flusso blu e riemette una vasta gamma di lunghezze d'onda per tutta la gamma visibile ottenendo la luce bianca. L'efficienza di emissione è fortemente dipendente dalla lunghezza d'onda del flusso blu, che si sposta al variare della temperatura di giunzione. Se la lunghezza d'onda dominante del LED blu si sposta fuori dalla portata efficiente del fosforo, il flusso blu non viene più filtrato aumentando la temperatura di colore.
- L'aumento della temperatura di giunzione riduce l'MTTF (mean time to failure-tempo medio di guasto) e accelera il degrado. Numerose prove sperimentali hanno mostrato come la rottura e il degrado dei LED sono processi sia meccanici sia chimici inversamente proporzionali alla temperatura di giunzione.

La temperatura di giunzione di un LED dipende: dalla corrente, dalla tensione di funzionamento, dall'alimentazione utilizzata, dal percorso termico (resistenza termica) tra il LED e l'ambiente, dalla potenza di uscita del LED per unità superficie, dall'orientamento di un singolo LED all'intera configurazione spaziale del sistema, e dalla temperatura ambiente. La dissipazione di potenza determina quanto calore viene generato (alimentazione e punto di funzionamento), mentre le resistenze termiche e le condizioni ambientali determinano in che modo efficiente il calore viene rimosso.

Il calore può essere generato dai contatti, nelle regioni d'interfaccia tra due materiali o leghe e naturalmente nella regione attiva. A bassi livelli di correnti la sorgente dominante è presente nella regione attiva ed è sintomo delle ricombinazioni di tipo non-radiativo. Ad alti livelli di corrente il contributo più importante è dovuto alle resistenze parassite definite dalle interfacce e dai contatti, le quali sviluppano calore per effetto joule.

Gli ultimi 15 anni dello sviluppo dei LED ad alta potenza si sono concentrati sull'uso di nuovi materiali e di architetture costruttive al fine di contribuire alla riduzione complessiva delle resistenze termiche.

Dunque la temperatura di giunzione o più propriamente la temperatura della regione attiva influenza in modo importante le prestazioni dei dispositivi LED sia a livello ottico sia a livello elettrico.

#### 2.4.1.1 Intensità di emissione

Riutilizzando le equazioni viste precedentemente, in particolare (2-64), possiamo evidenziale la dipendenza dell'intensità di emissione dalla temperatura:

$$\frac{d(\ln I)}{d(hv)} \propto \frac{1}{k_B T} \tag{2.78}$$

Un aumento della temperatura determina in generale un abbassamento dell'intensità luminosa. Questo comportamento è noto in letteratura attraverso una descrizione fenomenologica derivante da prove sperimentali:

$$I = I \Big|_{300K} \exp\left[-\frac{T - 300K}{T_i}\right] \tag{2.79}$$

dove  $T_i$  rappresenta la temperatura caratteristica del diodo.

Come vedremo in maggior dettaglio in 2.7, la dipendenza dalla temperatura è legata alla tipologia di lega utilizzata all'interno della regione attiva.

#### 2.4.1.2 Spettro di emissione

Lo spettro emesso dai diodi emettitori di luce dipende fortemente dalla temperatura di esercizio e quindi dalla temperatura di giunzione.

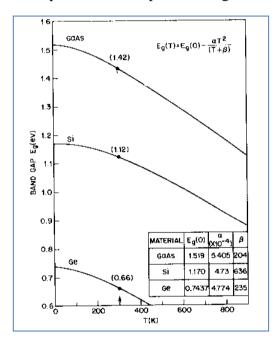


Figura 2-21 Andamento dei gap proibiti al variare della temperatura per i semiconduttori: arsenurio di gallio (AsGa); silicio (Si); germanio (Ge).

Tale fenomeno è dovuto all'acquisizione di energia da parte del reticolo del semiconduttore, descritto in fisica attraverso i fononi. Tralasciando trattazioni fisiche rigorose, l'acquisizione di energia determina un moto vibrazionale del reticolo (agitazione termica) che deforma l'andamento delle bande energetiche

individuabili all'interno di un semiconduttore. Queste infatti dipendono, come abbiamo visto, dalla conformazione spaziale del reticolo del solido e cioè dalla posizione relativa degli atomi. Il cambiamento della distanza interatomica muta l'andamento del potenziale al quale gli elettroni sono sottoposti definendo delle nuove energie permesse.

Il cambiamento delle bande determina il modificarsi della bada proibita alla quale è legato il salto energetico che l'elettrone compie nella ricombinazione. La modifica dunque interviene direttamente sulla frequenza dell'emissione stessa.

Sperimentalmente si è ricavato che l'ampiezza della banda proibita ha la seguente espressione, *relazione di Varshni*:

$$E_g = E_g \Big|_{T=0} - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} \tag{2.80}$$

dove  $\alpha$  e  $\beta$  sono dei parametri che dipendo dal tipo di lega o semiconduttore utilizzato nella regione attiva.

Inoltre se riconsideriamo la relazione (2-64) avremo che il cambiamento dello spettro emesso è anche legato all'acquisizione di energia dei portatori di carica stessi. Questi potranno riempire livelli maggiormente energetici e quindi, poiché come abbiamo visto all'interno dei LED non abbiamo un completo confinamento, i nuovi livelli energetici potranno esser coinvolti nell'emissione (Figura 2-22).

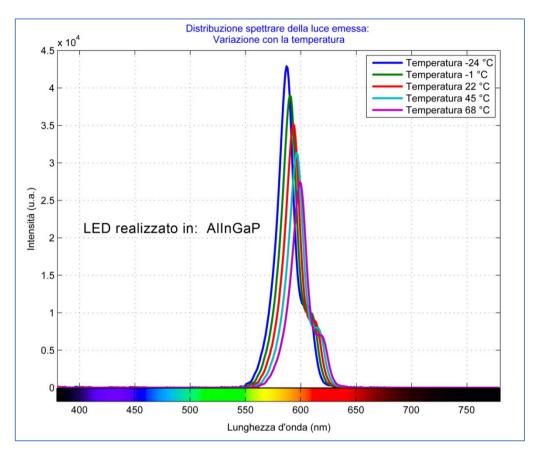


Figura 2-22 Shift dello spettro di radiazione emesso da un LED realizzato un AlInGaP al variare della temperatura di giunzione.

# 2.4.1.3 Tensione di funzionamento

Com'è noto le dipendenze interne alla temperatura dei LED coinvolgono anche un importante parametro elettrico come la tensione di funzionamento. Per ottenere la dipendenza di quest'ultima alla temperatura consideriamo la relazione ideale I-V di una giunzione p-n espressa per le densità di correnti:

$$J = J_S \left( e^{eV_f / (n_{ideale} k_B T)} - 1 \right) \tag{2.81}$$

Ipotizziamo una polarizzazione diretta  $V_f \gg k_{\rm B}T/e~{
m ottenendo}$ :

$$\frac{dV_f}{dT} = \frac{d}{dT} \left[ \frac{n_{ideale} k_B T}{e} \ln \left( \frac{J_f}{J_s} \right) \right]$$
 (2.82)

Evidenziando la dipendenza della corrente di saturazione dalla temperatura (coefficienti di diffusione, mobilità delle cariche, band gap, densità degli stati, tutti dipendono dalla temperatura di giunzione) possiamo scrivere:

$$\frac{dV_f}{dT} = \frac{eV_f - E_g}{eT} + \frac{1}{e} \frac{dE_g}{dT} - \frac{3k_B}{e}$$
 (2.83)

Per un tipico LED, ricordando la relazione (2-65) abbiamo:

$$eV_f - E_g \approx k_B T \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) - k_B T \ln\left(\frac{N_C N_V}{n_i^2}\right) = k_B T \ln\left(\frac{N_D N_A}{N_C N_V}\right)$$
(2.84)

E considerando l'espressione (2-79) avremo:

$$\frac{dV_f}{dT} = \frac{k_B}{e} \ln \left( \frac{N_D N_A}{N_C N_V} \right) - \frac{\alpha T \left( T + 2\beta \right)}{e \left( T + \beta \right)^2} - \frac{3k_B}{e}$$
 (2.85)

A livello macroscopico la relazione (2-84) definisce una dipendenza della tensione di funzionamento inversamente proporzionale alla temperatura.

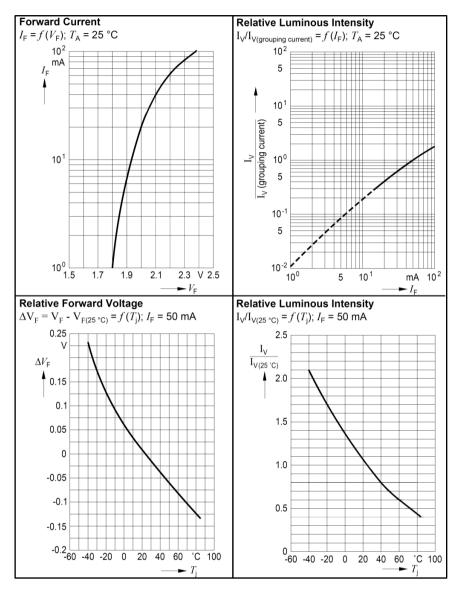


Figura 2-23 Dipendenze dalla temperatura delle proprietà elettro-ottiche di un classico LED reperibile in commercio.

## 2.5 Architettura del LED

Negli anni il design delle strutture interne dei diodi emettitori di luce si è evoluto costantemente cercando di portare alla luce architetture più efficienti e più facili da realizzare. Le strade seguite per migliorare l'efficienza di emissione si riassumono attraverso gli stessi fenomeni fisici che sono alla base del suo funzionamento. Da una parte una porzione della ricerca si è concentrata sulla ricombinazione radiativa, come favorirla. Dall'altra ha ricercato il modo di diminuire la probabilità di ricombinazione non-radiativa.

La scelta di prediligere una o l'altra strada ha determinato l'affermazione di strutture differenti che costituiscono gli attuali dispositivi [25].

### 2.5.1 Architettura delle etero-giunzioni

Come abbiamo visto un modo per aumentare la probabilità di emissione radiativa consiste nel definire delle regioni di confinamento delle cariche libere, buche di potenziale, confinando la regione attiva dei dispositivi. Tale confinamento si ottiene attraverso l'accostamento di due o più leghe di semiconduttori a diverso gap proibito, definendo delle buche di potenziale nelle bande energetiche di conduzione e valenza.

$$E_g \Big|_{\text{Regione Esterna}} - E_g \Big|_{\text{Regione Attiva}} = \Delta E_g = \Delta E_C + \Delta E_V$$
 (2.86)

Architettura del LED 83

Naturalmente come abbiamo già osservato nel § 2.3.2 per ottenere un comportamento stabile del confinamento, le discontinuità,  $\Delta E_C$  e  $\Delta E_V$ , devono essere maggiori dell'energia termica posseduta dalle cariche.

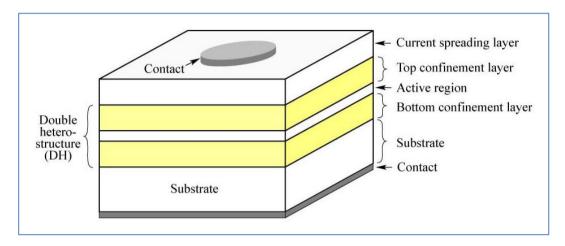


Figura 2-24 Schematizzazione planare di una architettura a doppia etero-giunzione.

Inoltre, bisogna considerare che la buca di potenziale definisce la lunghezza della regione attiva, la quale ha un grosso impatto sull'efficienza del dispositivo; se è troppo grande, ad esempio maggiore della lunghezza di diffusione delle cariche, i vantaggi di tale struttura sono completamente persi. In quest'ultimo caso avremo un comportamento e un'efficienza simile a una struttura a omo-giunzione.

D'altra parte se la struttura è troppo sottile, le cariche tenderanno a straripare dalla buca di potenziale.

Un ulteriore fenomeno riscontrato, che di fatto limita la lunghezza della singola etero-giunzione, è il così detto *effetto Stark* [26], [27]. In particolare tal effetto è legato alla modifica delle bande energetiche inseguito all'applicazione di un campo elettrico. Se osserviamo la Figura 2-25 possiamo notare come il gap

proibito risulti deformato, causando il cambiamento sia del salto energetico che le cariche devono compiere per ricombinarsi sia una diminuzione di efficienza dovuto al disallineamento dei minimi delle bande.

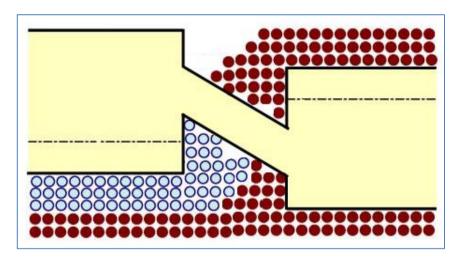


Figura 2-25 Effetto Stark in una struttura ad eterogiunzione. La buca di potenziale deformandosi per l'applicazione di un campo elettrico perde la propria efficienza di confinameto e selezione dello spettro emissivo.

# 2.5.2 Drogaggio

Un importante scelta nella realizzazione delle strutture è il drogaggio. In particolare per ottenere un buon confinamento delle cariche libere si è soliti drogare la regione attiva con droganti di tipo P, in quanto la lunghezza di diffusione degli elettroni è generalmente maggiore di quella delle lacune, consentendo di ottenere una maggiore uniformità nella regione di confinamento.

Mentre le regioni, che definiscono il confinamento, di solito risultano non dopate o comunque poco dopate, in modo tale da non promuovere spostamenti di cariche dalla regione attiva. Architettura del LED 85

Nella regione attiva la scelta del livello di drogaggio è frutto di una mediazione, infatti se da una parte una concentrazione alta di dopanti faciliterebbe la ricombinazione di tipo radiativo, dall'altra gli atomi dei dopanti introducono difetti nel reticolo che aumentano la ricombinazione di tipo non-radiativo.

Inoltre, questi ultimi influenzano in modo significato il tempo di vita del LED stesso. La presenza di difetti ha un effetto dannoso sul tempo di vita del dispositivo, ciò è dovuto al calore sprigionato nella ricombinazione non-radiativa che nel tempo può portare a un degrado del dispositivo stesso.

## 2.5.3 Spostamento della regione attiva

Lo spostamento della giunzione P-N dalla posizione prevista allo strato di confinamento può essere un problema significativo nelle strutture a eterogiunzione.

Di solito, lo strato di confinamento inferiore è di tipo n, lo strato di confinamento superiore è di tipo p, e la regione attiva è debolmente drogata con droganti di tipo n o p. Tuttavia, se si verifica una ridistribuzione dei droganti, la giunzione si può spostare in uno degli strati di confinamento compromettendo il funzionamento del dispositivo.

La diffusione di droganti si può verificare sia durante la realizzazione del LED sia durante il funzionamento del dispositivo stesso. Ad esempio, nel caso di una cattiva progettazione della dissipazione del calore, la regione attiva può portarsi facilmente a temperature elevate, e droganti di piccole dimensioni, come ad

esempio lo Zinco, facilmente per diffusione possono muoversi all'interno del reticolo del semiconduttore impiegato.

Come risultato, il dispositivo non funziona bene o non emette luce alla lunghezza d'onda di emissione prevista.

#### 2.5.4 Strati di "dilatazione" della corrente

Nella definizione della struttura dei dispositivi LED rivestono una notevole importanza strati di leghe o semiconduttori utilizzati per migliorare sia l'estrazione dei fotoni emessi sia lo scorrere della corrente nella regione attiva. Possiamo distinguere due tipologie di strutture dei dispositivi, la prima in cui lo sviluppo è di tipo *verticale* e una seconda a sviluppo *laterale* [28], [29].

Nella prima tipologia la corrente è iniettata nella regione attiva direttamente attraverso gli elettrodi. Com'è noto le cariche per loro stessa natura tendono a muoversi percorrendo la minor distanza tra due elettrodi. Nel caso dei dispositivi LED questo comporta l'azione della corrente in una ristretta porzione di regione attiva, riducendo l'efficienza dell'intero dispositivo. Un metodo errato di risolvere tale problematica è il semplice ampliamento dell'area dei contatti, infatti i contatti che formano gli elettrodi sono solitamente di natura opaca e sono quindi un ostacolo all'emissione dei fotoni stessi.

Per evitare questi inconvenienti si realizzano strati di leghe che permettano la diffusione, il più possibile omogenea, della corrente e che risultano trasparenti ai fotoni emessi dalla regione attiva, tali strutture sono dette *window o current-spreading layer*.

Architettura del LED 87

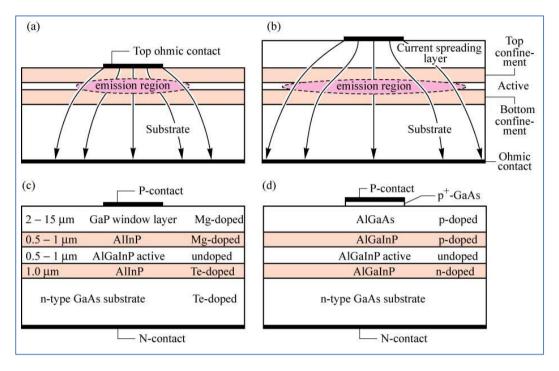


Figura 2-26 Current-spreading e window layer. (a) Struttura LED senza strati di dilatazione della corrente, mentre (b) con la presenza di tale accorgimento: si nota come la regione interessata dal passaggio di corrente sia notevolmente aumenta. (c) e (d) esempi di realizzazione.

La Figura 2-27 mostra come l'utilizzo di quest'accorgimento in un led a sviluppo verticale permetta una miglioria delle caratteristiche ottiche del dispositivo LED. È importante notare che nella regione posta di sotto al contatto elettrico si avrà comunque una densità di corrente maggiore che nelle regioni circostanti. Questo in particolare è indicato in letteratura come uno dei problemi che limita il tempo di vita dei dispositivi, di fatto si formano dei "punti caldi" all'interno del semiconduttore che nel tempo deteriorano il reticolo (*current-crowding effect*).

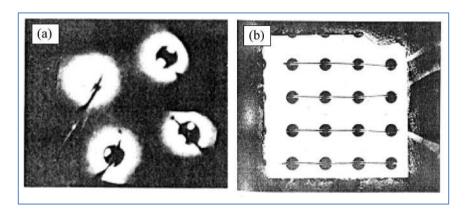


Figura 2-27 Effetto dell'utilizzo di strati adibiti alla dilatazione della corrente. (a) Visone dall'alto di un LED che non utilizza tali strati. (b) visione dall'alto di un LED con utilizzo di tale accorgimento.

Un ulteriore modo di realizzare una maggiore diffusione della corrente all'interno del semiconduttore è di realizzare un *current-blocking layer*, cioè uno strato sepolto d'isolante (o resistività più alta) come mostra la figura sottostante.

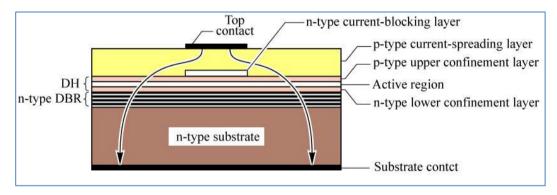


Figura 2-28 Schematizzazione di LED che fa uso della tecnica del current-blocking layer.

Lo stesso tipo di problema può essere riscontrato nei LED a sviluppo laterale, come mostra la Figura 2-29, anche in questo caso si svilupperà una regione privilegiata dalla corrente.

Architettura del LED 89

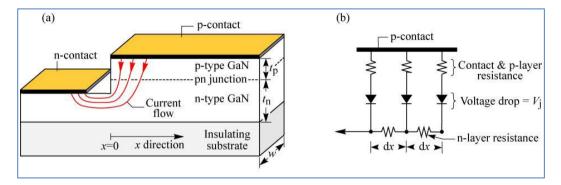


Figura 2-29 (a) Current-crowing effect all'interno di LED a sviluppo laterale. (b) Equivalente elettrico delle diverse regioni che definiscono un LED.

Per risolvere questo tipo di problema si realizzano strutture tipiche, come quelle mostrate in Figura 2-30, nelle quali le larghezze delle regioni  $W_n$  e  $W_p$  sono scelte in modo tale che la prima sia inferiore alla lunghezza di diffusione della corrente e la seconda sia tale da non determinare un'eccessiva resistenza di contatto (si ricordi la definizione di resistenza:  $R = \rho L/(W_n d)$ ).

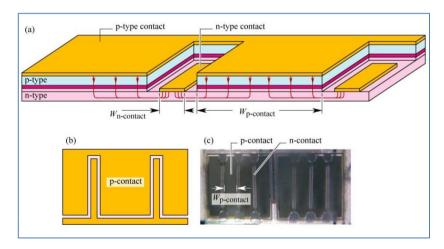


Figura 2-30 (a) Schematizzazione delle strutture interne di un LED a sviluppo laterale in cui si cerca di limitare il fenomeno di current-crowung. (b) e (c) visione dall'alto schematica e reale rispettivamente di un LED.

Inoltre per garantire l'omogeneità della corrente si realizza lo strato di tipo n meno resistivo dello strato di tipo p, in modo tale che la corrente prediliga lo scorrere laterale.

## 2.5.5 Architetture per favorire l'uscita della luce

Uno dei problemi noti sin dai primi anni '60 è la possibilità che i fotoni emessi nella regione attiva possano rimanere intrappolati all'interno del semiconduttore.

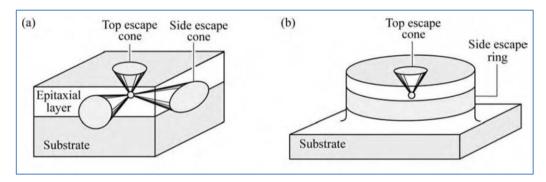


Figura 2-31 Schematizzazione di classiche geometrie realizzativie utilizzate nei LED. (a) LED parallelepipedo, in cui si individuano 6 coni di uscita della luce. (b) LED cilindrico con un unico cono di uscita.

Oltre a tecniche di realizzazione di strati con proprietà ottiche/elettroniche opportune (si realizzano layer di leghe di semiconduttori trasparenti ai fotoni emessi e allo stesso tempo conduttivi) uno dei problemi che si affronta è la differenza di indici di rifrazione tra il semiconduttore e l'incapsulamento e quest'ultimo e l'aria. Mentre l'ultimo con i nuovi materiali plastici può essere agevolmente superato, il primo è maggiormente problematico soprattutto perché il tipo di semiconduttore è legato alla lunghezza d'onda di emissione, e inoltre l'interfaccia con l'incapsulamento è direttamente legata alle tecniche di

Packaging 91

realizzazione planare microelettroniche. Infatti, benché da questo punto di vista il parallelepipedo non sia la struttura più efficiente è il tipo di realizzazione più comunemente adottata.

Un parallelepipedo consente, come mostra la Figura 2-31, solo sei coni di estrazione che coinvolgono solo piccole regioni del semiconduttore, e inoltre due di questi coni sono limitati dai contatti elettrici.

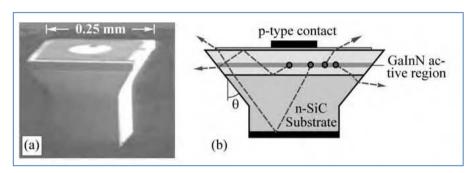


Figura 2-32 LED Osram "Aton". (a) Foto; (b) Illustazione schematica dell'estrazione della luce.

Una struttura migliore è quella cilindrica che consente un intero anello di estrazione. Infine particolare è il LED Osram "Aton" in Figura 2-32, che mostra come questo problema sia sentito, data la complessità realizzativa, dagli stessi produttori di LED.

# 2.6 Packaging

Tutti i dispositivi LED, come ogni circuito integrato, sono montati in un **package** che provvede ai contatti elettrici. Nei package dei diodi emettitore di luce tuttavia si possono riconoscere strutture che definiscono regioni trasparenti per l'emissione della luce e in particolare regioni realizzate con un buon conduttore di

calore per la dissipazione termica. I materiali utilizzati per l'incapsulamento posseggono caratteristiche quali la trasparenza, un alto indice rifrattivo per favorire l'emissione dei fotoni dal semiconduttore, e sono inerti chimicamente, stabili termicamente e naturalmente ermetici.

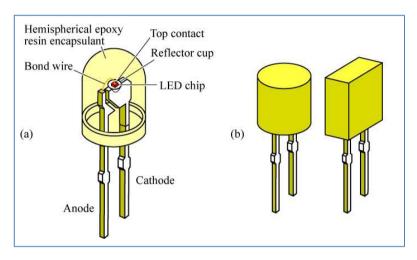


Figura 2-33 Packaging dei classici LED, solitamente utilizzati per svolgere la funzione di segnalazione all'interno dei circuiti stessi. Si riconoscono le classiche capsule tonde di materiale plastico di diametro 3 o 5 millimetri.

Negli ultimi anni sono stati realizzati nuovi package per i LED di potenza, di fatti per dissipare il calore si realizzano strutture conduttive che permettono di far scorrere il calore dal semiconduttore sino al circuito stampato in maniera efficace (Figura 2-34). Dalla figura si nota il dissipatore di calore, di solito in alluminio o rame, che permette una bassa resistività termica tra il LED e il circuito. Inoltre abbiamo di solito un incapsulamento in silicone e una lente plastica. Infine è importante notare il substrato in silicio su cui poggia il LED vero e proprio, questo è utilizzato per realizzare una protezione contro le scariche elettrostatiche.

LED visibili 93

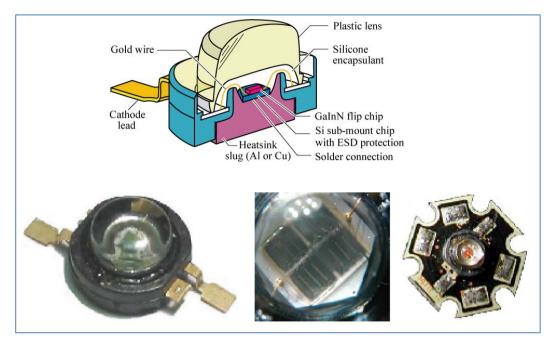


Figura 2-34 Packaging per i LED di ultima generazione, Power-LED. La gestione termica delle potenze a cui sono sottoposti ha reso necessario una nuova concezione dell'involucro contenitivo dei LED.

# 2.7 LED visibili

Le caratteristiche elettro-ottiche delle lampade, che osserveremo nei prossimi capitoli, dipendono dalla tipologia di LED utilizzati e dalla lega della loro regione attiva. In questo breve paragrafo discuteremo delle caratteristiche microscopiche delle leghe che definiscono la regione attiva dei LED che emettono nel visibile, soffermandoci sulle caratteristiche ottiche da cui deriva la loro scelta nelle applicazioni del segnalamento.

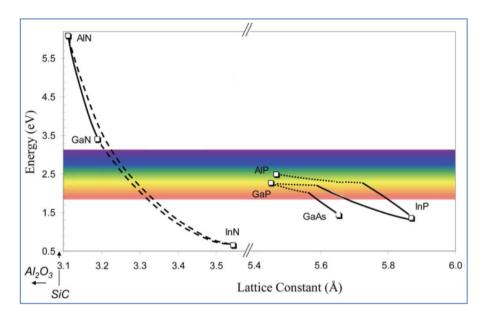


Figura 2-35 Salto energetico del gap proibito in funzione delle costanti reticolari delle leghe formanti le regioni attive dei LED. Le linee continue indicano le leghe a gap diretto, mentre le linee tratteggiate gap indiretti e le linee puntiformi sono stime dovute alla relativa incertezza derivante dal dopaggio con indio (In) e azoto (N).

La Figura 2-35 riassume gli elementi e i composti che oggi vengono utilizzati all'interno dei LED. Distinguiamo quattro famiglie di composti principali:

- $GaAs_{1-x}P_x$  e  $GaAs_{1-x}P_xN$ : da 570 nm (verde) a 660 nm (rosso);
- Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs: da 624 nm (arancio/rosso) a 870 nm (infrarosso);
- $\left(Al_xGa_{1-x}\right)_{1-y}In_yP$ : da 560 nm (giallo/verde) a 650 nm (rosso);
- In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N: da 365 nm (ultravioletto) a 550 nm (giallo);

che si "suddividono" lo spettro del visibile.

La lunghezza d'onda emessa è scelta attraverso la selezione della "frazione" x degli elementi che formano la lega della regione attiva (per  $(Al_xGa_{1-x})_{1-y}In_yP$  si

LED visibili 95

definisce anche la "frazione" y). Di fatto si riesce a modellare il gap proibito del semiconduttore attraverso la scelta del livello di drogaggio.

I limiti dello spettro emesso, definiti per le diverse leghe, dipendono dal gap proibito realizzato per x=0 e dalla diminuzione dell'efficienza del dispositivo all'aumentare della "frazione"; l'aumento del livello di drogaggio deteriora lo strato di semiconduttore realizzato per le dovute imperfezioni che si vengono a creare (dislocazioni).

# 2.7.1 Leghe GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> e GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>:N

I materiali GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> e GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>N sono usati per l'emissione nel rosso, arancione, giallo e verde. Tali tipi di materiali possiedono una bassa efficienza quantica interna, per il disallineamento tra i reticoli così ottenuti e il GaAs utilizzato come semiconduttore di substrato. Per quest'ultimo motivo tali tipi di LED sono utilizzati per applicazioni in cui non è necessaria un'alta brillanza.

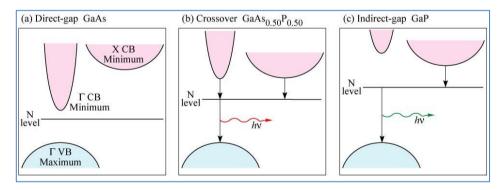


Figura 2-36 Conformazione delle bande energetiche delle regioni attive definite per le leghe  $GaAs_{1-x}P_x$  e  $GaAs_{1-x}P_x$ :N al variare delle concentrazioni dei droganti.

In Figura 2-36 vengono mostrate le bande energetiche della regione attiva al variare della frazione di fosforo P, è importante notare come si passa da un gap diretto a un gap indiretto. Per frazioni superiori al 50% il gap diviene indiretto e l'efficienza radiativa diminuisce (come abbiamo visto in gap indiretti la probabilità di emissione spontanea è molto limitata). Precisamente per evitare questo inconveniente, s'inseriscono impurità di azoto (N) che ricoprono il ruolo di centri ricombinativi radiativi.

## 2.7.2 Leghe Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs

La lega Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs è stata sviluppata tra il 1970 e agli inizi del 1980, fu il primo materiale utilizzato per i LED ad alta brillanza. Di fatti è una lega molto efficiente grazie all'allineamento tra i reticoli AlGaAs e GaAs che realizza il substrato.

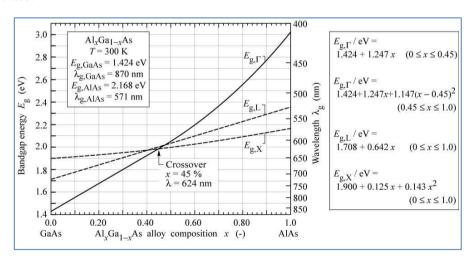


Figura 2-37 Salto energetico del gap proibito e lunghezza d'onda dominante al variare della composizione della lega che realizza la regione attiva.  $E_{\Gamma}$  identifica il gap diretto, mentre  $E_{X}$  e  $E_{L}$  il gap indiretto secondo le 3 differenti direzioni cristallografiche.

LED visibili 97

Come nella lega precedente, al variare della frazione di Al le bande energetiche ottenute nella regione attiva passano da una struttura a gap diretto a una a gap indiretto limitando le lunghezze d'onda per le quali può essere utilizzata.

La Figura 2-37 descrive l'andamento dei gap energetici lungo i tre assi cristallografici L, X e  $\Gamma$  al variare della composizione x. Per frazioni pari a x=45% i gap energetici si equivalgono, tuttavia solo il gap definito lungo l'asse  $\Gamma$  è utilizzato per la ricombinazione radiativa, essendo questo a gap diretto, mentre i gap lungo X e L definiscono centri di ricombinazione non-radiativi. Come abbiamo visto in precedenza le cariche occupano i livelli a più bassa energia, in questo caso all'aumentare della composizione i gap X e L divengono degli efficienti centri di ricombinazione non-radiativa sottraendo cariche disponibili per l'emissione e limitando l'efficienza interna del dispositivo così ottenuto.

Il tempo di vita dei dispositivi realizzati con questa tipo di lega è fortemente influenzato dalle alte concentrazioni di Al, il quale è soggetto a ossidazione.

# 2.7.3 Leghe $(Al_xGa_{1-x})_{1-y}In_yP$

La lega  $(Al_xGa_{1-x})_{1-y}$  In  $_yP$  è stata sviluppata nei primi anni '90 ed è attualmente il materiale più utilizzato nei LED di potenza, variando le frazioni dei diversi elementi della lega è possibile ottenere emissioni nel rosso, arancio e giallo. La composizione  $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}$  In  $_{0.5}P$  permette un perfetto allineamento col reticolo GaAs, utilizzato come substrato, ed è uno dei motivi del successo di questa lega in quanto permette di ottenere strutture prive d'imperfezioni.

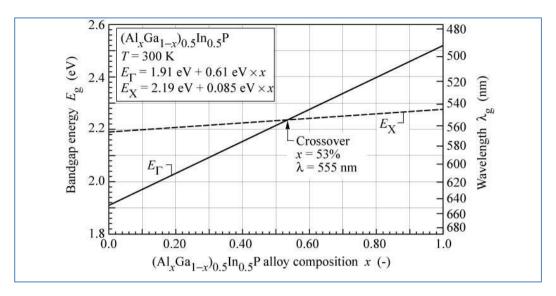


Figura 2-38 Salto energetico del gap proibito e lunghezza d'onda dominante al variare della composizione della lega che realizza la regione attiva.  $E_{\Gamma}$  identifica il gap diretto, mentre  $E_X$  il gap indiretto.

La Figura 2-38 descrive l'andamento dei gap energetici lungo i due assi  $\Gamma$  e X al variare della composizione x per il materiale  $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}$   $In_{0.5}$ P. Come nel caso della lega precedentemente descritta, per composizioni pari a x=53% il gap proibito cambia; le valli lungo l'asse cristallografico X divengono le valli minime. Tale cambiamento influisce notevolmente sull'efficienza del dispositivo essendo il nuovo gap di tipo indiretto. Di fatto tale caratteristica impedisce di creare dispositivi che emettano per lunghezze d'onda inferiori a 560 nm.

Inoltre per i dispositivi realizzati nell'intorno di tali lunghezze d'onde l'efficienza diviene fortemente legata alla temperatura. Infatti per entrambi i gap energetici vale la relazione di *Varshni*, vista in precedenza:

LED visibili 99

$$E_{g}(T) = E_{g}(0) - \frac{\alpha T^{2}}{T + \beta}$$
(2.87)

In questo caso, i coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  risultano differenti per i due gap [30]. In pratica al variare della temperatura i due gap energetici si avvicinano relativamente tra di loro determinando una notevole dipendenza dell'efficienza interna alla temperatura (Figura 2-39).

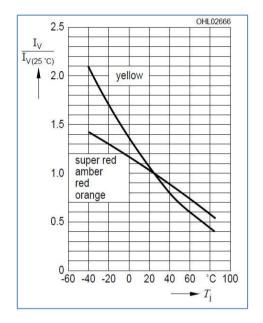


Figura 2-39 Confronto delle efficienze ottiche al variare della temperatura tra LED realizzati con la lega  $\left(Al_{_{x}}Ga_{_{l-x}}\right)_{_{l-y}}In_{_{y}}P$  ma a differente lunghezza d'onda dominate. Il LED che emette nel giallo ( $\lambda \approx 550$  nm) è maggiormente dipendente alla temperatura.

# 2.7.4 Leghe In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N

La lega In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, come abbiamo visto nel § 2.1.6 è l'ultimo materiale sviluppato per i LED, completa lo spettro del visibile potendo emettere dal blu al verde.

L'efficienza interna dei dispositivi realizzati con questa lega è ancora oggi oggetto di dibattito nel mondo della ricerca; a discapito di un'alta concentrazione d'imperfezioni i dispositivi presentano un'elevata efficienza. In particolare la realizzazione di un'alta concentrazione di difetti è dovuta al non ottimo controllo che si ha nelle fasi di drogaggio con l'Indio quando questo è in concentrazioni elevate. La Figura 2-40 mostra i classici V-defect presenti nella regione attiva di questi dispositivi [31], [32]. In particolare l'alta efficienza è probabilmente garantita dai livelli energetici definiti dalle imperfezioni che non risultano essere interni al band gap ma al di fuori di esso non deteriorando la probabilità di ricombinazione radiativa.

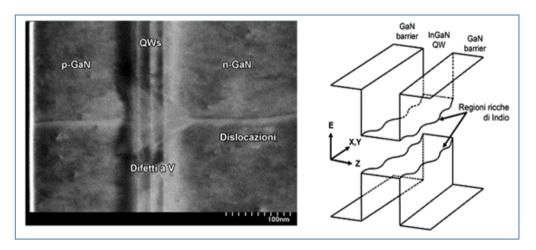


Figura 2-40 Difetti reticolari all'interno della regione attiva realizzata in  $In_xGa_{1-x}N$ . Le imperfezioni determinano un gap proibito spazialmente non costante.

Come mostra la figura precedente, l'imperfetto controllo del drogaggio comporta inoltre la realizzazione di un gap proibito non costante, tale caratteristica è causa dell'allargamento dello spettro emesso dai LED [33].

LED visibili 101

## 2.7.5 Proprietà ottiche dei LED visibili nel segnalamento

Come vedremo in maniera più dettagliata nel capitolo 4, le caratteristiche che abbiamo appena presentato implicano scelte progettuali nelle applicazioni del segnalamento. Le leghe  $(Al_xGa_{1-x})_{1-y}$  In  $_yP$  e In $_xGa_{1-x}N$  rappresentano i LED che in miglior modo rispondo alle necessità dei costruttori degli apparati di segnalazione.

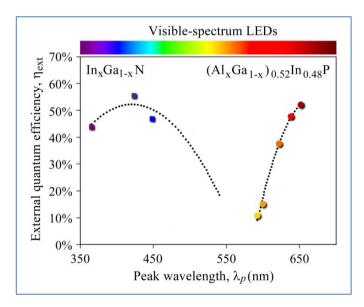


Figura 2-41 Stato dell'arte dell'efficienza dei power-LED visibili (Tj = 25°C).

Dalla Figura 2-41, che descrive lo stato dell'arte dell'efficienza interna, possiamo notare come le lunghezze d'onde prossime al giallo rappresentano una criticità per entrambe le leghe. Per l'In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N la diminuzione dell'efficienza interna è dovuta all'elevato drogaggio richiesto affinché si abbia emissione nel giallo, che causa un aumento delle imperfezioni nella regione attiva realizzata. Mentre per l'

LED 102

 $(Al_xGa_{1-x})_{1-y}$  In  $_yP$ , come abbiamo visto nel § 2.7.3, il giallo rappresenta il limite minimo, a causa del cambiamento del gap proibito da diretto a indiretto.

Il confronto delle caratteristiche ottiche, Figura 2-42, ci permette di individuare come la lega  $(Al_xGa_{1-x})_{1-y}$  In  $_yP$  a differenza dell'In $_xGa_{1-x}N$  sia fortemente influenzata dalla temperatura, mentre lo spettro emesso abbia una caratteristica più pura [34].

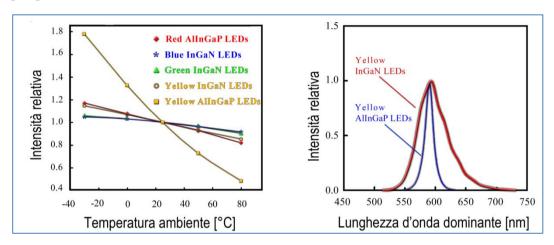


Figura 2-42 (Sinistra) Intensità di emissione di LED blue/verdi/gialli InGaN and gialli/rossi AlInGaP in funzione della temperatura ambiente da -40 °C a +80 °C. L'intensità è normalizzata a 25°C. (Destra) Spettro di emissione di un LED giallo InGaN e un LED giallo AlInGaP alimentati ad una corrente di 20 mA.

A causa delle rigide norme colorimetriche cui i costruttori di segnali devono fare riferimento, la lega  $(Al_xGa_{1-x})_{1-y}In_yP$  è utilizzata per gli aspetti che vanno dal rosso al giallo mentre l' $In_xGa_{1-x}N$  dal verde al blue.

Importante notare come entrambe le leghe presentano shift colorimentrico (§ 2.4.1.2), e che la lega  $\left(Al_xGa_{1-x}\right)_{1-y}In_yP$  è fortemente influenzata dalla temperatura (Figura 2-42).

# 2.8 Perdita di luminosità nel tempo

Le nuove applicazioni che fanno uso dei LED come sorgente di luce hanno evidenziato la mancanza di un importate parametro nella caratterizzazione di questi dispositivi. Gli ultimi anni hanno visto accrescere l'interesse, da parte della comunità scientifica, nella definizione del tempo di vita dei LED, seguendo di pari passo l'interesse degli stessi produttori.

A differenza delle lampade tradizionali, i LED non tendono a spegnersi improvvisamente esaurita la loro vita utile: i diodi LED nel tempo diminuiscono gradualmente il loro flusso luminoso iniziale fino a esaurirsi completamente in un periodo molto lungo (a meno di rotture improvvise). Per questo motivo occorre provvedere con termini di confronto che sono del tutto diversi da quelli utilizzati per le comuni sorgenti d'illuminazione come le lampadine a incandescenza.

In campo internazionale si sono viste nascere associazioni e società che riuniscono la maggior parte delle case produttrici di LED che si occupano, oltre ad attivare progetti di ricerca e attività per promuovere l'uso della tecnologia LED, di definire le linee guida per la descrizione dei parametri riguardanti le prestazioni dei LED. Tra di queste la "Illuminating Engineering Society of North America" riveste un ruolo importate nel definire le procedure per la caratterizzazione del tempo di vita. Infatti benché non esiste uno standard di riferimento accettato,

quest'ultima ha recentemente emanato le norme IES LM-80-08 e IES TM-21-11 che sono attualmente accolte dalla maggior parte dei produttori. Queste norme orientate ai costruttori dei LED, e prese come riferimento dall'associazione ASSIST (Alliance for Solid-State Illumination System and Tecnologies) che riunisce la maggior parte delle case produttrici di LED, prevedono test con durata compresa tra 6'000÷10'000 ore su un campione statisticamente significativo.

Accanto a tali normative, inoltre, si colloca la "Product Specification for Lamps (Light Bulbs)" dell'ENERGY STAR® Program Requirements (Elegibility Criteria Version 1.0, Draft 2) che pone l'attenzione sull'incertezza dei metodi di previsione per la definizione del tempo di vita.

In questo paragrafo dunque cercheremo di descrivere sia da un punto di vista "normativo" (sono semplicemente indicazioni) sia dal punto di vista fisico questo nuovo parametro di caratterizzazione dei diodi LED.

### 2.8.1 Meccanismi fisici di degrado

Nei LED l'intensità di emissione, a parità di corrente di pilotaggio, dipende dall'efficienza quantica interna  $\eta_{int}$  e dall'efficienza di estrazione  $\eta_{est}$ .

La prima, come abbiamo visto, scaturisce dal drogaggio, dalla temperatura e dalla densità dei difetti nei materiali con cui sono realizzati i dispositivi. I difetti nel materiale influenzano negativamente l'efficienza di emissione (§ 2.2.2.3); con il trascorrere del tempo i difetti del materiale tendono ad aumentare (il tasso di crescita dei difetti aumenta all'aumentare della temperatura e della corrente che

scorre nella giunzione) provocando la diminuzione dell'efficienza quantica e quindi della capacità del dispositivo di emettere luce.

L'efficienza di estrazione, invece, dipende dall'architettura con la quale il dispositivo LED è realizzato e dal package che lo racchiude. Anche in questo caso la temperatura e la corrente nel tempo possono provocare un degrado alle strutture sia interne sia esterne, limitando l'efficienza. Si pensi ad esempio alla possibile "cottura" della lente del package.

Un buon modello, che rappresenta come l'efficienza luminosa di un LED decresca con il tempo, è rappresentato dall'equazione (2.88) [35]:

$$\eta(t) = \eta(t_0) \left( \frac{J_{\text{nominale}}}{J_{\text{operativa}}} \right)^{k_1} \exp\left[ -\frac{t - t_0}{k_2} \right]^{k_3} \exp\left[ \frac{E_a}{k_B} \left( \frac{1}{T_{\text{operativa}}} - \frac{1}{T_{\text{nominale}}} \right) \right]$$
(2.88)

dove  $\eta(t_0)$  rappresenta l'efficienza al tempo t=0, J la densità di corrente (nominale/operativa), T la temperatura (nominale/operativa). Mentre le constanti  $E_a$  (energia di attivazione) e  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , sono dei parametri che dipendono dal tipo di architettura e materiale attivo utilizzato per la realizzazione del LED. L'equazione (2.88) mostra che il tasso di decrescita aumenta con la temperatura d'esercizio e con la densità di corrente che scorre nel diodo.

I fenomeni fisici alla base della perdita dell'efficienza luminosa dei LED nel tempo sono ancora oggetto di studio, tuttavia dai lavori disponibili in letteratura [36]-[44], possono essere riassunti in:

• Generazione di centri non radiativi nella regione attiva del dispositivo.

LED 106

 Diminuzione della concentrazione delle cariche disponibili nella regione attiva, a causa della generazione di centri di ricombinazione tra i contatti metallici e il semiconduttore.

- Degrado delle strutture che delimitano la regione attiva, modifiche dei processi d'iniezione delle cariche.
- Modifica delle regioni p-n del dispositivo a seguito di un evento ESD (Electrostatic discharge)
- Degradazione della lente di plastica del dispositivo.

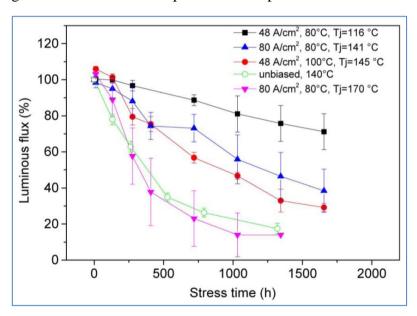


Figura 2-43 Degrado del flusso luminoso di LED bianchi durante prove sperimentali di stress a diverse correnti di polarizzazione e temperature. Ogni punto rappresenta la media tra 8 diversi dispositivi, mentre le barre di errore rappresentano la deviazione standard dei dati sperimentali.

Tutti questi fenomeni dipendono fortemente dalla temperatura e dalla corrente; di fatto questi si comportano da catalizzatori per i fenomeni diffusivi e di deriva (come l'elettro migrazione) che sono alla base delle modifiche nel tempo delle

strutture interne dei LED. Inoltre, com'è noto in letteratura, nel caso di densità elevate di correnti, il flusso di elettroni all'interno del reticolo può provocare il degrado dello stesso (degrado indotto dagli "hot-carrier").

La Figura 2-43 mostra uno dei risultati sperimentali presentati nel lavoro [43] dal quale si può notare come la perdita di efficienza sia direttamente proporzionale alla corrente e alle temperature operative cui è sottoposto il LED.

### 2.8.2 La normativa IES LM-80-08

La normativa IES LM-80-08 ("Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources") descrive le procedure con le quali testare i LED, allo scopo di definire il tempo di mantenimento del flusso luminoso [45]. L'obiettivo della norma è definire un metodo standard di test che permetta un confronto dei risultati, o dei dati sperimentali delle prove che negli ultimi anni sono state messe in atto sia da parte dei costruttori dei LED sia da numerosi centri di ricerca.

Lo scopo dei test, che brevemente descriveremo, non è quello di individuare il tempo di vita ma di fornire un'indicazione sul tempo di mantenimento a prescritte condizioni operative. Tale parametro è definito come  $L_p(Yk)$ , dove p indica in percentuale la luminosità residua a fine test, mentre Y indica il tempo di misura in migliaia di ore. Il tempo di mantenimento è naturalmente legato alle condizioni operative scelte.

Le prove sperimentali individuate dalla IES LM-80-08 si basano sulla misurazione del flusso luminoso di una sorgente LED pilotata a diversi valori di corrente continua e a tre diverse temperature ambienti (55°C, 85°C e una terza a

LED 108

scelta) per un periodo non inferiore a 6000 ore (con misurazioni almeno ogni 1000 ore). Inoltre stabilisce che le misurazioni fotometriche e colorimetriche devono essere effettuate alla temperatura di  $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  in modo tale da non far dipendere le misure dalle proprietà ottiche dei LED, anch'esse dipendenti alla temperatura.

In particolare la scelta delle 6000 ore minime di test è dovuta alla caratteristica dei LED di stabilizzare le proprie proprietà elettro-ottiche nelle prime migliaia di ore di funzionamento (assestamento dei vari strati di semiconduttore che definiscono le strutture interne).

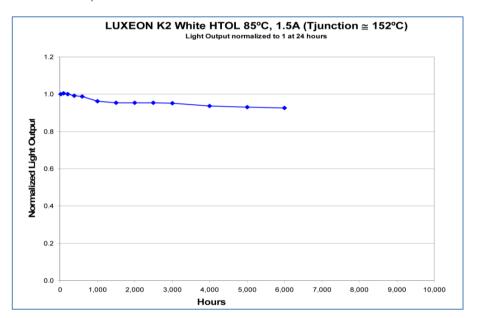


Figura 2-44 Degrado del flusso luminoso di LED bianchi registrato nell'attuazione di prove sperimentali conformi alla norma IES LM-80-08 [46].

La norma definisce due diversi tempi di vita: L70 e L50. Il primo indica come vita utile di una sorgente luminosa a LED il tempo necessario affinché l'emissione luminosa diminuisca al 70% del valore iniziale, il secondo invece al 50%. La

riduzione del 30% del flusso luminoso iniziale infatti è "poco" avvertita in tutte le applicazioni dove la luce deve essere percepita/interpretata dagli occhi umani. Pertanto una diminuzione al 70% della luminosità iniziale può essere considerata una soglia appropriata per definire la vita media di una sorgente luminosa. La soglia al 50%, benché meno prudente, viene utilizzata in tutte quelle applicazioni dove non è richiesta una stabilità dell'intensità, o comunque una diminuzione nel tempo della luminosità non risulta critica (si pensi ad esempio alle insegne luminose di un negozio).

È importante notare che i test non danno alcun tipo di informazioni riguardo all'eventuale previsione di decadimento e quindi di vita utile attesa al di fuori delle ore di prova effettuate (compito che viene svolto dalla normativa TM 21-11). Inoltre non fornisce alcun tipo di standard per la valutazione della circuiteria sia di alimentazione sia di controllo presente all'interno di ogni apparato illuminante.

### 2.8.3 La normativa TM 21-11

La norma TM 21-11 prevede l'acquisizione delle intensità luminose degli apparati luminosi a LED, nei metodi descritti dalla norma IES LM-80-08, e la proiezione delle intensità a lungo termine secondo ben determinate equazioni analitiche (sintesi dei metodi di previsione presenti in letteratura). La Tabella 2-1 riproduce le equazioni analitiche riportate nella norma [47].

Purtroppo, anche se tutto è codificato e definito, le proiezioni a lungo termine sono poco affidabili. Per tale motivo, la norma impone un limite massimo alle LED 110

estrapolazioni temporali. La TM 21-11 prevede che non si possa certificare un tempo di vita maggiore di sei volte il tempo utilizzato nei test. Ad esempio:

- 6.000 ore di test: vita media massima certificata < 36.000 ore
- 10.000 ore di test: vita media massima certificata < 60.000 ore

Tabella 2-1 TM 21-11: equazioni analitiche utilizzabili per estrapolare i valori d'intensità con il tempo.

Model	Decay Rate	Closed Form Solution	Comment
1	$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{v}}}{\mathrm{d}t} = k_{1}$	$I_{v} = I_{v}^{0} + k_{1}(t - t^{0})$	
2	$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{v}}}{\mathrm{d}t} = k_{2}I_{\mathrm{v}}$	$I_{v} = I_{v}^{0} \exp\left[k_{2}(t - t^{0})\right]$	
3	$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{v}}}{\mathrm{d}t} = k_{1}I_{\mathrm{v}} + k_{2}I_{\mathrm{v}}$	$I_{v} = \left(I_{v}^{0} + \frac{k_{1}}{k_{2}}\right) \exp\left[k_{2}(t - t^{0})\right] - \frac{k_{1}}{k_{2}}$	Model 1 + Model 2
4	$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{v}}}{\mathrm{d}t} = \frac{k_3}{t}$	$I_{\rm v} = I_{\rm v}^0 + k_3 \ln \left(\frac{t}{t^0}\right)$	
5	$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{v}}}{\mathrm{d}t} = k_1 + \frac{k_3}{t}$	$I_{v} = I_{v}^{0} + k_{1}(t - t^{0}) + k_{3} \ln\left(\frac{t}{t^{0}}\right)$	Model 1 + Model 4
6	$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{v}}}{\mathrm{d}t} = k_{4}I_{\mathrm{v}}^{2}$	$I_{v} = \frac{I_{v}^{0}}{1 + I_{v}^{0} k_{4}(t - t^{0})}$	
7	$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{v}}}{\mathrm{d}t} = k_5 \frac{I_{\mathrm{v}}}{t}$	$I_{\rm v} = I_{\rm v}^0 (t/t^0)^{k_5}$	
8	$\frac{\mathrm{d}I_{\mathrm{v}}}{\mathrm{d}t} = k_2 I_{\mathrm{v}} + k_5 \frac{I_{\mathrm{v}}}{t}$	$I_{v} = I_{v}^{0} \exp[k_{2}(t - t^{0})](t/t^{0})^{k_{s}}$	Model 2 + Model 7
9		$I_{\rm v} = I_{\rm v}^0 \exp \left[ -\frac{(t-t^0)}{k_6} \right]^{k_7}$	

La Figura 2-45 mostra tre diverse estrapolazioni del flusso luminoso di un LED commerciale della Philips. Analizzando la figura, è possibile notare che, con gli stessi dati sperimentali, utilizzando diversi modelli di estrapolazione, si ottengono stime notevolmente diverse.

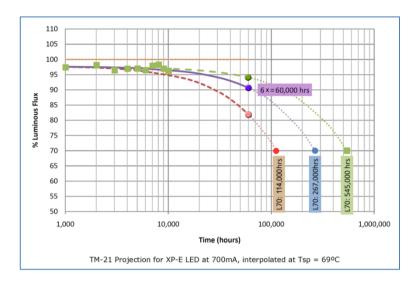


Figura 2-45 Estrapolazione della vita media di un LED con differenti modelli.

Con motivazioni analoghe, il programma Energy Star dalla *Environmental Protection Agency* (EPA) prevede certificazioni della vita media soltanto fino a 50'000 ore [48].

La Figura 2-46 mostra uno "stralcio" delle prescrizioni previste dall'ENERGY STAR® Program Requirements (Eligibility Criteria Version 1.0, Draft 2).

LED 112

Solid State	Lamp shall maintain minimum percentage of 0-hour light output after completion of the test duration corresponding to lamp's life claim (hours to 70% lumen maintenance or L <sub>70</sub> ) per the table(s) below. Lamp may earn optional early interim qualification after 3,000 hours, with a rated life claim ≤ 35,000 hours, per the provisions below. Lamps to be marketed as commercial grade shall satisfy requirements for no less than 35,000 hour rated life claims.				Measurement (lamps): ENERGY STAR Elevated Temperature Life Test (Annex A) ENERGY STAR Ambient Temperature Life Test			
	Maximum Life Claim (hours to L <sub>70</sub> )	Test Duration (hours) *	Minimum Lumen Maintenance After Test Duration	Status After Completion of Test Duration	(Annex B)  Measurement			
	15,000	6,000	86.7%	Final	(devices):			
	20,000	6,000	89.9%	qualification	IES LM-80-08			
	25,000	6,000	91.8%	testing completed.	Lumen			
	30,000	6,000	93.1%	Interim	Maintenance			
	35,000	6,000	94.1%	qualification	Projection:			
	40,000 6,000 94.8% ; continue				IES TM-21-11			
	45,000	6,000	95.4%	testing per	ILO TIVI-ZI-TI			
	50,000	6,000	95.8%	below.				
	maintain ≥ 9 completion of	claims > 2 1.5% of 0- of the test of	25,000 hours, hour light outp duration corres e table below.	out after				
	L <sub>70</sub> )							
	30,000 7,500							
	35,000	8,750						
	40,000	10,000						
	45,000	11,250						

Figura 2-46 Prescrizioni sulla vita media delle sorgenti luminose a stato secondo il programma Energy Star.

# Capitolo 3 Norme

3.1	INTENSITÀ LUMINOSA	114
3.1.1	FOTOMETRIA	116
3.1.2	SCELTA DEI VALORI DI LUMINOSITÀ PER I VARI ASPETTI DEI SEGNALI	119
3.1.3	VALORI DI INTENSITÀ DEI SINGOLI ASPETTI	120
3.2	COLORE NELLA SEGNALETICA LUMINOSA	123
3.2.1	LEGGE DEL BARICENTRO	128
3.2.2	DETERMINAZIONE DEL COLORE DI UN SEGNALE LUMINOSO	129
3.2.3	AREE DI CROMATICITÀ DI UN SEGNALE LUMINOSO	130
3.3	EFFETTO FANTASMA	132
3.3.1	DETERMINAZIONE DELL'EFFETTO FANTASMA	134
3.4	SPECIFICHE NORMATIVE	135
3.4.1	ENI12368	136
3.4.2	UNI9296	140
3.4.3	ITE-LED	144

In questo capitolo discuteremo delle norme di riferimento per la segnaletica luminosa. In particolare ci siamo interessati della classica segnaletica a tre aspetti: Rosso, Giallo, Verde; utilizzata a livello internazionale sia in ambito stradale sia ferroviario sia anche in quello aereonavale.

Prima di addentrarci nelle singole prescrizioni normative si è ritenuto opportuno descrivere brevemente la base teorica sulla quale si fondano le scelte/i limiti descritti all'interno delle stesse. Di fatto i segnali colorati sono apparecchi, di cui l'uomo è l'interprete, il cui scopo è fornire un'informazione o un'istruzione mediante l'uso di "avvisi" visivi.

Le normative di loro riferimento hanno base teorica su discipline come la fotometria e la colorimetria che cercano di correlare in modo oggettivo le caratteristiche della luce alla percezione visiva dell'uomo. Di fatto le disposizioni riguardanti l'ottica degli apparati di segnalamento, oggetto del nostro studio, ricercano la "sicurezza della sensazione" stimolata nell'osservatore, in altre parole i limiti imposti cercano di definire sorgenti luminose prive di ambiguità e visibili.

Nella descrizione delle norme, nello specifico, ci soffermeremo sulla parte ottica dei sistemi di segnalamento, essendo le caratteristiche elettriche e meccaniche estremamente variegate tra le diverse nazioni (ad esempio si pensi alla sola differenza tra la rete elettrica europea e quella utilizzata negli USA o alle reti "private", come può essere quella ferroviaria) o tra i diversi campi di applicazione (ferroviaria, stradale, navale...).

Infine mostreremo come, in alcuni casi, le prescrizioni si siano adeguate ai nuovi segnali a tecnologia LED.

# 3.1 Intensità luminosa

La soglia di visibilità rappresenta la minima intensità luminosa percepibile. L'abbagliamento, invece, è la momentanea riduzione delle facoltà visive Intensità luminosa 115

provocata dalla presenza nel campo visivo di un oggetto molto brillante rispetto agli altri circostanti.

L'abbagliamento e la soglia di visibilità non sono parametri assoluti, la visione è una sensazione "con memoria", in altre parole è fortemente influenzata da ciò che si è osservato in precedenza; il nostro cervello è in grado di adattare la percezione all'intensità globale dello stimolo. Se la luminosità media degli oggetti nel campo visivo è elevata, la soglia di visibilità tende a salire, mentre se è bassa la soglia tende a scendere. Questo adattamento non è istantaneo, ma richiede un certo tempo che dipende dalla differenza tra i due stimoli medi.

La percezione dell'intensità luminosa è, inoltre, legata al contrasto presente nel campo visivo, ad esempio le macchie solari ci appaiono quasi nere perché molto meno luminose del resto del disco solare, ma prese singolarmente sarebbero anch'esse molto brillanti, così come a occhio nudo vediamo scuri i "mari" della Luna perché contrastati dalle altre zone della superficie più riflettenti, mentre isolati nel campo del nostro oculare gli stessi si rivelano molto più chiari.

Tutti questi fenomeni rendono difficile la definizione delle specifiche d'intensità che debbano rispettare i segnali. Uno dei principali problemi (e anche il più difficile da risolvere) e quello di determinare il livello di luminosità in modo tale che il segnale sia sufficientemente brillante per essere leggibile in "pieno" sole, e non così brillante da causare "abbagliamento" durante le ore notturne. Un altro problema è quello di scegliere l'intensità luminosa in funzione dell'aspetto del segnale. Per ultimo, stabilire l'intensità luminosa in funzione della distanza alla quale deve essere "correttamente" interpretato.

### 3.1.1 Fotometria

Prima di presentare alcuni lavori presenti in letteratura, base delle attuali normative per il segnalamento (per quanto concerne la scelta dell'intensità luminosa degli aspetti), si è pensato di discutere brevemente della fotometria in modo tale da definire alcuni importanti concetti utili a una miglior comprensione degli argomenti tratti inseguito.

La fotometria è la disciplina che studia le grandezze legate alla luce, tenendo in conto come questa viene percepita dall'uomo, e i metodi e gli strumenti per misurarle.

Le caratteristiche qualitative della luce come luminosità e colore sono solo l'effetto prodotto sulla retina da una particolare forma di radiazione elettromagnetica. Come è noto, le radiazioni elettromagnetiche sono caratterizzate da tre parametri:

- velocità di propagazione nel vuoto;
- lunghezza d'onda, ossia lo spazio percorso da un'onda per compiere un'oscillazione completa;
- frequenza, ossia il numero di oscillazioni nell'unità di tempo.

La velocità di propagazione nel vuoto è una costante per tutte le radiazioni elettromagnetiche (c – velocità della luce nel vuoto). Al contrario la lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) e la frequenza ( $\nu$ ) sono variabili (dipendono dalla specifica radiazione). Con il termine luce si suole definire una radiazione elettromagnetica corrispondente a particolari lunghezze d'onda le quali definiscono lo spettro del visibile, Figura 3-1.

Intensità luminosa 117

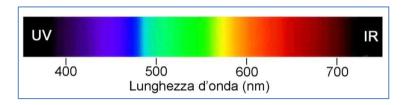


Figura 3-1 Spetto elettromagnetico corrispondente alla regione del visibile.

Lo spettro delle radiazioni visibili non ha dei limiti ben precisi in quanto la sensibilità dell'occhio umano varia da individuo a individuo. Nel 1924 la CIE (Commission Internationale de l'Éclairage - Commissione Internazionale per l'Illuminazione, organo di riferimento internazionale per il campo illuminotecnico e fotometrico) ha standardizzato la funzione spettrale di efficienza luminosa (sensibilità dell'occhio umano) per la visione fotopica (visione diurna) indicata di solito con  $V(\lambda)$ .

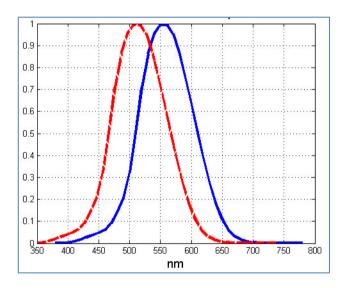


Figura 3-2 Standard della sensibilità dell'occhio umano. Curva continua: visione fotopica (visione diurna); Curva tratteggiata: visione scotopica (visione notturna). La sensibilità tuttavia dipende dall'intensità della luce irradiante.

Si è adottato dunque un "occhio medio internazionale" in grado di rispecchiare le caratteristiche medie dell'occhio umano, risultato di un'elaborazione statistica compiuta sulla scorta di rilievi condotti su un gran numero di individui, Figura 3-2.

Attraverso questo standard si definisce quindi lo spettro del visibile come le lunghezze d'onda comprese tra 380 e 780 nanometri (nm).

Tabella 3-1 Principali grandezze fotometriche.

GRANDEZZA	UNITÀ	GRANDEZZA	UNITÀ	DEFINIZIONE	
RADIOMETRICA	SIMBOLO	IMBOLO FOTOMETRICA			
Energia radiante	Joule: [ J ]	Quantità di luce	lumensecondo [lm s]	Quantità di energia trasportata da una radiazione elettromagnetica	
Flusso radiante	watt (J/s): [ W ]	Flusso luminoso	lumen [lm]	Quantità di energia luminosa emessa da una sorgente nell'unità di tempo	
Emettenza radiante	watt al metro quadrato: [W/m²]	Emettenza luminosa	lumen al metro quadrato: [lm/m <sup>2</sup> ]	Flusso per unità di superficie	
Irradianza	watt al metro quadrato [W/m²]	Illuminamento	lux (lm/m <sup>2</sup> ): [lx]	Flusso incidente per unità di superficie	
Intensità radiante	Watt allo steradiante [W/sr]	Intensità luminosa	candela: [cd]	Flusso emesso per angolo solido unitario	
Radianza	watt allo steradiante al metro quadrato [W/(sr m²)]	Luminanza (brillanza)	candela al metro quadrato: [nit=cd/m <sup>2</sup> ]	Intensità emessa dall'unità di superficie in una data direzione	

Come mostra la Figura 3-2, la sensibilità dell'occhio umano alle diverse lunghezze d'onda del visibile non è costante. Il sistema visivo presenta la sua

Intensità luminosa 119

massima sensibilità intorno alla lunghezza d'onda di  $\lambda = 555$  nm, che corrisponde alla luce di colore giallo-verde. Dunque, l'intensità della sensazione prodotta da un'eguale quantità di energia emessa varia lungo lo spettro del visibile.

Per quantificare l'emissione luminosa in termini di risposta del sistema visivo umano si introducono le grandezze fotometriche. Tali grandezze sono definite dalle grandezze radiometriche, che invece fanno riferimento all'energia posseduta dalle onde elettromagnetiche, pesate con la curva di sensibilità dell'occhio umano. Le grandezze fotometriche principali sono descritte nella Tabella 3-1.

### 3.1.2 Scelta dei valori di luminosità per i vari aspetti dei Segnali

L'occhio umano, come già detto, risponde al contrasto tra gli oggetti che sono presenti nel campo visivo. In realtà risponde al contrasto tra gli oggetti che hanno colore "simile".

Nell'ambiente (alle nostre latitudini), gli oggetti che riflettono radiazione Rossa sono praticamente inesistenti. Come è noto al variare della latitudine i raggi del sole attraversano una maggiore o minore regione dell'atmosfera terrestre la quale, comportandosi da filtro, determina variazioni delle componenti spettrali della luce che giunge sino a noi; si pensi al differente contenuto spettrale della luce tra le ore diurne e l'alba. Dunque, la presenza di pochi oggetti rossi indica che è sufficiente un'intensità luminosa relativamente "bassa" affinché un segnale Rosso/Porpora venga "distinto" dallo sfondo e correttamente interpretato.

Al contrario, nell'ambiente (sempre alle nostre latitudini), gli oggetti che riflettono radiazione Giallo/Arancio sono molto numerosi. Questo sta a indicare

che è necessaria un'intensità luminosa relativamente "alta" affinché un segnale Giallo/Arancio venga correttamente interpretato.

Sempre con riferimento alle nostre latitudini, nell'ambiente gli oggetti che riflettono radiazione Verde/Blu sono meno numerosi di quelli che riflettono la radiazione Giallo/Arancio, tuttavia sono "abbastanza presenti". Questo sta a indicare che è necessaria un'intensità luminosa relativamente "media" affinché un segnale verde/blu venga correttamente interpretato.

In letteratura sono disponibili soltanto due lavori sperimentali orientati alla determinazione dei rapporti d'intensità che devono avere i vari aspetti dei segnali luminosi. Nel lavoro [49] si conclude che l'aspetto Verde deve essere circa 1.0-1.2 volte più intenso del Rosso. Mentre nell'articolo [50] si stabilisce che il colore Verde dovrebbe essere 1.0-2.5 volte il Rosso e l'aspetto Giallo 2.5-3.0 volte più intenso del Rosso.

In particolare, come vedremo nei paragrafi successivi, numerosi standard internazionali si rifanno a tali studi (anche se in alcuni casi modificano lievemente i rapporti appena descritti).

## 3.1.3 Valori d'intensità dei singoli aspetti

Come abbiamo definito nel § 3.1 un parametro importante per definire l'intensità di un singolo aspetto è la distanza cui deve essere percepito. Infatti, stabilità la distanza è possibile definire una relazione lineare tra la brillanza (luminanza) dello sfondo ( $L_{sfondo}$ ) e la brillanza (luminanza) che deve avere il segnale ( $L_{segnale}$ ), [49]-[51]:

Intensità luminosa 121

$$\frac{L_{sfondo}}{L_{seenale}} = C_1 \tag{3.1}$$

dove  $C_1$  è una costante che dipende dalla distanza cui deve essere percepito il segnale.

Tuttavia bisogna considerare che non tutta la luce emessa dal segnale raggiunge direttamente l'osservatore. Se da una parte si dimostra che la risposta a uno stimolo luminoso dipende solamente dalla quantità di radiazione che dal segnale giunge nell'occhio dell'osservatore [52], dall'altra, in generale, i segnali non sono posti lungo la linea di moto dell'osservatore [54]. Questo comporta che nell'occhio si sommano informazioni provenienti da parti diverse dell'occhio stesso.

Attraverso semplici relazioni geometriche è possibile affermare che l'intensità luminosa (*I*) che raggiunge l'occhio è indipendente dalle dimensioni del segnale. La luce che stimola l'occhio dipende semplicemente dall'angolo tra osservatore e semaforo. Quindi la visibilità di un segnale non dipende dall'intensità luminosa ma dal rapporto tra intensità e la superficie del segnale.

La corretta intensità luminosa è scelta, dunque, imponendo che la brillanza moltiplicata per l'angolo solido sotteso dal segnale sia costante:

$$L_{seonale}\Omega = C_2 \quad (C_2 = \text{costante}) \tag{3.2}$$

Nell'equazione (3.2)  $\Omega$  rappresenta l'angolo solido sotteso dal segnale. Come è noto, l'angolo solido è determinato dall'area del segnale (A) divisa per la distanza di osservazione (d) al quadrato.

$$\Omega = \frac{A}{d^2} \tag{3.3}$$

Mentre la brillanza  $L_{segnale}$  (o luminanza del segnale) è l'intensità luminosa emessa per unità di superficie:  $L_{segnale} = I_d / A$  (misurata nel sistema SI in cd/m<sup>2</sup>). Pertanto, l'intensità luminosa del segnale può essere espressa come:

$$I_d = L_{segnale} \cdot A \tag{3.4}$$

Sostituendo le equazioni (3.3) e (3.4) nell'equazione (3.2) si ottiene:

$$\frac{I_d}{d^2} = C_2 \quad \Rightarrow \quad I_d = C \cdot d^2 \cdot L_{sfondo} \tag{3.5}$$

Pertanto se fossimo in grado di definire il livello di brillanza dello sfondo ( $L_{sfondo}$ ) saremmo in grado di determinare il valore della costante C in modo tale da definire la corretta intensità luminosa che il segnale deve assumere.

SORGENTE	LUMINANZA cd/m <sup>2</sup>
Sole a mezzogiorno	16 x 10 <sup>9</sup>
Sole al tramonto	6 x 10 <sup>6</sup>
Cielo sereno	8000
Cielo nuvoloso	2000
Terreno a prato	800

Figura 3-3 Tipiche luminanze di sfondo.

I lavori [55], [56] indicano come brillanza dello sfondo  $10^4$  cd/m<sup>2</sup> e come costante C per il Rosso il valore di  $2 \cdot 10^{-6}$ .

$$I_d^{(Rosso)} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot d^2 \cdot L_{stondo}$$
 (3.6)

Mentre per l'aspetto Giallo e per l'aspetto Verde abbiamo:

$$I_d^{(Giallo)} = 6 \cdot 10^{-6} \cdot d^2 \cdot L_{sfondo}$$
(3.7)

$$I_d^{(Verde)} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot d^2 \cdot L_{stondo}$$
 (3.8)

È importante notare che le intensità luminose individuate per i tre diversi aspetti seguono i rapporti identificati nel § 3.1.2.

I risultati appena presentati fanno riferimento per di più alla segnaletica realizzata con la classica tecnologia a filamento, mentre per quanto riguarda i nuovi segnali realizzati con tecnologia LED, si deve considerare che essi emettono "colori" più puri (in altre parole possiedono una radiazione più monocromatica rispetto a quella dei segnali tradizionali), "apparendo" più brillanti. Come abbiamo più volte affermato, l'osservatore percepisce la differenza d'intensità luminosa e il contrasto cromatico. Quindi a parità d'intensità luminosa, una sorgente monocromatica appare più visibile in quanto si differenzia meglio dalle componenti cromatiche dello sfondo.

Per i segnali a LED le costanti presenti nelle equazioni (3.6), (3.7) e (3.8) potrebbero assumere valori più bassi (stessa visibilità dei segnali tradizionali ma a intensità più bassa). Tuttavia studi sui nuovi dispositivi sono ancora in via di sviluppo e la cautela nel cambiare le normative fa sì che nella maggior parte dei casi si faccia uso dei valori precedentemente presentati [53].

# 3.2 Colore nella segnaletica luminosa

Il colore è una caratteristica della percezione visiva psicosensoriale in quanto è di natura soggettiva. È però possibile stabilire una correlazione tra la percezione e lo

stimolo, cioè l'energia radiante che penetra nell'occhio, che provoca la sensazione di colore. Si può, infatti, valutare oggettivamente il colore, se si definiscono come nella fotometria le caratteristiche dell'osservatore normalizzato.

Le convenzioni CIE 1931 stabiliscono le caratteristiche dell'osservatore normalizzato, di fatto le norme che inseguito presenteremo fanno riferimento alle convenzioni CIE utilizzando il loro sistema colorimetrico.

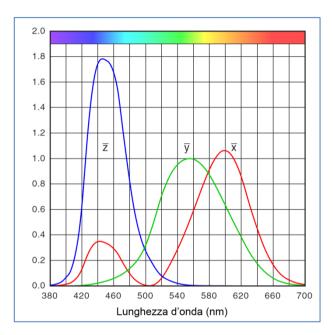


Figura 3-4 Funzioni di corrispondenza colore CIE (CIE XYZ color-matching functions).

Il sistema colorimetrico CIE [57], definisce tre curve indicate con  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  e  $\bar{z}$  dette funzioni di corrispondenza colore CIE (CIE-color matching functions), esse definiscono l'osservatore colorimetrico standard CIE 1931 (CIE 1931 standard colorimetric observer), Figura 3-4. Le tre funzioni sono anche spesso, in maniera impropria, indicate come colori primari del sistema CIE.

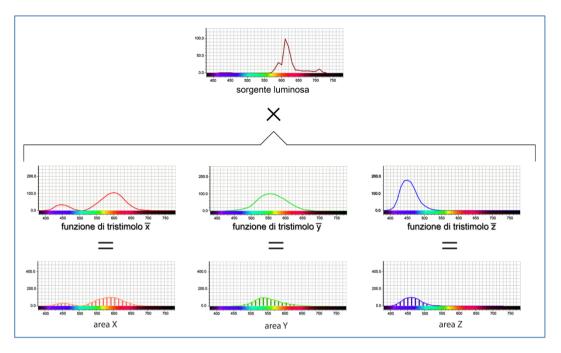


Figura 3-5 Rappresentazione schematica di come si ricavano i valori tristimolo CIE X, Y, Z.

Queste funzioni si utilizzano per calcolare i valori tristimolo X, Y e Z che definiscono in maniera oggettiva la cromaticità di una sorgente luminosa. In particolare se consideriamo una sorgente con spettro emissivo pari alla funzione  $\Phi(\lambda)$ , i valori tristimolo sono così calcolati:

$$X = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \cdot \overline{x}(\lambda) \, d\lambda \,; \quad Y = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \cdot \overline{y}(\lambda) \, d\lambda \,; \quad Z = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \cdot \overline{z}(\lambda) \, d\lambda \tag{3.9}$$

dove  $\Phi(\lambda)$  indica i valori dell'energia spettrale in funzione della radiazione emessa dalla sorgente considerata e  $\overline{x}(\lambda)$ ,  $\overline{y}(\lambda)$ ,  $\overline{z}(\lambda)$  sono le funzioni colorimetriche definite in precedenza, Figura 3-5.

Per la rappresentazione grafica dei valori tristimolo, così ottenuti, la convenzione CIE 1931 e sue successive definiscono diverse metodologie grafiche, dallo Spazio Tristimolo 1931 ai diagrammi colorimetrici CIE 1931 o CIE 1976, Figura 3-6.

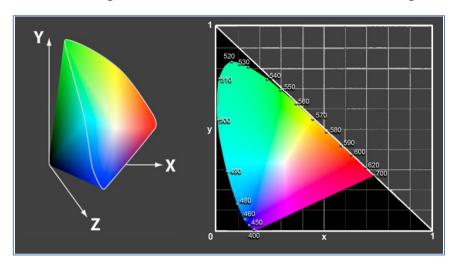


Figura 3-6 Rappresentazione grafica della colorimetria di una sorgente luminosa. (Sinstra) Spazio Tristimolo 1931; (Destra) Diagramma colorimetrico CIE 1931.

In particolare nella nostra trattazione ci rifacciamo al diagramma cromatico CIE1931, essendo questo più comodo da utilizzare (rappresentazione a 2D) ed essendo quello cui fanno riferimento le norme per la segnaletica luminosa.

Il diagramma di cromaticità CIE1931 è ottenuto per proiezione dall'infinito dello spazio tristimolo sul piano Z=0. I punti (x, y) all'interno del diagramma di cromaticità CIE1931 descrivono l'insieme dei colori visibili o reali. Al di fuori di esso, ma all'interno del triangolo rettangolo (indicato in nero in Figura 3-6), ci sono tutti i colori non visibili o irreali.

Il contorno del diagramma (luogo dello spettro) rappresenta le cromaticità delle radiazioni monocromatiche e nel tratto rettilineo le radiazioni di tinta porpora (o magenta), tutte al loro massimo grado di saturazione. Nello spettro elettromagnetico del visibile possiamo individuare solo i colori spettrali, ovvero tinte caratterizzate da un'unica lunghezza d'onda e per questo definite come monocromatiche. Esistono, però, infinite tinte non spettrali (ovvero non presenti nello spettro elettromagnetico) ottenute dalla miscelazione di colori "estremi" dello spettro, quali il rosso e il violetto. Si tratta delle cosiddette porpore, colori ben noti in natura, ma non riproducibili monocromaticamente, né ricavabili per diffrazione da un raggio di luce bianca.

Per ottenere dunque la rappresentazione della cromaticità sul diagramma CIE1931 dai valori tristimolo si definiscono i coefficienti tricromatici come l'intersezione degli stessi valori X, Y e Z con il piano unitario X+Y+Z=1. I coefficienti tricromatici si determinano dunque:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}; \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$
 (3.10)

Convenzionalmente si utilizzano i valori (x, y) che permettono di individuare sul diagramma di cromaticità il punto rappresentante la cromaticità della sorgente analizzata. In particolare i coefficienti tricomatici x e y sono sufficienti per caratterizzare la cromaticità di una sorgente luminosa poiché il terzo coefficiente può essere calcolato ricordando che le equazioni (3.10) sono vincolate all'equazione x+y+z=1.

Infine è importante notare che i coefficienti tricomatici definiscono la "ricetta" della sorgente luminosa analizzata, cioè esprimono i rapporti dei "colori primari CIE" che compongono la sorgente analizzata.

## 3.2.1 Legge del Baricentro

La colorimetria moderna ha le sue basi negli studi dello scienziato inglese Isaac Newton (1642-1727), che per primo ebbe l'intuizione che la relazione tra lo stimolo luminoso e la percezione del colore si potesse rappresentare attraverso un modello matematico. Benché il suo sistema colorimetrico fosse ancora "primitivo", quest'ultimo gli permise di enunciare la legge del baricentro della colorimetria, tuttora considerata valida.

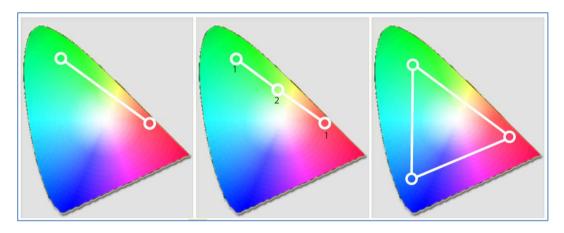


Figura 3-7 Rappresentazione grafica della legge del baricentro.

Se due stimoli di colore, rappresentati dai propri coefficienti tristimolo, vengono mescolati additivamente, le loro mescolanze stanno sul segmento retto che congiunge i due punti nello spazio del diagramma CIE1931. In particolare la luminanza dei due stimoli si comporta da "peso": il risultato della mescolanza sta nel punto di baricentro definito dalle luminanze (legge del baricentro).

Mentre, le mescolanze additive di tre colori stanno nel triangolo che ha come vertici i tre colori che si mescolano e vale anche in questo caso la legge del

#### baricentro.

Tale legge offre un notevole grado di libertà nella definizione del sistema ottico della segnaletica, inoltre alcune soluzioni ipotizzate in questa tesi fanno riferimento a quest'ultima (§ 6.1.1).

### 3.2.2 Determinazione del colore di un segnale luminoso

Il sistema più accurato per la misura del colore è il metodo spettroradiometrico. Un analizzatore di spettro (spettroradiometro) determina la curva di emissione spettrale della sorgente luminosa. In altre parole, lo strumento ricava, per ogni singola lunghezza d'onda appartenete allo spettro del visibile, l'intensità della luce emessa dalla sorgente. Pertanto, lo spettroradiometro permette di ottenere la distribuzione spettrale relativa di energia associata alla luce emessa da una sorgente (la funzione  $\Phi(\lambda)$  vista nel paragrafo precedente).

La Figura 3-8 mostra la disposizione strumentale da utilizzare per la registrazione dello spettro di emissione di una sorgente luminosa. La luce proveniente dal segnale viene fatta incidere direttamente sul sensore di misura. La distanza "d" è scelta in modo tale che la radiazione incidente sul sensore sia "spazialmente uniforme".

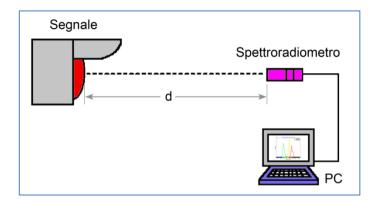


Figura 3-8 Disposizione strumentale per la determinazione dello spettro di emissione di una sorgente luminosa.

Utilizzando quindi le funzioni colorimetriche CIE, precedentemente presentate, si possono ricavare i valori tristimolo X, Y e Z della sorgente luminosa considerata: equazioni (3.9) e (3.10).

### 3.2.3 Aree di cromaticità di un segnale luminoso

Le norme per il segnalamento definiscono il colore dei vari aspetti di un segnale attraverso la descrizione di aree di cromaticità all'interno dei diagrammi CIE1931. Le caratteristiche colorimetriche dei segnali devono essere interne a queste aree in tutte le possibili condizioni di funzionamento definite dalle norme stesse. Quest'ultime di solito comprendono: variazioni della temperatura ambientale; variazioni delle specifiche dei singoli componenti entro i limiti delle relative prescrizioni; variazioni della tensione di alimentazione; dell'angolo di osservazione del segnale; ecc.

In campo internazionale esistono norme che definiscono aree cromatiche leggermente differenti [58]. La Figura 3-9 mostra le aree cromatiche definite dalla

norma UNI9296 (RFI), dalla specifica EN12368 (European Traffic Signal Color Requirement), dalla specifica ICAO-Aeronautical Ground Light Colors (prodotta dalla International Civil Aviation Organizzation), dalla specifica MIL-C250550 (FAA-Ground light Colors – prodotta dalla Federal Aviation Administration) e dalla norma ITE-LED (Institute of Transportation Engineers per i segnali stradali a tecnologia LED).

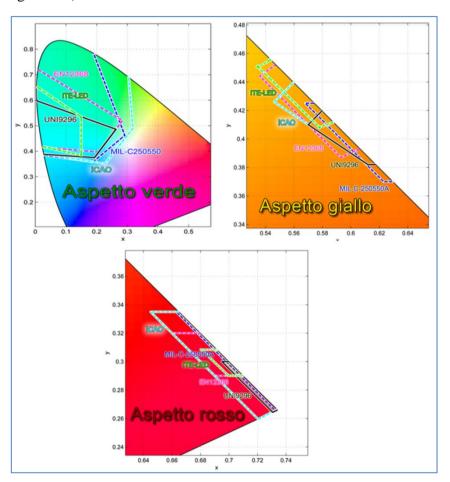


Figura 3-9 Limiti delle aree di cromaticità per gli aspetti Rosso, Giallo e Verde definiti dalle specifiche tecniche: UNI9296, EN12368, ICAO-Aeronautical Ground Light Colors, MIL-C250550 e ITE-LED.

È importante notare come in campo internazionale la tendenza è di definire aree cromatiche sul diagramma CIE1931, per i diversi aspetti di un segnale, il più possibile lontane tra di loro. Come avevamo già anticipato nell'introduzione al capitolo, la preferenza diffusa di scegliere come aspetti luminosi di un segnale i colori blu, rosso, giallo e verde è dettata dalla ricerca della "sicurezza dello stimolo". Il segnale che non rispetta in modo "rigoroso" le aree di cromaticità delle norme non induce errori interpretativi e/o crea situazioni di pericolo.

### 3.3 Effetto Fantasma

Le prescrizioni dei segnali luminosi descrivono un particolare effetto che può presentarsi nelle ore di alba e tramonto nei segnali rivolti verso i punti cardinali est e ovest rispettivamente, denominato "effetto fantasma". Nella segnaletica luminosa tale fenomeno è dovuto all'incidenza dei raggi solari sulle unità ottiche dei segnali che, sotto un determinato angolo e in particolari condizioni di visibilità, riflettendosi sull'unità ottica a lampada spenta, possono dare un'indicazione errata facendola apparire accesa.

All'interno delle norme si definiscono dunque le massime intensità luminose riemesse a seguito d'illuminamento esterno.

Questa problematica affligge la segnaletica realizzata con le classiche tecnologie (sorgente luminosa + filtro); infatti la luce del sole, penetrando all'interno dell'ottica del segnale, viene riflessa dai riflettori interni e riemessa attraverso i filtri colorati dando la sensazione di segnalamento.

Effetto Fantasma 133

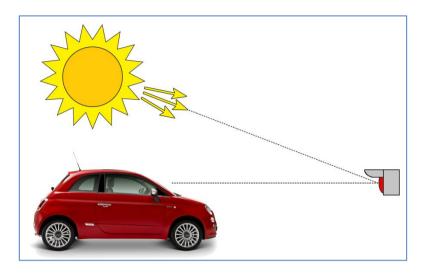


Figura 3-10 Effetto Fantansma. La luce del Sole penetrando nelle unità ottiche del segnale può esser riemessa inducendo un errore unterpretativo all'utente finale.

La nuova tecnologia a LED invece risulta immune a questa problematica, in quanto non facendo uso di filtri e riflettori non permette la restituzione della luce solare nelle forme previste dalle norme stesse (l'eventuale "colorazione" della luce riemessa dal segnale non risulta conforme a nessuno degli aspetti). Infatti la criticità di questo effetto è data dalla colorazione della luce riemessa dal segnale, che nel caso in cui sia presente un filtro risulta conforme alle aree cromatiche viste nel precedente paragrafo. Nel caso della segnaletica a LED, benché l'ottica interna può riflettere la luce incidente, la luce riemessa presenterà lo stesso spettro di quella incidente.

In particolare la limitazione dell'effetto fantasma viene ottenuta realizzando strutture a nido d'ape che impediscono alla luce esterna di "entrare" nell'ottica del segnale stesso, Figura 3-11 (vedi anche [60][61]).



Figura 3-11 Classiche strutture a nido d'ape utilizzate per limitare l'effetto fantasma.

#### 3.3.1 Determinazione dell'effetto fantasma

La Figura 3-12 descrive la disposizione strumentale per la determinazione dell'effetto fantasma. Nella pratica tutte le norme fanno riferimento all'illuminante di tipo "A" della CIE, utilizzato per simulare la luce del Sole quand'esso risulta radente rispetto all'orizzonte. La sua distribuzione spettrale relativa di potenza è di un radiatore di Planck a una temperatura di circa 2856 K.

In fase di misura il segnale luminoso viene istallato con asse ottico orizzontale. La superficie ottica del segnale viene illuminata con un proiettore certificato illuminante "A" CIE. Quest'ultimo viene posto superiormente al gruppo ottico del segnale, con l'asse ottico sullo stesso piano verticale contenente l'asse ottico del segnale, e in modo che i due assi ottici formino un angolo  $\alpha$ . Tale angolo può variare tra i 5° e 10° secondo la norma considerata. La distanza "d" è scelta in modo tale da poter considerare il segnale come una sorgente di radiazione

"puntiforme". Attraverso un fotosensore, dunque, si rileva la quantità di luce "scatterata" dall'ottica del segnale.

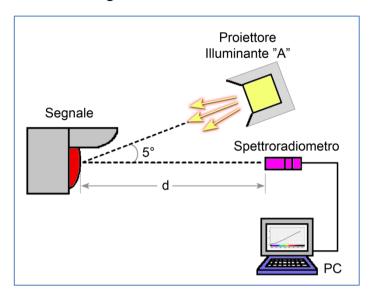


Figura 3-12 Disposizione strumentale per la determinazione dell'effetto fantasma.

Inoltre, al fine di stabilire se la luce generata da effetto fantasma possa essere confusa con uno degli aspetti del segnale, si effettua un'analisi cromatica (tramite spettroradiometro) della radiazione "scatterata" dal segnale.

# 3.4 Specifiche Normative

In questo breve paragrafo cercheremo di riassumere le prescrizioni normative che in questi anni sono state oggetto del nostro studio. In particolare la nostra attenzione è stata posta verso la normativa europea ENI12368 specifica per il segnalamento luminoso di tipo stradale, la normativa UNI9296 per il

segnalamento ferroviario italiano e infine la neo nata normativa ITE-LED vigente negli Stati Uniti d'America per il segnalamento stradale.

### 3.4.1 ENI12368

La presente norma europea si applica alle segnalazioni luminose rosse, gialle e verdi destinate al controllo del traffico stradale. La norma definisce dunque i requisiti delle lampade semaforiche, le quali possono avere un diametro di 200 mm o 300 mm, indicando le prestazioni visive, strutturali e ambientali nonché le prove di verifica e collaudo cui i segnali stessi devono essere sottoposti. In particolare oggi questa norma regola la realizzazione dei segnali luminosi senza distinzione di tecnologia utilizzata come sorgente luminosa, che sia "classica" o a LED [62].

Come abbiamo già detto, siamo interessati alle prescrizioni ottiche degli apparati di segnalazione, e in quest'ambito allo scopo di ottenere buone prestazioni nei diversi possibili ambienti d'installazione (zone urbane/rurali, ambienti climaticamente rigidi/temperati, ecc.) la norma specifica svariati livelli di prestazione indicando per ogni prescrizione ottica diverse classi di performance, oltre ai già citati due differenti diametri possibili.

La Tabella 3-2 descrive i range delle intensità luminose possibili, secondo il livello di prestazione scelto per il segnale. Per esempio per il livello di prestazioni 2/1 l'intensità luminosa emessa dalla lampada semaforica deve essere compresa tra i valori di  $I_{\min}$  pari a 200 cd e di  $I_{\max}$  pari a 800 cd.

Tabella 3-2 Disposizione dell'intensità luminosa consentita per distinte classi di performance, norma ENI12368.

	1	2	3
$I_{\min}$	100 cd	200 cd	400 cd
$I_{\rm max}$ classe 1	400 cd	800 cd	1000 cd
$I_{\rm max}$ classe 2	1100 cd	2000 cd	2500 cd

Inoltre la norma specifica il diagramma di radiazione della lampada. La Tabella 3-3 descrive in valori percentuali l'intensità luminosa che il segnale deve presentare al variare dell'angolo di osservazione (l'asse ottico principale definisce il riferimento angolare).

Tabella 3-3 Segnali ad apertura molto ampia (Tipo E) combinazioni possibili B 1/1, B 2/2. Norma ENI12368.

$lpha_{ m oriz}$ $lpha_{ m vert}$	0°	± 2.5°	± 5°	±10°	±15°	±20°	±30°
0°	100	-	85	80	1	60	40
-1.5°	1	1	ı	1	1	1	ı
-3°	80	1	75	1	1	1	ı
-5°	60	1	-	45	-	1	-
-10°	50	-	-	-	-	20	-
-20°	20	-	-	-	-	-	10

In particolare, la tabella è specifica per i segnali ad apertura molto ampia definiti "Tipo E", in realtà la norma definisce ben quattro tipologie differenti (E, W, M, N).

Inoltre si stabilisce l'uniformità della luce emessa dalla lente circolare della lampada, in altre parole l'uniformità della luminanza. Quest'ultima è definita

Norme 138

come il rapporto tra la luminanza minore e la luminanza maggiore misurabile sulla stessa lente di emissione del segnale:

$$\frac{L_{\min}}{L_{\max}} \ge \frac{1}{10} \text{ per E,W e M; } \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \ge \frac{1}{15} \text{ per N.}$$
 (3.11)

La ENI12368 definisce anche i massimi valori d'intensità dovuti all'effetto fantasma, del quale abbiamo discusso nel paragrafo 3.3. La Tabella 3-4 descrive i massimi rapporti accettati tra l'intensità luminosa emessa (I) dal segnale quando è acceso e l'intensità emessa da effetto fantasma ( $I_{ph}$ ) quando la lampada semaforica è illuminata da un'illuminate di tipo "A" CIE di 40000 lx con un angolo di 10°.

L'utilizzo dei rapporti, invece dell'indicazione di un valore massimo d'intensità, consente alla norma di non essere troppo restrittiva, di fatto si tiene conto del livello di prestazione dell'intensità scelto. Ad esempio, facendo riferimento alla Tabella 3-2, a un segnale di prestazione d'intensità 3/2 sarà concesso, in valore assoluto, un maggiore effetto fantasma rispetto a un segnale di prestazione 1/1. Tale scelta naturalmente non invalida la sicurezza della segnalazione in quanto l'osservatore non potrà essere "ingannato" dall'effetto fantasma; la differenza in intensità tra quest'ultimo e l'intensità dell'aspetto acceso consente all'osservatore di discriminare i due fenomeni.

Tabella 3-4 Rapporti massimi consentiti tra l'intensità emessa in funzionamento normale e l'intensità dovuta all'effetto fantasma. Norma ENI12368.

$I/I_{ph}$	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Rosso, Giallo	>1	>5	>4	>8	>16
Verde	>1	>5	>8	>16	>16

Per quanto riguarda il colore degli aspetti, la norma indentifica aree cromatiche all'interno del diagramma CIE1931 (vedi § 3.2.2). La Tabella 3-5 mostra le coordinate dei punti d'intersezione delle linee limite delle aree di cromaticità, mentre la Figura 3-13 è la rappresentazione grafica sul diagramma CIE.

Per concludere le prescrizioni ottiche, è importante notare come la norma prescrive l'utilizzo di uno schermo opaco di contrasto che circondi la lampada. Questa disposizione è di fatto nata per migliorare la percezione visiva del segnale; come abbiamo indicato nel § 3.1.2 l'occhio umano risponde bene al contrasto tra gli oggetti.

Tabella 3-5 Coordinate dei punti di intersezione delle linee limite delle aree di cromaticità. Norma ENI12368.

		Coordinata A		Coordinata B		Coordinata C		Coordinata D	
		CCX	CCY	CCX	CCY	CCX	CCY	CCX	CCY
I	Rosso	0.660	0.320	0.668	0.320	0.710	0.290	0.690	0.290
Ī	Giallo	0.536	0.444	0.547	0.452	0.613	0.387	0.593	0.387
I	Verde	0.009	0.720	0.284	0.520	0.209	0.400	0.028	0.400

Terminiamo la descrizione della norma ENI12368 con la Tabella 3-6 che rappresenta i range di temperatura, secondo le classi di riferimento, nei quali il segnale deve mantenere un comportamento conforme alle prescrizioni presenti nella norma stessa. Come abbiamo visto nel capitolo precedente, le prestazioni ottiche delle nuove sorgenti luminose a LED risultano fortemente influenzate dalle variazioni della temperatura e queste prescrizioni divengono fortemente restrittive. Da un punto di vista illuminotecnico tale caratteristica è una delle novità che la nuova tecnologia ha portato con sé.

140 Norme

Classe A	+ 60 °C	-15 °C
Classe B	+55 °C	-25 °C

Tabella 3-6 Range termici di funzionamento definiti nella norma ENI12368.

+40 °C

-40 °C

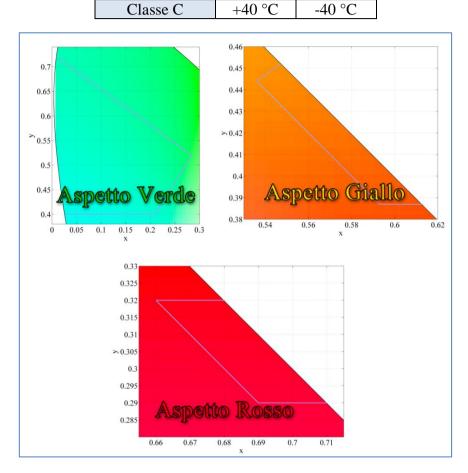


Figura 3-13 Limiti colorimetrici per gli aspetti Rosso, Giallo e Verde definiti dalla norma ENI12368.

### 3.4.2 UNI9296

La presente norma italiana si applica alle segnalazioni luminose rosse, gialle e verdi destinate all'ambiente ferroviario [63]. In particolare le prescrizioni, che andremo a presentare, fanno riferimento a una particolare tipologia di segnali ferroviari denominati "segnali alti e di avviso" di categoria 1, Figura 3-14 (per maggiori dettagli capitoli 4 e 7). La UNI9296, come nel caso precedente, regola la realizzazione dei segnali luminosi senza distinzione di tecnologia utilizzata come sorgente luminosa, che sia "classica" o a LED.



Figura 3-14 Segnali luminosi "alti" utilizzati in campo ferroviario.

Le prescrizioni fotometriche sono descritte dalla Tabella 3-7, la quale indica il range d'intensità che la lampada deve emettere lungo l'asse ottico principale di emissione. Come si può notare le prescrizioni seguono i valori d'intensità individuati nel paragrafo 3.1.3.

Norme 142

Tabella 3-7 Disposizione dell'intensità luminosa consentita per "segnali alti" di categoria 1, norma UNI9296.

Rosso	600 cd	1200 cd
Giallo	2000 cd	3600 cd
Verde	1500 cd	2400 cd

Inoltre, come la ENI12368, la norma specifica il diagramma di radiazione della lampada anche denominato "geometria del fascio", Tabella 3-8.

Tabella 3-8 Geometria del fascio luminoso emesso, norma UNI9296.

	Aspetto	o Rosso	Aspetto	Bianco	Aspetto	Giallo	Aspetto	) Verde
Angolo Orizzontale	$\mathrm{cd}_{\mathrm{Min}}$	$\mathrm{cd}_{\mathrm{Max}}$	$\mathrm{cd}_{\mathrm{Min}}$	$cd_{Max}$	$cd_{Min}$	$\mathrm{cd}_{\mathrm{Max}}$	$\mathrm{cd}_{\mathrm{Min}}$	$cd_{Max}$
0 °	600	1200	1500	2400	2000	3600	1500	2400
± 1°	545	1090	1360	2176	1800	3240	1360	2176
± 2°	400	800	1000	1700	1350	2430	1000	1700
± 3°	240	480	660	1260	900	1620	660	1260
Angolo Verticale	$\mathrm{cd}_{\mathrm{Min}}$	$\mathrm{cd}_{\mathrm{Max}}$	$\mathrm{cd}_{\mathrm{Min}}$	$cd_{Max}$	$cd_{Min}$	$\operatorname{cd}_{\operatorname{Max}}$	$\mathrm{cd}_{\mathrm{Min}}$	$cd_{Max}$
0°	600	1200	1500	2400	2000	3600	1500	2400
± 1°	250	700	650	1500	600	1950	650	1500

La norma definisce la massima intensità dovuta all'effetto fantasma pari a 10 cd, del quale abbiamo discusso nel paragrafo 3.3. L'intensità emessa da effetto fantasma ( $I_{ph}$ ) deve essere misurata a lampada semaforica spenta e illuminata con un'illuminate di tipo "A" CIE di 30000 lx con un angolo di 5°. Si noti come tale prescrizione sia notevolmente più restrittiva della ENI12368.

Tabella 3-9 Coordinate dei punti di intersezione delle linee limite delle aree di cromaticità. Norma UNI9296.

		Coordinata A		Coordinata B		Coordinata C		Coordinata D	
		CCX	CCY	CCX	CCY	CCX	CCY	CCX	CCY
	Rosso	0.695	0.300	0.700	0.300	0.735	0.265	0.731	0.264
ĺ	Giallo	0.570	0.410	0.580	0.420	0.617	0.382	0.612	0.382
ĺ	Verde	0.004	0.598	0.263	0.486	0.193	0.375	0.027	0.388

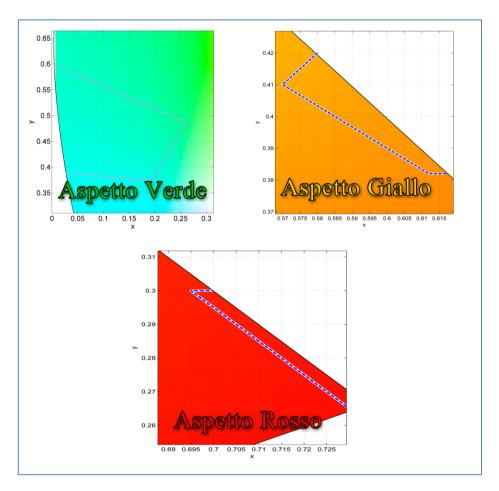


Figura 3-15 Limiti colorimetrici per gli aspetti Rosso, Giallo e Verde definiti dalla norma UNI9296.

Per quanto riguarda il colore degli aspetti, la norma indentifica aree cromatiche all'interno del diagramma CIE1931 (vedi § 3.2.2). La Tabella 3-9 mostra le coordinate dei punti d'intersezione delle linee limite delle aree di cromaticità, mentre la Figura 3-15 è la rappresentazione grafica sul diagramma CIE.

Terminiamo, come in precedenza, la descrizione della norma indicando il range di temperatura nel quale il segnale deve mantenere un comportamento conforme alle prescrizioni presenti nella norma stessa [-25°C +70°C].

### **3.4.3 ITE-LED**

La presente norma americana si applica alle segnalazioni luminose rosse, gialle e verdi destinate al controllo del traffico stradale. In particolare questa norma regola la realizzazione dei segnali luminosi a tecnologia LED, e solo a essi è dedicata. A differenza di ciò che succede nel nostro continente, l'Institute of Transportation Engineers (ITE) ha emanato una norma specifica per i segnali realizzati a LED tenendo conto dei pregi e dei difetti della nuova tecnologia [64].

Le normative infatti, oltre a definire le specifiche, assumono molto spesso la funzione di guida della corretta progettazione dei sistemi complessi cui fanno riferimento. Ad esempio la norma UNI9296, presentata in precedenza, individua le grandezze che possono influenzare le prestazioni dei segnali, dando suggerimenti sui parametri da prendere in considerazione per una "buona" progettazione: "... Per conseguire una buona costanza della cromaticità per ogni specifica applicazione, è opportuno, in definitiva, stabilire ristrette tolleranze di fabbricazione per l'efficienza luminosa, evitare forti escursioni nella tensione di

alimentazione e prevedere un'opportuna sostituzione programmata delle lampade. ...". Tuttavia tali suggerimenti fanno riferimento alle sorgenti luminose a filamento o a quelle a scarica e perdono di significato per i LED. Per tale motivo la ITE ha emanato una norma specifica.

Le prescrizioni fotometriche sono descritte dalla Tabella 3-10, la quale indica il range d'intensità che la lampada deve emettere lungo l'asse ottico principale di emissione secondo il diametro della lampada. Come si può notare le prescrizioni, anche in questo caso, seguono i valori d'intensità individuati nel paragrafo 3.1.3.

Tabella 3-10 Range delle intensità luminose secondo il diametro della lampada, norma ITE-LED.

	200	mm	300 mm		
Rosso	165 cd 495 cd		365 cd	1095 cd	
Giallo	410 cd	1230 cd	910 cd	1830 cd	
Verde	215 cd	645 cd	475 cd	1425 cd	

Inoltre è importante notare come i limiti massimi siano tre volte i minimi. Facendo riferimento al § 2.4.1.1 è facile intuire come questa scelta sia derivata da uno studio attento delle caratteristiche intensità/temperatura dei LED: la scelta di un'ampia regione di funzionamento permette una semplificazione nella progettazione delle lampade; la dipendenza dell'efficienza dei LED alla temperatura non è più un parametro critico.

Inoltre, come le precedenti norme, la ITE-LED specifica il diagramma di radiazione della lampada attraverso la definizione di due espressioni che legano l'intensità all'angolo di osservazione (il riferimento è definito dai piani verticale e orizzontale perpendicolari alla lente della lampada stessa).

Norme 146

• Verticale, per  $\theta_{Vert} > -2.5^{\circ}$ :

$$f(I_{Vert}) = 0.05 + 0.9434 \exp\left[-\left(\frac{\theta_{Vert} + 2.5}{5.3}\right)\right]$$
 (3.12)

• Verticale, per  $\theta_{Vert} \le -2.5^{\circ}$ :

$$f(I_{Vert}) = 0.26 + \left(\frac{\theta_{Vert}}{143}\right) + 0.76 \left\{ \exp\left[-0.02(\theta_{Vert} + 2.5)^{2}\right] \right\}^{(-0.07\theta_{Vert})}$$
(3.13)

• Orizzontale:

$$f(I_{Oriz}) = 0.05 + 0.95 \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\theta_{Oriz}}{11} \right) \right]^2$$
 (3.14)

Come nella norma ENI12368, si stabilisce l'uniformità della luce emessa dalla lente circolare della lampada: il rapporto tra la luminanza minore e la luminanza maggiore misurabile sulla stessa lente di emissione del segnale non deve essere maggiore di 1/10.

Per quanto riguarda il colore degli aspetti, la norma indentifica aree cromatiche all'interno del diagramma CIE1931 (vedi § 3.2.2). La Tabella 3-11 mostra le coordinate dei punti d'intersezione delle linee limite delle aree di cromaticità, mentre la Figura 3-16 è la rappresentazione grafica sul diagramma CIE.

Tabella 3-11 Coordinate dei punti di intersezione delle linee limite delle aree di cromaticità. Norma ITE-LED.

		Coordinata A		Coordinata A Coordinata B		Coordinata C		Coordinata D	
		CCX	CCY	CCX	CCY	CCX	CCY	CCX	CCY
	Rosso	0.692	0.308	0.681	0.308	0.700	0.290	0.710	0.290
Ī	Giallo	0.545	0.454	0.536	0.449	0.578	0.408	0.588	0.411
	Verde	0.005	0.651	0.150	0.531	0.150	0.380	0.022	0.416

Infine, il range di temperatura nel quale il segnale deve mantenere un comportamento conforme alle prescrizioni presenti nella norma stessa è pari a  $[-40^{\circ}\text{C} + 74^{\circ}\text{C}]$ .

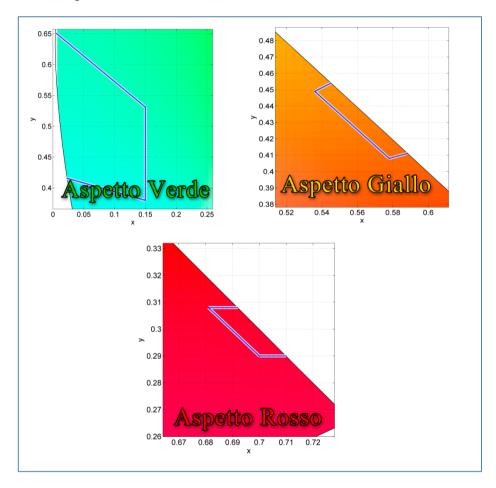


Figura 3-16 Limiti colorimetrici per gli aspetti Rosso, Giallo e Verde definiti dalla norma ITE-LED.

# Capitolo 4

# LED nei Segnali Ferroviari

4.1	STRUTTURA DI UN APPARATO CLASSICO	149
4.2	CRITICITÀ NEGLI APPARATI DI SEGNALAMENTO A LED	151
4.2.1	REALIZZAZIONE DI UN BOX-TERMICO	152
4.2.2	PROCEDURE DI MISURA	154
4.2.3	COLORE DI EMISSIONE VS TEMPERATURA	155
4.2.4	STABILITÀ DELL'INTENSITÀ DI EMISSIONE VS TEMPERATURA	159
4.3	VITA UTILE DELLA SEGNALETICA A LED	162
4.3.1	CALCOLO DELLA VITA MEDIA DI UN SISTEMA DI SEGNALAMENTO	165

In questo capitolo descriveremo le problematiche individuate nei segnali a tecnologia LED a nostra disposizione (segnali ferroviari luminosi alti cat.1).

I primi collaudi/test hanno mostrato come la classica metodologia di progettazione illuminotecnica può portare alla realizzazione di apparati le cui caratteristiche ottiche risultano dipendenti alla temperatura. Di fatto, l'esclusione delle dipendenze elettro-ottiche delle proprietà dei LED alla temperatura, in fase di progettazione, causano importanti comportamenti macroscopici dei dispositivi realizzati, che in casi limite portano alla loro non conformità alle norme. Infatti a

livello di apparato, mostreremo come le proprietà ottiche seguono gli andamenti e le dipendenze discusse nel capitolo 2 per i LED stessi.

Infine evidenzieremo come l'utilizzo di questo nuovo dispositivo all'interno di un apparato pone un importante incertezza nella definizione del tempo di vita del dispositivo realizzato.

## 4.1 Struttura di un apparato classico

La Figura 4-1 mostra le diverse parti che compongono un comune apparato di segnalamento. In essa si riconoscono due diverse ottiche secondarie (si considera come lente primaria la lente del package del LED): la prima dedicata al conseguimento del giusto diagramma di radiazione della lampada (direziona i singoli fasci di emissione dei LED); la seconda destinata alla protezione meccanica da acqua e polvere (in alcuni casi svolge anche la funzione di limitare l'effetto fantasma).

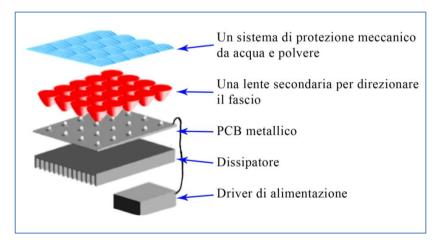


Figura 4-1 Schematizzazione di un apparato di segnalamento a tecnologia LED.

Inoltre è visibile la classica disposizione a matrice dei LED che realizzano la sorgente luminosa della lampada, solitamente saldati su PCB metallico, il quale, coadiuvato da un dissipatore, favorisce lo smaltimento del calore generato.

A livello circuitale, i LED vengono suddivisi in array-cluster costituiti da stringhe di serie di LED collegate tra loro in parallelo (Figura 4-2); il conseguimento di un flusso luminoso appropriato impone l'utilizzo di più LED, inoltre la connessione serie-parallelo consente una maggiore libertà nella progettazione del driver di alimentazione.

La loro disposizione sul PCB e il loro numero sono un compromesso tra le proprietà del flusso luminoso che devono garantire e la scelta in fase di progetto della tipologia di LED da adoperare. Ovviamente i nuovi power-LED, a parità di numero, consentono un'intensità superiore ai classici LED a 5mm. Tuttavia i primi implicano una maggior disomogeneità luminosa nella matrice realizzata e una peggior distribuzione del carico termico sul PCB metallico.

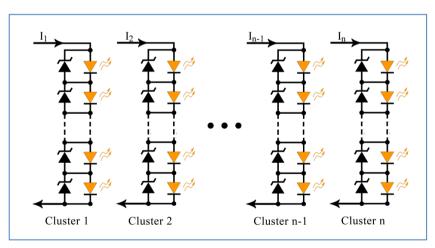


Figura 4-2 Schema circuitale della matrice di LED che realizza la sorgente luminosa in un apparato di segnalamento.

Nella progettazione per così dire "classica" il driver di alimentazione ha lo scopo di alimentare ogni cluster LED con la stessa corrente, in modo tale da assicurare un flusso luminoso omogeneo e uniforme. La corrente solitamente è continua e non pulsata, consentendo di avere uno stress minore sui dispositivi LED rispetto al caso pulsato stesso.

Nella pratica comune dunque si utilizza un classico generatore di corrente che può essere lineare o switching, secondo le tensioni e le correnti necessarie al singolo cluster. È importante sottolineare che in questo settore illuminotecnico si cerca di evitare l'uso di circuiterie current-sharing (un esempio sono gli specchi di corrente) che consentirebbero l'utilizzo di un unico generatore di corrente per tutti i cluster che realizzano la sorgente luminosa. Infatti, in questo caso, la singola rottura di un componente pregiudicherebbe il funzionamento dell'intero segnale, compromettendo la sicurezza. Per questo solitamente ogni cluster ha un driver dedicato. Da questo punto di vista si deve anche considerare l'utilizzo dei diodi zener posti in parallelo ai LED stessi: la rottura di un LED non determina lo spegnimento dell'intero cluster.

## 4.2 Criticità negli apparati di segnalamento a LED

Come abbiamo visto nel capitolo precedente, gli apparati adibiti a segnalamento devono rispettare rigorose prescrizioni fotometriche e colorimetriche per ampi range di temperatura.

In passato, l'utilizzo di sorgenti luminose come le lampade a filamento ha indirizzato l'attenzione dei progettisti dei segnali sulle problematiche di stabilità

elettrica delle alimentazioni, essendo il flusso luminoso e il colore esclusivamente dipendenti da essa. L'efficienza di trasduzione elettrica-ottica nelle lampade è un parametro stabile e indipendente dalla temperatura. Allo stesso tempo, i filtri ottici, utilizzati per definire il colore, presentano proprietà stabili nel tempo e indipendenti dai fattori ambientali esterni.

Le proprietà elettro-ottiche dei LED, invece, risultano fortemente influenzate dalle variazioni della temperatura sia dal punto di vista cromatico (§ 2.4.1.2) sia dal punto di vista della stabilità del flusso luminoso (§ 2.4.1.1-2.7.5). Questa dipendenza, che rappresenta un nuovo aspetto, è risultata critica nello sviluppo degli apparati di segnalamento con la nuova tecnologia LED.

Di fatto, come mostreremo nei capitoli 5 e 6, uno dei metodi che consente di ottenere un comportamento ottico globale stabile è di realizzare alimentazioni non più semplicemente stabili ma "attive", che rispondono alle variazioni di temperatura alimentando in modo opportuno i LED formanti l'impianto ottico del sistema di segnalamento.

Nei paragrafi successivi mostreremo dunque alcune misure sperimentali sui segnali a nostra disposizione, i nuovi segnali alti di cat.1 a tecnologia LED della Rete Ferroviaria Italiana (RFI), le cui caratteristiche ottiche sono risultate dipendere dalla temperatura.

#### 4.2.1 Realizzazione di un box-termico

Per studiare la relazione temperatura-proprietà ottiche di emissione dei segnali si è realizzato un box-termico dedicato (Figura 4-3) che ci ha permesso di effettuare

misurazioni "dirette" sulla luce emessa dai segnali, al contrario di una "classica" camera climatica.

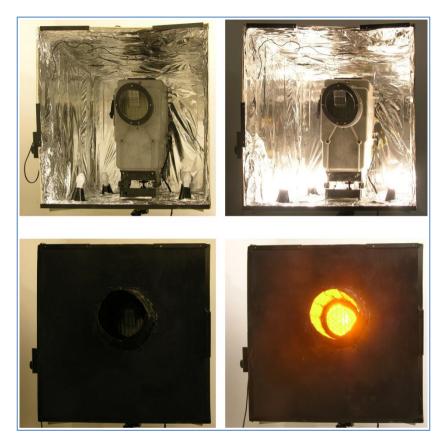


Figura 4-3 Box per il riscaldamento/raffreddamento del segnale.

Il box-termico avvolge completamente il segnale ed è in grado di innalzare la temperatura al suo interno fino a 70 °C. Tale sistema, non efficiente come una camera climatica, ha il vantaggio di consentire la registrazione dello spettro di emissione nelle reali condizioni di lavoro del segnale.

Il box-termico realizzato, infatti, consente di analizzare la radiazione emessa dal segnale senza "strutture" intermedie; la radiazione fuoriesce dal dispersore senza incontrare ulteriori "ostacoli". Al contrario utilizzando una camera climatica, la radiazione può essere analizzata solo dopo che ha attraversato lo sportello della camera. Quest'ultimo può modificare in modo significativo (e spesso non valutabile) le caratteristiche della radiazione emessa dal segnale.

#### 4.2.2 Procedure di misura

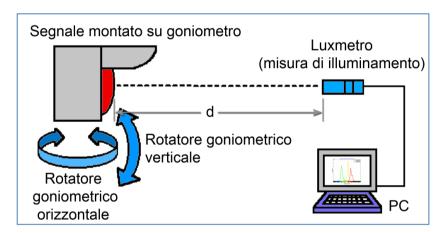


Figura 4-4 Disposizione strumentale utilizzata per la determinazione delle caratteristiche fotometriche e colorimetriche dei segnali a nostra disposizione.

Per determinare le caratteristiche ottiche (intensità e colore) emesse dai segnali, si è fatto ricorso all'apparato sperimentale schematicamente illustrato in Figura 4-4.

L'intensità luminosa è stata ricavata da una misura d'illuminamento (Flusso luminoso incidente per unità di superficie). La distanza "d" (distanza segnale – strumento di misura) è stata scelta in modo tale da poter considerare il segnale come una sorgente di radiazione "puntiforme" (per un segnale con area di

emissione avente diametro pari a 150 mm, la distanza d deve essere maggiore di 7.5 m).

In queste condizioni operative, l'intensità luminosa risulta essere:

Intensità Luminosa = 
$$(Illuminamento) \cdot (distanza)^2 \implies [cd] = [lux] \cdot [m^2]$$

Per le misure di colore, invece, si è sostituito al luxmetro, visibile in figura, uno spettroradiometro capace di fornire lo spettro di emissione della luce emessa dai segnali sotto test.

### 4.2.3 Colore di emissione vs temperatura

I LED sono sorgenti luminose con colore proprio. Tali sorgenti luminose possono essere utilizzate efficacemente per la realizzazione di sistemi di segnalazione.

Tuttavia, come abbiamo visto nel § 2.4.1.2 e in maniera generale nel primo capitolo, la cromaticità dei LED è fortemente influenzata dalla temperatura, più precisamente dalla variazione della temperatura della giunzione, sede del fenomeno radiativo. Ovviamente la temperatura sentita dalla giunzione dipende dalla corrente di pilotaggio dei LED, dal sistema di trasferimento del calore tra i LED e l'ambiente esterno e dalla temperatura stessa di quest'ultima; in generale dalla progettazione dell'apparato di segnalamento.

Con una progettazione accurata dell'alimentazione e dei sistemi di dissipazione del calore e con l'utilizzo di diodi luminosi a differente cromaticità (utilizzo di tecniche di color mixing) è possibile realizzare sistemi che hanno una contenuta variazione cromatica rispetto alla temperatura.

Tuttavia i costruttori degli apparati di segnalamento, come abbiamo già evidenziato, tendono a sottovalutare tale dipendenza realizzando apparati che alle temperature limite possono risultare fuori norma.

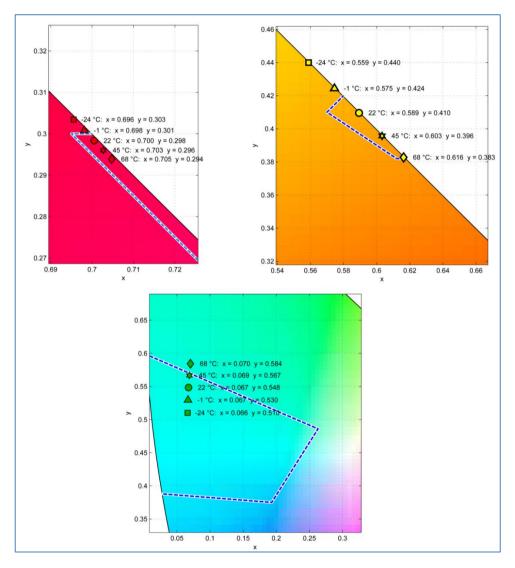


Figura 4-5 Variazione delle coordinate cromatiche in funzione delle variazioni della temperatura ambiente: Costruttore 1.

La Figura 4-5 mostra le variazioni cromatiche in funzione della temperatura di uno dei segnali analizzati a tecnologia LED. In particolare le temperature di -1 °C e -24 °C sono state determinate tramite simulazione numerica, basandosi sugli andamenti osservati in fase sperimentale e considerando la proporzionalità nei LED tra shift cromatico e temperatura.

Come mostra la figura, per temperature estreme il segnale analizzato non rispetta la sua norma di riferimento, anche se bisogna osservare che i punti si discostano di poco dai limiti imposti dalla stessa norma (per maggiori dettagli sulla norma si veda § 3.4.2).

Tutti i segnali a nostra disposizione hanno mostrato un comportamento simile: variazione della cromaticità emessa rispetto a variazione della temperatura esterna. Tuttavia come mostra la Figura 4-6 alcuni costruttori scegliendo in maniera più proficua i LED, formanti l'apparato ottico del sistema di segnalamento, sono riusciti a presentare un comportamento meno critico.

Di fatto è possibile ottenere un comportamento cromatico globale corretto utilizzando LED che presentano sia un minor shift cromatico rispetto alla temperatura (parametro caratteristico della tecnologia realizzativa del LED) sia una cromaticità a temperatura ambiente posizionata al centro dei limiti imposti dalla norma di riferimento.

Tale scelta, comunque, aggrava le proprietà colorimetriche che i LED devono presentare, obbligando i costruttori a effettuare un'attenta selezione dei dispositivi che realizzano l'apparato ottico, aumentando inoltre anche il loro costo. Le

tecniche di color mixing invece permettono minor limiti nella scelta dei LED e una maggior libertà progettuale (vedi § 5.1).

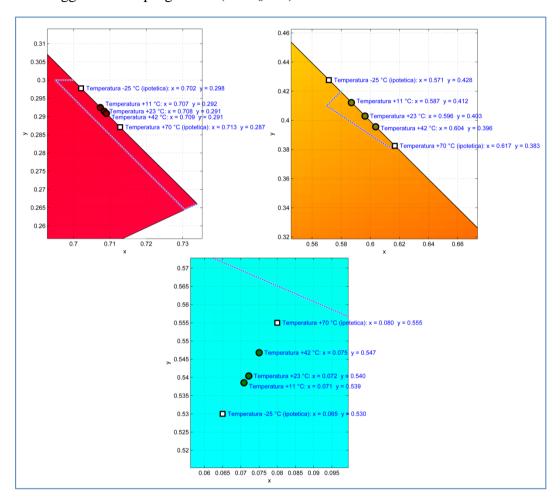


Figura 4-6 Variazione delle coordinate cromatiche in funzione delle variazioni della temperatura ambiente: Costruttore 2.

Infine è importante notare che per i segnali ferroviari l'aspetto più critico è il Giallo, in quanto la norma di riferimento impone una ridotta area cromatica.

### 4.2.4 Stabilità dell'intensità di emissione vs temperatura

Come abbiamo discusso nel § 2.4.1.1 e nel § 2.7.5 l'efficienza di trasduzione elettro-ottica nei LED dipende fortemente dalla temperatura. In generale l'efficienza decresce con l'aumentare della temperatura in modo pressoché proporzionale. Il valore di proporzionalità, come è noto, è legato alla tecnologia utilizzata per la realizzazione dei diodi luminosi.

La scelta delle tecnologie dei LED da utilizzare nei vari aspetti risulta tuttavia obbligata a causa delle rigide norme colorimetriche cui i costruttori dei segnali devono fare riferimento. La tecnologia  $\left(Al_xGa_{1-x}\right)_{1-y}In_yP$  è solitamente usata per gli aspetti Rosso e Giallo mentre l' $In_xGa_{1-x}N$  per l'aspetto Verde.

Nel § 2.7.5 abbiamo discusso come i dispositivi realizzati in tecnologia  $(Al_xGa_{1-x})_{1-y}$   $In_yP$  che emettono nel giallo risultano maggiormente dipendenti dalla temperatura. Tale proprietà viene completamente manifestata nel comportamento globale degli apparati a nostra disposizione, facendo del Giallo, anche in questo caso, l'aspetto più critico.

La Figura 4-7 mostra le misure sperimentali realizzate su uno dei segnali a nostra disposizione. La dipendenza dalla temperatura fa sì che, soprattutto per l'aspetto Giallo, il segnale risulta fuori norma. È importante notare che la pendenza delle curve rispecchiano gli andamenti descritti dai datascheet dei LED utilizzati per la realizzazione degli aspetti.

Ad esempio per l'aspetto giallo questo costruttore utilizza i LED LY G6SP che presentano una variabilità di efficienza, da datasheet, pari a 0.013/°C comparabile

a quella misurata sperimentalmente di 0.009/°C con la strumentazione a nostra disposizione.

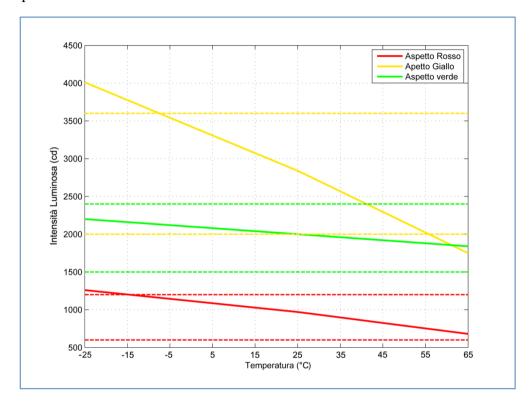


Figura 4-7 Intensità vs. Temperatura del segnale LED prodotto dal Costruttore 2.

È importante notare come un comportamento simile non è adeguato alla funzionalità di sicurezza che i segnali devono ricercare. Nell'arco di una giornata le temperature più alte generalmente vengono raggiunte in pieno giorno mentre al contrario nelle ore notturne si hanno le temperature minime. Un comportamento simile determina che il segnale presenta un'intensità più bassa di giorno e una più alta di notte, l'esatto contrario di quello che dovrebbe accadere; in quanto di notte

la mancanza di luce di fondo permetterebbe la visibilità del segnale anche con intensità "basse".

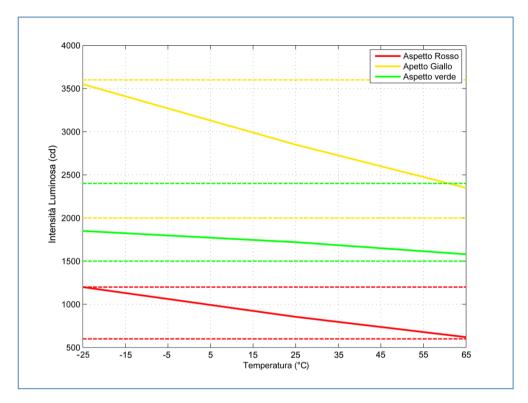


Figura 4-8 Intensità vs. Temperatura del segnale LED prodotto dal Costruttore 1.

In particolare, la scelta di un costruttore di utilizzare i classici LED a 5mm gli ha permesso di realizzare un apparato che mostra un comportamento globale conforme alla norma, Figura 4-8. Questo è dovuto alla particolare caratteristica dell'involucro di contenimento dei LED classici che permettono una minor dipendenza della temperatura di giunzione dalla temperatura ambiente esterna.

Tuttavia il conseguimento del corretto comportamento è stato possibile solo imponendo un'intensità di emissione a temperatura ambiente centrata nei limiti

definiti dalla norma di riferimento, cioè attraverso un'accurata calibrazione dell'apparato realizzato ma di difficile applicazione a livello industriale.

In realtà è possibile ottenere un comportamento corretto realizzando un driver di alimentazione per i cluster, che definiscono la componente ottica del segnale, dipendente dalla temperatura e tale da reagire a un aumento di quest'ultima attraverso un aumento della corrente di pilotaggio.

## 4.3 Vita utile della segnaletica a LED

Uno dei più importanti vantaggi che comporta l'uso dei dispositivi LED è la possibilità di ottenere un sistema con un tempo di vita (MTTF - Mean Time To Failure) di gran lunga superiore a quello che le passate tecnologie permettono.

Come abbiamo discusso nel § 1.1, il passaggio dalle lampade a incandescenza, purtroppo ancora spesso usate, alla tecnologia LED permette in linea teorica un importante risparmio manutentivo. Di fatto si passa da una sorgente luminosa con un tempo di vita dell'ordine di 1'000/2'000 ore all'altra con un tempo di vita maggiore delle 50'000 ore.

Ad esempio sulla rete ferroviaria italiana è in uso la sostituzione preventiva di tutte le lampade ogni 6 mesi, che siano esse ancora perfettamente funzionanti o no, con un importante impiego di squadre di tecnici e costi manutentivi. Mentre una lampada realizzata in tecnologia LED, considerando 50'000 ore, richiederebbe manutenzione solo ogni circa 5 anni.

Tuttavia il tempo di vita delle sorgenti luminose a LED, che è tuttora oggetto di studio, dipende dalle condizioni operative cui esse sono sottoposte, tra cui la temperatura sin qui discussa.

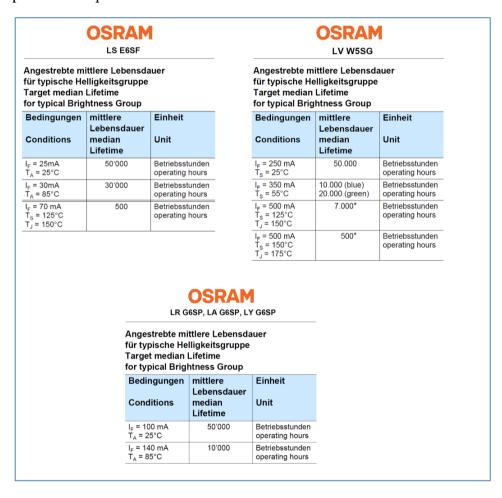


Figura 4-9 I tempi di vita disponibili nei datascheet dei LED sono definiti a costanti condizioni operative.

In particolare, come abbiamo affrontato nel § 2.8, la proprietà di ridurre gradualmente la propria caratteristica di efficienza luminosa determina

un'ambiguità nella stessa definizione del tempo di vita di tali dispositivi. Infatti, per i segnali luminosi se da una parte tale proprietà consente di avere un apparato più sicuro, in quanto non avremo mai l'istantanea perdita dell'informazione segnaletica, dall'altra rende difficile la valutazione del momento in cui il sistema risulta fuori norma.

A tale ambiguità, inoltre, si legano anche le condizioni operative non certo stabili dei sistemi di segnalamento, i quali sono sottoposti all'azione e alla variabilità del clima, tale da non permette il facile legame tra i tempi di vita definiti nei datasheet dei LED e il tempo di vita del sistema ottico di un segnale, Figura 4-9.

Qual è dunque la vita utile di un apparato di segnalamento a LED? Dalle teorie dell'affidabilità, sappiamo che la vita utile di un'apparecchiatura è l'intervallo temporale durante il quale il sistema garantisce le prestazioni definite dalle specifiche di progetto, il quale dipende dalle singole proprietà dei componenti che ne fanno parte [65]-[66], e quindi nel nostro caso anche dai LED.

È importante notare che tale parametro è di vitale importanza per sistemi che devono garantire sicurezza; il gestore del servizio (come può essere RFI) deve essere in grado di programmare in piena sicurezza la manutenzione necessaria affinché non possano verificarsi situazioni di pericolo. La sovrastima ma soprattutto la sottostima (che potrebbe essere ad esempio ottenuta ipotizzando una temperatura ambiente pari alla massima consentita dalla norma) del tempo di vita hanno importanti conseguenze sia dal punto di vista economico sia di sicurezza.

#### 4.3.1 Calcolo della vita media di un sistema di segnalamento

La stima del tempo di vita di un apparato complesso si consegue attraverso un sua analisi dal punto di vista delle logiche di guasto che possono causare il non rispetto delle sue specifiche di progetto.

Senza entrare troppo nella materia, l'analisi suddivide i componenti, facenti parte del sistema in oggetto, in elementi serie ed elementi ridondanti. Per elementi serie s'intendono i componenti la cui rottura determina lo stato di guasto dell'intera apparecchiatura, mentre per elementi ridondanti si considerano i dispositivi il cui singolo guasto non pregiudica il funzionamento dell'apparato.

Il tempo di vita di una catena di elementi serie è definita secondo la seguente relazione:

$$MTTF_{S} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{MTTF_{i}}}$$

$$\tag{4.1}$$

dove *MTTF*<sub>i</sub> indica il tempo di vita di ogni singolo componente.

Mentre nel caso in cui il sistema sia definito da elementi in ridondanza il tempo di vita è dato da:

$$MTTF_{S} = \int_{0}^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^{n} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{1}{MTTF_{i}} t\right) \right] \right\} dt$$
 (4.2)

In particolare, l'espressione (4.1) mostra come in un sistema "serie" il tempo di vita è limitato dal componente a minor *MTTF*, mentre l'espressione (4.2) rivela

come, nel caso di ridondanza, l'apparato possieda un tempo di vita maggiore del componente a più lunga vita.

Naturalmente per i sistemi misti serie/ridondanti il tempo di vita è definito da una funzione algebrica delle equazioni (4.1) e (4.2), la Figura 4-10 mostra i tre diversi casi.

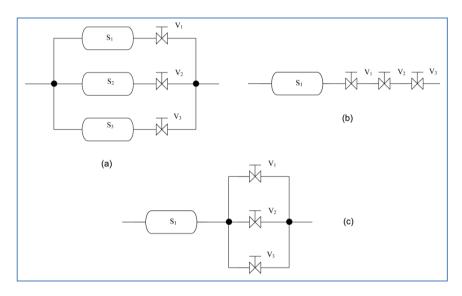


Figura 4-10 Esempi di sistemi idraulici composti da serbatoi e valvole. (a) Sistema ridondante: il sistema è composto sia da 3 serbatoi sia da 3 valvole posti in logica parallela; la rottura di uno di loro non pregiudica il funzionamento del sistema. (b) Sistema serie: il serbatoio e le valvole sono connessi in logica serie; la rottura di un unico componente del sistema ne pregiudica il funzionamento. (c) Sistema misto: il sistema è composto da 1 serbatoio e da 3 valvole poste tra loro in logica parallela; la rottura di un'unica valvola non pregiudica il funzionamento del sistema, tuttavia la rottura del serbatoio determina lo stato di guasto.

Nel caso in studio, quindi nei sistemi di segnalamento, il tempo di vita è definito dall'*MTTF* del driver di alimentazione, delle componenti meccaniche e dell'apparato ottico, che tutti insieme definiscono il segnale. Questi tre macro blocchi logici definiscono un sistema serie rispondendo alla relazione (4.1).

Tuttavia, mentre le caratteristiche dell'elettronica e della meccanica sono ben note, le proprietà ottiche risultano di difficile definizione.

Inoltre, nel difficile calcolo del tempo di vita caratteristico di un apparato ottico per segnalamento bisogna considerare che: i singoli LED formanti la sorgente luminosa risultano essere, nella logica di guasto, tutti elementi serie, in quanto a livello funzionale ognuno di essi concorre all'ottenimento della corretta intensità di emissione.

La valutazione dunque del tempo di vita della componente ottica dei segnali risulta di vitale importanza.

Tuttavia studi del tempo di vita di apparati come quelli adibiti a segnalamento risultano essere ancora assenti e in generale studi sul tempo di vita dei LED nei quali si sia ipotizzata una dinamica della temperatura così pronunciata.

Nel capitolo 7 infatti si è cercato di fornire una risposta a questo importate parametro, che attualmente presenta una criticità degli apparati di segnalamento in quanto non permette una corretta valutazione del tempo di vita della segnaletica realizzata.

Stato dell'arte 168

# Capitolo 5 Stato dell'arte

5.1	COLOR MIXING	169
5.1.1	STABILIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ OTTICHE: LED RGB	172
5.2	PATENT SULLA SEGNALETICA A LED	174
5.2.1	FOTOSENSORE DI FEEDBACK	175
5.2.2	SENSORE DI TEMPERATURA	177
5.2.3	LED COME SENSORE DI TEMPERATURA	179

L'instabilità delle proprietà ottiche della segnaletica a LED, mostrata nel capitolo precedente, ha determinato negli ultimi anni una sinergica attività di ricerca tra il campo accademico, industriale e normativo. Un esempio è la stessa norma presentata nel § 3.4.3, che è uno dei risultati raggiunti dal lavoro coadiuvato tra i soggetti sopraccitati negli Stati Uniti d'America [67] (per maggiori info: www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/index.html).

In questo breve capitolo, dunque, cercheremo di descrivere alcuni importati lavori che rappresentano lo stato dell'arte in letteratura delle idee sviluppate per cercare di realizzare segnali con caratteristiche cromatiche e d'intensità stabili (anche se, come abbiamo visto, nella pratica si possono ancora individuare numerose lacune nei segnali realizzati).

Stato dell'arte 169

In particolare, molte idee, che descriveremo, sono simili ad alcune delle nostre proposte di soluzione sviluppate nel capitolo 6. Benché il nostro studio sia nato senza prendere visione della maggior parte di questi lavori, la vicinanza nelle soluzioni ci ha permesso di confermare le nostre idee d'intervento.

Il capitolo dunque verterà inizialmente sui metodi classici d'intervento per ottenere stabilità ottica nelle generiche sorgenti di luce; dalle semplici tecniche di color mixing, attualmente ampiamente usate per la realizzazione della luce bianca a LED, alla realizzazione di driver "attivi" di compensazione. Mentre infine ci soffermeremo su alcuni interessanti brevetti americani specifici per la segnaletica.

## 5.1 Color mixing

Il crescente sviluppo della tecnologia LED ha permesso negli ultimi anni la realizzazione di fonti di luce bianca a semiconduttore, con la conseguente entrata dei LED nel mercato illuminotecnico generico. Tuttavia, i dispositivi, di cui abbiamo ampiamente discusso nel capitolo 2, emettono singole porzioni dello spettro del visibile, mentre la luce "bianca", come è noto, è composta dalla somma di tutte le componenti spettrali che definiscono la stessa luce visibile.

In questi anni si sono viste dunque nascere tecniche che consentono l'utilizzo dei LED nella realizzazione della luce bianca, di fatto oggi questo definisce il settore maggiormente trainante.

Accanto alla realizzazione di LED che emettono nel bianco, attraverso l'uso di strati filtranti della luce emessa dai LED, si è fatto massiccio uso di tecniche di color mixing [68].

Color mixing 170

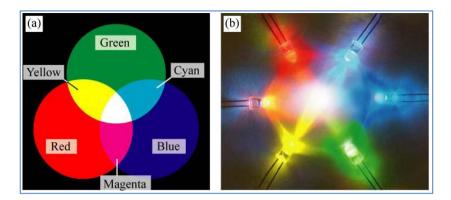


Figura 5-1 (a) Schematizzazione delle tecniche additive di color mixing basate sui tre colori primari. (b) Esempio di tecniche di color mixing nella tecnologia LED.

Queste tecniche si basano sulla legge del baricentro, presentata nel § 3.2.1, e rendono possibile realizzare sorgenti luminose con qualsivoglia indici colorimetrici sommando gli spettri emessi da differenti dispositivi. Infatti, sin da piccoli s'impara che il colore bianco può essere ottenuto attraverso una mescolanza additiva dei tre colori "primari" Rosso, Verde e Blu, che definiscono il cosiddetto modello RGB (Figura 5-1). A rigore, tali colori definiscono un triangolo all'interno del diagramma CIE, che esprime tutti i possibili colori che possono essere ottenuti da una loro mescolanza additiva (tra cui anche il bianco naturalmente, Figura 5-2).

Alcune importanti soluzioni illuminotecniche, oggi reperibili sul mercato, si basano proprio su tali tecniche: l'utilizzo di LED RGB, polarizzati in modo opportuno, consente la realizzazione di una lampada con un qualsiasi colore di emissione.

Stato dell'arte 171

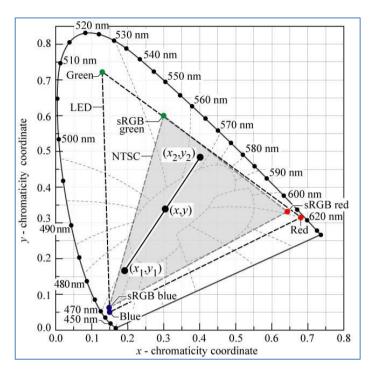


Figura 5-2 Illustrazione del principio delle tecniche di color mixing. La mescolanza additiva di due sorgenti  $(x_1, y_1)$  e  $(x_2, y_2)$  permette di ottenere, secondo la legge del baricentro, una qualsivoglia sorgente con caratteristiche colorimetriche poste sul segmento che congiunge le sorgenti inziali. Inoltre si mostra come l'utilizzo di sorgenti RGB, sfruttando sempre la legge del baricentro, permette di ricreare la quasi totalita delle colorazioni possibili.

Benché nei generici settori illuminotecnici, a differenza del segnalamento, l'instabilità delle proprietà ottiche delle sorgenti a LED rispetto alla temperatura non sia largamente sentita, si sono sviluppati accorgimenti tecnici che permettono di realizzare sorgenti che presentano caratteristiche ottiche stabili. Di fatto, nella maggior parte dei settori, cui stiamo facendo riferimento, le sorgenti di luce vengono utilizzate in ambiti in cui si ha un'escursione termica limitata (si pensi ad esempio all'uso domestico o decorativo) e in cui non è richiesta una definita e

Color mixing 172

precisa colorazione di emissione (non essendo il colore emesso un veicolo d'informazione, come nella segnaletica).

Nel capitolo 6 utilizzeremo di fatto tali tecniche nello sviluppo di una matrice a LED a differenti lunghezze d'onda dominanti allo scopo di sviluppare un impianto semaforico conforme alle norme di riferimento.

#### 5.1.1 Stabilizzazione delle proprietà ottiche: LED RGB

L'utilizzo di LED RGB nella realizzazione d'impianti luminosi è una prassi oramai consolidata. In commercio si possono individuare numerosi prodotti che, utilizzando sistemi contro-reazionati, realizzano sorgenti luminose stabili. In alcuni casi è anche possibile scegliere in tempo reale il diagramma di radiazione emesso da tali sistemi, agendo su manopole o potenziometri o altro resi disponibili all'utente finale.

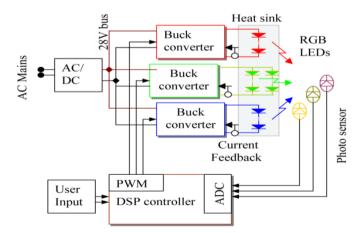


Figura 5-3 Schematizzazione di un classico driver di alimentazione "attivo". Sfruttando i segnali provenienti da fotosensori selettivi è possibile definire un sistema di controreazione capace di controllare e stabilizzare l'emissione di un cluster RGB.

Stato dell'arte 173

Si utilizzano solitamente dei driver di alimentazione "attivi", cioè capaci di monitorare lo stato dei LED, il loro punto di lavoro, e di comportarsi di conseguenza agendo direttamente sull'alimentazione fornitagli.

L'utilizzo di microcontrollori permette di creare sistemi "intelligenti" che implementano algoritmi di compensazione rispetto la temperatura e rispetto la deriva nel tempo dei componenti. Il metodo comune è rappresentato dal lavoro [69] la cui idea di funzionamento può essere intuita dalla Figura 5-3.

In pratica si utilizzano tre diversi fotosensori (si veda [70]) con sensibilità similari alle funzioni di corrispondenza CIE, definite nel § 3.2, rendendo disponibile a un microcontrollore ("DSP controller" in figura) dei segnali proporzionali sia alle coordinate cromatiche dei tre diversi LED sia alla coordinata cromatica totale. Agendo dunque sui singoli driver di alimentazione dei LED, si è in grado di modificare lo spettro emesso in modo tale che risulti conforme a quello voluto (si agisce sul "peso" che ogni radiazione emessa dai diversi LED ha sulla cromaticità globale). È importante notare, inoltre, che il segnale proveniente dai fotosensori rappresenta anche l'intensità totale di emissione della lampada; il micro può dunque agire anche attraverso una compensazione di intensità, e non solo cromatica.

Infine, si possono facilmente individuare "application note" delle stesse case costruttrici di LED, che in maniera similare descrivono come poter realizzare una sorgente luminosa a LED stabile.

Ad esempio degli application note della Osram descrivono la realizzazione di un driver di alimentazione attraverso l'utilizzo di un semplice PIC (Programmable Interface Controller). In particolare, ipotizzano l'utilizzo di un sensore di temperatura, come può essere una resistenza NTC, che permette di calcolare in maniera indiretta il punto di lavoro ottico della matrice di LED che realizza la sorgente luminosa. Conoscendo le dipendenze dei dispositivi alla temperatura, descritti nei rispettivi datascheet, è quindi possibile agire su di loro compensando il loro errato comportamento [71]-[72].

## 5.2 Patent sulla segnaletica a LED

Nell'intensa attività di ricerca, che ci ha coinvolto durante questi anni, ci siamo imbattuti in importanti patent americani specifici per il campo del segnalamento. I brevetti, che rapidamente andremo a presentare, descrivono quello che può essere considerato lo stato dell'arte della segnaletica a LED.

Nei lavori individuati possiamo distinguere tre tipologie di driver "attivi", classificandoli attraverso l'elemento di sensing utilizzato nella catena di feedback:

- Fotosensore: attraverso un segnale rappresentativo dell'intensità di emissione del cluster a LED si modifica il punto di lavoro del cluster stesso.
- Sensore di Temperatura: nota la variabilità delle caratteristiche ottiche rispetto la temperatura dei dispositivi LED utilizzati, ci si serve di un segnale rappresentativo della temperatura sentita da questi ultimi per agire sulla loro stessa polarizzazione.
- LED come sensore di Temperatura: si utilizza la dipendenza delle caratteristiche elettriche dei LED alla temperatura per definire un segnale

Stato dell'arte 175

rappresentativo della temperatura stessa, il quale viene utilizzato per la definizione del punto di lavoro dei LED che definiscono la sorgente luminosa.

Come abbiamo evidenziato, alcune soluzioni proposte all'interno dei patent ripercorrono in modo più o meno velato le soluzioni da noi suggerite nel capitolo 6.

#### **5.2.1** Fotosensore di feedback

I patent [73] e [75] si prefiggono lo scopo di descrivere degli accorgimenti hardware utili a definire un controllo sull'intensità emessa dagli apparati ottici di segnalamento.

Questi lavori definiscono dei driver "attivi" di alimentazione che, in base al segnale elettrico proveniente da un fotosensore, stabiliscono il punto di lavoro dei cluster che definiscono la sorgente luminosa (Figura 5-4). Nel funzionamento dinamico, dunque, i driver possono effettuare correzioni sulla polarizzazione dei LED, in modo tale da compensare l'instabilità delle proprietà ottiche di questi ultimi.

Nello specifico, il fotosensore fornisce un segnale elettronico proporzionale all'intensità di emissione globale misurando l'intensità emessa da un singolo LED di riferimento appartenente allo stesso cluster a cui il driver fornisce l'alimentazione.

Il patent [73] utilizza tale segnale per definire il duty cycle dell'alimentazione pulsata con la quale è alimentato il cluster (tecniche PWM – Pulse-Width Modulation).

Nel lavoro [75], invece, il fotosensore è una foto-resistenza: un dispositivo che cambia la propria impedenza secondo la luce incidente. La variazione dell'impedenza modifica il riferimento del regolatore lineare, visibile in figura, modificando la tensione di alimentazione fornita al cluster e ottenendo così il controllo dell'intensità di emissione dell'intero segnale. La scelta della rete resistiva permette la calibrazione del circuito.

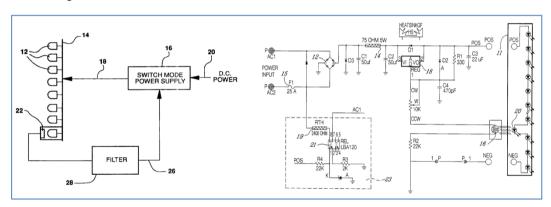


Figura 5-4 (Sinistra) Schemi a blocchi logici del driver di alimentazione ipotizzato nel patet [73]. (Destra) Schema elettrico del driver di alimentazione del patent [75].

Alla base del funzionamento dei driver presentati, tuttavia, c'è l'ipotesi che l'intensità emessa dal dispositivo di riferimento sia rappresentativa dell'intero apparato ottico, supposizione che non sempre risulta verificata.

Stato dell'arte 177

## 5.2.2 Sensore di temperatura

La realizzazione di un driver di alimentazione, capace di compensare l'instabilità delle proprietà dei LED al variare della temperatura, può concretizzarsi tramite il semplice uso di un sensore di temperatura. Come abbiamo visto nel § 5.1.1, è possibile risalire al punto di lavoro ottico di un sistema a LED attraverso l'impiego di un sensore di temperatura, conoscendo la dipendenza delle caratteristiche ottiche dei LED del sistema alla temperatura.

In letteratura ci sono numerosi patent che si muovono su questa strada, specifici per il campo di applicazione del segnalamento [74], [76] e [78]. Particolari sono i lavori [74] e [76] che, a differenza del lavoro [78] più astratto e concettuale, effettuano una descrizione particolareggiata del driver ipotizzato.

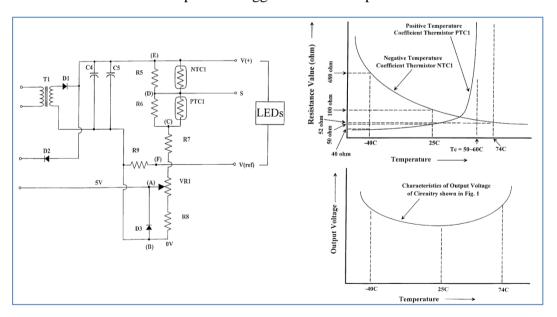


Figura 5-5 (Sinistra) Schema elettrico del driver ipotizzato nel lavoro [74]. (Destra) Andamento della tensione di alimentazione del cluster al variare della temperatura.

In Figura 5-5 è visibile il driver ipotizzato nel patent [74], dove si utilizzano un resistore NTC (Negative Temperature Coefficient) e un resistore PTC (Positive Temperature Coefficient) come sensori di temperatura.

La realizzazione di una semplice rete resistiva permette di legare la tensione di alimentazione dei cluster dei LED alla temperatura. Dunque, noto il comportamento del cluster (o del singolo LED) al variare della temperatura, si può effettuare una calibrazione di tale rete (attraverso l'uso del potenziometro VR1 e l'imposizione della tensione nel punto A), ottenendo un comportamento ottico globale stabile.

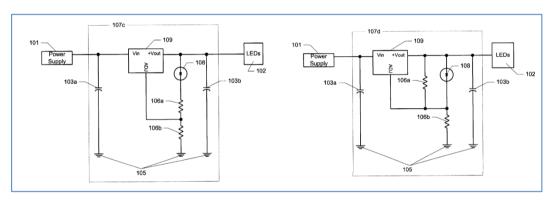


Figura 5-6 Due delle possibili realizzazioni del driver ipotizzato nel patent [76].

In Figura 5-6, invece, è visibile uno dei driver ipotizzato nel patent [76], dove il sensore di temperatura è rappresentato da un diodo. Il driver è realizzato con un semplice regolatore lineare, il cui riferimento di tensione dipende dalla rete resistiva e dal diodo stesso.

In particolare, in questo caso si sfrutta la dipendenza delle caratteristiche elettriche di un diodo alla temperatura. Di fatto, questi dispostivi al variare della temperatura variano la propria tensione di attivazione e, all'interno di una rete Stato dell'arte

resistiva, possono essere utilizzati come resistenze dipendenti dalla temperatura. Precisamente nel patent, oltre alla versione presentata in Figura 5-6, si ipotizza l'uso anche di resistori NTC o PTC in sostituzione del diodo.

Tuttavia, tale scelta, benché non sottolineato all'interno del patent, permette di utilizzare all'interno del driver un sensore di temperatura con proprietà prossime a quelle di un LED, permettendo una regolazione e un controllo più efficiente (i LED e diodi essendo accumunati dalla stessa fisica di funzionamento, presentano uguali dipendenze elettriche alla temperatura, sebbene i LED mostrano una dipendenza accentuata, dovuta alla realizzazione delle particolari regioni otticamente attive; vedi § 2.4.1.3).

Naturalmente la calibrazione è ottenuta attraverso la scelta della rete resistiva visibile in entrambe le Figura 5-6.

In conclusione, è importante notare come in entrambi i lavori si ipotizzi un'alimentazione a tensione costante, non propriamente quella più efficiente per un apparato ottico a LED.

## 5.2.3 LED come sensore di temperatura

Come abbiamo evidenziato nel paragrafo precedente, l'utilizzo di un sensore di temperatura con caratteristiche simili a un LED permette di ottenere driver di alimentazione più stabili ed efficienti.

In Figura 5-7 è mostrato il driver ipotizzato nel patent [77], nel quale si utilizza come sensore di temperatura uno stesso LED appartenente al cluster che definisce la sorgente luminosa. In particolare, si sfrutta la dipendenza della tensione di

attivazione del LED alla temperatura, che come è noto (vedi § 2.4.1.3), tende a diminuire all'aumentare di quest'ultima.

Il driver realizza un alimentatore switching con un innovativo controllore, oggetto del patent stesso, che lega la corrente che scorre all'interno del cluster al punto di polarizzazione di un singolo LED (tensione e corrente), modulando l'accensione/spegnimento dell'interruttore switching.

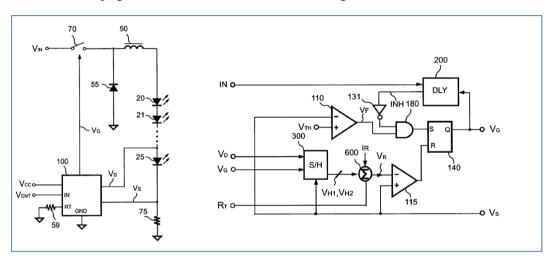


Figura 5-7 (Sinistra) Schema elettrico del driver ipotizzato nel patent [77]. (Destra) Schema elettrico del controllore switching ipotizzato nel patent stesso.

Il funzionamento logico del controllore è schematizzato in Figura 5-7, nello specifico a regime si realizzano due diverse catene di feedback secondo lo stato logico del segnale che pilota l'interruttore dell'alimentatore.

Nello stato logico "alto" il controllore attiva una circuiteria di "sample and hold" monitorando la tensione di attivazione del LED di riferimento. Sin quando l'equazione (5.1) risulta verificata il controllore mantiene alto il segnale di controllo dell'interruttore.

Stato dell'arte 181

$$V_D(t_0) + V_D(t_1) + I_R R_T < V_S$$

$$(5.1)$$

dove  $V_D(t_0)$  e  $V_D(t_1)$  sono la tensione di attivazione del LED in due tempi differenti,  $I_R$  ed  $R_T$  sono rispettivamente una corrente e una resistenza settate in fase di calibrazione del circuito, mentre  $V_S$  è la tensione registrata sulla resistenza di sensing posta in serie ai LED formanti il cluster.

Mentre, nello stato logico "basso" il controllore monitora la tensione  $V_s$  di sensing. Sin quando l'espressione (5.2) risulta verificata, il controllore segue ad inviare uno stato logico "basso".

$$V_{\rm S} < V_{\rm TH} \tag{5.2}$$

dove  $V_{TH}$  rappresenta una tensione di riferimento interna.

Dunque nel funzionamento a regime, scegliendo opportunamente  $V_{TH}$ ,  $I_R$  e  $R_T$  è possibile ottenere un comportamento globale dell'apparato ottico stabile alle variazioni di temperatura.

In particolare, all'accensione dell'apparato si forza l'accensione dell'interruttore attraverso una circuiteria di softstart (DLY in figura).

Come vedremo nel § 6.1.2.1, l'utilizzo di uno stesso LED formante la sorgente luminosa come sensore di temperatura permette importanti vantaggi, tra i quali va sicuramente evidenziato la possibilità di servirsi di un sensore con sensibilità e dipendenze identiche a quelle dei dispositivi di cui si vuole realizzare il controllo.

Tuttavia le relazioni (5.1) e (5.2), come vedremo nel prossimo capitolo, nascondono una "criticità": la tensione di attivazione di un LED dipende anche dalla corrente che scorre al suo interno.

Di fatto, il circuito può risultare instabile: si effettua un controllo della corrente attraverso una catena di feedback che utilizza un unico segnale di errore dipendente sia dalla grandezza da controllare sia dalla temperatura.

Soluzioni proposte 183

# Capitolo 6 Soluzioni proposte

6.1 Controllo Attivo Elettronico	185
6.1.1 COMPENSAZIONE CROMATICA	186
6.1.1.1 Calcolo della corrente di polarizzazione	192
6.1.1.2 Prove sperimentali	195
6.1.2 COMPENSAZIONE DELL'EFFICIENZA	197
6.1.2.1 LED retroazionato	198
6.1.2.1.1 LED retroazionato: Resistenza variabile.	201
6.1.2.1.2 LED retroazionato: Buck Converter.	206
6.1.2.2 LED/NTC	209
6.1.2.3 LED di riferimento	213
6.1.2.4 Prove sperimentali	216
6.2 CONTROLLO SULLA TEMPERATURA	219
6.2.1 SISTEMA "SEGNALE-CUFFIA"	220
6.2.1.1 Segnale alto luminoso	221
6.2.1.2 Cuffia per gruppo semaforico	223
6.2.2 CATENA METROLOGICA	224
6.2.2.1 Sensori di Temperatura	225
6.2.2.2 Scheda di Acquisizione	227
6.2.2.3 Software di Acquisizione	228
6.2.3 CARATTERIZZAZIONE TERMICA DEL SEGNALE	230
6.2.3.1 Transitori termici per corpi a temperatura quasi uniforme	232
6.2.3.2 Modello Termico e analogia elettrica RC	235
6.2.3.2.1 Modello "Ambiente"	238

6.2.3.2.1.1 Metodo delle differenze di temperatura equivalenti	239
6.2.3.2.2 I Prova sperimentale: verifica delle ipotesi	243
6.2.3.2.3 II Prova sperimentale: Funzionamento Normale	245
6.2.3.2.4 III Prova sperimentale: Funzionamento senza Zavorra	246
6.2.3.3 Modello matematico	247
6.2.4 SISTEMI DI CONDIZIONAMENTO	253
6.2.4.1 Cella peltier	254
6.2.4.1.1 IV Prova sperimentale: Funzionamento con Peltier	256
6.2.4.2 Inerzia termica	258
6.2.4.2.1 PCM – Phase Change Material	261
6.2.4.2.2 V Prova sperimentale: Funzionamento con aumento inerzia termica	262
6.2.4.2.3 VI Prova sperimentale: Funzionamento con PCM	265
6.2.4.2.4 Previsione di funzionamento in campo aperto con PCM	267

In questo capitolo descriveremo le soluzioni individuate nel corso del nostro studio che sono una risposta alle problematiche descritte nel capitolo 4.

In particolare, abbiamo identificato due possibilità d'intervento che ci permettono di realizzare segnali rispettosi sia delle norme d'intensità sia di cromaticità al variare della temperatura, che sono:

#### • Un controllo attivo elettronico:

 Compensazione Cromatica: a seguito di una misura di temperatura, moduliamo l'intensità emessa da LED a differenti lunghezze d'onde in modo da ottenere una corretta cromaticità globale.  Compensazione dell'efficienza: a seguito di una misura di temperatura variamo la corrente di polarizzazione dei LED in modo da ottenere una corretta intensità di emissione.

### • Un controllo sulla temperatura:

- Sistema "attivo": se la potenza necessaria all'emissione luminosa è inferiore alla potenza che, per dato di progetto, deve assorbire il segnale; è possibile promuovere un effetto pompa di calore con una cella peltier, utilizzando proprio la potenza in "eccesso".
- Sistema "passivo": aumentando l'inerzia termica dell'intero sistema è possibile stabilizzare la temperatura/calore sentita dai LED; utilizzo di materiali PCM (Phase Change Material).

## 6.1 Controllo Attivo Elettronico

Gli apparati semaforici devono presentare, a differenza di come si comportano i LED, stabilità elettro-ottica al variare della temperatura. La realizzazione di un sistema che riesca a mascherare, attraverso un corretto comportamento globale, le dipendenze dalla temperatura della sorgente luminosa utilizzata non è semplice.

La soluzione da noi proposta parte da tecniche di color mixing sino a giungere allo sviluppo di nuovi sistemi di alimentazione per i cluster di LED che realizzano la sorgente luminosa all'interno degli apparati semaforici.

In particolare sono state testate soluzioni che fanno uso sia di LED di vecchia generazione, LED a 5mm, che dei nuovi power-LED a smd cercando di definire le linee guida per un corretto metodo di progettazione degli impianti di segnalazione.

Faremo riferimento all'aspetto giallo in quanto come è stato già evidenziato esso rappresenta l'aspetto più critico.

## **6.1.1** Compensazione cromatica

In fase progettuale la scelta dei LED da utilizzare nei cluster che definiscono la lampada assume una notevole importanza. Le norme colorimetriche risultano molto stringenti indirizzando la scelta verso LED che possiedano maggiore purezza di emissione (spettro emissivo molto stretto).

Gruppe Group			amber		orange		yellow		
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	Unit		
2	612	616	600	603		·	nm		
3	616	620	603	606	583	586	nm		
4	620	624	606	609	586	589	nm		
5		'		'	589	592	nm		
6					592	595	nm		
Wellenlänge Wavelength Gruppe	engruppen fü Groups for S	Stop / Tail light	cht-Selektion (E Selection (Dom @4 mA	Dominantwellenla inant Wavelengt	ange) <sup>5)Seite</sup> 18 h) <sup>5) page</sup> 18 <b>amber @</b>	250 mA	Einheit		
Group	min		max.	min.		max.	Unit		
2	611	611 6		611 616 612		612		616	nm
3	615		620	616		620	nm		
4	619		624	620		624	nm		

Figura 6-1 Variabilità della lunghezza d'onda dominante del LED commerciale Lx E6SF, estratto del datasheet [79]. A causa delle tolleranze dei processi di produzione, utilizzati nella realizzazione dei LED, le proprietà elettro-ottiche del dispositivo commercializzato possono differire da quelle dichiarate all'interno del datasheet di riferimento.

Tuttavia i LED, che realmente vengono utilizzati all'interno di un apparato di segnalamento, derivano da una selezione di LED appartenenti alla stessa tipologia. Infatti all'interno degli stessi datasheet viene specificato che, a causa

delle particolari condizioni dei processi di fabbricazione dei LED, i parametri tecnici riflettono dati statistici. I quali non corrispondono necessariamente ai parametri reali di ogni singolo prodotto, che possono differire dalle caratteristiche tipiche.

La Figura 6-1 ad esempio mostra la variabilità dello spettro di emissione della famiglia di LED Lx E6SF [79]. Se ipotizziamo di acquistare un LED della tipologia LY E6SF per realizzare l'aspetto giallo di un apparato semaforico potremmo trovarci con un dispositivo che non rispetti le specifiche colorimetriche, infatti lo spettro di ogni LED potrebbe esser centrato su una lunghezza d'onda dominante che può variare da 583 nm a 595 nm. Anche la sola scelta del gruppo di appartenenza (aumentando tuttavia il prezzo unitario dei LED) non ci assicura di realizzare un sistema conforme alle norme. Le tecniche di color mixing, che abbiamo mostrato nel capitolo 5, permettono proprio di limitare questo problema.

La nostra soluzione consiste nell'utilizzo per ogni aspetto di due differenti cluster cui corrispondono sia LED differenti sia diversi driver di alimentazione. Utilizzando LED a diversa lunghezza d'onda è possibile ottenere un corretto spettro emissivo globale effettuando una somma ponderata degli spettri emessi dai singoli cluster.

La Figura 6-2 mostra il nostro cluster per l'aspetto giallo a doppio LED, ipotizzato per un impianto semaforico. Se sommiamo le radiazioni emesse dai due tipi di LED, polarizzati in modo tale che emettano con un definito rapporto d'intensità, si possono ottenere coordinate cromatiche posizionate al centro della zona definita dalle norme. Quindi la dipendenza dello spettro alla temperatura può essere

Soluzioni proposte 188

eliminata modulando il rapporto d'intensità al variare della temperatura stessa, facendo quindi dipendere la polarizzazione dei due cluster alla temperatura.

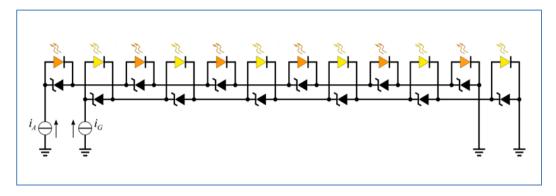


Figura 6-2 Doppia cluster a LED per la realizzazione di un sigolo aspetto della segnaletica.

Le figure seguenti mostrano come questo può essere ottenuto al variare della temperatura, in particolare si sono considerate le norme colorimetriche UNI 9296 per l'aspetto giallo, viste nel capitolo 3, e si sono scelti i LED seguenti:

- LY E6SF 594 nm (giallo).
- o LO E6SF 605 nm (arancio).

Come mostrano le figure, oltre ad ottenere un corretto comportamento cromatico al variare della temperatura, tale metodo ci permette di non avere limitazione nella scelta dei LED.

Le figure sono state ottenute attraverso simulazioni numeriche considerando uno shift colorimetrico pari a 0.2 nm/°C, definito nel datasheet stesso dei dispositivi, nel caso di temperatura ambiente, Figura 6-3, e per le temperature estreme definite nella norma: a -25 °C Figura 6-4; a +70 °C Figura 6-5.

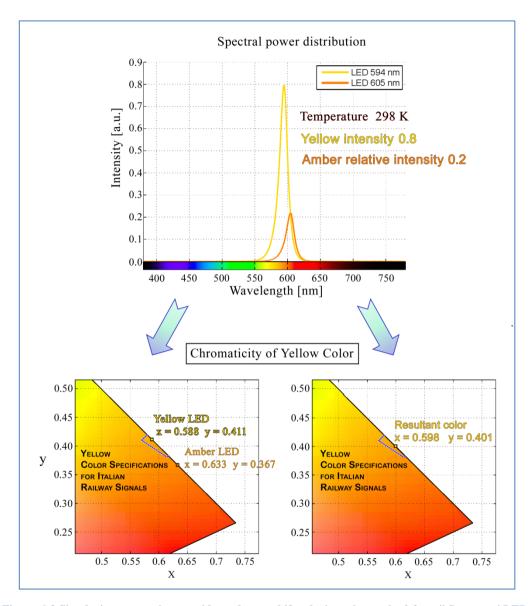


Figura 6-3 Simulazione numerica, considerando uno shift colorimetrico pari a 0.2 nm/ $^{\circ}$ C per ogni LED. Temperatura ambiente (25  $^{\circ}$ C  $\approx$  298 K); LO E6SF – 605 nm (arancio) con intensità pari al 20% dell'intensità totale, e LY E6SF – 594 nm (giallo) con 80%. Il colore risultante è centrato nella norma di riferimento.

190

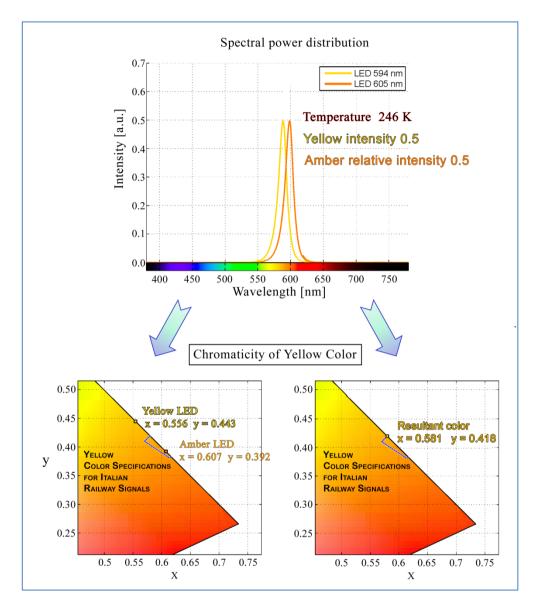


Figura 6-4 Simulazione numerica, considerando uno shift colorimetrico pari a 0.2 nm/ $^{\circ}$ C per ogni LED. Temperatura (-25  $^{\circ}$ C  $\approx$  246 K); LO E6SF – 605 nm (arancio) con intensità pari al 50% dell'intensità totale, e LY E6SF – 594 nm (giallo) con 50%. Il colore risultante rispetta la norma di riferimento.

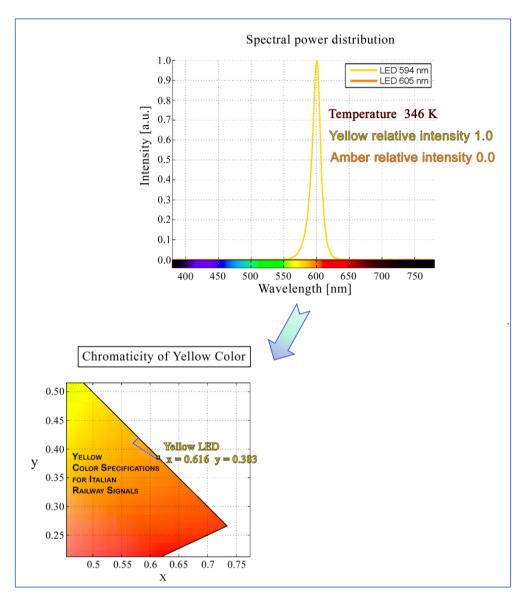


Figura 6-5 Simulazione numerica, considerando uno shift colorimetrico pari a 0.2 nm/ $^{\circ}$ C per ogni LED. Temperatura (+70  $^{\circ}$ C  $\approx$  346 K); LO E6SF – 605 nm (arancio) con intensità pari al 0% dell'intensità totale, e LY E6SF – 594 nm (giallo) con 100%. Il colore risultante rispetta la norma di riferimento.

Soluzioni proposte 192

#### 6.1.1.1 Calcolo della corrente di polarizzazione

Il sistema di compensazione cromatica, descritto nel precedente paragrafo, si basa sulla possibilità di legare la corrente di polarizzazione dei cluster alla temperatura, in modo tale da compensare le variazioni delle proprietà ottiche con una variazione del punto di lavoro dei LED.

In particolare, i datasheet dei diodi luminosi forniscono tutte le caratterizzazioni necessarie alla definizione delle corrette correnti di polarizzazioni.

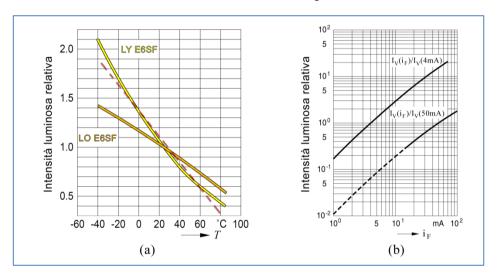


Figura 6-6 Proprietà ottiche dei LED LY E6SF e LO E6SF. (a) Efficienza luminosa vs temperatura. (b) Intensità luminosa vs corrente di polarizzazione.

La figura precedente mostra le tipiche curve di caratterizzazione per i due LED scelti: efficienza luminosa al variare della temperatura; intensità luminosa al variare della corrente di polarizzazione. Per mezzo di queste, è possibile ricavare le funzioni analitiche necessarie a ottenere, a qualunque temperatura di esercizio, un'intensità di emissione stabile e costante per i LED considerati.

Dalla Figura 6-6 (a) possiamo ricavare l'andamento dell'intensità con la temperatura. Indicando con *T* la temperatura, si ha:

$$I_{VG}(T)/I_{VG}(25^{\circ}C) = -0.0142(T-25) + 1.185 \text{ (Giallo)}$$

$$I_{VA}(T)/I_{VA}(25^{\circ}C) = -0.007(T-25) + 0.955 \text{ (Arancio)}$$
(6.1)

È importante notare che, affinché la corrente che scorre nei LED abbia un effetto compensativo sulla variazione di efficienza, essa deve comportarsi in maniera "opposta", cioè a un aumento di temperatura deve corrispondere un aumento della corrente di polarizzazione (in forma analitica bisogna invertire il coefficiente angolare delle relazioni precedenti).

Mentre, dalla Figura 6-6 (b) correliamo la corrente di polarizzazione all'intensità emessa:

$$i_G = 50 I_{VG}(T) / I_{VG}(25^{\circ}C,50 \text{ mA})$$
  
 $i_A = 4 [I_{VG}(T) / I_{VG}(25^{\circ}C,4 \text{ mA})]^{1/1.2}$ 
(6.2)

Unendo le relazioni precedenti si ottiene in forma analitica l'andamento delle correnti che consentono di compensare le variazioni di efficienza dei LED con la temperatura:

$$i_G = 50I_{VG}(25^{\circ}C) [0.0142(T-25)+1.185]$$

$$i_A = 4I_{VA}(25^{\circ}C) [0.007(T-25)+0.955]^{1/1.2}$$
(6.3)

dove  $I_{vx}(25^{\circ}C)$  è un coefficiente di fitting che tiene conto delle correnti e quindi dell'intensità scelta a 25 °C.

Le equazioni (6.3) consentono di compensare le variazioni di luminosità del segnale con la temperatura. Ma come detto in precedenza, i LED, oltre alla variazione dell'intensità, presentano uno shift della lunghezza d'onda dominante. Tramite le simulazioni numeriche mostrate precedentemente, è possibile ricavare come il rapporto d'intensità tra i due tipi di LED deve essere modificato, in funzione della temperatura, per far sì che la "somma" delle radiazioni emesse dai due cluster abbia intensità e coordinate cromatiche relativamente stabili e conformi alla norma considerata. In particolare, nel caso esposto nelle Figura 6-3/Figura 6-4/Figura 6-5:

$$i_{PG}(T) = 0.006(T - 25) + 0.7$$
  
 $i_{PA}(T) = -0.006(T - 25) + 0.3$  (6.4)

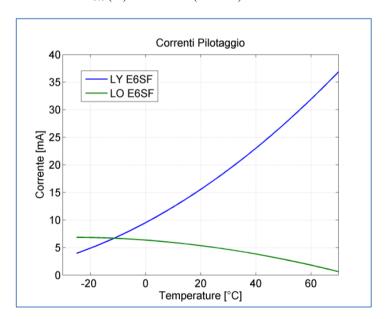


Figura 6-7 Correnti di polarizzazione che permettono di ottenere stabilità cromatica e di intensità al variare della temperatura: equazioni (6.5). Sono specifiche per la nostra ipotesi di sistema compensato.

Definendo quindi un sistema di alimentazione che polarizzi i cluster di LED secondo le seguenti relazioni è possibile ottenere un corretto comportamento globale del segnale (vedi § 6.1.2).

$$i_{G} = 50I_{VG}(25^{\circ}C) \left[ 0.0142(T-25) + 1.185 \right] \left[ 0.006(T-25) + 0.7 \right]$$

$$i_{A} = 4I_{VA}(25^{\circ}C) \left[ 0.007(T-25) + 0.955 \right]^{1/1.2} \left[ -0.006(T-25) + 0.3 \right]$$
(6.5)

### 6.1.1.2 Prove sperimentali

La soluzione cromatica esposta nel precedente paragrafo è stata testata in laboratorio. In particolare attraverso il setup sperimentale mostrato in Figura 6-8 [80], si è realizzato un sistema utilizzante soltanto due LED:

- LY E6SF 594 nm (giallo).
- LO E6SF 605 nm (arancio).

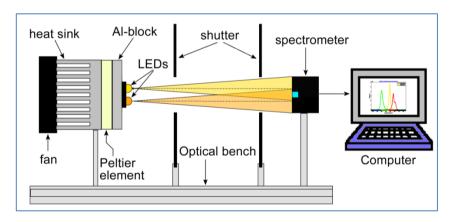


Figura 6-8 Sistema sperimentale utilizzato durante le prove in laboratorio.

Il setup sperimentale permette il controllo termico sulla giunzione dei LED, responsabile dello shift cromatico. Come mostra la figura, i LED sono saldati su un PCB metallico in modo tale da rendere minima la resistenza termica tra la

giunzione e la cella peltier che ricoprire il ruolo di pompa di calore (vedi § 6.2.4.1 per le caratteristiche di tali dispositivi). In questo modo, la temperatura di giunzione è imposta dalla temperatura assunta dalla superficie della cella peltier. Un controllore PID alimenta la cella secondo la temperatura sentita da un sensore di temperatura applicato al PCB metallico.

Lo spettrometro permette di misurare la distribuzione spettrale emessa dai LED da 380 nm a 780 nm, consentendo di calore i parametri colorimetrici e fotometrici.

Questo stesso setup sperimentale è stato utilizzato per verificare le caratteristiche dei LED acquistati, rispetto la caratterizzazione da datasheet presentata nel paragrafo precedente, Figura 6-9. L'errore che si commette sulla caratteristica intensità-temperatura facendo riferimento ai datasheet è al di sotto del 5%.

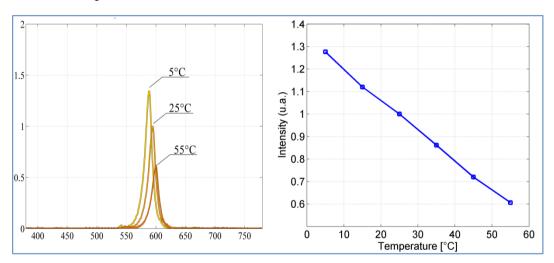


Figura 6-9 Caratterizzazione delle proprietà ottiche del LED LY E6SF al variare della temperatura. (Sinistra) Spettro di emissione vs temperatura. (Destra) Efficienza di emissione vs temperatura.

In fase di misura, dunque, attraverso il controllore PID si impone la temperatura sentita dai LED e attraverso dei generatori da banco la corrente che scorre al loro interno, secondo le espressioni (6.5).

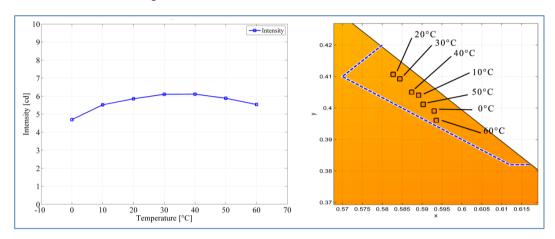


Figura 6-10 Risultati sperimentali ottenuti in laboratorio. (Sinistra) Stabilizzazione dell'intensità al variare della temperatura. (Destra) Rispetto delle norme colorimetriche della sorgente realizzata a doppio cluster LED.

Con questa configurazione abbiamo testato la nostra soluzione di compensazione cromatica al variare della temperatura. La Figura 6-10 mostra i risultati sperimentali ottenuti.

# 6.1.2 Compensazione dell'efficienza

La soluzione cromatica e d'intensità, presentata nei precedenti paragrafi, ipotizza la possibilità di poter legare l'alimentazione dei cluster dei LED alla temperatura. Ci sono innumerevoli possibilità di realizzare, in forma retroazionata, un driver di alimentazione che segua l'andamento della temperatura. Le stesse dipendenze delle caratteristiche elettro-ottiche dei LED alla temperatura offrono innumerevoli

Soluzioni proposte 198

tipologie di segnali che opportunamente manipolati consentono di avere un segnale elettrico disponibile.

In questo paragrafo cercheremo di mostrare le idee realizzate e testate in laboratorio. In particolare sono state sviluppate 3 tipologie di circuiti denominati:

- LED retroazionato
- LED/NTC
- LED di riferimento.

La denominazione assegnata dipende dal tipo di segnale di riferimento utilizzato come sensore di temperatura.

#### 6.1.2.1 LED retroazionato

In questa soluzione circuitale si utilizza la dipendenza della tensione diretta dei LED alla temperatura per realizzare il segnale di controllo del driver di alimentazione, questa idea è disponibile anche in letteratura [81], [82].

Consideriamo le curve caratteristiche dei LED scelti precedentemente per realizzare l'aspetto giallo, rispettivamente LY E6SF e LO E6SF. In particolare poiché essi appartengono alla stessa famiglia di dispositivi, la tensione diretta  $V_{FW}$  presenta una simile dipendenza dalla corrente di alimentazione e dalla temperatura, per cui faremo riferimento alle sole caratteristiche del LED LY E6SF. Di fatto il nostro scopo è di individuare un semplice metodo di progettazione delle lampade che possa essere non molto oneroso e realmente applicabile.

La Figura 6-11 mostra le curve di nostro interesse. In prima approssimazione possiamo legare la tensione diretta alla temperatura:

$$V_{FW} = -0.003T + V_{FW} (25^{\circ}C, I_{FW}) + 0.14$$
 (6.6)

dove  $V_{FW}(25^{\circ}C, I_{FW})$  dipende dalla corrente che scorre all'interno del LED.

La dipendenza della tensione alla corrente può essere ottenuta attraverso un fitting della curva mostrata in Figura 6-11 (sinistra).

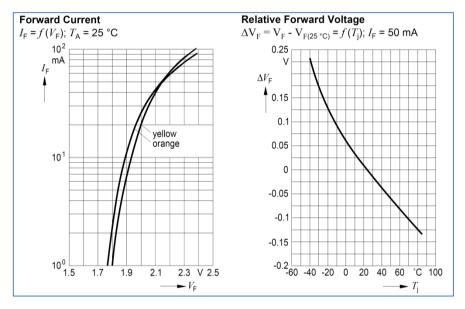


Figura 6-11 Dipendenze della tensione diretta dei LED LY E6SF e LO E6SF alla corrente di polarizzazione (sinistra) e alla temperatura (destra).

In particolare consideriamo la curva caratteristica del LED LY E6SF approssimandola con una funzione esponenziale, il cui esponente è a sua volta una funzione di grado secondo:

$$I_{FW} = \operatorname{d} \exp \left[ aV_{FW}^{2} \left( 25^{\circ}C \right) + bV_{FW} \left( 25^{\circ}C \right) + c \right]$$

$$V_{FW} \left( 25^{\circ}C \right) = \frac{-b + \sqrt{b^{2} - 4a\left( c - \ln I_{FW} / d \right)}}{2a}$$
(6.7)

Attraverso un'elaborazione numerica, sviluppata tramite software Matlab, otteniamo la caratterizzazione visibile in Figura 6-12.

Le relazioni (6.7), tuttavia, risultano poco pratiche, complicando notevolmente la nostra formulazione. La Figura 6-13 mostra il risultato di una caratterizzazione al primo ordine, relazione (6.8). Di fatto ammettendo un lieve errore di approssimazione le equazioni risultano più maneggevoli.

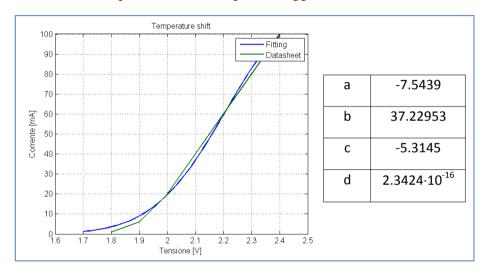


Figura 6-12 Approssimazione con un funzione esponenziale di secondo ordine della caratteristica I-V dei LED di interesse.

$$I_{FW} = \exp\left[aV_{FW}(25^{\circ}C) + b\right]$$

$$V_{FW}(25^{\circ}C) = \frac{\ln(I_{FW})}{a} - b$$
(6.8)

La dipendenza della tensione diretta dalla temperatura, riprendendo la relazione (6.6), può essere quindi espressa:

$$V_{FW} = -0.003T + 0.1288 \ln(I_{FW}) + 1.77$$

$$I_{FW} = \exp\left[\frac{V_{FW} + 0.003T - 1.77}{0.1288}\right]$$
(6.9)

Note, dunque, le dipendenze della tensione diretta dalla temperatura si sono realizzate due tipologie di driver di alimentazione. Tuttavia, come sarà più evidente nei prossimi paragrafi, la calibrazione di entrambe le circuiterie risultò notevolmente onerosa e complicata, facendoci abbandonare questa tipologia di soluzione. In particolare entrambe le circuiterie, per come sono state definite, tendono a discostarsi dal punto di lavoro, che analiticamente dovrebbe esser stabile, incominciando a oscillare nel suo intorno.

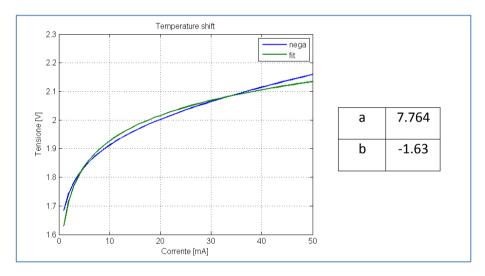


Figura 6-13 Approssimazione con un funzione esponenziale di primo ordine della caratteristica I-V dei LED di interesse.

#### 6.1.2.1.1 LED retroazionato: Resistenza variabile.

La Figura 6-14 mostra la soluzione che cronologicamente per prima è stata sviluppata nel corso del nostro studio. Il circuito mostrato sfrutta la relazione

(6.9): la diminuzione della tensione diretta del cluster, a un aumento della temperatura, definisce un aumento della corrente di polarizzazione, che controbilancia la perdita di efficienza luminosa. Al contrario, a una diminuzione della temperatura il circuito risponde diminuendo la corrente di polarizzazione nel cluster.

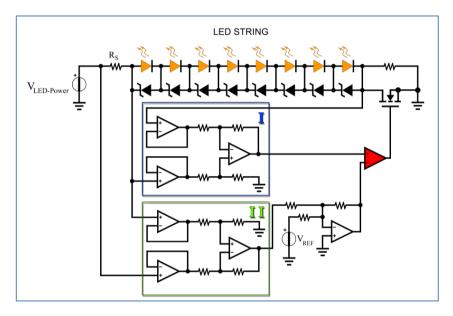


Figura 6-14 Driver di compensazione per il cluster LY E6SF: LED Retroazionato.

Il cuore del circuito è l'operazionale evidenziato in rosso in figura, il quale lavora per mantenere l'uguaglianza dei suoi ingressi polarizzando l'nMos e quindi definendo la corrente che scorre all'interno del cluster. Il driver di alimentazione segue quindi la relazione:

$$V_{FW} = -R_S I_{FW} + V_{REF} (6.10)$$

L'amplificatore di strumentazione "I" misura la caduta di tensione sul cluster, mentre l'amplificatore di strumentazione "II" misura la caduta di tensione sulla resistenza di sensing  $R_S$ , la quale dipende dalla corrente di polarizzazione che scorre nel cluster stesso. Infine attraverso un semplice sommatore analogico, la tensione  $V_{REF}$  offre un ulteriore grado di libertà per la calibrazione del circuito. I parametri  $R_S$  e  $V_{REF}$  definiscono la curva di lavoro del cluster visibile in Figura 6-15 che mostra il comportamento dinamico del circuito al variare della temperatura.

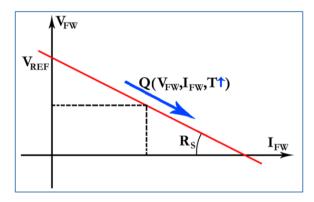


Figura 6-15 Retta di lavoro dei LED definita dal driver di alimentazione denominato "LED Retroazionato".

In particolare se sostituiamo nella (6.10) la relazione (6.9) otteniamo:

$$-0.003T + 0.1288\ln(I_{FW}) + 1.77 = -R_S I_{FW} + V_{REF}$$
 (6.11)

La relazione (6.11) ci permette, attraverso un'analisi numerica con la relazione (6.5), di effettuare la calibrazione del circuito considerato (Figura 6-16), in modo tale da realizzare il driver di alimentazione per il cluster di LED giallo visto nel paragrafo 6.1.1.1. La Figura 6-16 mostra anche l'analisi effettuata attraverso Orcad Pspice.

Soluzioni proposte 204

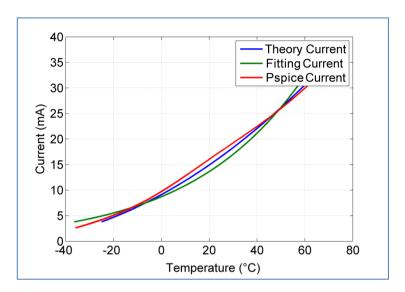


Figura 6-16 Calibrazione e simulazione del circuito "LED Retroazionato" per cluster Giallo. La curva Blu rappresenta la curva teorica di riferimento, equazione 6.5. La curva Rossa rappresenta la simulazione effettuata con il software Orcad Pspice. La curva Verde il "fitting", ottenuto via software Matlab, che ci ha permesso di calibrare il circuito:  $Rs = 1 \Omega$ ; Vref=2.06 V.

È importante notare anche, la funzione di protezione realizzata dalla resistenza R<sub>S</sub> e della resistenza posta in parallelo al nMos all'interno del circuito di Figura 6-14. Tali resistenze limitano l'escursione della corrente definendo rispettivamente la corrente massima assorbita e la minima, consentendo al circuito in caso di rottura di rimanere nei range di sicurezza definiti per i LED.

La Figura 6-17, invece, mostra il driver di alimentazione per il cluster arancio, definito dai LED LO E6SF, di fatto rispetto al precedente basta invertire l'amplificatore di strumentazione I. La Figura 6-18 mostra la caratterizzazione del circuito.

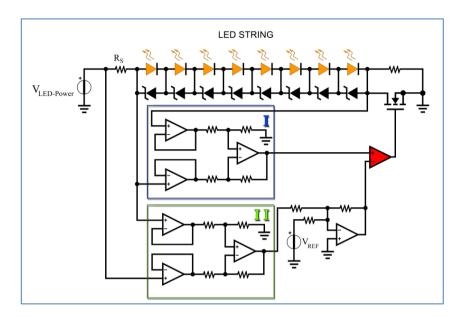


Figura 6-17 Driver di compensazione per il cluster LO E6SF: LED Retroazionato.

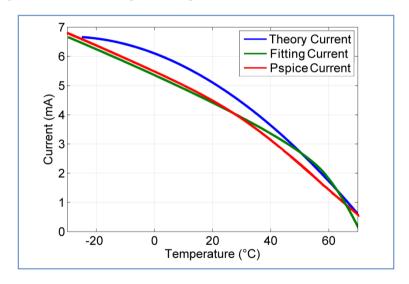
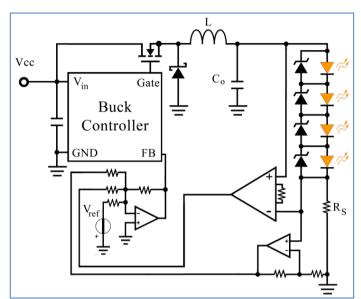


Figura 6-18 Calibrazione e simulazione del circuito "LED Retroazionato" per cluster Arancio. La curva Blu rappresenta la curva teorica di riferimento, equazione 6.5. La curva Rossa rappresenta la simulazione effettuata con il software Orcad Pspice. La curva Verde il "fitting", ottenuto via software Matlab, che ci ha permesso di calibrare il circuito:  $Rs = 90 \Omega$ ; Vref = 1.5 V.

Soluzioni proposte 206



#### 6.1.2.1.2 LED retroazionato: Buck Converter.

Figura 6-19 Driver di compensazione per il cluster LY E6SF; LED Retroazionato – Buck Converter.

Il driver utilizza una configurazione a corrente constante di un classico alimentatore switching realizzato con un integrato di controllo commerciale [83], [84]. L'innovazione di questa soluzione è definita dalla rete di retroazione realizzata con un amplificatore per strumentazione e due classiche configurazioni di Opamp: amplificatore non invertente e sommatore. Tale innovazione ci permette di ottenere un controllo sulla corrente che scorre nel cluster attraverso la seguente legge:

$$-A_{IN-A}V_{FW} = -A_{NO-I}(I_{FW}R_S) + V_{RFF} - V_{FR}$$
(6.12)

dove:  $V_{FW}$  e  $I_{FW}$  sono la tensione e la corrente diretta del cluster;  $A_{IN-A}$  e  $A_{NO-I}$  rappresentano l'amplificazione dell'amplificatore rispettivamente di

strumentazione e non invertente;  $V_{REF}$  è una tensione di riferimento che ci offre un ulteriore grado di libertà;  $V_{FB}$  è la tensione di riferimento interna al driver di controllo;  $R_s$  la resistenza di sensing.

La soluzione descritta è formalmente identica alla precedente ma consente di ottenere una migliore efficienza del driver di alimentazione. Infatti mentre nel circuito precedente la variazione di corrente era ottenuta attraverso una dissipazione di potenza su carico resistivo variabile (nMos), in questo caso il driver assorbe solo la potenza necessaria.

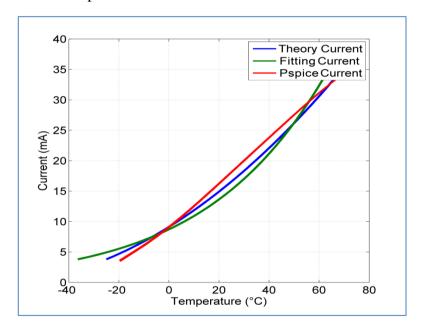


Figura 6-20 Calibrazione e simulazione del circuito "LED Retroazionato – Buck Converter" per cluster Giallo. La curva Blu rappresenta la curva teorica di riferimento, equazione 6.5. La curva Rossa rappresenta la simulazione effettuata con il software Orcad Pspice. La curva Verde il "fitting", ottenuto via software Matlab, che ci ha permesso di calibrare il circuito:  $A_{\rm IN-A}=1.4$ ;  $A_{\rm IN-A}=0.5$  Rs = 2  $\Omega$ ; Vref = -1.62 V.

L'integrato utilizzato nella realizzazione del circuito è il MC34063A, scelto semplicemente per la sua praticità d'impiego; sul mercato sono presenti numerose tipologie di driver specifici per i LED [85], [86].

Attraverso le relazioni (6.9) e (6.5) abbiamo effettuato un'analisi numerica e una calibrazione del circuito per un cluster realizzato con i LED LY E6SF, Figura 6-20. I parametri così ottenuti ci hanno permesso di simulare il circuito anche attraverso Orcad Pspice.

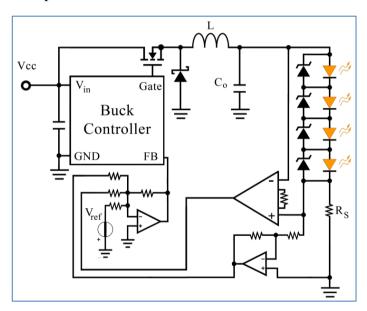


Figura 6-21 Driver di compensazione per il cluster LO E6SF: LED Retroazionato – Buck Converter.

La Figura 6-21, invece, mostra il driver di alimentazione per il cluster arancio, definito dai LED LO E6SF, di fatto rispetto al precedente è stato invertito l'amplificatore di strumentazione e invece dell'amplificatore non invertente, per la misura sulla resistenza di sensing  $R_{\rm S}$ , abbiamo posto un amplificatore invertente. La Figura 6-22 mostra la caratterizzazione del circuito.

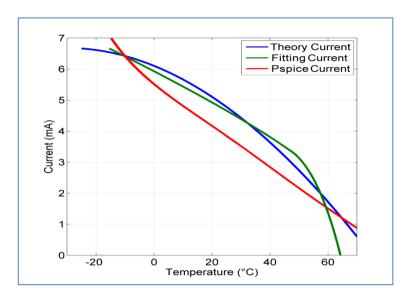


Figura 6-22 Calibrazione e simulazione del circuito "LED Retroazionato – Buck Converter" per cluster Arancio. La curva Blu rappresenta la curva teorica di riferimento, equazione 6.5. La curva Rossa rappresenta la simulazione effettuata con il software Orcad Pspice. La curva Verde il "fitting", ottenuto via software Matlab, che ci ha permesso di calibrare il circuito:  $A_{\rm IN-A}=5.72$ ;  $A_{\rm NO-A}=0.63$  Rs = 750  $\Omega$ ; Vref = 9.85 V.

## 6.1.2.2 LED/NTC

In questa soluzione circuitale si utilizza una resistenza NTC (Negative Temperature Coefficient) che attraverso un partitore resistivo realizza il segnale di controllo del driver di alimentazione [87], [88]. L'utilizzo di questo dispositivo come sensore di temperatura è ben noto in letteratura trovando larga applicazione anche nei driver di alimentazione dei LED, tuttavia solitamente esso viene utilizzato come sensore di allarme.

Nei sistemi d'illuminazione a LED sul PCB metallico, su cui i LED sono montati, vengono applicate diverse resistenze di tipo NTC, utilizzate per fornire un segnale dipendente dalla temperatura al driver di alimentazione. Il driver impiega questo segnale per determinare la corrente che scorre nel cluster allo scopo di

salvaguardare la rottura dei LED stessi. Quindi, a un aumento della temperatura il sistema di alimentazione risponde diminuendo la corrente.

L'idea sviluppata nel nostro lavoro invece utilizza la resistenza NTC per definire la corrente di alimentazione del cluster in modo da rispettare le norme per la segnaletica. La Figura 6-23 mostra la soluzione implementata.

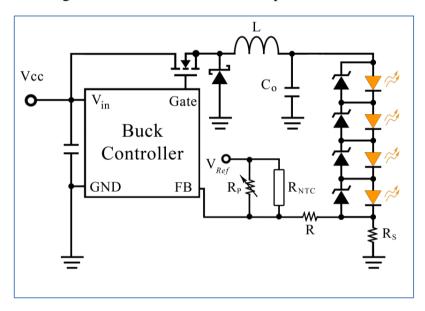


Figura 6-23 Driver di compensazione per il cluster LY E6SF: LED/NTC.

Come descritto per la soluzione precedente, l'alimentatore è la configurazione a corrente constante di un classico alimentatore switching realizzato utilizzando driver di controllo commerciale (integrato: MC34063A). La catena di retroazione realizzata permette di legare la corrente alla seguente relazione:

$$I_{FW} = \frac{1}{R_S} \left[ V_{FB} - \frac{R + R_S}{R + \frac{R_{NTC}(T)R_P}{R_{NTC}(T) + R_P} + R_S} V_{REF} \right]$$
(6.13)

dove:  $I_{FW}$  è la corrente diretta che scorre nel cluster;  $V_{REF}$  è una tensione di riferimento esterna;  $V_{FB}$  è la tensione di riferimento interna al driver di controllo;  $R_S$  la resistenza di sensing;  $R_P$  una resistenza variabile utilizzata in fase di calibrazione;  $R_{NTC}$  una resistenza di tipo NTC.

La (6.13) associa la corrente nel cluster alla temperatura sentita dalla resistenza NTC, che come è noto ha una dipendenza dalla temperatura pari:

$$R(T) = R(T_0) \exp\left\{B\left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_0 + 273.15}\right)\right\}$$
(6.14)

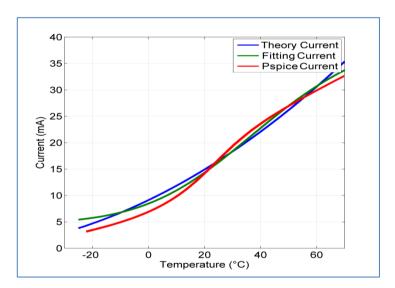


Figura 6-24 Calibrazione e simulazione del circuito "LED NTC" per cluster Giallo. La curva Blu rappresenta la curva teorica di riferimento, equazione 6.5. La curva Rossa rappresenta la simulazione effettuata con il software Orcad Pspice. La curva Verde il "fitting", ottenuto via software Matlab, che ci ha permesso di calibrare il circuito: R = 18k;  $Rs = 274~\Omega$ ; Vref = -10.5V;  $Rp = 12M~\Omega$ ; NTC: R(T0) = 42k, Rossa Ross

Quindi attraverso la relazione (6.5) siamo in grado di effettuare un'analisi numerica che ci permette la calibrazione del circuito. Come in precedenza,

consideriamo dapprima un cluster realizzato con i LED LY E6SF. La Figura 6-24 mostra la calibrazione effettuata e la simulazione del circuito attraverso il software Orcad Pspice.

In particolare con questa particolare soluzione, il driver di alimentazione per il cluster arancio, definito dai LED LO E6SF, è identico a quello appena presentato, bisogna solo cambiare i suoi parametri caratteristici, Figura 6-25.

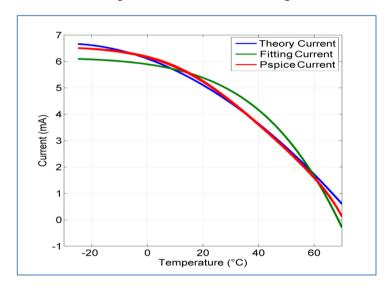


Figura 6-25 Calibrazione e simulazione del circuito "LED NTC" per cluster Arancio. La curva Blu rappresenta la curva teorica di riferimento, equazione 6.5. La curva Rossa rappresenta la simulazione effettuata con il software Orcad Pspice. La curva Verde il "fitting", ottenuto via software Matlab, che ci ha permesso di calibrare il circuito: R=12k;  $Rs=15~\Omega$ ; Vref=2.23V;  $Rp=1.2k\Omega$ ; NTC:  $R(T0)=42k\Omega$ , R=4450.

#### 6.1.2.3 LED di riferimento

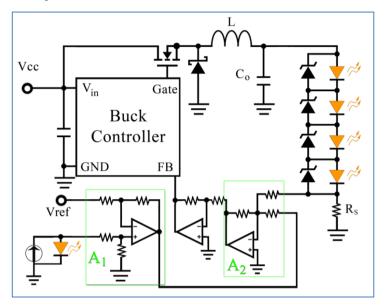


Figura 6-26 Driver di compensazione per il cluster LY E6SF: LED di riferimento.

Dopo aver sviluppato una soluzione con un sensore resistivo NTC siamo ritornati sui nostri passi cercando di utilizzare un LED come sensore di riferimento [89]. La Figura 6-26 mostra la soluzione circuitale nella quale si utilizza la dipendenza della tensione diretta di un LED, della stessa famiglia di quelli utilizzati nel cluster, alla temperatura. Importante notare che in questo modo abbiamo un sensore di temperatura con una caratteristica identica a quella dei LED che definiscono il cluster.

A differenza della soluzione circuitale vista nel § 6.1.2.1, utilizzando un LED alimentato a corrente costante è possibile avere un segnale di riferimento stabile. L'instabilità della soluzione precedente è dovuta alla correlazione tra le due catene

di feedback, la prima sulla corrente la seconda sulla tensione, che risultano legate dalla caratteristica corrente-tensione dei LED stessi.

Il segnale di riferimento è in questo caso rappresentato semplicemente da:

$$V_{LEDr} = -0.003T + V_{FW} (25^{\circ}C, I = const) + 0.14$$
 (6.15)

La catena di retroazione lega la corrente che scorre nel cluster secondo la seguente relazione:

$$I_{FW} = \frac{1}{A_2 R_S} \left[ V_{FB} + A_1 A_2 V_{REF} - A_1 A_2 V_{LEDr} (T) \right]$$
 (6.16)

Quindi attraverso la relazione (6.5) siamo in grado di effettuare una analisi numerica che ci permette la calibrazione del circuito. Come in precedenza, consideriamo dapprima un cluster realizzato con i LED LY E6SF. La Figura 6-27 mostra la calibrazione effettuata e la simulazione del circuito attraverso il software Orcad Pspice.

In particolare il driver di alimentazione per il cluster arancio, definito dai LED LO E6SF, è leggermente diverso da quello appena presentato. Oltre a cambiare i parametri di calibrazione, è necessario invertire gli ingressi dell'amplificatore differenziale  $A_1$  Figura 6-28.

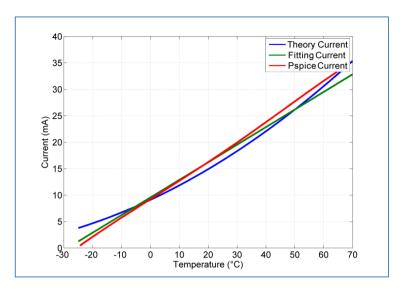


Figura 6-27 Calibrazione e simulazione del circuito "LED di riferimento" per cluster Giallo. La curva Blu rappresenta la curva teorica di riferimento, equazione 6.5. La curva Rossa rappresenta la simulazione effettuata con il software Orcad Pspice. La curva Verde il "fitting", ottenuto via software Matlab, che ci ha permesso di calibrare il circuito:  $Rs = 17 \Omega$ ; Vref = 0.575 V;  $A_2 = 0.41$ ;  $A_1 = 1.9$ .

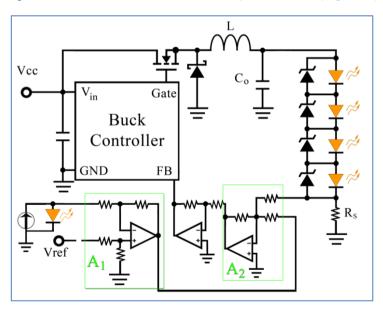


Figura 6-28 Driver di compensazione per il cluster LO E6SF: LED di riferimento.

Soluzioni proposte 216

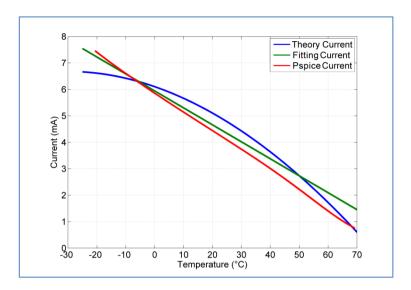


Figura 6-29 Calibrazione e simulazione del circuito "LED di riferimento" per cluster Arancio. La curva Blu rappresenta la curva teorica di riferimento, equazione 6.5. La curva Rossa rappresenta la simulazione effettuata con il software Orcad Pspice. La curva Verde il "fitting", ottenuto via software Matlab, che ci ha permesso di calibrare il circuito:  $Rs = 1 \text{ k}\Omega$ ; Vref = 1.86 V;  $A_2 = 1$ ;  $A_1 = 20$ .

## 6.1.2.4 Prove sperimentali

I circuiti descritti sono stati realizzati e testati in laboratorio con il setup sperimentale presentato nel § 6.1.1.2. Le tolleranze dei componenti discreti non risultarono critiche, l'utilizzo di potenziometri e alimentatori variabili consentì la corretta calibrazione di ogni circuito, permettendoci di verificare le potenzialità della nostra soluzione (Figura 6-31/Figura 6-33).

Tuttavia il circuito "LED retroazionato" ha mostrato, in entrambe le versioni presentate, un'instabilità dinamica che ne compromette la funzionalità. In fase di misura, e quindi in condizioni dinamiche, la variazione di temperatura fa oscillare lievemente la corrente, che scorre nel cluster, intorno al valore atteso sino al raggiungere della stabilità.

Tale caratteristica è dovuta alla doppia catena di retroazione (corrente e tensione) legate dalla caratteristica corrente-tensione dei LED. La funzione di errore che il circuito realizza modifica contemporaneamente i due segnali di errore provenienti dalle catene di feedback.

L'oscillazione tuttavia non sarebbe critica, ma in alcuni casi ha determinato la saturazione degli operazionali, che realizzano il feedback, interrompendo il funzionamento del nostro driver.

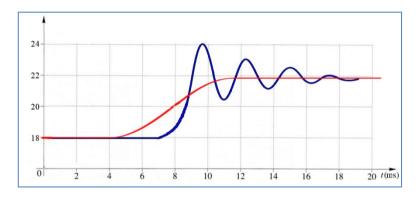


Figura 6-30 Comportamento dinamico del driver "LED retroazionato". In rosso la variazione teorica nel tempo della corrente che scorre nel cluster. In blu l'andamento reale della corrente di polarizzazione.

Il circuito "LED/NTC" invece risultò molto stabile, mostrando come unica criticità la difficoltà di linearizzare il comportamento del resistore NTC attraverso il partitore creato; la Figura 6-32 mostra come l'intensità emessa segua l'andamento della caratteristica resistenza/temperatura dell'NTC.

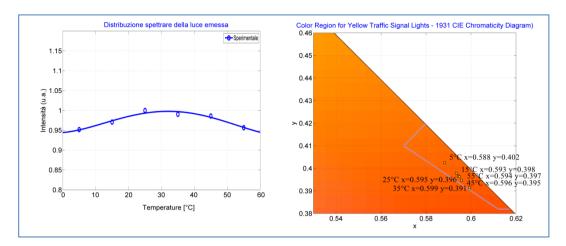


Figura 6-31 Misure sperimentali ottenute con i driver per cluster Arancio e cluster Giallo in configurazione "Led retroazionato".

Il circuito "LED di riferimento" invece risultò il più performante, caratterizzato da facilità di calibrazione e stabilità alle variazioni della temperatura.

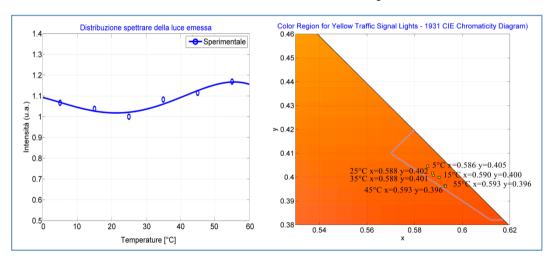


Figura 6-32 Misure sperimentali ottenute con i driver per cluster Arancio e cluster Giallo in configurazione "LED NTC".

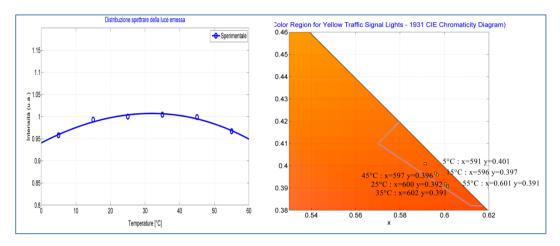


Figura 6-33 Misure sperimentali ottenute con i driver per cluster Arancio e cluster Giallo in configurazione "Led riferimento".

# **6.2** Controllo sulla Temperatura

La criticità nel realizzare apparati semaforici conformi alle normative risiede nella notevole dinamica della temperatura ambiente cui essi sono sottoposti, rispetto la quale devono mantenere inalterate le proprie caratteristiche elettro-ottiche. Il metodo presentato nei precedenti paragrafi cerca di limitare l'influenza della temperatura sulle caratteristiche emissive della lampada che realizza la sorgente di luce. In questo paragrafo invece si cercherà di limitare la dinamica della stessa temperatura.

Gli apparati semaforici di fatto sono dei sistemi chiusi per cui è possibile intervenire su di essi in modo tale che i cluster di LED non sentano tutta l'escursione termica esterna. In questo modo è possibile limitare l'effetto che la temperatura ha sulle caratteristiche elettro-ottiche dei singoli LED.

Lo studio che andiamo a presentare è specifico per i segnali a nostra disposizione e quindi faremo riferimento ai nuovi segnali alti a tecnologia LED di RFI. Tuttavia il metodo sviluppato e le conclusioni possono essere applicate all'interno mercato degli apparati di segnalamento. In particolare descriveremo inizialmente il sistema sotto analisi inseguito la caratterizzazione termica del sistema "segnale ferroviario" e le relative prove sperimentali e modello matematico sviluppato.

# 6.2.1 Sistema "Segnale-Cuffia"

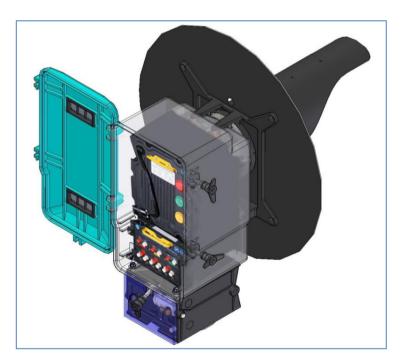


Figura 6-34 Apparato di segnalamento ferroviario: Segnali "Alti" categoria 1. Il segnale vero è proprio è posto all'interno della "Cuffia" di protezione.

Il sistema studiato è un apparato di segnalamento destinato all'ambiente ferroviario, atto a fornire segnali alti luminosi (di 1a categoria e di avviso) di colore (o aspetto) Rosso, Giallo o Verde. La versione esaminata è in grado di proiettare tutti e tre i colori; le versioni più leggere hanno la possibilità di proiettare uno solo dei tre colori; quelle intermedie permettono, infine, di proiettare due dei tre colori. In Figura 6-34 è visibile come l'intero sistema si presenta ai nostri occhi.

In queste brevi pagine presenteremo le caratteristiche tecniche principali della cuffia e del segnale studiato.

#### 6.2.1.1 Segnale alto luminoso

Il segnale alto luminoso con dispositivi a semiconduttore (LED) si compone di due gruppi:

- Gruppo di alimentazione
- Gruppo ottico

lo schema a blocchi di Figura 6-35 mostra la composizione del dispositivo.

I tre aspetti sono completamente indipendenti da un punto di vista funzionale ed elettrico, l'unica integrazione avviene a livello meccanico, in particolare nella sezione d'illuminazione.

La componente fondamentale del dispositivo (componente ottica) è costituita da una matrice piana di LED, ognuno dei quali possiede una propria ottica di collimazione per garantire la corretta direttività e intensità del fascio ottico. La matrice è pilotata in corrente, essendo l'intensità luminosa funzione della corrente di polarizzazione dei LED, mentre una logica di "controllo integrità" monitorizza lo stato del segnale.

Soluzioni proposte 222

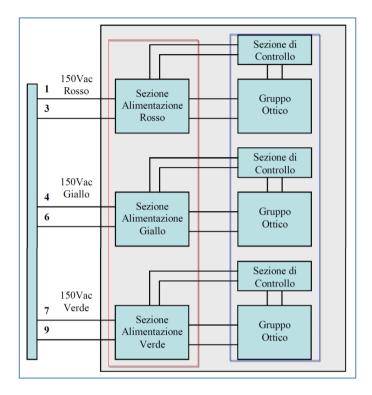


Figura 6-35 Schema a blocchi dell'apparato di segnalamento, in rosso il gruppo di alimentazione, in blu il gruppo ottico.

In condizione di funzionamento normale la logica di controllo inserisce una resistenza di zavorra (carico a inserimento controllato) che garantisce il mantenimento della corrente nei livelli prefissati da RFI (i sistemi di sicurezza preesistenti necessitano che il segnale in caso di funzionamento normale, assorba circa 22 W; tarati su lampade a filamento). In condizione di avaria la resistenza di zavorra viene tolta per cui la corrente di linea (lato 150Vac) assume valori esterni alle soglie di corrente di normale funzionamento.

A livello elettronico la suddetta zavorra risulta essere in parallelo alla matrice di LED ciò consente, come vedremo in seguito, di poterla escludere pur mantenendo un corretto funzionamento della parte ottica del segnale. In particolare viene utilizzato come zavorra un IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) di potenza opportunamente collegato a un dissipatore che consente la rimozione del calore da esso generato.

La caratterizzazione termica del segnale risulta essere al quanto agevole vista la composizione del case di sola natura plastica (unico coefficiente di adduzione, se si esclude la parte di alloggio del suddetto dissipatore), e di forma parallelepipeda priva di angoli vivi e pronunciati che permette di escludere un effetto "punta". Inoltre per specifiche RFI (IP66), esso risulta completamente ermetico e privo di sedi preferenziali di scambio termico.

### 6.2.1.2 Cuffia per gruppo semaforico

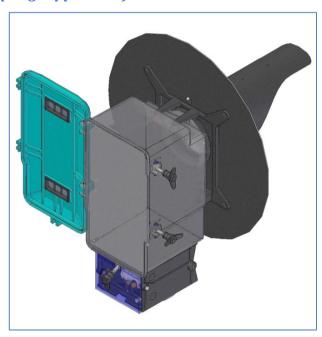


Figura 6-36 Cuffia di alloggio della segnaletica "Alta" della Rete Italiana Ferroviaria.

La cuffia è l'involucro di alloggio utilizzato da RFI per i segnali semaforici alti luminosi di 1a categoria. E' realizzata in tecnopolimero con fibra di vetro semiespanso e presenta ottime resistenze all'urto e all'invecchiamento. Questa è definita completamente stagna (IP45), ed è elettricamente e termicamente isolata (le due feritoie, visibili in Figura 6-36, contribuiscono allo scambio termico in modo impercettibile). È dotata di gruppo di regolazione micrometrica con ingranaggi e viti senza fine autolubrificanti e insensibili alle intemperie [90].

# 6.2.2 Catena Metrologica

La caratterizzazione termica del segnale ha reso necessario la realizzazione di un setup di misura, visibile nella figura seguente, e di uno strumento di misura vero e proprio. Per la realizzazione di quest'ultimo si è scelto di sfruttare la modularità e la semplicità offerta dalle schede di acquisizione LabVIEW e dal linguaggio di programmazione stesso.

In questa breve sezione presenteremo le caratteristiche principali dello strumento realizzato e le scelte effettuate in fase di progetto. In particolare, la realizzazione di tale strumento è stata agevolata dalla caratteristica dei segnali di temperatura misurati, lento variabili, che non richiedono frequenze di campionamento elevate e dal tipo di caratterizzazione che si vuole ottenere. Di fatti, il modello termico presentato si basa sulle differenze di temperatura e non sul valore assoluto di esse, e necessita solo di un'equalizzazione dei sensori di temperatura in fase di calibrazione (non richiede una calibrazione di precisione per ogni singolo sensore).



Figura 6-37 Catena di misura utilizzata per la caratterizzazione del sistema segnale-cuffia.

In particolare lo strumento si può suddividere in:

- Sensori di temperatura.
- Scheda di Acquisizione.
- Software di Acquisizione.

### 6.2.2.1 Sensori di Temperatura

Lo strumento di misura realizzato utilizza 8 sensori di temperatura. Tale numero deriva dalla necessità, in fase preliminare, della verifica delle ipotesi fatte sul comportamento del sistema "cuffia-segnale" (effetto punta, sistema privo di ponti termici preferenziali). Infatti si ha necessita di verificare l'andamento delle

temperature all'interno della cuffia (5 sulle pareti, 1 in aria all'interno), all'interno del segnale semaforico (1 sensore), e l'andamento della temperatura ambientale esterna che fa da riferimento (si veda § 6.2.3.2.2).

I sensori scelti sono gli AD590KH, come è noto, essi funzionano come generatori di corrente continua, il valore di quest'ultima dipende in modo lineare dalla temperatura. La scelta di questo tipo di sensore è dovuta alle sue ottime caratteristiche di linearità, stabilità nel tempo, tempo di risposta ed errore assoluto, e naturalmente all'uscita in corrente insensibile agli errori causati dalle resistenze parassite della catena di misura.

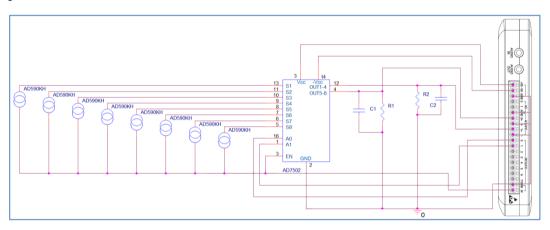


Figura 6-38 Schema elettrico Sensori di temperatura-Scheda di acquisizione LabView.

La Figura 6-38 mostra lo schematico della scheda d'interfaccia sensori-DAQ realizzata; è visibile un multiplexer (AD7502, necessario in quanto il DAQ possiede soli due ingressi analogici) e le resistenze R1 e R2 (R1= R2=7.4 k $\Omega$ , C1=C2=10nF) che sono le resistenze di misura.

In ingresso alla scheda di acquisizione si misurerà, quindi, una tensione pari:

$$V = R \frac{1\mu A}{K} T_{S} \tag{6.17}$$

Dove R è la resistenza di misura,  $1\mu$ A/K è il coefficiente di temperatura del nostro sensore, mentre  $T_S$  è la temperatura a cui è sottoposto il sensore stesso.

#### 6.2.2.2 Scheda di Acquisizione

La scheda di acquisizione utilizzata è il NI myDAQ sia per la sua grande facilità di utilizzo e sia per la presenza di uscite di alimentazione standard (±15V, 5V e 3.3V) che consento di realizzare veri e propri strumenti servendosi di pochi componenti.

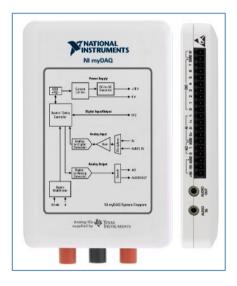


Figura 6-39 Scheda di acquisizione LabView: NI myDAQ.

NI myDAQ è un dispositivo di acquisizione dati dotato di 2 canali analogici differenziali d'ingresso e 2 d'uscita (200ks/s, 16 bit, +/-10V), 8 linee digitali d'ingresso e uscita (compatibili TTL a 3,3V), un multimetro digitale (DMM) per misure di tensione, corrente e resistenza. Come detto, fornisce alimentazione

sufficiente a circuiti semplici e sensori attraverso la sola alimentazione derivante dal bus USB.

#### 6.2.2.3 Software di Acquisizione

Il software di acquisizione è stato realizzato in linguaggio di programmazione LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench). Il linguaggio di programmazione LabVIEW si differenzia nettamente dai linguaggi tradizionali, intrinsecamente sequenziali, mettendo a disposizione un ambiente di programmazione grafica e tutti gli strumenti necessari per sviluppare applicazioni rivolte all'acquisizione dati e alla loro analisi e presentazione. L'innovazione più importante di questo linguaggio di programmazione è la possibilità di realizzare con estrema facilità un'interfaccia grafica che consente all'utente di interagire con il computer manipolando graficamente degli oggetti.

In Figura 6-40 è visibile l'interfaccia grafica realizzata per il nostro strumento di misura: si riconosce l'area riservata al grafico, l'area in cui sono riportati i valori istantanei rilevati e i controlli come il "Tempo di campionamento" (tempo che intercorre tra un campione e il seguente) e la "Media-Numero Campioni" (offre la possibilità di memorizzare solo una media dei campioni misurati; ad esempio se si pone il valore 5, il software memorizza solo il valor medio di 5 campioni misurati).

Il software ha un duplice compito:

- acquisizione-elaborazione
- memorizzazione.

In fase di acquisizione-elaborazione; il primo passo compiuto è la selezione del sensore da campionare attraverso il multiplexer e, dopo aver aspettato che la tensione si sia stabilizzata sulla resistenza di misura, l'acquisizione del valore di tensione. Il valore campionato viene in seguito processato ricavandone il valore in temperatura.

In fase di memorizzazione; il software visualizza sul pannello utente il valore campionato e al tempo stesso lo scrive su due file (a ogni nuovo campionamento questi vengono aggiornati), uno di tipo \*.txt (utile per l'elaborazione del modello termico in Matlab) e uno di tipo \*.xls.

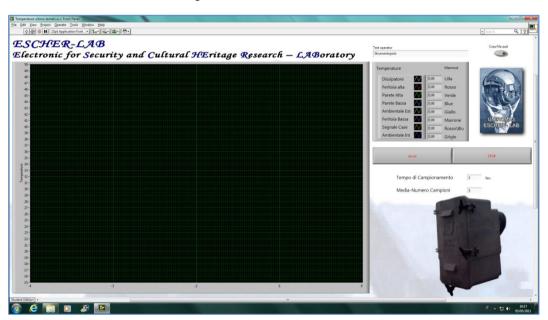


Figura 6-40 Interfaccia grafica del programma di misura realizzato.

# 6.2.3 Caratterizzazione Termica del Segnale

Lo scambio termico che si realizza tra sistemi termodinamici distinti o tra porzioni distinte di un sistema termodinamico è una forma di energia trasferita in presenza di una differenza di temperatura. L'esistenza dell'equilibrio termico tra due punti, individuato dall'uguaglianza delle temperature dei due punti considerati, preclude qualsiasi scambio di calore tra di essi.

I meccanismi che presiedono allo scambio termico sono molto diversi secondo il mezzo attraverso il quale il trasferimento di calore si realizza. Nel caso di un mezzo solido, le molecole non possono muoversi che in un intorno della propria posizione di equilibrio. Il trasferimento di calore deve avvenire tramite la propagazione del moto oscillatorio delle molecole (meccanismo fononico) oppure anche tramite lo spostamento degli elettroni di conduzione (meccanismo elettronico), qualora il solido sia anche un conduttore elettrico. In generale si parla di trasmissione del calore per conduzione termica.

Nel caso di un mezzo fluido, sia esso liquido o gassoso, al meccanismo conduttivo si sovrappone, spesso prevalendo su questo in termini quantitativi, il meccanismo convettivo. Nella convezione termica l'energia è trasferita da una posizione a un'altra per effetto dello spostamento relativo di molecole con un diverso contenuto energetico, sia a seguito di un processo meramente diffusivo, sia a seguito di un rimescolamento indotto della massa fluida. Tale rimescolamento può essere legato all'insorgere di un gradiente di densità legato a quello di temperatura o in presenza di un campo di forze esterne di volume che innesca moti convettivi (convezione naturale), oppure può essere prodotto artificialmente movimentando

il fluido (convezione forzata). In entrambi i casi l'analisi della convezione è finalizzata a quantificare lo scambio termico che ha luogo tra una superficie solida che delimita il deflusso e il fluido che la lambisce.

Infine, il calore può anche essere scambiato in assenza di mezzo fisico, tra due sistemi che emettono e ricevono energia termica sotto forma di onde elettromagnetiche. In parte le radiazioni elettromagnetiche possono ricadere nel campo di lunghezze d'onda del visibile, comprese tra 0.4 e 0.7  $\mu$ m, nel qual caso sono percepite come radiazioni luminose. Il contenuto energetico più significativo, per quanto riguarda l'emissione da corpi alle temperature tecnicamente riscontrabili (da qualche decina di migliaia di kelvin alla temperatura ambiente) è tuttavia quello relativo alle lunghezze d'onda comprese tra 0.1 e 100  $\mu$ m (nel campo dell'ultravioletto, del visibile e dell'infrarosso). È questo l'intervallo d'interesse per la radiazione termica.

Nelle applicazioni della tecnica il trasferimento di calore da un sistema a un altro o da una parte all'altra di un sistema è spesso legato alla sovrapposizione o alla successione di più di un meccanismo di scambio termico. Quando sono contemporaneamente presenti due o tre modi di scambio termico, si parla di scambio termico globale [91].

In questo breve capitolo, tuttavia, ci soffermeremo sullo scambio termico per conduzione, in quanto, come verrà mostrato dalle misure sperimentali, questo caratterizza gli scambi termici del sistema segnale-cuffia.

Soluzioni proposte 232

### 6.2.3.1 Transitori termici per corpi a temperatura quasi uniforme

Lo studio termico del sistema "segnale-cuffia" può essere affrontato tramite il metodo delle capacità concentrate. Il nostro problema di scambio di calore può essere schematizzato come due scatole costituite da buon conduttore termico contenenti aria, le quali sono scaldate da un riscaldatore elettrico di forma sferica (*W*), come mostra la Figura 6-41.

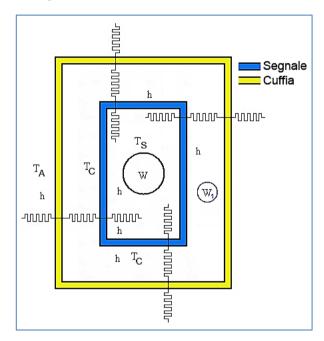


Figura 6-41 Modellizzazione Termica del sistema Segnale-Cuffia.

Con tale modellizzazione, si prendono qui in esame i transitori termici in cui i vari corpi del sistema in studio hanno una temperatura che, pur variando nel tempo, risulta approssimativamente uniforme e cioè non varia apprezzabilmente da punto a punto; tale ipotesi permette di ottenere una soluzione assai semplice e, in particolare, permette di utilizzare l'analogia elettrica a parametri concentrati.

A rigore, al fine di avere una trasmissione termica devono essere presenti dei gradienti (delle variazioni spaziali) della temperatura; ciò è una conseguenza del secondo principio della termodinamica.

Peraltro è ben noto che zone limitate di un solido, che sia buon conduttore termico, possono sopportare flussi termici rilevanti, senza presentare notevoli sbalzi di temperatura al loro interno; inoltre, in un fluido i moti di mescolamento possono efficacemente trasportare entalpia, pur mantenendo il fluido stesso quasi isotermo. In tali casi i salti termici più importanti sono imputabili alle resistenze termiche convettive all'interfaccia tra solidi e fluidi; è evidente che potremo considerare a temperatura uniforme i vari corpi (solidi, fluidi) quando le differenze termiche nel loro seno sono piccole rispetto ai salti convettivi.

Per un solido di conducibilità termica  $k_S$  che scambi, per convezione, una potenza termica q con un solo fluido, attraverso un coefficiente di scambio h, è facile quantificare un criterio per la sua quasi uniformità termica. Si introduce infatti la lunghezza caratteristica  $L_S$  come il rapporto tra il volume V del solido e l'area A di scambio con il fluido.

$$L_{\rm S} = \frac{V}{A} \tag{6.18}$$

In base ad essa è facile stimare una resistenza conduttiva all'interno del corpo (come  $L_S/k_SA$ ) e quindi un salto termico dentro il solido dell'ordine di:

$$\Delta T_{\rm S} = \frac{qL_{\rm S}}{k_{\rm S}A} \tag{6.19}$$

d'altro canto il salto di temperatura tra superficie del corpo e fluido è  $\Delta T_{conv} = (q/hA)$ ; affinché il primo sia piccolo rispetto al secondo è sufficiente che sia piccolo il *numero di Biot* definito dalla relazione:

$$Bi = \frac{hL_{\rm S}}{k_{\rm S}} \tag{6.20}$$

In altre parole, il numero di Biot è pari a  $\Delta T_S/\Delta T_{conv}$  e fornisce una stima del rapporto tra il tipico salto termico interno al solido e quello convettivo localizzato sulla sua superficie. In pratica, per corpi di forma non troppo irregolare, si ritiene accettabile l'ipotesi di quasi uniformità già quando Bi < 0,1.

Nel nostro caso tale ipotesi è ben realizzata, essendo la fonte principale del calore definita dalla potenza dissipata internamente su un unico componente elettronico (IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor).

In questo caso dunque, accettando l'ipotesi di corpo a temperatura quasi uniforme, si rinuncia a un'analisi dettagliata della trasmissione termica al suo interno: per un solido non ha più senso andare a considerare l'equazione di Fourier, per un fluido cercare di descrivere i moti di mescolamento al suo interno. La soluzione consiste nel considerare il bilancio energetico unitamente alle resistenze convettive. Si ricorda che per un sistema chiuso a pressione costante (al quale si riduce tipicamente un qualsiasi problema di trasmissione del calore) la forma più conveniente del primo principio della termodinamica è quella entalpica e cioè:

$$\frac{\partial I}{\partial t} = q_{fr} + q_{sor} \tag{6.21}$$

ove I è l'entalpia dell'intero sistema,  $q_{fr}$  la potenza termica da esso scambiata (considerata come positiva quando è "assorbita" dal sistema),  $q_{sor}$  la potenza internamente generata.

# 6.2.3.2 Modello Termico e analogia elettrica RC

Il nostro modello termico è ricavato dall'equazione di bilancio presentata precedentemente, scritta sia per il segnale interno sia per la cuffia esterna.

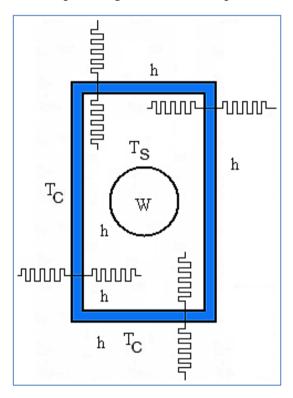


Figura 6-42 Modello Termico dell'apparato di segnalamento.

Se consideriamo il solo segnale semaforico, come mostra la Figura 6-42, possiamo approssimare l'elettronica interna (sede della generazione di calore per

effetto Joule W) a una piccola sfera posta al centro del segnale. La variazione entalpica cui sarà sottoposto è pari a  $\partial I = Mc_p \partial T$  (con  $C = Mc_p$  capacità termica dell'elettronica interna).

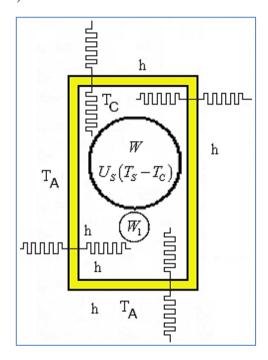


Figura 6-43 Modello Termico della Cuffia.

Il processo di scambio termico verso l'esterno (quindi in questo caso, verso la cuffia) avviene sia per conduzione sia per convezione, e può essere rappresentato tramite  $q_{fr} = U_S \left( T_C - T_S \right)$  (dove U è il coefficiente di scambio termico globale ed è pari a  $1/U = \sum 1/h + \sum V/\lambda$ , in cui h è coefficiente di scambio termico convettivo, V il volume e  $\lambda$  è la conducibilità termica). Mentre ovviamente per il

termine di produzione si ha  $q_{sor} = W$  (dove W indica la produzione di calore). Quindi la prima parte del sistema è ben definita dall'equazione di bilancio:

$$C\frac{\partial T}{\partial t} = U_S \left( T_C - T_S \right) + W \tag{6.22}$$

Per la sola "cuffia" possiamo effettuare una stessa identica ipotesi, e cioè approssimare l'intero segnale semaforico a un piccolo riscaldatore per cui valgono ancora le approssimazioni di Biot.

Se quest'approssimazione risulta valida (le misure sperimentali lo dimostrano), avremo che la variazione entalpica cui sarà sottoposta è pari a  $\partial I = M_S c_p \partial T$  (con  $C_S = M_S c_p$  capacità termica dell'intero segnale). Anche in questo caso, il processo di scambio termico verso l'esterno (verso l'ambiente) può essere rappresentato tramite  $q_{fr} = U_C (T_A - T_C)$ . Mentre il termine di produzione risulta essere  $q_{sor} = W + W_1 + U_S (T_S - T_C)$ , in quanto il segnale contiene il termine di produzione interna W, uguale al precedente (elettronica interna), e la potenza scambiata tramite le sue pareti, mentre il termine  $W_1$  deriva dalla presenza (come vedremo inseguito) di un dissipatore sul segnale che si comporta da "pompa di calore" passiva, determinando che parte della potenza di alimentazione viene a trovarsi direttamente in cuffia, come schematizzato nella Figura 6-41. Quindi la nuova equazione di bilancio è:

$$C_{S} \frac{\partial T}{\partial t} = U_{C} \left( T_{A} - T_{C} \right) + U_{S} \left( T_{S} - T_{C} \right) + W + W_{1}$$

$$(6.23)$$

L'intero sistema è rappresentato dal sistema algebrico di tali equazioni di bilancio.

$$\begin{cases}
C \frac{\partial T}{\partial t} = U_S (T_C - T_S) + W \\
C_S \frac{\partial T}{\partial t} = U_C (T_A - T_C) + U_S (T_S - T_C) + W + W_1
\end{cases}$$
(6.24)

In Figura 6-44 è visibile l'analogia elettrica.

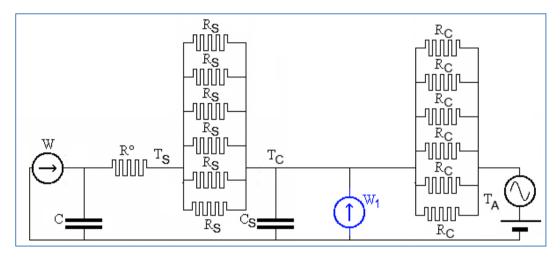


Figura 6-44 Analogia elettrica del modello termico segnale-cuffia.

#### 6.2.3.2.1 Modello "Ambiente"

La modellizzazione presentata del sistema in studio, se pur corretta, non permette da sola la caratterizzazione e la creazione di un modello di previsione sul comportamento in "loco", difatti è necessario tenere in conto la variabilità ambientale. L'impiego della sola temperatura ambientale all'interno del modello di Figura 6-44 determina un'erronea valutazione dei carichi termici cui l'intero sistema può essere sottoposto nel suo funzionamento, infatti nel periodo estivo l'irraggiamento del sole risulta essere il carico termico principale. Quest'ultimo è anche l'unica variabile ambientale tenuta in considerazione nel nostro lavoro in

quanto il modello, come vedremo, verrà utilizzato per predire l'andamento termico nelle condizioni più estreme, con le quali definiremo il nostro sistema di controllo "passivo" della temperatura.

Allo scopo di mantenere semplice la trattazione matematica precedentemente esposta si è trattato il carico termico derivante dall'irraggiamento tramite il metodo delle differenze di temperatura equivalenti (metodo di Carrier), che permette di modellare il carico dell'irraggiamento come una temperatura fittizia da sommare alla temperatura ambientale. Dunque si riconduce l'effetto congiunto dell'irraggiamento solare e della convezione adduzione a un unico fenomeno di convezione adduzione che permette al modello precedentemente presentato di esser ancora valido.

#### 6.2.3.2.1.1 Metodo delle differenze di temperatura equivalenti

Il metodo di Carrier, come abbiamo detto, permette di ridurre l'effetto congiunto dell'irraggiamento solare e della convezione adduzione a un unico fenomeno di convenzione adduzione [92].

L'effetto della radiazione solare dipende naturalmente dal tipo di materiale su cui incide, si definisce a questo scopo un coefficiente di assorbimento a [0 1] che caratterizza quest'ultimo. Tali materiali assorbono la quota a della radiazione solare incidente sulla superficie esterna e ne trasmettono all'interno una frazione di ampiezza ridotta (rispetto ad a) e con un picco ritardato rispetto al picco della radiazione solare incidente.

La parte di radiazione assorbita dalla superficie esterna della parete, per unità di superficie, vale:

Soluzioni proposte 240

$$\Phi_r = a \cdot I \qquad [W/m^2] \tag{6.25}$$

Dove I è la radiazione incidente.

La superficie stessa inoltre scambia calore per adduzione con l'aria esterna. Indicando con  $t_e$ ,  $t_s$ , rispettivamente la temperatura dell'aria esterna e della superficie, e indicando con  $\alpha$  il coefficiente di scambio per adduzione si ha:

$$\Phi_C = \alpha \cdot (t_e - t_s) \qquad [W/m^2] \qquad (6.26)$$

La somma dei flussi termici incidenti sulla superficie esterna della parete è:

$$\Phi = \Phi_r + \Phi_c = a \cdot I + \alpha \cdot (t_e - t_s)$$
(6.27)

Si può immaginare che la somma di questi due flussi termici, scambiati per convenzione e per irraggiamento, possa essere ceduta alla superficie considerata per adduzione tra l'ambiente esterno (aria + superfici verso cui avviene lo scambio radiante) posto a una temperatura  $t_e$  più elevata di  $t_e$ , in modo tale che risulti:

$$\Phi = \alpha \cdot (t_e - t_s) \qquad [W/m^2] \qquad (6.28)$$

Eguagliando le precedenti si ottiene:

$$t_{e}' = t_{e} + a \cdot I / \alpha \tag{6.29}$$

La temperatura t<sub>e</sub> è, quindi, quella temperatura che dovrebbe avere l'aria per scambiare, con la superficie della parete, lo stesso flusso termico per convenzione che, invece, viene scambiato per convenzione e per irraggiamento solare.

Nel nostro caso, per il calcolo di  $t_e^{'}-t_e^{}$  (=  $a\cdot I/\alpha$ ) si è fatto riferimento alle intensità di radiazione solare tabulate secondo l'orientazione delle pareti, del sistema ipotizzato, per il 21 luglio per latitudine 40 grandi Nord (Tabella 6-1).

Tabella 6-1 Intensità I  $\left[W/m^2\right]$  della radiazione solare al 21 luglio per latitudine 40 gradi Nord (Fonte: http://www.solaritaly.enea.it).

Ore	NE	Е	SE	S	SO	О	NO	Orizz.
5	7	7	4	3	3	3	3	10
6	450	493	245	40	40	40	40	115
7	586	734	457	76	72	72	72	317
8	533	778	576	108	78	78	78	522
9	382	695	612	187	112	112	112	698
10	202	526	572	292	130	126	126	832
11	144	292	457	367	155	133	133	914
12	137	148	288	392	188	148	137	943
13	133	133	155	367	457	292	144	914
14	126	126	130	292	572	526	202	832
15	112	112	112	187	612	695	382	698
16	94	94	94	108	576	778	533	522
17	72	72	72	76	457	734	587	317
18	40	40	40	40	245	493	450	115
19	3	3	3	3	4	7	7	10

Mentre per il coefficiente di assorbimento si è utilizzato un valore pari a 0.7, essendo la cuffia di materiale plastico (policarbonato con fibra di vetro

semiespanso) e di colore grigio. Infine il coefficiente di adduzione è stato valutato attraverso i valori descritti in Tabella 6-2.

In particolare per il calco si è considerata un'orientazione simile a quella utilizzata nel lavoro sperimentale di cui si parlerà nel capitolo 7.

Il modello matematico, quindi utilizzato, è rappresentato, insieme all'equivalente elettrico, qui sotto.

$$\begin{cases}
C \frac{\partial T}{\partial t} = U_S (T_C - T_S) + W \\
C_S \frac{\partial T}{\partial t} = U_C (T_A + a \cdot I / \alpha - T_C) + U_S (T_S - T_C) + W + W_1
\end{cases}$$
(6.30)

Tabella 6-2 Valori tipici del coefficiente di adduzione α ( ω, velocità dell'aria in m/s).

	Superficie in aria calma (interno locali)	Superficie rivolta all'esterno (vento fino a 4m/s)	Superficie rivolta all'esterno (vento oltre i 4 m/s)
Superficie orizz. (flusso ascendente)	9.28 W/m <sup>2</sup> •°C	23.40 W/m <sup>2</sup> •°C	$2.32 + 10.44 \bullet \sqrt{\omega_a}$ $W/m^2 \bullet {}^{\circ}C$
Superficie vert.	8.12 W/m $^2$ •°C		
Superficie orizz. (flusso discendente)	5.80 W/m <sup>2</sup> •°C	16.24 W/m <sup>2</sup> •°C	$1.74 + 7.83 \cdot \sqrt{\omega_a}$ $W/m^2 \cdot {^{\circ}C}$

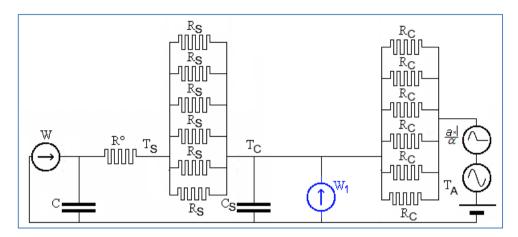


Figura 6-45 Analogia elettrica del modello termico segnale-cuffia con irraggiamento solare.

### 6.2.3.2.2 I Prova sperimentale: verifica delle ipotesi

In questa prima prova lo scopo è determinare la correttezza delle ipotesi che si sono formulate per la creazione del modello. Per eliminare le possibili variabili ambientali, che potessero inficiare la misura, le prove sperimentali sono state svolte in ambiente controllato. Le ipotesi sono:

- Assenza di moti d'aria fra le feritoie poste sullo sportello della cuffia;
- Uniformità delle temperature delle pareti interne della cuffia.

I sensori di temperatura sono stati disposti come mostra la Figura 6-46, in particolare abbiamo:

• 2 sensori sullo sportello della cuffia: valutare il gradiente di temperatura tra i due punti allo scopo di identificare eventuali flussi di aria rilevanti attraverso tali feritoie;

Soluzioni proposte 244

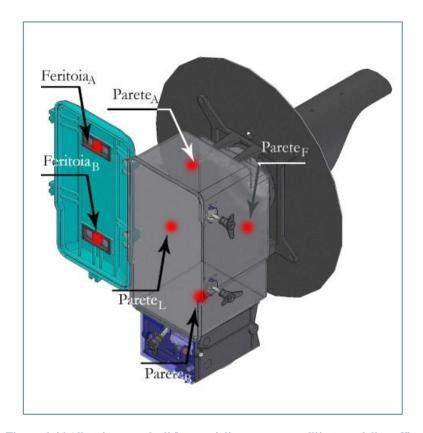


Figura 6-46 Alloggiamento degli 8 sensori di temperatura all'interno della cuffia.

- 4 sensori sulle pareti interne della cuffia: valutare l'entità dei gradienti termici per verificare la possibilità di eventuali moti d'aria nell'intercapedine fra il segnale e la cuffia.
- 1 sensore ambientale interno alla cuffia.
- 1 sensore ambientale esterno: riferimento di temperatura.

Nella figura seguente si mostrano gli andamenti delle temperature registrate nei circa 2 giorni di test effettuato, da esso si evince che:

• Le pareti laterali sono isoterme;

- Fra le due feritoie il gradiente termico è ridotto (≈3°C), tanto da non far pensare a un rilevante moto d'aria;
- Il gradiente termico fra parete superiore e parete inferiore è ridotto (≈4°C), sembra causato dalla stratificazione dell'aria.

Quindi le ipotesi fatte per la creazione del modello matematico risultano verificate e l'intero sistema può esser visto come due contenitori chiusi l'uno dentro l'altro.

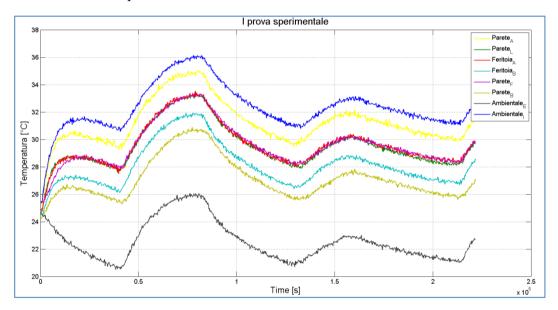


Figura 6-47 I Prova sperimentale: Verifica delle ipotesi del modello termico. Andamento delle temperature all'interno del sistema Segnale-Cuffia.

#### 6.2.3.2.3 II Prova sperimentale: Funzionamento Normale

In questa sessione di prova si vogliono valutare gli scambi termici fra i vari elementi costituenti il sistema, quand'esso funzioni nel modo normale. In particolare questo test è stato effettuato modificando la disposizione dei sensori di temperatura: si sono rimossi i sensori sulla parete laterale (Parete<sub>L</sub>) e frontale

(Parete<sub>F</sub>) della cuffia per posizionarli uno sul dissipatore del segnale e l'altro all'interno.

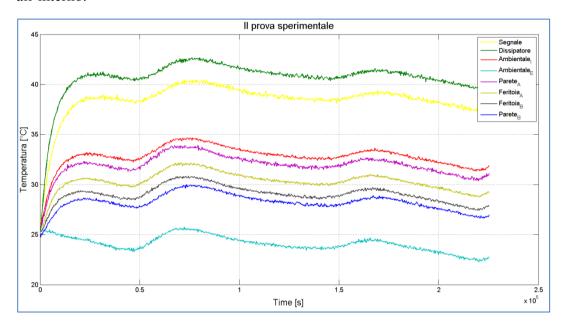


Figura 6-48 II Prova sperimantale. Raccolta dati per la caratterizzazione del modello termico.

#### 6.2.3.2.4 III Prova sperimentale: Funzionamento senza Zavorra

In questa sessione di prova si vogliono valutare gli scambi termici fra i vari elementi costituenti il sistema eliminando la potenza dissipata dalla zavorra che, come abbiamo già detto, non impedisce al segnale di funzionare in modo corretto. Tale tipo di funzionamento, oltre a essere un'ipotesi per migliorare la dissipazione termica, ci permette di avere un parametro di confronto col precedente e quindi di sviluppare il modello matematico in modo appropriato.

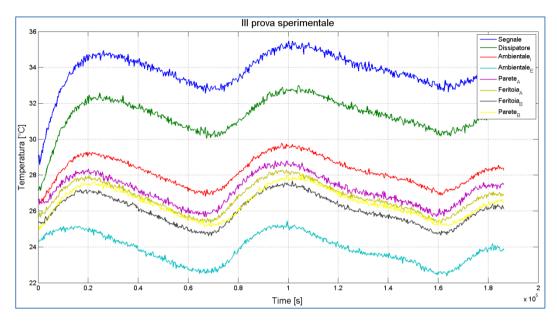


Figura 6-49 III Prova sperimentale: Raccolta dati per la caratterizzazione del modello termico. Segnale privato del carico termico derivante dalla zavorra.

#### 6.2.3.3 Modello matematico

Il modello presentato nel § 6.2.3.2 è stato implementato attraverso l'utilizzo dell'ambiente di lavoro Matlab e attraverso i dati raccolti dalla II e III prova sperimentale. In particolare si sono calcolate le capacità termiche e i coefficienti di scambio termico globale che definiscono termicamente il sistema "segnale-cuffia". Per rendere la comprensione migliore di seguito riportiamo il modello elaborato (in assenza di fattori ambientali esterni in quanto i dati a disposizione fanno riferimento a prove in ambiente controllato).

$$\begin{cases}
C \frac{\partial T}{\partial t} = U_S \left( T_C - T_S \right) + W \\
C_S \frac{\partial T}{\partial t} = U_C \left( T_A - T_C \right) + U_S \left( T_S - T_C \right) + W + W_1
\end{cases}$$
(6.31)

Tuttavia, prima di addentrarci nei calcoli veri e propri è necessario stimare le potenze W (potenza interna al segnale) e  $W_1$  (potenza in cuffia), che dipendo dal comportamento termico del dissipatore utilizzato per la zavorra.

Il dissipatore ha la funzione di pompa di calore tuttavia, non possedendo la sua caratterizzazione termica e non conoscendo la potenza che ricade sulla zavorra, il suo comportamento termico non è di facile intuizione.

Nel nostro lavoro la caratterizzazione è stata ottenuta grazie a misure elettriche di assorbimento e al confronto degli andamenti delle temperature nelle due diverse prove.

Nella II prova (funzionamento normale), precedentemente presentata, il segnale sotto test presentava un assorbimento in corrente pari a circa 148 mA da cui, considerando il valore di tensione di alimentazione pari a 150V in AC, si ottiene una potenza di circa 22 W.

Mentre nella III prova (funzionamento senza zavorra) il segnale presentava un consumo in corrente di circa 60 mA e quindi una potenza pari a circa 9 W.

La differenza tra le precedenti ci permette di quantificare la potenza dissipata dalla sola zavorra in 13 W.

La tipologia degli scambi termici in vicinanza del dissipatore sono visibili nella figura seguente.

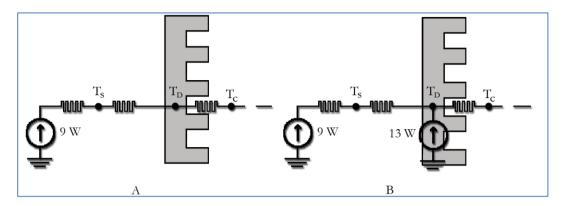


Figura 6-50 Modello Termico del dissipatore utilizzato dal segnale ferroviario sotto test.

Se si osserva la Figura 6-50, dove "A" descrive lo stato della regione prossima al dissipatore nella III prova mentre "B" nella II, possiamo scrivere le seguenti relazioni valide a regime:

A. 
$$9W \cdot R_1 = (T_S - T_D) \rightarrow R_1 = \frac{2}{9} = 0.23$$
 [°C/W]  
 $9W \cdot R_2 = (T_D - T_C) \rightarrow R_2 = \frac{3}{9} = 0.34$  [°C/W]

B. 
$$R_2(9W+P) = (T_D - T_C) \rightarrow P = 11.5 W$$

Dove *P* rappresenta la porzione di potenza dissipata dalla zavorra che viene dispersa in cuffia. Note le potenze all'interno del nostro sistema possiamo ora calcolarci sia i coefficienti di scambio termico globale sia le capacità termiche del nostro modello. Osservando i dati registrati in fase sperimentale (Figura 6-48 e Figura 6-49), si nota come loro siano caratterizzati da un transitorio iniziale e da una fase a regime, Figura 6-51.

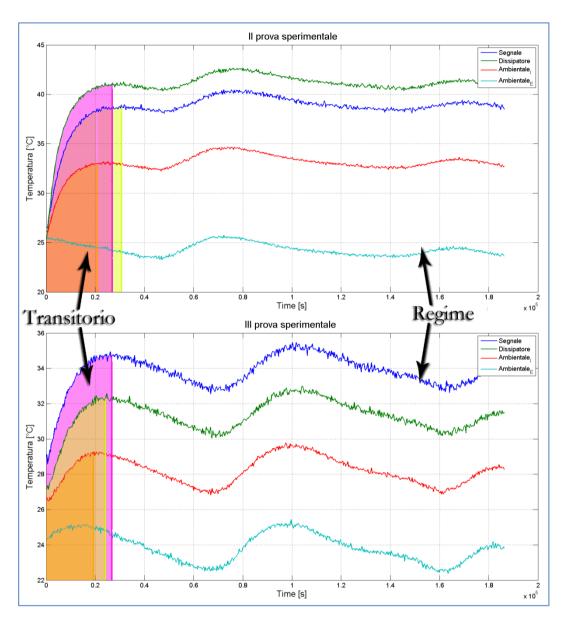


Figura 6-51 Caratterizzazione del modello termico. Nelle misure presentate nella seconda e terza prova si ricosce una fase transitoria, a cui sono legate le capacità termiche del sistema, e una fase a regime, a cui sono legate le adduttanze globali del sistema.

Per il calcolo dei coefficienti di scambio termico globale si fa riferimento alla fase a regime, utilizzando il modello semplificato:

$$\begin{cases}
U_S (T_C - T_S) + W = 0 \\
U_C (T_A - T_C) + U_S (T_S - T_C) + W + W_1 = 0
\end{cases}$$
(6.32)

Per il calcolo delle capacità termiche del sistema si è fatto riferimento al modello dinamico (6.31), e in Tabella 6-3 si possono osservare i valori ottenuti.

D	С	US	W	CS	UC	W1
Prova	(J/°C)	(W/°C)	(W)	(J/°C)	(W/°C)	(W)
II	5940	2.02	10.5	1780	2.46	11.5
III	5940	1.45	9	1780	2.07	0

Infine per provare la validità del modello realizzato si è usata la temperatura ambiente, misurata in fase di test, come stimolo del modello  $(T_A)$  e si sono calcolati gli andamenti (ottenuti come soluzione dal modello) della temperatura di cuffia (Ambientele<sub>I</sub>) e della temperatura all'interno del segnale (Segnale) e confrontati con le temperature realmente misurate, Figura 6-52 e Figura 6-53.

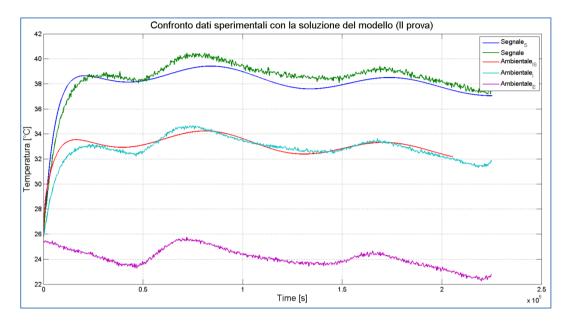


Figura 6-52 Confronto dati sperimentali-soluzioni del modello (II prova).

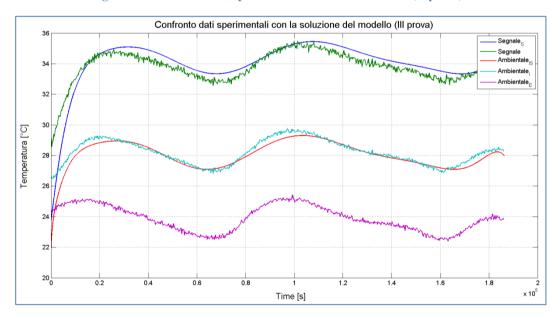


Figura 6-53 Confronto dati sperimentali-soluzioni del modello (III prova).

#### 6.2.4 Sistemi di condizionamento

Come è stato evidenziato il profilo delle temperature all'interno del segnale risulta essere influenzato dalla potenza dissipata sulla zavorra, essendo questa il carico termico maggiore. Un metodo per ridurla e/o controllarla è quello di scollegarla, inviando quindi la sola potenza necessaria; tuttavia tale metodo è in contrasto con le specifiche tecniche definite da RFI.

Il presente studio persegue la definizione di un sistema di controllo termico che determini l'abbattimento delle temperature all'interno del segnale nel rispetto delle norme e delle specifiche, e anche nel rispetto delle scelte dei costruttori dei segnali (di fatto si potrebbe spostare la zavorra in una posizione meno critica). La ricerca è stata mirata verso un sistema poco invasivo, che risultasse contenuto nel volume racchiuso fra segnale e cuffia. Le idee che sono state sviluppate sono:

- Sistema di contenimento attivo: utilizzo della potenza di zavorra come alimentazione di una celle peltier per promuovere un effetto pompa di calore.
- Sistema di contenimento passivo: aumento dell'inerzia termica del sistema "segnale-cuffia" mediante l'inserimento di masse d'acqua e/o inserendo materiali PCM (Phase Change Material).

Di seguito descriveremo in breve il funzionamento e l'utilizzo di tali materiali, presentando infine i risultati ottenuti attraverso prove sperimentali.

#### 6.2.4.1 Cella peltier

La cella Peltier è un dispositivo termoelettrico costituito da molte giunzioni a effetto Peltier in serie, il suo nome deriva da Jean Charles Athanase Peltier scopritore dell'effetto stesso. Tale dispositivo è fondamentalmente una pompa di calore a stato solido (Figura 6-54): una delle due superfici assorbe il calore mentre l'altra lo emette. La direzione in cui il calore viene trasferito dipende dal verso della corrente continua applicata ai capi della cella stessa.

La sua struttura è definita dalla serie di due materiali semiconduttori drogati di tipo N e di tipo P, collegati tra loro da una lamella di rame. Se si applica al tipo N una tensione positiva e al tipo P una tensione negativa, la lamella superiore si raffredda mentre quella inferiore si riscalda. Invertendo la tensione lo spostamento di energia termica viene invertito.

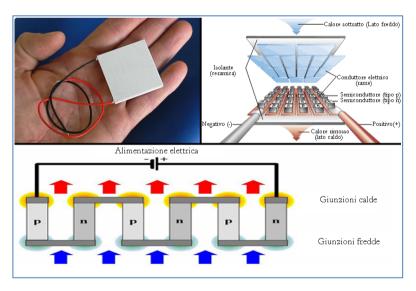


Figura 6-54 Cella Peltier. In alto a sinistra come si presenta ai nostri occhi, in alto a destra si mostra il suo funzionamento ed in basso la sua schematizazione elettrica.

La cella peltier utilizzata in questo lavoro è la Melcor PT2-12-30 alimentata con una potenza di circa 13 W (potenza della zavorra) con una tensione imposta di 8 V.

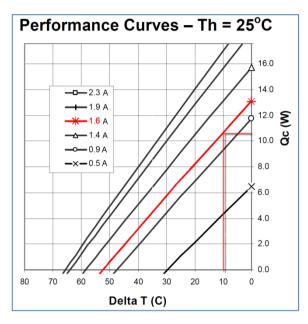


Figura 6-55 Caratteristiche prestazionali della cella scelta. In rosso il punto di lavoro scelto per il sistema da noi ipotizzato.

Dallo studio delle sue caratteristiche tecniche, con la configurazione scelta (Figura 6-55), dalla piastra fredda vengono sottratti circa 11 W, in quanto si registrano circa 10°C di differenza tra la sua piastra fredda e calda.

Tale cella è stata, quindi, posta sulla struttura in alluminio del dissipatore come mostra la figura sottostante.

Come detto precedentemente, il suo utilizzo è dovuto allo scopo di spostare il carico termico dall'interno del segnale alla regione tra cuffia e segnale stesso con

l'intenzione di ridurre la temperatura interna. Nel nostro modello matematico infatti abbiamo ridotto la potenza interna proprio degli 11 W imposti dalla cella.



Figura 6-56 Montaggio della cella peltier sul dissipatore del segnale ferroviario.

#### 6.2.4.1.1 IV Prova sperimentale: Funzionamento con Peltier

In questa sessione di prova si vogliono valutare gli scambi termici fra i vari elementi costituenti il sistema utilizzando la potenza dissipata dalla zavorra per alimentare la cella peltier.

Confrontando le misure registrate col funzionamento normale si nota come l'uso della peltier non consente, in modo apprezzabile, di migliorare la situazione termica all'interno del segnale (la temperatura interna è diminuita di soli 4°C). Questo è dovuto in particolare all'impossibilità da parte della peltier di dissipare

in un ambiente chiuso l'intero flusso di calore estratto dal segnale. Per cui l'efficienza della cella diminuisce e la reale potenza estratta risulta essere solo quantificabile in 9 W.

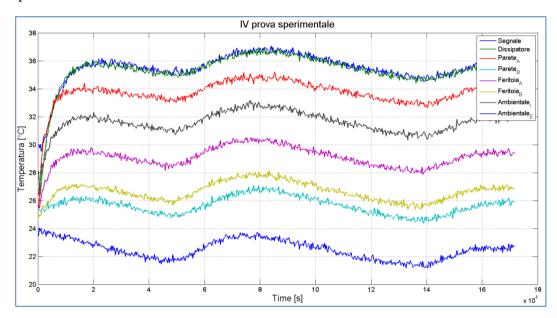


Figura 6-57 IV prova sperimentale: Cella peltier. Andamento delle temperature del sistema Segnale-Cuffia.

Utilizzando ora il modello da noi creato, si sono calcolate le caratteristiche termiche del sistema, visibili nella tabella seguente.

Tabella 6-4 Caratterizzazione termica del sistema Segnale-Cuffia nel caso di utilizzo della potenza della zavorra per alimentare una cella peltier, allo scopo di diminuire la temperatura sentita all'interno del segnale.

Prova	C (J/°C)	$U_S$ (W/°C)	W (W)	$C_S$ (J/°C)	$U_C$ (W/°C)	$W_I$ (W)
IV	5940	1	3	1780	2.1	19

Dalla tabella 6-4 si nota come l'inserimento della cella peltier abbia modificato solamente i coefficienti globali di adduzione e non le capacità.

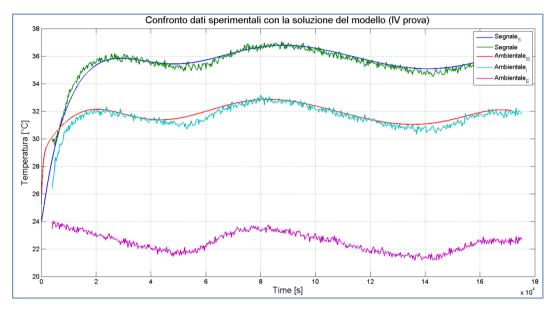


Figura 6-58 Confronto dati sperimentali-soluzioni del modello (IV prova).

#### 6.2.4.2 Inerzia termica

L'inerzia termica di una struttura consiste nella sua capacità di opporsi al passaggio del flusso di calore assorbendone una quota senza rilasciarlo in maniera immediata, contribuendo al contenimento delle oscillazioni della temperatura. Tale caratteristica è definita dall'effetto combinato dell'accumulo termico (capacità termica) e dalla resistenza termica della struttura. Quest'ultime due, come abbiamo già definito, dipendono dalla massa della struttura ( $C = Mc_p$ ) e dalla conduttività del materiale che la costituisce.

La soluzione tecnica migliore da adottare è quindi scegliere un sistema dotato contemporaneamente di sufficiente massa e bassa conduttività senza prediligere

soltanto una di queste caratteristiche. In particolare all'aumentare della capacità cresce la quantità di energia immagazzinata e al diminuire della conduttività decresce anche la velocità con cui il calore viene ceduto.

Considerando l'andamento giornaliero delle temperature, si ottiene un'onda termica sinusoidale che oscilla tra valori minimi e massimi. Un'inerzia termica elevata permette lo smorzamento dell'onda (quindi una riduzione dei picchi massimi) e uno sfasamento tra le temperature esterne e interne a una struttura (definito come il tempo che intercorre tra l'impatto dell'onda termica sulla superficie esterna e il suo manifestarsi sulla faccia interna).

Nel nostro caso non avendo la possibilità di scegliere i materiali del sistema "cuffia-segnale", si è optato per l'aumento dell'inerzia termica accrescendo la massa presente in cuffia, inserendo dell'acqua negli spazi liberi. Con questa operazione si è praticamente aumentata la sola capacità del segnale (C<sub>S</sub> nel modello).

L'obiettivo, che si è raggiunto, è un aumento del tempo di reazione a una sollecitazione di temperatura esterna e quindi la possibilità di avere all'interno del segnale una temperatura di picco inferiore. Nella figura seguente si nota come anche a regime per le precedenti prove la capacità termica del segnale determini uno sfasamento di circa 1 ora tra gli andamenti delle temperature.

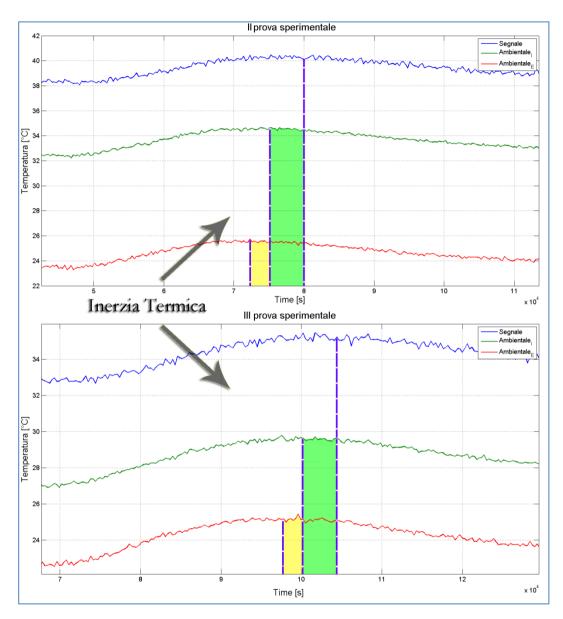


Figura 6-59 Sfasamento tra la temperatura ambientale esterna e la temperatura registrata all'interno della cuffia (giallo) e all'interno del segnale (verde).

#### 6.2.4.2.1 PCM – Phase Change Material

La trattazione precedente mostra la possibilità di avere una temperatura interna funzione esclusiva della potenza dissipata e del valor medio della temperatura esterna. Difatti se la capacità termica fosse infinita la temperatura interna non sarebbe in alcun modo influenzata dalle oscillazioni della temperatura esterna. A livello tecnico questo obiettivo non è perseguibile in quanto richiede la realizzazione di una struttura a massa infinita.

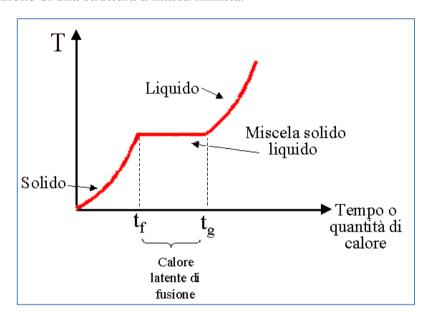


Figura 6-60 Andamento delle temperature al passaggio di stato solido-liquindo.

Tuttavia si può agire sul sistema cambiando la fisica degli scambi di calore sfruttando, ad esempio, i cambiamenti di stato solido-liquido di natura isoterma. Infatti, come è noto, in un cambiamento di stato il calore assorbito, dal materiale in esame, viene utilizzato per rompere i legami di aggregazione delle molecole

non determinando dunque aumento della temperatura. Nel cambiamento di stato si ha quindi un comportamento assimilabile a una capacità infinita.

I materiali PCM sfruttano proprio questa caratteristica, cioè sono materiali in grado di accumulare o rilasciare una grande quantità di calore a temperatura costante e "programmabile" sfruttando proprio la natura isoterma del cambiamento di fase.

# 6.2.4.2.2 V Prova sperimentale: Funzionamento con aumento inerzia termica In questa sessione di prova si vogliono valutare gli scambi termici fra i vari elementi costituenti il sistema dopo l'aumento della sua massa attraverso l'inserimento di una massa d'acqua (2.5 kg).

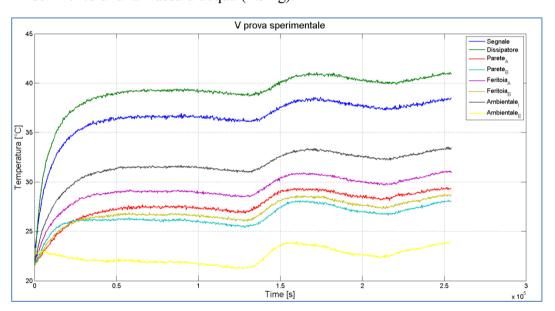


Figura 6-61 V prova sperimentale: Aumento dell'inerzia termica con acqua. Andamento delle temperature nel sistema Segnale-Cuffia.

Utilizzando ora il modello da noi creato, si sono calcolate le caratteristiche termiche del sistema, visibili nella tabella seguente.

Tabella 6-5 Caratterizzazione termica del sistema Segnale-Cuffia nel caso di aumento della massa del sistema Segnale-Cuffia.

Prova	C (J/°C)	$U_S$ (W/°C)	W (W)	$C_S$ (J/°C)	$U_C$ (W/°C)	W <sub>1</sub> (W)
V	10834	2.05	10.5	7398	2.39	11.5

Dalla Tabella 6-5 si nota come l'inserimento di una massa d'acqua abbia modificato solamente le capacità termiche. In particolare l'acqua aggiunta determina un aumento della capacità termica di  $10465~\rm J/^{\circ}C$  ( $C_{\rm H_2O}=c_{\rm p}\cdot M=4186\cdot 2.5~\rm J/^{\circ}C$ ).

Per come si è creato il modello, la massa aggiuntiva determina in parte il cambiamento della capacità interna al segnale, in parte il cambiamento della capacità del segnale stesso (di fatto si è posta massa fra la cuffia e il segnale, e per come si registra in fase sperimentale la temperatura Ambientale, la massa viene in parte considerata all'interno del segnale e in parte al di fuori).

Infine se si confrontano i dati sperimentali precedenti con quelli di quest'ultima si può facilmente osservare come si è passati da un tempo di sfasamento di una sola ora a uno di circa 2.5 ore (lo smorzamento risulta tuttavia di piccola entità, circa 0.8°C).

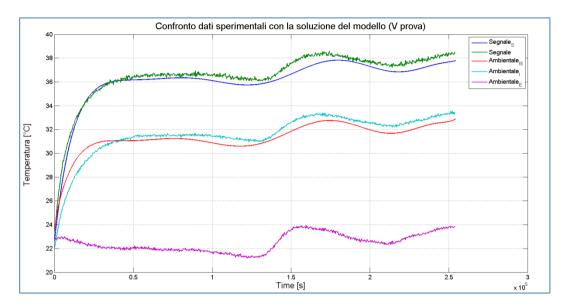


Figura 6-62 Confronto dati sperimentali-soluzioni del modello (V prova).

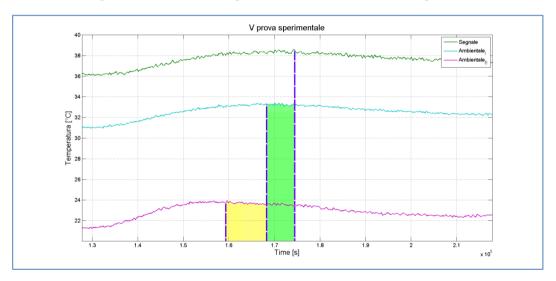


Figura 6-63 V prova: Sfasamento tra la temperatura ambientale esterna e la temperatura registrata all'interno della cuffia (giallo) e all'interno del segnale (verde).

#### 6.2.4.2.3 VI Prova sperimentale: Funzionamento con PCM

In questa sessione di prova si vogliono valutare gli scambi termici fra i vari elementi costituenti il sistema dopo l'inserimento di circa 3kg di materiale PCM (come nel caso precedente, inserito tra cuffia e segnale).

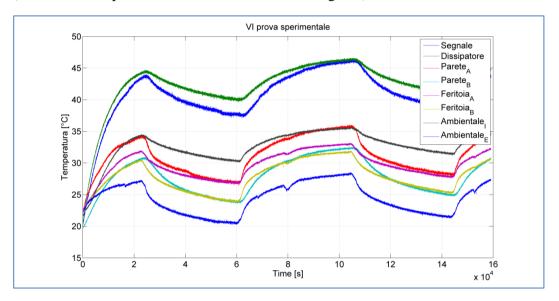


Figura 6-64 VI prova sperimentale: Utilizzo di materiali PCM. Andamento delle temperature nel sistema Segnale-Cuffia.

In particolare, poiché le prove sperimentali si sono svolte in laboratorio (luogo chiuso e a temperatura controllata) si è scelto come materiale PCM il solfato di sodio decaidrato che ha come punto di fusione all'incirca i 32 °C. La massa utilizzata permette di assorbire una quantità di calore latente paria a:

$$Q = \lambda M = 251 \cdot 3 = 753$$
 [J] (6.33)

Utilizzando ora il modello da noi creato, si sono calcolate le caratteristiche termiche del sistema, visibili nella tabella seguente.

Prova	<i>C</i> (J/°C)	$U_S$ (W/°C)	W (W)	$C_S$ (J/°C)	$U_C$ (W/°C)	W <sub>1</sub> (W)
IV	4304	6.21	10.5	5978	3.68	11.5

Tabella 6-6 Caratterizzazione termica del sistema Segnale-Cuffia nel caso di utilizzo di materiali PCM.

Anche in questo caso, il materiale aggiuntivo determina in parte il cambiamento della capacità interna al segnale, in parte il cambiamento della capacità del segnale stesso. Tuttavia a differenza del caso precedente il materiale PCM determina un aumento dei coefficienti di adduzione, l'inserimento di questo tipo di materiale permette il miglioramento dell'isolamento termico.

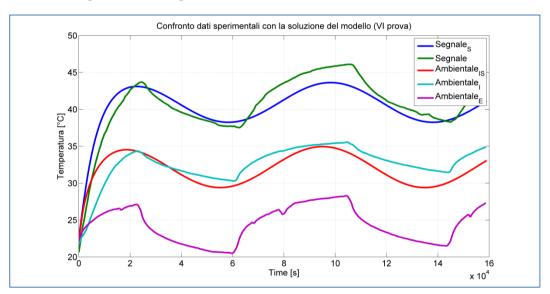


Figura 6-65 Confronto dati sperimentali-soluzioni del modello (VI prova).

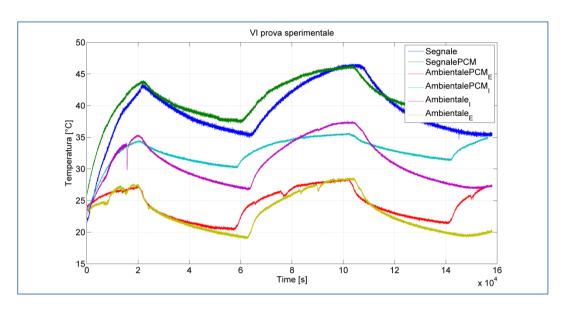


Figura 6-66 Confronto tra funzionamento senza PCM e con PCM.

Dalla Figura 6-66 è possibile notare come questa tecnica permette uno smorzamento delle temperature all'interno del sistema "cuffia-segnale", che è l'effetto da noi perseguito.

#### 6.2.4.2.4 Previsione di funzionamento in campo aperto con PCM

Il modello matematico creato può essere utilizzato anche per prevedere il funzionamento del sistema "cuffia-segnale" in campo, all'aperto. In particolare qui ipotizziamo di inserire una massa di 6 kg di materiale PCM e di essere nelle condizioni più estreme. In particolare faremo riferimento al modello (6.30), qui riproposto:

$$\begin{cases}
C \frac{\partial T}{\partial t} = U_S (T_C - T_S) + W \\
C_S \frac{\partial T}{\partial t} = U_C (T_A + a \cdot I / \alpha - T_C) + U_S (T_S - T_C) + W + W_1
\end{cases}$$
(6.34)

valido per temperature inferiori alla temperatura di fusione del PCM. E al modello seguente:

$$\begin{cases}
0 = U_S \left( T_{fus-PCM} - T_S \right) + W \\
T_C = T_{fus-PCM}
\end{cases}$$
(6.35)

dove si ipotizza il passaggio di stato del PCM. Il passaggio di stato, come abbiamo visto, implica una temperatura di cuffia costante, da cui deriva nel modello la perdita della dipendenza dal tempo.

Il tipo di PCM ipotizzato è l'RT-50 della Rubitherm, la cui scelta è dovuta all'ipotesi di funzionamento continuativo e al vincolo energetico. Per funzionamento continuativo si intende l'ipotesi che ogni giorno nelle ore notturne il PCM ritorni solido, ciò significa avere un vincolo sull'energia giornaliera scambiata in fase di transizione da solido a liquido e da liquido a solido:

$$\int_{0}^{24h} \left[ U_{C} \left( T_{A} + a \cdot I / \alpha - T_{fus-PCM} \right) + U_{S} \left( T_{S} - T_{fus-PCM} \right) + W + W_{1} \right] dt = 0$$
 (6.36)

Da cui risolvendo, per condizioni ambientali estreme,  $T_{\it fus-PCM}$  risulta uguale a  $48^{\circ}{\rm C}.$ 

Per vincolo energetico si intende l'ipotesi che il PCM non raggiunga mai la completa liquefazione (vincolo che si potrebbe eliminare):

$$\int_{t_{i}}^{t_{f}} \left[ U_{C} \left( T_{A} + a \cdot I / \alpha - T_{fus-PCM} \right) + U_{S} \left( T_{S} - T_{fus-PCM} \right) + W + W_{1} \right] dt \le \lambda_{PCM} M_{PCM}$$
 (6.37)

Dove  $\lambda_{PCM}$ =168 kJ/kg ed è il calore latente assorbito per unità di massa e  $M_{PCM}$  è la massa. Mentre  $t_i$  e  $t_f$  sono rispettivamente il tempo di inizio e fine acquisizione del calore da parte del PCM stesso. Dalla soluzione di questo integrale si è individuata la necessita di utilizzare una massa di 6 kg (all'incirca 8 dm<sup>3</sup>).

Utilizzando il nostro modello con i parametri visibili in Tabella 6-3 (II prova = Funzionamento normale) si è ottenuta la previsione di funzionamento visibile in Figura 6-67.

Mentre utilizzando il nostro modello con i parametri visibili in Tabella 6-5 (IV prova = Funzionamento con Peltier) si è ottenuta la previsione di funzionamento visibile in Figura 6-68.

In particolare si è ricreata numericamente la temperatura ambiente utilizzando il modello di Carrier presentato nel § 6.2.3.2.1.1, quindi tenendo in conto anche dell'influenza dell'irraggiamento solare.

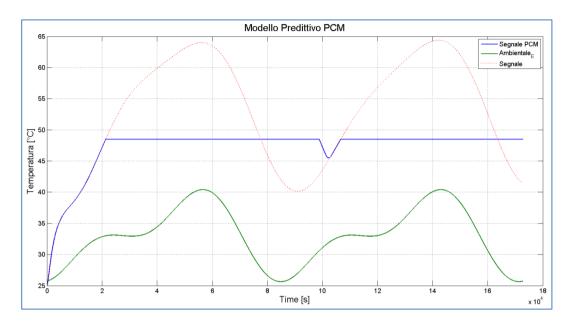


Figura 6-67 Confronto tra previsione di funzionamento senza PCM e con PCM.

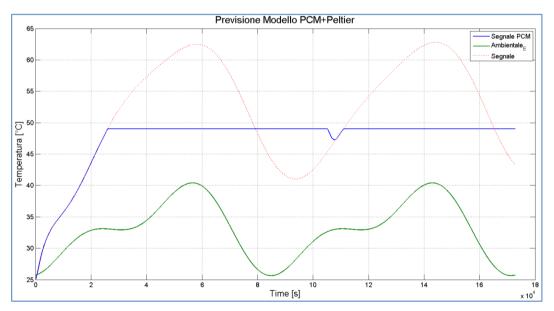


Figura 6-68 Confronto tra previsione di funzionamento senza PCM e con PCM più l'utilizzo della peltier.

Life time 271

## Capitolo 7 Life time

7.1 APPARATO SPERIMENTALE	273
7.1.1 STRUMENTAZIONE DEI SEGNALI	276
7.1.2 SISTEMA DI CONTROLLO	277
7.1.2.1 Elettronica di interfaccia	<i>278</i>
7.1.2.1.1 Elettronica di alimentazione	279
7.1.2.1.2 Elettronica di condizionamento	280
7.1.2.1.3 Schede di acquisizione	285
7.1.2.2 Software di controllo	285
7.1.3 MISURE DI INTENSITÀ	289
7.2 PROVA SPERIMENTALE	291
7.2.1 METODO DI PREVISIONE	298
7.2.1.1 Tempo di vita nella segnaletica	<i>300</i>
7.2.2 MISURE DI INTENSITÀ IN FUNZIONE DEL TEMPO	302
7.2.2.1 Segnali Costruttore 1	303
7.2.2.2 Segnali Costruttore 2	314
7.2.2.3 Segnali Costruttore 3	327
7.3 Considerazioni	340

Nello studio che andiamo a presentare si cerca di dare una risposta alla criticità osservata nel § 4.3. Il lavoro è specifico per i segnali a nostra disposizione e quindi faremo riferimento ai nuovi segnali alti a tecnologia LED di RFI. Tuttavia

Life time 272

il metodo sviluppato di analisi/test e le conclusioni possono essere applicate all'interno mercato degli apparati di segnalamento.

Come abbiamo visto, per la definizione del tempo di vita (MTTF) di sistemi complessi si ricorre a un'analisi delle logiche di guasto che possono subire le singole parti che realizzano un apparato. La base di partenza di questa analisi è la conoscenza del tempo di vita dei singoli componenti. L'MTTF è di fondamentale importanza per definire i metodi di intervento e manutenzione per prevenire situazioni di pericolo che possano verificarsi in caso di guasto di un sistema.

Negli apparati semaforici a LED il tempo di vita delle sorgenti luminose utilizzate non è noto a priori. Come abbiamo visto, solo negli ultimi anni e con le nuove applicazioni l'interesse verso questo parametro ha determinato studi e norme che permettono di definire la vita utile delle sorgenti a LED. Si fa riferimento alla definizione L70: la vita utile di una sorgente luminosa a LED è il tempo necessario affinché l'emissione luminosa diminuisca al 70% del valore iniziale. La riduzione del 30% del flusso luminoso iniziale infatti è "poco" avvertito in tutte le applicazioni dove la luce deve essere percepita/interpretata dagli occhi umani. Pertanto una diminuzione al 70% della luminosità iniziale può essere considerata una soglia appropriata per definire la vita media di una sorgente luminosa.

Come è descritto nel § 2.8, le norme IES LM-80-08 e TM-21-11 forniscono un'ottima procedura per la stima sperimentale della vita del LED come componente. Purtroppo tali normative sono di difficile applicazione per gli apparati che utilizzano i LED come sorgente di luce. In particolare queste normative non sono applicabili, in toto, ai segnali ferroviari che abbiamo studiato.

Inoltre le normative prevedono la stima a specifiche temperature d'esercizio, che non permettono una semplice corrispondenza dei dati così ottenuti al tempo di vita dei segnali durante la loro operatività in campo (la dinamica della temperatura cui sono sottoposti i sistemi studiati è molto ampia).

Anche se non completamente applicabili queste normative sono risultate molto utili per scegliere gli intervalli di tempo necessari per le prove (maggiori di 6000 ore), le procedure di misura e le tecniche di interpolazione/estrapolazione dei dati.

In questo capitolo dunque descriveremo l'apparato sperimentale realizzato e la stima che siamo riusciti a ottenere nella campagna di misure che è durata oltre un anno.

### 7.1 Apparato sperimentale

Gli studi presentati nei capitoli precedenti legano il tempo di vita di un LED alla temperatura di giunzione e alla densità di corrente che scorre nella giunzione. La temperatura di giunzione è influenzata dalla stessa densità di corrente che scorre nel LED, dai sistemi di dissipazione termica e dalla temperatura ambiente. In un apparato che utilizza sorgenti luminose a LED, il tempo di vita dei LED può essere influenzato, in modo più che rilevante, dalla progettazione/realizzazione del sistema di dissipazione termica.

Poiché lo scopo del nostro studio è la valutazione del tempo di vita delle sorgenti luminose dei segnali sotto test (correnti e resistenze termiche sono imposte dalle scelte dei costruttori) il setup sperimentale realizzato ha l'unico scopo di legare il Life time 274

decadimento del flusso luminoso emesso, agli stress di temperatura ambientali che i segnali subiscono durante la propria operatività in campo.

Una corretta valutazione imporrebbe lo studio su un numero di sistemi statisticamente significativo. Tuttavia prove su un gran numero di sistemi risultano poco praticabili e nel caso di nostro interesse, comunque, ogni sistema risulta costituito da molti LED che possono rappresentare un insieme statisticamente significativo. Per tale motivo, le prove sono state eseguite su un numero ristretto di segnali.

Gli apparati semaforici a nostra disposizione (6: 2 per ogni costruttore) sono stati posti in cuffia e istallati sul tetto dell'edificio del Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università degli Studi "Roma Tre" (Roma, via della Vasca Navale n. 84), sottoponendoli agli stress termici che derivano dalla variabilità del clima. Prima di essere collocati in esercizio, i segnali sono stati strumentati così da poter monitorare le temperature d'esercizio. In particolare, all'interno dei segnali sono stati inseriti dei sensori di temperatura così da controllare la temperatura dei LED (o della piastra di alloggiamento dei LED).

Per il pilotaggio dei segnali è stato realizzato un sistema di controllo che provvede alle corrette alimentazioni, alla gestione delle sequenze degli aspetti, al monitoraggio delle temperature di esercizio, al monitoraggio della corretta accensione dei segnali e al monitoraggio della tensione di alimentazione.

La misura del decadimento quindi è stata realizzata attraverso misurazioni dell'intensità luminosa emessa da ciascun aspetto per ogni segnale, effettuate a intervalli irregolari per tutta la durata del test.

Nei paragrafi successivi mostreremo nel dettaglio come il nostro setup di misura è composto.



Figura 7-1 Segnali oggetto del nostro studio; i segnali si trovano montati sul tetto dell'edificio del Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università degli Studi "Roma Tre".



Figura 7-2 Posizionamento geografico dei segnali sul tetto dell'edificio.

Life time 276

#### 7.1.1 Strumentazione dei segnali

Ogni sistema "cuffia-segnale" a nostra disposizione è stato strumentato con sensori di temperatura e fototransistor allo scopo di fornire indicazioni sul suo stato.

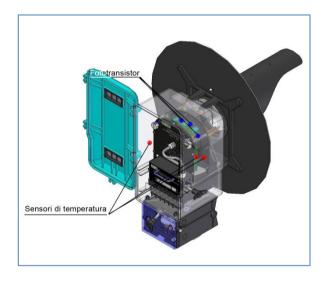


Figura 7-3 Alloggiamento dei sensori di temperatura e dei fototransistor nei segnali studiati.

#### Abbiamo:

- 1 sensore di temperatura posto nel punto di saldatura o sulla piastra di alloggiamento dei LED;
- 1 sensore di temperatura interno al segnale;
- 1 sensore di temperatura posto tra cuffia e segnale stesso.
- 3 fototransistor, utili a verificare l'accensione dei vari aspetti.

I sensori di temperatura utilizzati sono gli AD590KH (vedi § 6.2.2.1), mentre i fototransistor sono del tipo SDP8406.

#### 7.1.2 Sistema di controllo

Il sistema di controllo si compone di un elettronica di interfaccia, utile a fornire l'alimentazione ai segnali e ad acquisire i segnali elettrici dei sensori con i quali sono strumentati gli apparati, e di un software di controllo scritto in LabView®. Il compito principale è di gestire le sequenze degli aspetti e di acquisire le varie temperature di esercizio.

In particolare, perseguendo lo scopo di stressare i segnali nel modo più simile a quello che avviene nella realtà, si sono definite due differenti sequenze di accensione degli aspetti:

- sequenza di linea (rosso 2 minuti, giallo 2 minuti, verde 10 minuti);
- sequenza di stazione (rosso 20 minuti, giallo 2 minuti, verde 2 minuti).

La sequenza di linea è programmata in modo che l'aspetto Rosso rimanga attivato per due minuti, aspetto Giallo per due minuti e l'aspetto Verde per dieci minuti. La sequenza di stazione è programmata in modo che l'aspetto Rosso rimanga attivato per venti minuti, aspetto Giallo per due minuti e l'aspetto Verde per due minuti. Tali sequenze sono state scelte in base ai dati forniti da RFI sulla frequenza di accensione/spegnimento dei segnali alti lungo la propria rete. Tre segnali, uno per ogni costruttore, sono pilotati con la sequenza di linea e tre segnali (sempre uno per ogni costruttore) sono pilotati con la sequenza di stazione. Il software LabView® realizzato, attraverso gli opportuni sensori di temperatura e circuiti di condizionamento, provvede ad acquisire la temperatura ambiente, la temperatura cui operano i LED e la temperatura all'interno delle cuffie. Tutte le misurazioni delle temperature sono effettuate con una precisione di ±1°C.

Life time 278

#### 7.1.2.1 Elettronica di interfaccia

La Figura 7-4 mostra dove è allocata l'elettronica di interfaccia del nostro setup di misura.

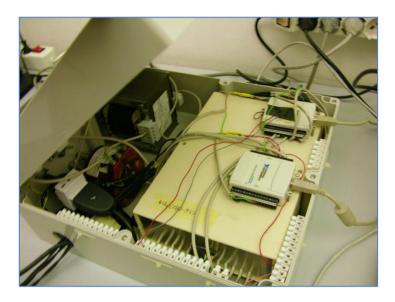


Figura 7-4 Sistema di controllo per la gestione dei segnali.

In essa possiamo distinguere:

- elettronica di alimentazione;
- elettronica di condizionamento;
- schede di acquisizione.

L'elettronica di alimentazione permette di realizzare in perfetta sicurezza l'alimentazione necessaria per l'accensione di ogni aspetto dei segnali. Mentre l'elettronica di condizionamento al compito di gestire il cambiamento degli aspetti di ogni segnale e di rendere usufruibile alle schede di acquisizione i segnali elettrici derivanti dai sensori di temperatura e dai fototransistor. Le schede di

acquisizione invece permettono l'interfacciamento del software di controllo con il setup realizzato.

#### 7.1.2.1.1 Elettronica di alimentazione

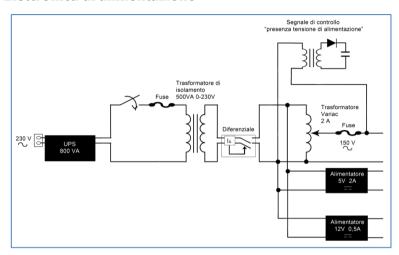


Figura 7-5 Schema logico della elettronica adibita alla realizzazione delle alimentazioni utili al nostro setup sperimentale.

La Figura 7-5 mostra l'elettronica realizzata per fornire le corrette alimentazioni al setup di misura realizzato. L'utilizzo di un gruppo di continuità (UPS in figura) consente di realizzare un sistema immune agli sbalzi di tensione provenienti dalla rete elettrica e inoltre permette il corretto funzionamento del sistema anche nel caso di interruzione della stessa (è in grado di assorbire interruzioni di circa 30 minuti).

Il trasformatore d'isolamento è utilizzato al fine di isolare elettricamente il setup di misura. Mentre l'utilizzo di fusibili (sia sulla linea a 230 V che sulla 150 V) e del differenziale permette di interrompere l'alimentazione nel caso di assorbimenti indebiti del setup realizzato.

Life time 280

In particolare la linea di alimentazione 150 V 50 Hz, utilizzata per fornire la corretta alimentazione ai segnali, è realizzata attraverso un autotrasformatore, mentre gli alimentatori a 12 V e a 5 V sono dei classici alimentatori switching commerciali.

Infine nella figura è possibile notare la presenza di un ulteriore trasformatore che permette di realizzare un segnale di controllo "presenza tensione di alimentazione" che rende disponibile alle schede di acquisizione un segnale in tensione (0-9 V) rappresentante la rete di alimentazione dei segnali.

#### 7.1.2.1.2 Elettronica di condizionamento

Il cambiamento degli aspetti di ogni segnale e l'acquisizione dei segnali elettrici derivanti dai sensori di temperatura e dai fototransistor ha reso necessario la realizzazione di un'elettronica d'interfaccia tra il setup di misura e le schede di acquisizione.

La Figura 7-6 mostra l'elettronica dedicata alla realizzazione delle sequenze di linea e stazione definite precedentemente. Attraverso l'uso di relè (RX424012C) è possibile alimentare l'aspetto selezionato. Nello specifico, in figura sono visibili le "Uscite X" che rappresentano le uscite digitali delle schede di acquisizione, le quali assumendo valor logico alto (5V) consentono la commutazione del relè interessato. A ogni aspetto corrisponde un relè dedicato che lo alimenta in base al controllo proveniente dalle schede di acquisizione. In particolare su ogni relè è connesso lo stesso aspetto di 3 diversi segnali accumunati dalla sequenza scelta.

La Figura 7-7 mostra invece l'impedenza di lettura per tutti i sensori di temperatura presenti nel setup di misura. In particolare oltre a quelli definiti per

ogni segnale sotto test si è utilizzato un ulteriore sensore per avere un riferimento della temperatura ambiente esterna. Le resistenze hanno valore pari a 7.4 k $\Omega$  mentre le capacità di 10 nF.

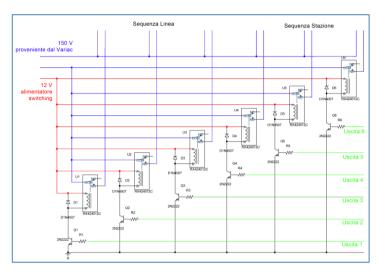


Figura 7-6 Elettronica di interfaccia per la realizzazione delle sequenze di linea e stazione.

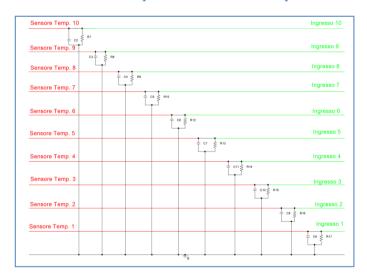


Figura 7-7 Impedenza di misura per i sensori di temperatura utilizzati nel setup sperimentale.

In più, poiché un apparato semaforico di un costruttore rende già disponibile dei sensori interni di temperatura (LM61BIM3), si è realizzata una classica circuiteria di conversione tensione/corrente per trasdurre l'uscita in tensione del sensore in corrente, Figura 7-8 (la scelta di avere segnali in corrente è dovuta alle possibili interferenze esterne sui cavi; la distanza tra i sensori e le schede di acquisizione è di circa 15 m).

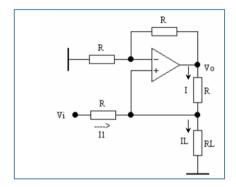


Figura 7-8 Classica configurazione di convertitore tensione/corrente.

La Figura 7-9 invece mostra come i fototransistor, con i quali si sono strumentati i segnali sotto test, sono stati interfacciati con le schede di acquisizione. In particolare si è fatto uso degli ingressi digitali delle schede. Quando l'aspetto del segnale considerato è acceso il segnale "Ingresso dig. X" assume valor logico basso (0V), mentre quando l'aspetto del segnale è spento valor logico alto (5V) (per come abbiamo realizzato il setup di misura ogni segnale potrà accendere un unico e solo aspetto alla volta, per cui è possibile utilizzare i fototransistor, specifici per segnale, in parallelo).

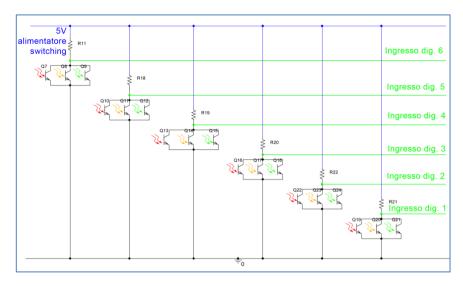


Figura 7-9 Elettronica di interfaccia digitale per i fototransistor di sensing utilizzati all'inteno dei segnali.

Infine si è resa necessaria la realizzazione di una circuiteria d'interfaccia per pilotare correttamente una tipologia di segnali a nostra disposizione. A differenza dei segnali alti di RFI di tipo SDO che utilizzano per ogni aspetto un'alimentazione separata, i segnali di tipo Relè Schermo utilizzano un'unica alimentazione e il cambiamento dell'aspetto è ottenuto tramite un segnale elettrico: -48V aspetto verde; +48V aspetto giallo.

La Figura 7-10 mostra la circuiteria realizzata, in particolare ponendo all'ingresso del trasformatore *TX5* l'alimentazione 150V 50Hz per l'aspetto giallo avremo in uscita una tensione pari a 48V. Mentre ponendo all'ingresso del trasformatore *TX6* l'alimentazione per l'aspetto verde avremo in uscita una tensione pari a -48V. Attraverso la circuiteria realizzata è stato dunque possibile pilotare i segnali di tipo Relè Schermo con gli stessi cavi di alimentazione dei segnali di tipo SDO.

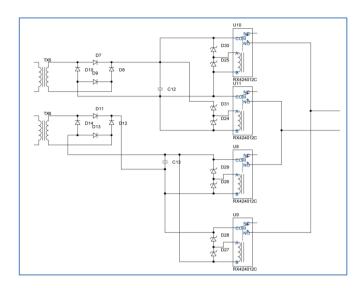


Figura 7-10 Elettronica di interfaccia per fornire i corretti segnali di cambio aspetto ai segnali di tipologia Relè Schermo.

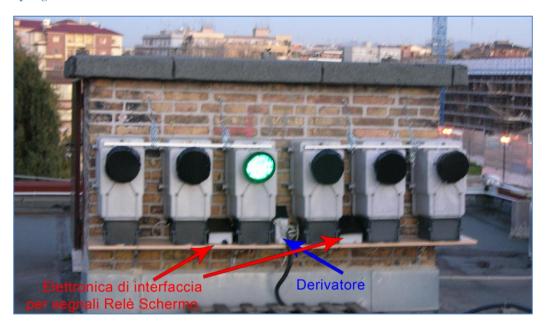


Figura 7-11 Segnali montati sul tetto dell'edificio del Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università degli Studi "Roma Tre". Si mostra l'alloggiamento dell'elettronica d'interfaccia per i segnali a Relè Schermo e una cassetta di derivazione per le connessioni elettriche necessarie ai segnali.

#### 7.1.2.1.3 Schede di acquisizione

Le schede di acquisizione utilizzate sono del tipo NI USB-6009, la connessione via USB consente un loro facile utilizzo. Il NI USB-6009 è un dispositivo di acquisizione dati dotato di 8 canali analogici d'ingresso (48kS/s, 14 bit, +/-10V) e 2 d'uscita (150S/s, 12 bit, 0-5V) e 12 linee digitali d'ingresso e uscita (compatibili TTL a 3,3V o 5V).



Figura 7-12 Scheda di acquisiozione della National Instruments: NI USB-6009.

Le due schede hanno consentito sia di acquisire 11 canali analogici (10 temperature, 1 segnale di controllo "presenza tensione di alimentazione") e 6 canali digitali (fototransistor per ogni segnale sotto test) sia di pilotare, attraverso le 6 linee digitali di uscita, i 6 relè di alimentazione aspetto.

### 7.1.2.2 Software di controllo

Il software di controllo è stato realizzato in linguaggio di programmazione LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench). Il software ha un triplice compito:

- controllo;
- acquisizione-elaborazione;
- memorizzazione.

La fase di controllo si occupa di pilotare i relè di alimentazione degli aspetti dei segnali, in base alle due sequenze stazione o linea rispettivamente.

In fase di acquisizione-elaborazione il software campiona i sensori di temperatura e i fototransistor.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1	3.4539	26.9182	22,6675	11.4621	17.6056	12,0200	19.7045	25.0193	19.3817	22.7063	
3 4	2	3.1870	26.0935	22.2473	10.9459	17.0122	11.2673	19,0333	24.3388	18.7429	22.1181	
3	3	2.9363	25.2606	21.5201	10.4619	16.0765	10.3204	18.5239	23.9419	18.4919	21.4735	
	4	2.2408	24.6461	20.9626	9.9538	15.2320	9.7620	17.8770	23.3181	17.5564	20.9900	Stato Semafori:
5	5	1.8606	24.2580	20.6879	9.4860	15.0723	9.7377	17.4969	22.7186	17.3739	17.3739 20.6194 1 ROSSO On	1 Rosso On
6	6	1.6827	24.1690	20.4293	9.3488	14.9353	9.6567	17.4403	22.5323	17.3282	20.3696	1 Giallo spento 1 Verde spento 03/02/2011 21:15:43 2 Rosso 0n 2 Giallo spento 2 Verde spento 03/02/2011 21:15:43 3 Rosso 0n
7	7	1.4886	23.7971	20.1869	9.0746	14.8212	9.3330	17.1492	22.1921	17.2826	20.0795	
8	8	2.1518	24.2256	20.4374	9.7602	14.9810	9.7134	17.4322	22.1597	17.3739	20.4985	
9	9	3.3568	24.7755	21.4151	10.7765	15.6657	10.0614	18.2732	22.5890	17.8074	21.5057	
10	10	4.6185	25.6245	22.5705	12.1558	16.1906	10.8060	19.0657	23.4558	18.6972	22.8675	
11 12	11	5,9529	26.5705	24.1219	13.7206	17.2405	11.5830	20.4484	24.6062	19.4274	24.5193	3 Giallo spento 3 Verde spento 03/02/2011 21:15:43
12	12	7.4330	27.7915	26.1985	17.1567	17.6969	12.6999	21.7099	25.6755	20.6138	26.7836	4 Rosso On
13	13	10.0372	29.6028	30.6345	22.3189	19.0892	14.6180	23,9902	27.3929	22.9183	31.7149	4 Giallo On
13 14 15 16	14	12.8516	34.8991	34.7634	24.7386	23.5625	18.0497	28.5993	31.6378	27.0938	35.6310	4 Verde On 5 Rosso On
15	15	14.3640	36.3141	36.2339	25.1984	25.3884	18.9642	30.3783	33.5982	28.2802	37.2828	5 Giallo On
16	16	13.6523	36.1928	35.4663	22.8673	25.5710	18.8833	30.3379	34.5866	28.0977	36.0581	5 Verde On
17	17	10.8216	30.4304	29.8391	17.5680	22.8778	17,2322	29,8608	29.4730	23.9679	28.0592	6 613110 On
17 18 19	18	8.8725	28.1635	26.1015	15.8822	21.6682	15.7349	23,6694	27.2471	23.4659	26.2276	
19	19	7.7241	28.6729	26.0531	15.1886	20.6868	15,2170	23.0150	27.3200	22.8271	26.0020	Tensione di rete: PRESENTE -
20	20	6.6970	28.5112	25.4309	14.3981	19.8195	14.3671	21.7099	26.8096	21.9828	25.2929	
21	21	6.1470	26.7242	22.7079	13.6641	20.0934	13.6792	21.2355	25.4892	20.2716	23,4799	
21 22 23 24	22	5.2008	28.0907	23.7341	12.8495	18.9979	13.3069	21.1196	25.9023	20.1119	23.6410	
23	23	4.0038	27.5732	23.4674	12.1477	18.2447	12.8375	20.3271	25.5054	19.9522	23.3268	
24	24	3.2921	27.1042	22.8695	11.3653	17.6056	12,1010	19.7611	24.9140	18.9710	22.7547	

Figura 7-13 File di memorizzazione dello stato dei segnali sotto test. (Sinistra) Memorizzazione delle temperature registrate dai sensori. (Destra) File di LOG dello stato degli aspetti di ogni segnale e della tensione di alimentazione.

In fase di memorizzazione il software memorizza su due diversi file \*.txt lo stato dei segnali. In particolare memorizza in un file le temperature campionate facendo una media oraria dei valori, mentre crea un file di LOG che indica lo stato dei semafori e la tensione di alimentazione.

Il file di LOG viene ricreato ogni qual volta ci sia un cambiamento di stato degli aspetti dei segnali (a ogni fototransitor corrisponde uno stato logico On se l'aspetto pilotato è risultato acceso, Off se l'aspetto pilotato è risultato spento) o un cambiamento dello stato della tensione di alimentazione (Presente-Assente). Mentre il file delle temperature viene ricreato ogni 24 ore.

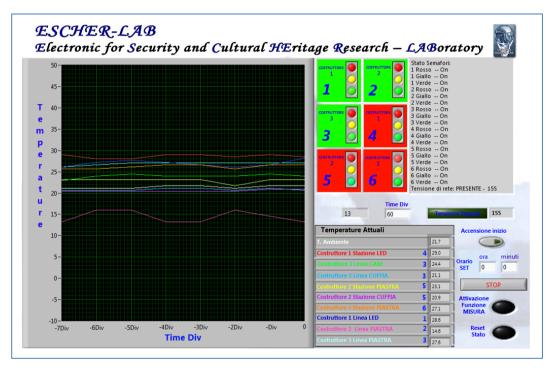


Figura 7-14 Pannello di controllo del software di gestione dei segnali.

In Figura 7-14 è visibile l'interfaccia grafica realizzata per il nostro setup di misura, si riconosce:

- l'area riservata al grafico dell'andamento delle temperature;
- l'area in cui sono riportati i valori istantanei delle temperature ("Temperature Attuali");

- l'area dello stato dei segnali:
  - o il colore dei rettangoli indica l'aspetto pilotato (in figura verdesequenza linea; rosso-sequenza stazione);
  - il semaforo stilizzato indica per ogni segnale se l'aspetto si è realmente acceso (in caso positivo il semaforo stilizzato accende tutti e 3 i suoi aspetti, in caso negativo spegne l'aspetto che non si è acceso);
- il pulsante "Accensione Inizio Ora", consente di avviare il setup di misura all'inizio dell'ora (per far corrispondere le righe del file di temperature alle ore giornaliere);
- il controllo "Orario Set", permette di selezionare l'orario in cui creare un nuovo file di temperature (ad esempio in figura è settato alle 00:00: ogni giorno a mezzanotte il software creerà un nuovo file, in modo tale da avere un file di acquisizione per ogni giorno di misura);
- il controllo "Time Div", definisce il tempo di campionamento in secondi dei sensori di temperatura;
- il controllo "Reset Stato", permette di resettare il file LOG mostrato nella finestra testuale (la finestra testuale mostra l'ultimo file LOG creato dal software);
- il controllo "Attivazione Funzione Misura", consente di alimentare tutti i segnali con una sequenza di 2 minuti per ogni aspetto, per consentire in maniera agevole le misure di intensità;

• la finestra testuale del file LOG, mostra l'ultimo file LOG creato dal software: lo stato degli aspetti dei segnali (On-Off) e lo stato della tensione (Presente-Assente).

### 7.1.3 Misure di intensità

La misura del decadimento è stata realizzata attraverso misurazioni dell'intensità luminosa emessa da ciascun aspetto di ogni segnale, effettuate nelle ore notturne a intervalli irregolari per tutta la durata del test. La Figura 7-15 descrive l'apparato sperimentale utilizzato.

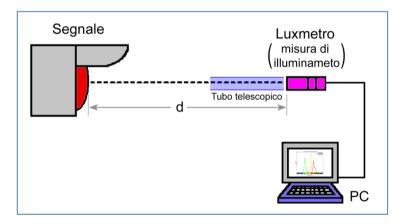


Figura 7-15 Disposizione strumentale utilizzata per la determinazione dell'intensità luminosa.

L'intensità luminosa è stata ricavata da una misura d'illuminamento (Flusso luminoso incidente per unità di superficie – misurazione effettuata tramite luxmetro). La distanza "d" (distanza segnale – strumento di misura) è stata scelta in modo tale da poter considerare il segnale come una sorgente di radiazione "puntiforme" (per un segnale con area di emissione avente diametro pari a 150

mm quindi per i nostri segnali, la distanza *d* deve essere maggiore di 7.5 m). Nel nostro caso è stata scelta una distanza di 12.25 m.

Inoltre eseguendo misure in campo, non è possibile montare i segnali su un rotatore goniometrico. Pertanto, l'asse di emissione, segnale per segnale, è stato individuato movimentando la testa del luxmetro. Fissata la posizione della testa di misura, attraverso dei riferimenti geometrici (distanze; altezze; angoli), tutte le misurazioni d'intensità sono state eseguite con il sistema di misura sistemato sempre nello stesso punto e con la medesima orientazione.

Inoltre, poiché è necessario eseguire misurazioni in campo, anche se realizzate in ore notturne con bassa luminosità ambientale, al fine di evitare che sul sensore arrivi radiazione estranea al segnale, davanti alla testa di misura viene posizionato un "tubo" telescopico con apertura tale che alla distanza di 12.25 m abbia un angolo di vista appena superiore alla superficie di emissione del segnale. Prima di effettuare le misurazioni, con i segnali schermati, si verifica che la radiazione di fondo registrata dal luxmetro sia inferiore a 10 mlux (corrispondente ad un'intensità luminosa inferiore a 1.5 cd). In queste condizioni operative, l'intensità luminosa risulta essere pari:

Intensità Luminosa = 
$$(Illuminamento) \cdot (distanza)^2 \implies [cd] = [lux] \cdot [m^2]$$

Per valutare l'incertezza di misura, in particolare quella legata al riposizionamento della testa di misura del luxmetro, in giorni diversi sono state fatte diverse misurazioni indipendenti, montando e smontando la testa di misura e il tubo telescopico. Da questa serie di misurazioni si è ricavato che l'incertezza massima, sulla determinazione dell'intensità, è inferiore al ±5% del valore misurato.

# 7.2 Prova Sperimentale

Come abbiamo già evidenziato, per raggiungere l'obiettivo prefissato sono stati analizzati sei segnali. Quattro segnali a tecnologia LED di tipo SDO (2 per costruttore) e due segnali di tipo Relè Schermo, che sono le tipologie di segnali alti che sono presenti sulla rete ferroviaria gestita da RFI. I segnali fanno uso delle seguenti tipologie di LED:

- Segnali SDO Costruttore 1
  - Aspetto Rosso:
    - LED Kingbright L-7113SRD-F; Tecnologia AlGaAs;
    - LED Bright Electronics Co. BVU-5M5QG4; Tecnologia AlGaInP;

nei led circola una corrente compresa tra 11.5 e 17.5 mA, LED a 5 mm.

- Aspetto Giallo:
  - LED Bright Electronics Co. BVU-5M5QS4; Tecnologia AlGaInP/GaAs;
  - LED Bright Electronics Co. BVU-5M5TG4; Tecnologia AlGaInP;

nei led circola una corrente compresa tra 11.5 e 17.5 mA, LED a 5 mm.

- o Aspetto Verde:
  - SLOAN AG (Precision Optoelectronics) L5-BG1G;
     Tecnologia InGaN;

nei led circola una corrente compresa tra 7.5 e 11 mA, LED a 5 mm.

- Segnali Relè Schermo Costruttore 2
  - o Aspetto Rosso:
    - LED OSRAM LRG6SP, Tecnologia AlInGaP;
    - LED OSRAM LSE6SF, tecnologia AlInGaP;

nei led circola una corrente dell'ordine dei 30 mA, power LED.

- o Aspetto Giallo:
  - LED OSRAM LYG6SP, Tecnologia AlInGaP;

nei led circola una corrente dell'ordine dei 67 mA, power LED.

- Aspetto Verde:
  - LED NICHIA CORPORATION NFSE036BT, tecnologia InGaN;

nei led circola una corrente dell'ordine dei 77 mA, power LED.

- Segnali SDO Costruttore 3
  - Aspetto Rosso:
    - LED OSRAM LSE6SF; Tecnologia AlInGaP;

nei led circola una corrente dell'ordine dei 30 mA, power LED.

- Aspetto Giallo:
  - LED OSRAM LYG6SP AlInGaP;

nei led circola una corrente dell'ordine dei 90 mA, power LED.

- o Aspetto Verde:
  - LED OSRAM LVW5SG (Golden Dragon); Tecnologia InGaN;

nei led circola una corrente dell'ordine dei 120 mA, power LED.

Come già detto, per valutare il funzionamento dei segnali in campo, i sei dispositivi sono stati collocati sul tetto dell'edificio, sede del Dipartimento d'Ingegneria Elettronica dell'Università degli Studi "Roma Tre". Al fine di non creare disturbo agli edifici circostanti e per fare in modo che le misure d'intensità effettuate su un segnale non vengano influenzate dalle emissioni luminose degli altri segnali, i sei segnali sono stati mascherati così che dall'esterno non vengano percepiti i vari aspetti. Il sistema di "mascheramento" viene rimosso, segnale per segnale, soltanto durante le misurazioni d'intensità, Figura 7-16.



Figura 7-16 Segnali montati sul tetto dell'edificio del Dipartimento di Ingegneria Elettronica dell'Università degli Studi "Roma Tre" e sistema di mascheramento dell'emissione. Nonostante tutti i segnali siano correttamente attivati, appare luminoso soltanto il segnale cui è stato rimosso il sistema di "mascheratura".

Attraverso il sistema di controllo, oltre a definire le sequenze di azionamento degli aspetti, si sono monitorate le seguenti temperature:

- temperatura ambiente;
- temperatura LED segnale Costruttore 1 attivato con sequenza di stazione;

• temperatura LED segnale Costruttore 2 attivato con sequenza di stazione;

- temperatura LED segnale Costruttore 3 attivato con sequenza di stazione;
- temperatura LED segnale Costruttore 1 attivato con sequenza di linea;
- temperatura LED segnale Costruttore 2 attivato con sequenza di linea;
- temperatura LED segnale Costruttore 3 attivato con sequenza di linea;
- temperatura cuffia segnale Costruttore 1 attivato con sequenza di linea;
- temperatura cuffia segnale Costruttore 2 attivato con sequenza di linea;
- temperatura cuffia segnale Costruttore 3 attivato con sequenza di linea;

Nel mese di gennaio 2011 i segnali sono stati istallati sul tetto dell'edificio. Fino al 10 febbraio 2011 il sistema è stato sottoposto a test funzionali e collaudato in ogni sua parte. Dal 11 febbraio 2011 il sistema è stato messo in esercizio continuo; le registrazioni delle misure di temperatura sono state archiviate giorno per giorno. A titolo di esempio, in Figura 7-17 vengono riportate le misurazioni relative al 16 marzo 2011 (giornata piovosa senza sole) e in Figura 7-18 le misurazioni relative al 27 giugno 2011 (giornata calda e serena).

Le figure mostrano come la variabilità ambientale, cui sono sottoposti i segnali ferroviari, modifica la temperatura di esercizio delle sorgenti luminose a LED.

Inoltre, la Figura 7-17 e la Figura 7-18 contengono importanti informazioni particolarmente interessanti:

• Le temperature dei LED seguono lo stesso andamento della temperatura ambiente; maggiore è la temperatura ambiente più elevata è la temperatura dei LED.

- Le temperature presenti in cuffia (tracce di colore rosso) sono "molto simili" per tutti i segnali. Tutti i segnali dissipano in cuffia la stessa potenza, per specifica di progetto. Le piccole differenze sono dovute alle differenti dimensioni e capacità termiche dei segnali.
- I segnali del Costruttore 1 (tracce blu), a causa della diversa tipologia di LED utilizzata, presentano un salto termico, rispetto alla temperatura ambiente (traccia verde), più elevato degli altri segnali. I segnali del Costruttore 1 hanno un salto termico di 16-20 °C; i segnali del Costruttore 3 hanno un salto termico di 14-16 °C; i segnali del Costruttore 2 hanno un salto termico di 8-10 °C.
- I segnali del Costruttore 2 e 3 con sequenza di stazione (tracce nere e blu tratteggiate), presentano LED con temperatura più bassa dei rispettivi LED attivati con sequenza di linea (tracce nere e blu continue). Nella sequenza di stazione rimangono accesi per maggior tempo i LED rossi. Questi LED sono pilotati con una corrente più bassa (minore dissipazione di calore) rispetto ai LED verdi (LED che rimangono accesi più a lungo nella sequenza di linea). Questo fenomeno si inverte nei segnali del Costruttore 1 (tracce viola). Nei segnali del Costruttore 1, i LED rossi sono pilotati con corrente maggiore rispetto ai LED verdi. Quindi, in questo caso, la temperatura dei LED durante la sequenza di linea e maggiore di quella che si ha durante la sequenza di stazione.

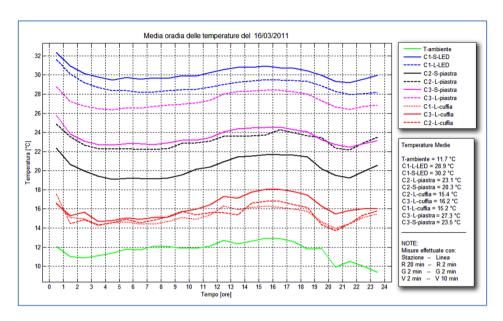


Figura 7-17 Tipiche misurazioni relative a giornata piovosa e senza sole.

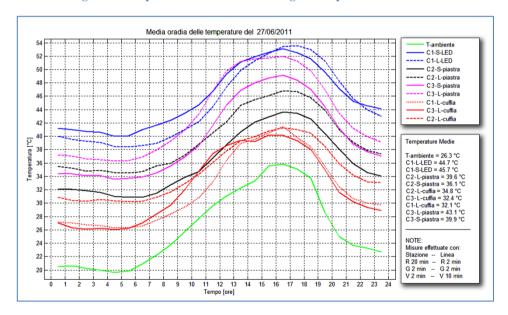


Figura 7-18 Tipiche misurazioni relative a giornata calda e serena.

In particolare, come abbiamo già evidenziato, nei sistemi a LED, sia la vita media sia l'intensità emessa sono dipendenti dalla temperatura. Tutto questo rende di difficile utilizzo le stime di tempo di vita dei LED rese disponibili dalle case costruttrici. In alcuni datasheet sono disponibili stime della vita media che fanno riferimento a condizioni operative (temperatura e corrente) stabili; in queste stime, si veda Figura 7-19, l'aumento di poche decine di gradi della temperatura comporta, a parità di corrente di pilotaggio, una drastica diminuzione del tempo di vita. Per tanto, al fine di compiere una corretta stima della vita media dei segnali, è indispensabile conoscere l'andamento della temperatura in esercizio.

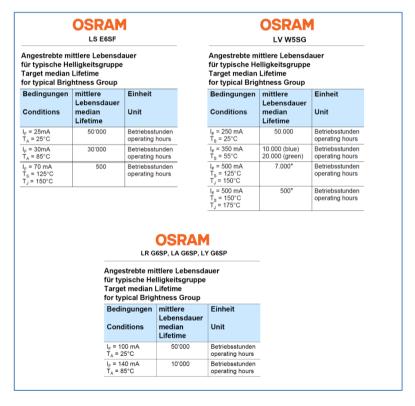


Figura 7-19 Tempo di vita di alcuni LED SMD ad alta intensità di emissione prodotti dalla OSRAM.

# 7.2.1 Metodo di previsione

Nei segnali realizzati con tecnologia LED, l'intensità luminosa dei vari aspetti può essere rappresentata dall'equazione:

$$I_N^{(A)}(t, k_A, \lambda_A) = G_A(T_{LED}) \cdot I_N^{(A)}(t = 0, k_A, \lambda_A) \exp\left[-\left(\frac{t}{\lambda_A}\right)^{k_A}\right]$$

$$(7.1)$$

dove si fa riferimento al modello 9 della norma TM 21-11 (§ 2.8.3). Nell'equazione (7.1)  $I_N^{(A)}(t,k_A,\lambda_A)$  rappresenta l'intensità luminosa del generico aspetto "A" normalizzata a 25 °C, t rappresenta il tempo durante il quale il segnale è rimasto acceso,  $I_N^{(A)}(t=0,k_A,\lambda_A)$  rappresenta l'intensità luminosa dell'aspetto "A" normalizzata a 25 °C al tempo iniziale (t=0),  $k_A$  rappresenta lo shape factor della curva intensità vs. tempo,  $\lambda_A$  è il coefficiente che caratterizza il lifetime (la vita media del LED) e  $G_A(T_{LED})$  è una funzione che lega l'intensità della radiazione emessa dal LED alla sua temperatura di giunzione.

Conoscendo la funzione  $G_{\!\scriptscriptstyle A}(T_{\!\scriptscriptstyle LED})$ , e tramite misurazioni dell'intensità luminosa in funzione del tempo, è possibile ricavati i valori  $k_{\scriptscriptstyle A}$  e  $\lambda_{\scriptscriptstyle A}$ .

Per ricavare i valori delle costanti,  $k_A$  e  $\lambda_A$  è indispensabile che i dati d'intensità luminosa siano dipendenti "esclusivamente" dal tempo, in altre parole è indispensabile conoscere la funzione  $G_A(T_{LED})$  ed è indispensabile che eventuali sistemi attivi non modifichino l'intensità di emissione in funzione dei parametri operativi e/o ambientali.

Come abbiamo già discusso nel capitolo 4, nei segnali a tecnologia LED, al variare della temperatura varia l'intensità di emissione dei LED. In particolare l'intensità di emissione decresce con l'aumentare della temperatura. Per il funzionamento nell'intorno delle temperature ambientali (300 K), l'intensità di emissione dei LED è, in genere, descritta dalla seguente equazione empirica, che abbiamo già visto nel § 2.4.1.1:

$$I = I \Big|_{298K} \exp \left[ -\frac{T_{LED} - 298K}{T_1} \right] \implies G(T_{LED}) = \exp \left[ -\frac{T_{LED} - 298K}{T_1} \right]$$
 (7.2)

Nell'equazione (7.2)  $T_{LED}$  rappresenta la temperatura cui operano i LED mentre  $T_1$  rappresenta la temperatura caratteristica del LED. In generale,  $T_{LED}$  dipende dalla temperatura ambiente e dalle resistenze termiche presenti tra LED e ambiente. La temperatura caratteristica  $T_1$  dipende dalla tecnologia costruttiva e dal tipo di LED.

La funzione  $G(T_{LED})$ , indispensabile per effettuare la normalizzazione dell'intensità emessa a 25°C, è stata determinata tramite interpolazione numerica dell'equazione (7.2). In particolare, si misura l'intensità luminosa emessa dai segnali a 4-5 differenti temperature d'esercizio, conoscendo le varie  $T_{LED}$  è possibile, tramite interpolazione, determinare la costante  $T_1$ .

Tuttavia anche se tutto è codificato e definito, le proiezioni a lungo termine sono poco affidabili. Per tale motivo, le norme impongono un limite massimo alle estrapolazioni temporali. La TM 21-11 prevede che non si possa certificare un tempo di vita maggiore di sei volte il tempo utilizzato nei test. Con motivazioni

analoghe, il programma Energy Star dalla *Environmental Protection Agency* (EPA) prevede certificazioni della vita media soltanto fino a 50<sup>°</sup>000.

## 7.2.1.1 Tempo di vita nella segnaletica

Durante la prova sperimentale ci siamo chiesti se fosse giusto utilizzare come definizione di tempo di vita lo stesso di quello indicato per i LED, L70.

Per un appartato, la vita utile dovrebbe essere definita come l'intervallo temporale durante il quale il sistema garantisce le prestazioni definite dalle specifiche di progetto.

Tuttavia l'utilizzo di questa definizione potrebbe essere fuorviante per i costruttori della segnaletica.

A titolo di esempio prendiamo in esame un aspetto "rosso" e ipotizziamo che inizialmente il segnale abbia un'emissione pari a 900 cd, posto al centro dei limiti d'intensità che deve rispettare. In particolare, tramite l'equazione (7.1), stimando la funzione  $G_A(T_{LED})$ , è possibile ricavare le costanti  $k_R$  e  $\lambda_R$  che governano la vita utile del segnale.

Ipotizziamo di stabilire come vita utile del segnale l'intervallo di tempo durante il quale l'intensità della radiazione emessa è superiore al limite inferiore stabilito dalle prescrizioni (esempio: 600 cd per l'aspetto Rosso). Nell'ipotesi che la curva di emissione sia quella illustrata in Figura 7-20 si ha una vita utile di circa  $100^{\circ}000$  ore. In questo esempio l'intensità iniziale è di 900 cd e le costanti valgono  $k_R = 4$  e  $\lambda_R = 125000$ .

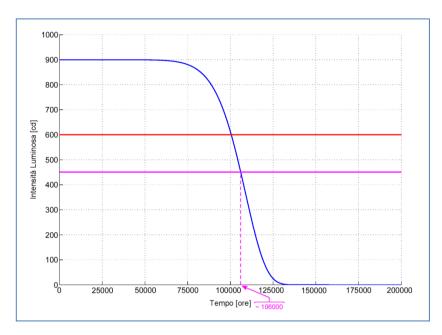


Figura 7-20 Intensità di emissione in funzione del tempo. Emissione iniziale pari a 900 cd.

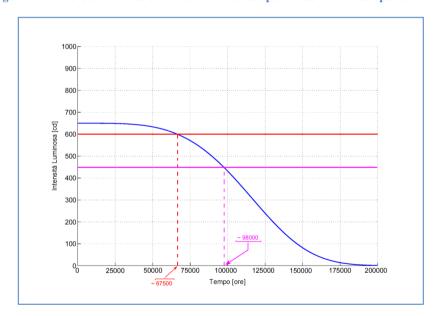


Figura 7-21 Intensità di emissione in funzione del tempo. Emissione iniziale pari a 600 cd.

Se lo stesso segnale (stessi LED e stesse situazioni operative) ha un'emissione iniziale di 650 cd, la vita utile, valutata come l'intervallo di tempo durante il quale l'intensità della radiazione emessa è superiore al limite inferiore stabilito dalle prescrizioni (600 cd), scende a ~ 67000 ore (si veda Figura 7-20). Al contrario, se consideriamo come vita utile del segnale l'intervallo di tempo durante il quale l'intensità della radiazione emessa è superiore al limite inferiore stabilito dalle prescrizioni diminuito di circa il 30% (450 cd), la vita utile risulta di circa 98000 ore.

Questo secondo esempio mostra che, se si considera a fine vita il segnale quando raggiunge l'intensità luminosa di 600 cd (per l'aspetto Rosso), l'emissione iniziale è "molto" importante e "critica". Al contrario, se consideriamo come vita utile del segnale l'intervallo di tempo durante il quale l'intensità della radiazione emessa è superiore al limite inferiore stabilito dalle prescrizioni diminuito di circa il 30% (450 cd per l'aspetto Rosso), la vita utile risulta poco influenzata dall'emissione iniziale.

In particolare noi faremo riferimento alla definizione L70 utilizzata per i LED essendoci nelle normative di riferimento degli apparati studiati un "buco normativo".

# 7.2.2 Misure di Intensità in funzione del tempo

Da febbraio 2011 sono stati messi in esercizio continuo sei segnali alti. Per questi sei segnali sono state misurate l'intensità di radiazione dei vari aspetti. La campagna di misura, complessivamente, ha avuto una durata di oltre 10'000 ore.

### 7.2.2.1 Segnali Costruttore 1

La Figura 7-22 mostra l'intensità della radiazione in funzione del tempo del segnale del Costruttore 1 attivato con la sequenza di stazione (20 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 2 minuti acceso l'aspetto Verde). Per 10'000 ore di funzionamento del segnale si hanno circa 8334 ore di accensione dei LED Rossi, 833 ore di accensione dei LED Gialli e 833 ore dei LED Verdi. Con questa sequenza si dovrebbe riscontrare un degrado dei LED rossi e una radiazione stabile per i LED Gialli e Verdi.

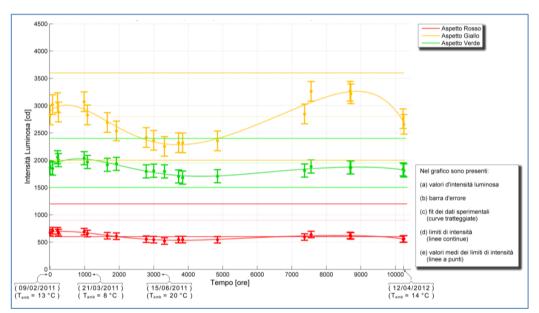


Figura 7-22 Segnale Costruttore 1 (Stazione) - Intensità di emissione in funzione del tempo.

La Figura 7-22 mostra che l'aspetto Rosso, di fatto, non rispetta le prescrizioni RFI su tutto il range delle temperature d'esercizio. Inoltre, si deve considerare che le misure sono state eseguite nelle ore notturne a temperature più basse di quelle che si registrano nelle ore centrali della giornata. Questo dimostra che, nonostante

il segnale abbia "inizialmente" a 25 °C un'emissione conforme alle prescrizioni RFI ( $\sim 700$  cd), a temperature d'esercizio "elevate" non rispetta le prescrizioni ( $\S 4.2.4$ ).

La Figura 7-23 mostra l'intensità della radiazione in funzione del tempo del segnale del Costruttore 1 attivato con la sequenza di linea (2 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 10 minuti acceso l'aspetto Verde). Per 10'000 ore di funzionamento del segnale si hanno circa 1428 ore di accensione dei LED Rossi, 1428 ore di accensione dei LED Gialli e 7144 ore dei LED Verdi. Con questa sequenza si dovrebbe riscontrare degrado dei LED Verdi superiore a quello dei LED Rossi e Gialli.

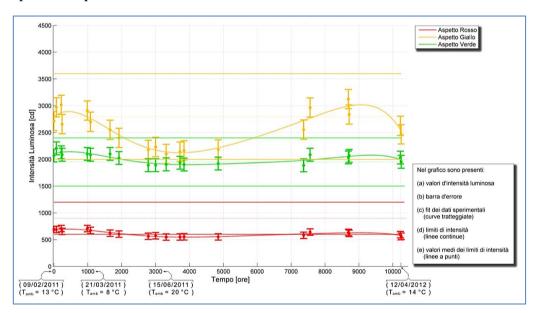


Figura 7-23 Segnale Costruttore 1 (Linea) - Intensità di emissione in funzione del tempo.

Anche questo segnale mostra gli stessi problemi riscontrati con il segnale attivato con la sequenza di stazione.

I grafici presentati nelle Figura 7-22 e Figura 7-23 sono inutilizzabili per la determinazione della vita media dei segnali; la variazione d'intensità legata alla temperatura maschera eventuali variazioni d'intensità legate al tempo di funzionamento. Pertanto, al fine di valutare il decadimento della radiazione emessa con il tempo, le misure d'intensità sono state normalizzate a +25 °C attraverso la funzione  $G_A(T_{LED})$  descritta precedentemente.

La Figura 7-24 mostra, per il segnale del costruttore 1 attivato con la sequenza di stazione (20 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 2 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità della radiazione in funzione del tempo normalizzata a +25 °C.

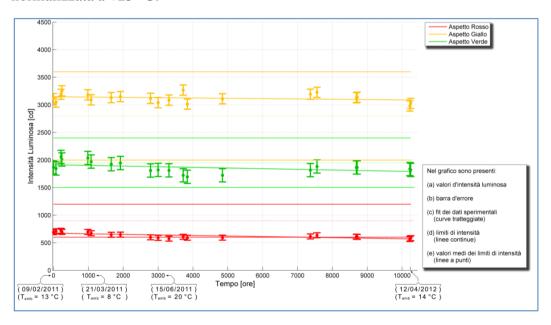


Figura 7-24 : Segnale Costruttore 1 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Osservando la Figura 7-24 sembrerebbe che l'intensità "normalizzata" dei vari aspetti del segnale decresca in modo significativo con il tempo. In realtà, i LED "inizialmente" possono perdere efficienza di emissione e "stabilizzarsi" a valori più bassi di quelli iniziali (assestamento degli strati di semiconduttore interni). Di fatto osservando la Figura 7-24 si vede che le intensità si stabilizzano dopo circa 3'000 ore di funzionamento.

La Figura 7-25 mostra, per il segnale del costruttore 1 attivato con la sequenza di stazione (20 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 2 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità normalizzata a +25 °C per l'intervallo di tempo compreso tra 3'000÷10'000 ore di funzionamento.

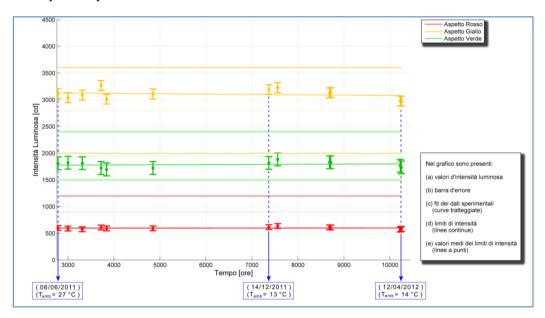


Figura 7-25 Segnale Costruttore 1 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Osservando la Figura 7-25 si nota che nell'intervallo di tempo  $3.000 \div 10.000$  ore non si riscontrano "osservabili" variazioni dell'intensità di emissione. Considerando le incertezze di misura e l'approssimazione della stima della funzione  $G_A(T_{LED})$  è possibile affermare che il segnale presenta una vita media, certamente, superiore a 60.000 ore.

Utilizzando la relazione (7.1), è possibile effettuare l'estrapolazione a lungo termine dei dati sperimentali. Con questa estrapolazione si ottengono, per i vari aspetti, i grafici di Figura 7-26, Figura 7-27 e Figura 7-28.

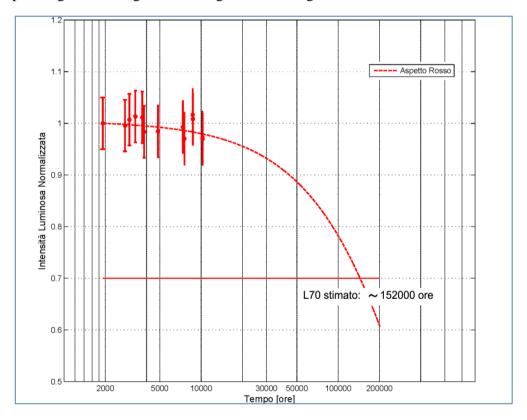


Figura 7-26 Segnale Costruttore 1 (Stazione) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

Queste previsioni a lungo termine mostrano che, con alta probabilità, la vita utile del segnale è "significativamente" superiore a 60'000 ore.

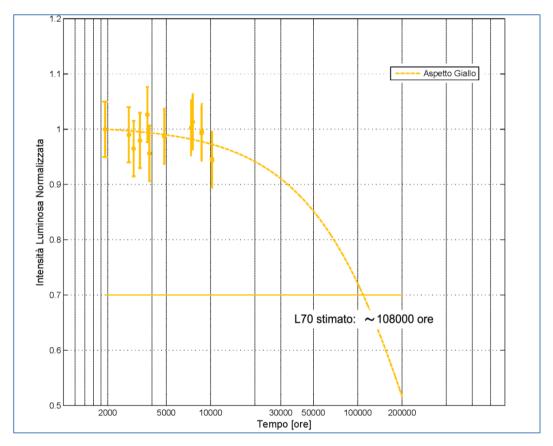


Figura 7-27 Segnale Costruttore 1 (Stazione) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

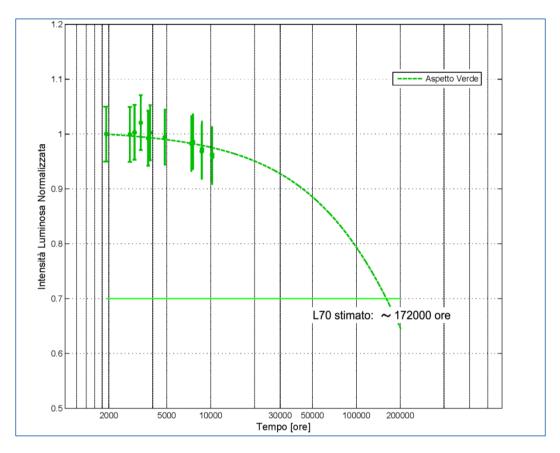


Figura 7-28 Segnale Costruttore 1 (Stazione) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

La Figura 7-29 mostra l'intensità normalizzata a +25 °C della radiazione in funzione del tempo del segnale del Costruttore 1 attivato con la sequenza di linea (2 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 10 minuti acceso l'aspetto Verde). La normalizzazione è stata effettuata tramite una stima teorico/sperimentale delle funzioni  $G_A(T_{LED})$ .

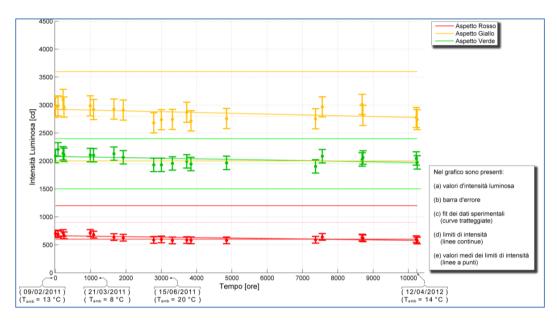


Figura 7-29 Segnale Costruttore 1 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Anche in questo caso, osservando la Figura 7-29 sembrerebbe che l'intensità "normalizzata" dei segnali decresca con il tempo; i segnali stabilizzano la propria intensità dopo circa 3'000 ore di funzionamento.

La Figura 7-30 mostra, per segnale del Costruttore 1 attivato con la sequenza di linea (2 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 10 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità normalizzata a +25 °C per l'intervallo di tempo compreso tra 3'000÷10'000 ore di funzionamento.

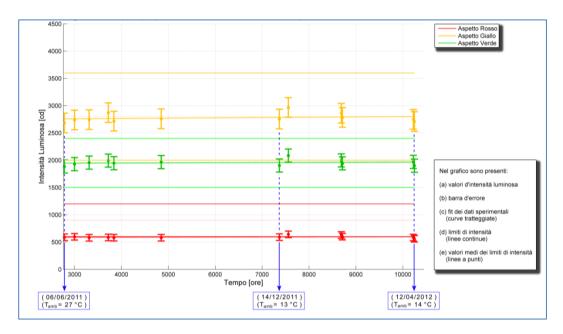


Figura 7-30 Segnale Costruttore 1 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Così come osservato per il segnale attivato con sequenza di stazione, anche in questo caso non si riscontrano "osservabili" variazioni dell'intensità di emissione. Utilizzando la relazione (7.1), è possibile effettuare un'estrapolazione a lungo termine dei dati sperimentali. Con questa estrapolazione si ottengono, per i vari aspetti, i grafici di Figura 7-26, Figura 7-27 e Figura 7-28.

Queste previsioni a lungo termine mostrano che, con alta probabilità, la vita utile del segnale è "significativamente" superiore a 60'000 ore.

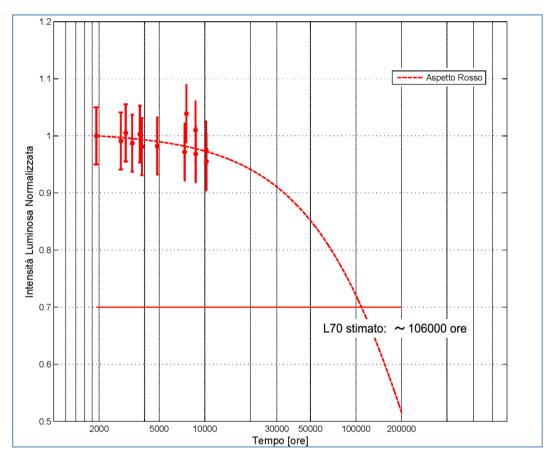


Figura 7-31 Segnale Costruttore 1 (linea) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

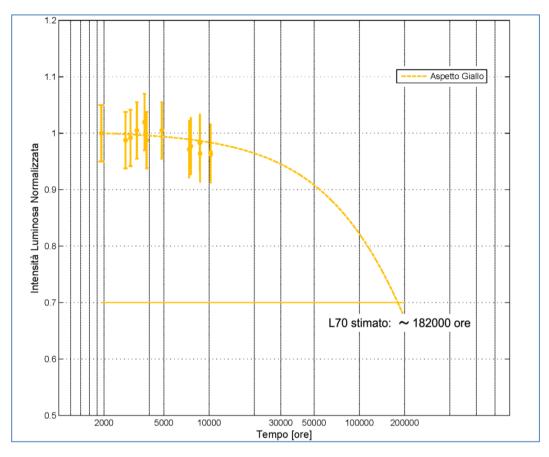


Figura 7-32 Segnale Costruttore 1 (linea) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

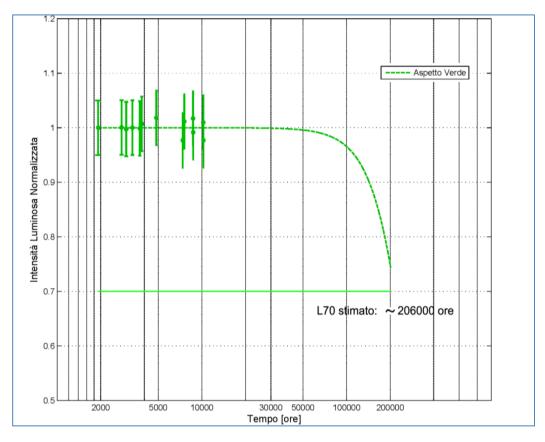


Figura 7-33 Segnale Costruttore 1 (linea) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

#### 7.2.2.2 Segnali Costruttore 2

La Figura 7-34, mostra per il segnale del Costruttore 2 attivato con la sequenza di stazione (20 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 2 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità della radiazione luminosa in funzione del tempo. Per 10'000 ore di funzionamento del segnale si hanno circa 8334 ore di accensione dei LED Rossi, 833 ore di accensione dei LED Gialli e 833 ore dei

LED Verdi. Con questa sequenza si dovrebbe riscontrare degrado dei LED rossi e radiazione stabile per i LED Gialli e Verdi.

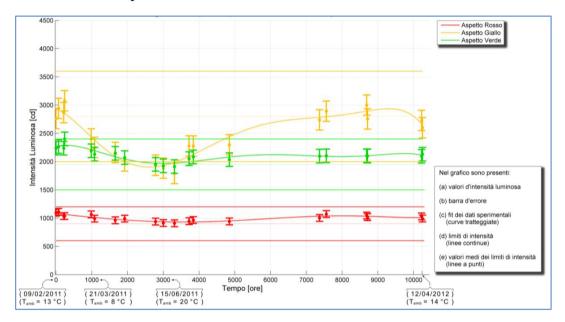


Figura 7-34 Segnale Costruttore 2 (Stazione) - Intensità di emissione in funzione del tempo.

La Figura 7-34 mostra che l'aspetto Giallo, non sempre rispetta le prescrizioni RFI. Inoltre, si deve considerare che le misure sono state fatte in ore notturne a temperature più basse di quelle che si registrano nelle ore centrali della giornata.

Bisogna comunque osservare che i segnali del Costruttore 2 sono provvisti di un sistema di compensazione delle variazioni d'intensità con la temperatura. Per le nostre misurazioni il sistema è stato disattivato. La disattivazione di tale compensazione si è resa necessaria, principalmente per due motivi:

• non conoscenza dettagliata del meccanismo/algoritmo di compensazione;

 necessità di valutare le variazioni d'intensità con il tempo senza influenze esterne.

Lasciare attivo il sistema di compensazione dell'intensità luminosa con la temperatura, apparentemente avrebbe potuto evitare il calcolo della funzione  $G_A(T_{LED})$ . Ma non conoscendo l'algoritmo di compensazione, e se questo opera in modo lineare, la presenza di variazioni d'intensità non controllate, avrebbe implicato l'aumento delle incertezze di misura. Inoltre, eventuali non linearità avrebbero comportato l'introduzione di errori sistematici. Si fa notare che la disattivazione non cambia la funzionalità del sistema.

La Figura 7-35 mostra l'intensità della radiazione in funzione del tempo del segnale attivato con la sequenza di linea (2 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 10 minuti acceso l'aspetto Verde). Per 10'000 ore di funzionamento del segnale si hanno circa 1428 ore di accensione dei LED Rossi, 1428 ore di accensione dei LED Gialli e 7144 ore dei LED Verdi. Con questa sequenza si dovrebbe riscontrare degrado dei LED Verdi superiore a quello dei LED Rossi e Gialli.



Figura 7-35 Segnale Costruttore 2 (linea) - Intensità di emissione in funzione del tempo.

I grafici presentati nella Figura 7-34 e nella Figura 7-35 sono inutilizzabili per la determinazione della vita media dei segnali, la variazione d'intensità legata alla temperatura maschera eventuali variazioni d'intensità legate al tempo di funzionamento. Pertanto, al fine di valutare il decadimento della radiazione emessa con il tempo, le misure d'intensità sono state normalizzate a +25 °C.

La Figura 7-36 mostra, per il segnale attivato con la sequenza di stazione (20 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 2 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità normalizzata a +25 °C della radiazione luminosa del segnale in funzione del tempo. La normalizzazione è stata effettuata tramite una stima teorico/sperimentale delle funzioni  $G_A(T_{LED})$ .

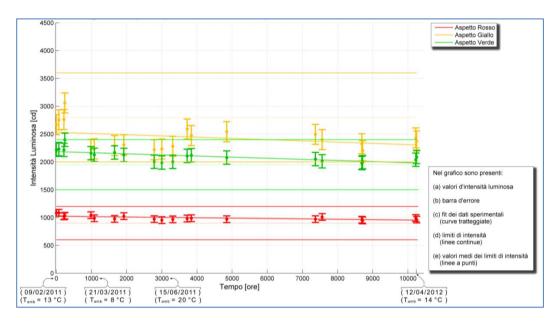


Figura 7-36 Segnale Costruttore 2 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Osservando la Figura 7-36, in modo simile al segnale del Costruttore 1, sembrerebbe che l'intensità "normalizzata" dei vari aspetti del segnale decresca in modo significativo con il tempo. In realtà, i LED "inizialmente" perdono efficienza di emissione e "stabilizzandosi" a valori più bassi di quelli iniziali. Osservando la Figura 7-36 si vede che le intensità si stabilizzano dopo circa 3'000 ore di funzionamento.

La Figura 7-37 mostra, per segnale del costruttore 2 attivato con la sequenza di stazione (20 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 2 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità normalizzata a +25 °C per l'intervallo di tempo compreso tra 3'000÷10'000 ore di funzionamento.

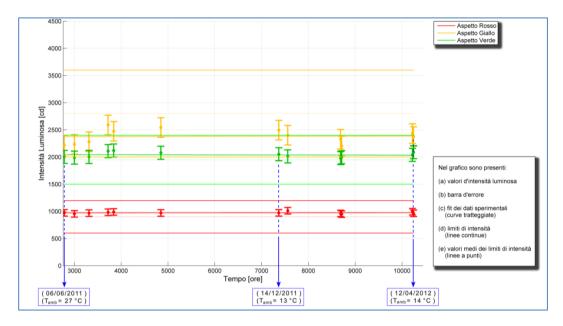


Figura 7-37 Segnale Costruttore 2 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Osservando la Figura 7-37 si nota che nell'intervallo di tempo  $3.000 \div 10.000$  ore non si riscontrano "osservabili" variazioni dell'intensità di emissione. Considerando le incertezze di misura e l'approssimazione della stima della funzione  $G_A(T_{LED})$  è possibile affermare che il segnale presenta una vita media, certamente, superiore a 60.000 ore.

Utilizzando la relazione (7.1), è possibile effettuare un'estrapolazione a lungo termine dei dati sperimentali. Con questa estrapolazione si ottengono, per i vari aspetti, i grafici di Figura 7-38, Figura 7-39 e Figura 7-40.

Queste previsioni a lungo termine mostrano che, con alta probabilità, la vita utile del segnale è "significativamente" superiore a 60'000 ore.

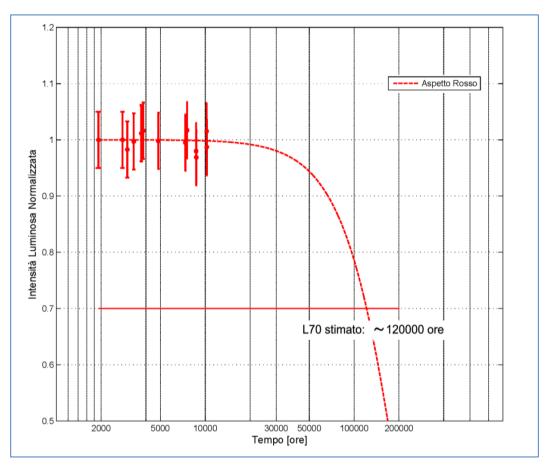


Figura 7-38 Segnale Costruttore 2 (Stazione) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

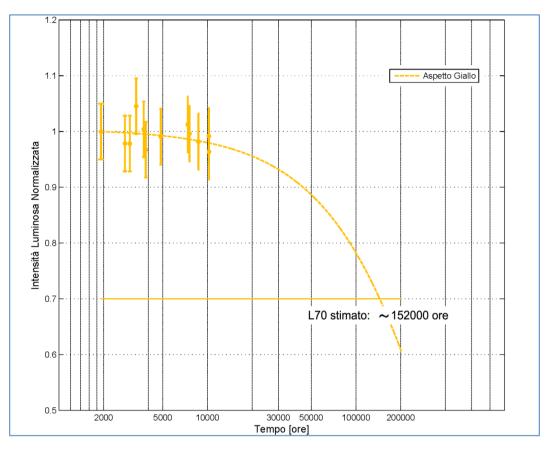


Figura 7-39 Segnale Costruttore 2 (Stazione) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

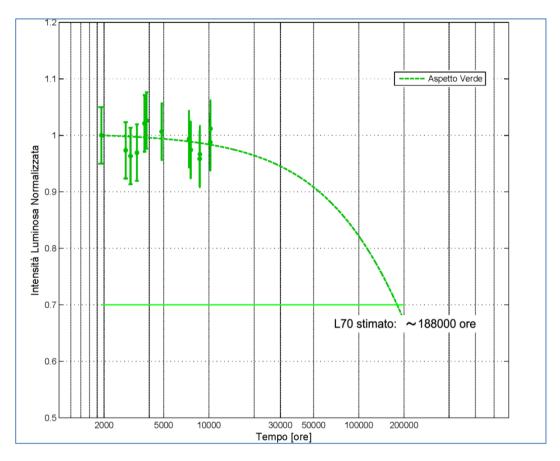


Figura 7-40 Segnale Costruttore 2 (Stazione) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

La Figura 7-41 mostra l'intensità normalizzata a +25 °C della radiazione in funzione del tempo del segnale attivato con la sequenza di linea (2 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 10 minuti acceso l'aspetto Verde). La normalizzazione è stata effettuata tramite una stima teorico/sperimentale delle funzioni  $G_A(T_{LED})$ .

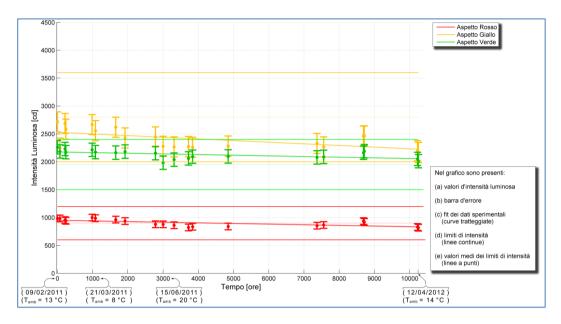


Figura 7-41 Segnale Costruttore 2 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Anche in questo caso, osservando la Figura 7-41 sembrerebbe che l'intensità "normalizzata" dei segnali decresca con il tempo; i segnali stabilizzano la propria intensità dopo circa 3'000 ore di funzionamento.

La Figura 7-42 mostra, per segnale del Costruttore 2 attivato con la sequenza di linea (2 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 10 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità normalizzata a +25 °C per l'intervallo di tempo compreso tra 3'000÷10'000 ore di funzionamento.

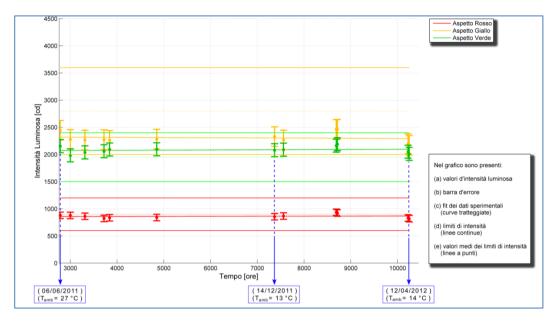


Figura 7-42 Segnale Costruttore 2 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Così come osservato per il segnale attivato con sequenza di stazione, anche in questo caso non si riscontrano "osservabili" variazioni dell'intensità di emissione. Utilizzando la relazione (7.1), è possibile effettuare un'estrapolazione a lungo termine dei dati sperimentali. Con questa estrapolazione si ottengono, per i vari aspetti, i grafici di Figura 7-43, Figura 7-44 e Figura 7-45.

Queste previsioni a lungo termine mostrano che, con alta probabilità, la vita utile del segnale è "significativamente" superiore a 60'000 ore.

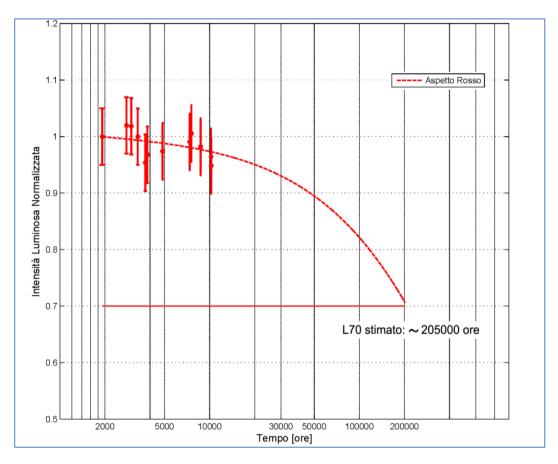


Figura 7-43 Segnale Costruttore 2 (Linea) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

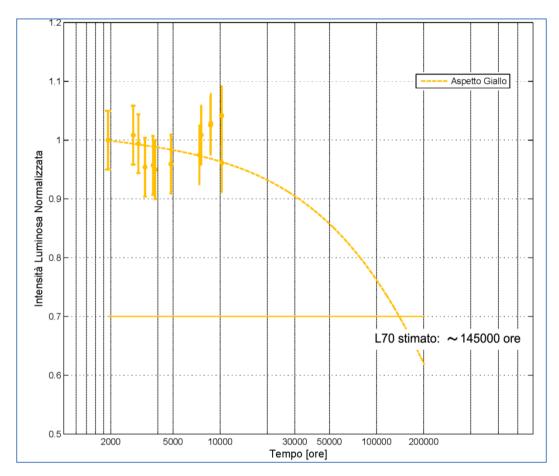


Figura 7-44 Segnale Costruttore 2 (Linea) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

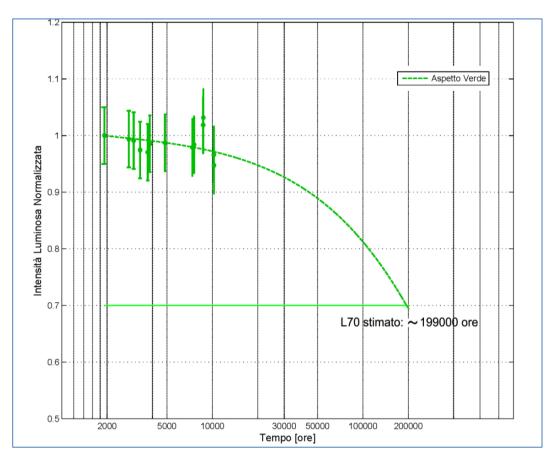


Figura 7-45 Segnale Costruttore 2 (Linea) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

## 7.2.2.3 Segnali Costruttore 3

La Figura 7-46 mostra, per il segnale del Costruttore 3 attivato con la sequenza di stazione (20 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 2 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità della radiazione in funzione del tempo. Per 10'000 ore di funzionamento del segnale si hanno circa 8334 ore di accensione dei LED Rossi, 833 ore di accensione dei LED Gialli e 833 ore dei

LED Verdi. Con questa sequenza si dovrebbe riscontrare degrado dei LED rossi e radiazione stabile per i LED Gialli e Verdi.

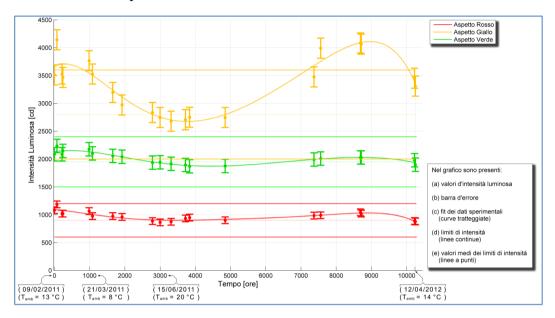


Figura 7-46 Segnale Costruttore 3 (Stazione) - Intensità di emissione in funzione del tempo.

Come per gli altri costruttori, la Figura 7-46 mostra che l'aspetto Giallo, per particolari temperature d'esercizio, non rispetta le prescrizioni RFI.

La Figura 7-47 mostra, per il segnale attivato con la sequenza di linea (2 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 10 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità della radiazione in funzione del tempo. Per 10'000 ore di funzionamento del segnale si hanno circa 1428 ore di accensione dei led rossi, 1428 ore di accensione dei led gialli e 7144 ore dei led verdi. Con questa sequenza si dovrebbe riscontrare degrado dei LED Verdi superiore a quello dei LED Rossi e Gialli.

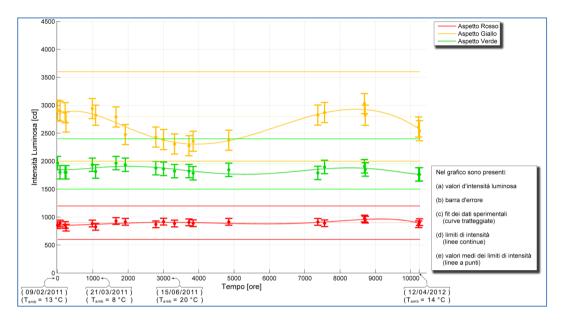


Figura 7-47 Segnale Costruttore 3 (linea) - Intensità di emissione in funzione del tempo.

I grafici presentati nelle Figura 7-46 e Figura 7-47 sono inutilizzabili per la determinazione della vita media dei segnali; la variazione d'intensità legata alla temperatura maschera eventuali variazioni d'intensità legate al tempo di funzionamento. Pertanto, al fine di valutare il decadimento della radiazione emessa con il tempo, le misure d'intensità sono state normalizzate a +25 °C attraverso la funzione  $G_A(T_{LED})$ .

La Figura 7-48 mostra, per il segnale del Costruttore 3 attivato con la sequenza di stazione (20 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 2 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità della radiazione in funzione del tempo normalizzata a +25 °C.

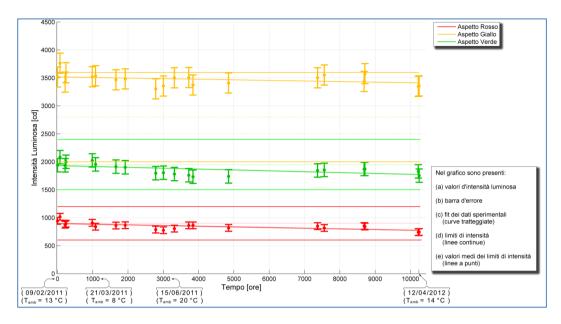


Figura 7-48 Segnale Costruttore 3 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

La Figura 7-48 mostra la "classica" perdita di efficienza luminosa iniziale dei LED. Osservando la Figura 7-48 si vede che le intensità si stabilizzano dopo circa 3.000 ore di funzionamento.

La Figura 7-49 mostra, per segnale del Costruttore 3 attivato con la sequenza di stazione (20 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 2 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità normalizzata a +25 °C per l'intervallo di tempo compreso tra 3'000÷10'000 ore di funzionamento.

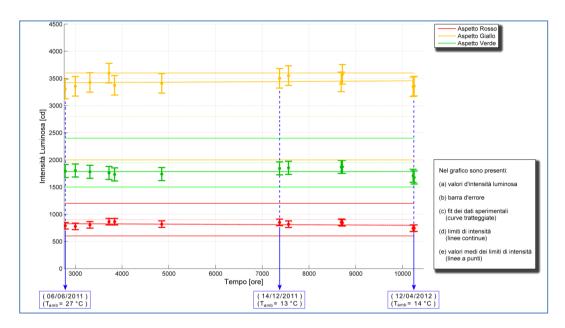


Figura 7-49 Segnale Costruttore 3 (Stazione) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Osservando la Figura 7-49 si nota che nell'intervallo di tempo  $3.000 \div 10.000$  ore non si riscontrano "osservabili" variazioni dell'intensità di emissione. Considerando le incertezze di misura e l'approssimazione della stima della funzione  $G_A(T_{LED})$  è possibile affermare che il segnale presenta una vita media, certamente, superiore a 60.000 ore.

Utilizzando la relazione (7.1), è possibile effettuare un'estrapolazione a lungo termine dei dati sperimentali. Con questa estrapolazione si ottengono, per i vari aspetti, i grafici di Figura 7-50, Figura 7-51 e Figura 7-52.

Queste previsioni a lungo termine mostrano che, con alta probabilità, la vita utile del segnale è "significativamente" superiore a 60'000 ore.

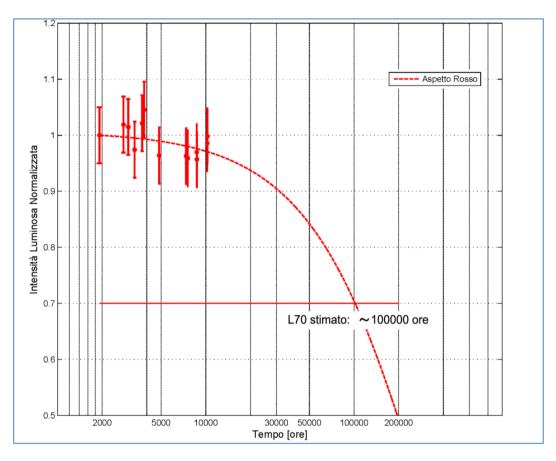


Figura 7-50 Segnale Costruttore 3 (Stazione) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

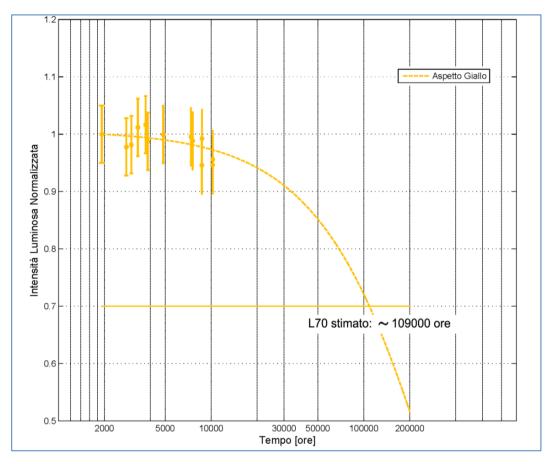


Figura 7-51 Segnale Costruttore 3 (Stazione) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

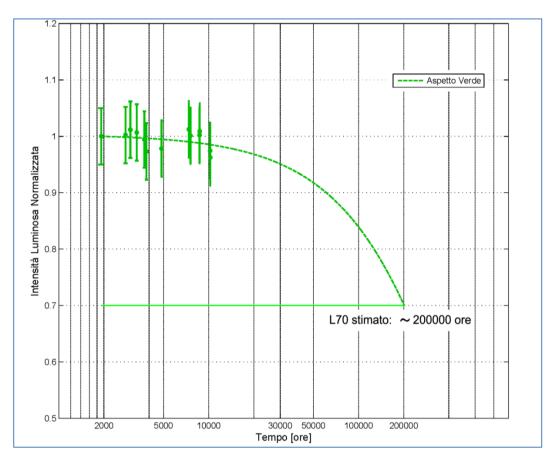


Figura 7-52 Segnale Costruttore 3 (Stazione) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

La Figura 7-53 mostra l'intensità normalizzata a +25 °C della radiazione in funzione del tempo del segnale attivato con la sequenza di linea (2 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 10 minuti acceso l'aspetto Verde). La normalizzazione è stata effettuata tramite una stima teorico/sperimentale delle funzioni  $G_A(T_{LED})$ .

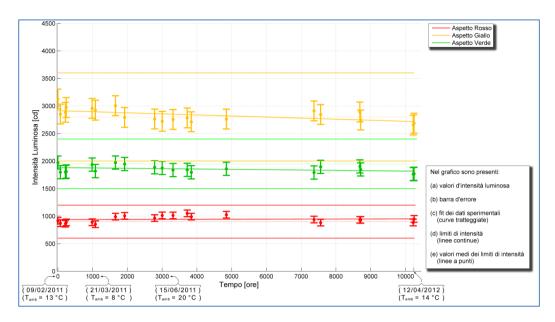


Figura 7-53 Segnale Costruttore 3 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Anche in questo caso, si nota la perdita iniziale dell'efficienza dei LED; i segnali stabilizzano la propria intensità dopo circa 3'000 ore di funzionamento.

La Figura 7-54 mostra, per segnale del Costruttore 3 attivato con la sequenza di linea (2 minuti acceso l'aspetto Rosso; 2 minuti acceso l'aspetto Giallo; 10 minuti acceso l'aspetto Verde), l'intensità normalizzata a +25 °C per l'intervallo di tempo compreso tra 3'000÷10'000 ore di funzionamento.

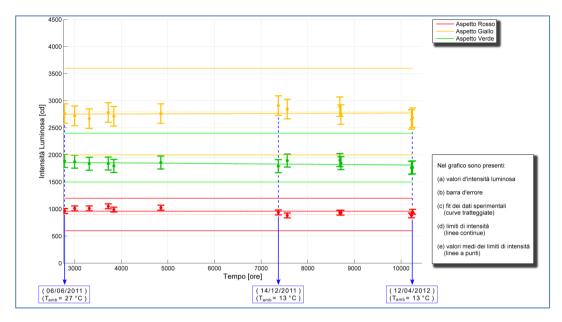


Figura 7-54 Segnale Costruttore 3 (Linea) - Intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

Così come osservato per il segnale attivato con sequenza di stazione, anche in questo caso non si riscontrano "osservabili" variazioni dell'intensità di emissione. Utilizzando la relazione (7.1), è possibile effettuare un'estrapolazione a lungo termine dei dati sperimentali. Con questa estrapolazione si ottengono, per i vari aspetti, i grafici di Figura 7-55, Figura 7-56 e Figura 7-57.

Queste previsioni a lungo termine mostrano che, con alta probabilità, la vita utile del segnale è "significativamente" superiore a 60.000 ore.

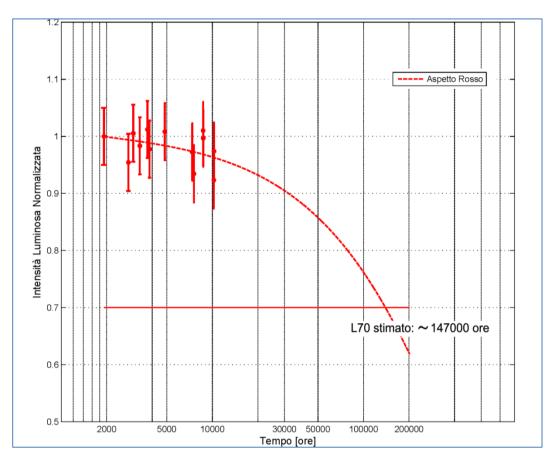


Figura 7-55 Segnale Costruttore 3 (Linea) aspetto Rosso – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

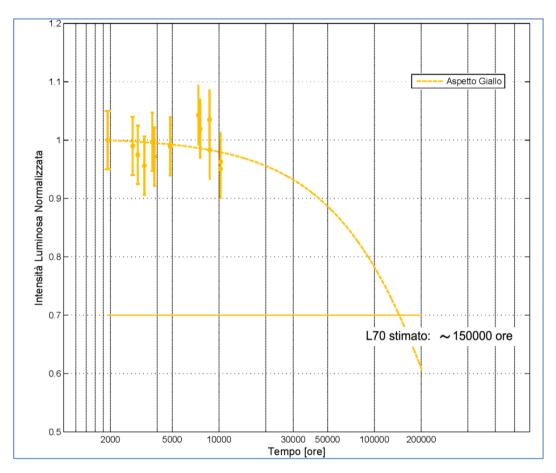


Figura 7-56 Segnale Costruttore 3 (Linea) aspetto Giallo – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25  $^{\circ}$ C, in funzione del tempo.

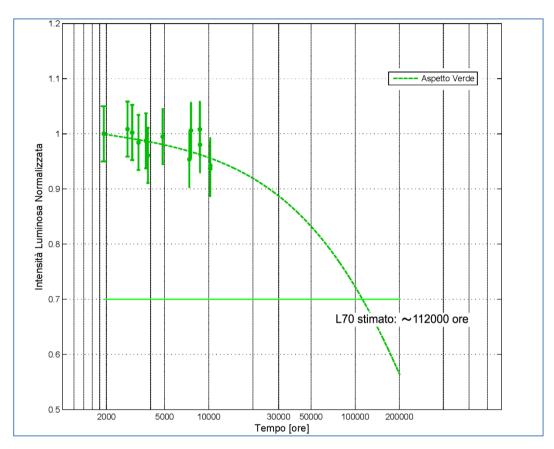


Figura 7-57 Segnale Costruttore 3 (Linea) aspetto Verde – Estrapolazione a lungo termine dei valori d'intensità di emissione, normalizzata a 25 °C, in funzione del tempo.

Considerazioni 340

## 7.3 Considerazioni

La prova sperimentale e i risultati mostrati ci hanno permesso di osservare la complessità della stima del tempo di vita di dispositivi, quali sono i LED, che presentano una mortalità di tipo non funzionale. Come indicano le nuove norme, presentate lungo la nostra trattazione, il grado di incertezza dei metodi di estrapolazione dei dati non consente di effettuare una stima efficace. Nel caso in studio inoltre, la natura aleatoria del clima e l'eccessiva dinamica della temperatura, causa principale del degrado dei LED, determina un ulteriore grado di incertezza.

In particolare, non ci sono studi in letteratura di tipo dinamico rispetto alla temperatura del tempo di vita di questi dispositivi: il degrado dipende dalla temperatura operativa media o è fortemente influenzata dai picchi di temperatura a cui sono sottoposti i dispositivi? La fisica che determina il degrado della regione attiva dei LED sembrerebbe avvalorare la seconda ipotesi (il calore si comporta da catalizzatore per i fenomeni diffusivi e di degrado) aumentando l'incertezza delle previsioni di "mortalità".

Tuttavia le misurazioni mostrate nei precedenti paragrafi ci hanno permesso di osservare il degrado "iniziale" dell'intensità luminosa, dovuto a una lieve ricottura degli strati di semiconduttore che formano i LED stessi. Questo degrado è compreso tra 0÷20% del valore iniziale e benché i segnali tendono a stabilizzarsi dopo circa 3'000 ore di funzionamento, questo fenomeno invita a porre attenzione all'intensità iniziale con cui vengono "collaudai" i segnali. Ad esempio il segnale del Costruttore 1 alimentato con sequenza stazione presentava inizialmente un

intensità di emissione conforme alla norma di riferimento, tuttavia dopo le prime 3000 ore di funzionamento l'aspetto rosso è risultato fuori norma.

I dati raccolti sono sufficienti, in accordo con le normative internazionali vigenti, ad affermare che la vita utile dei segnali (sotto il profilo dell'emissione dell'intensità luminosa) è certamente superiore a 60'000 ore; questo risultato è valido sia con funzionamento con frequenza di linea sia con funzionamento con frequenza di stazione.

La stima delle 60.000 ore di vita media è stata ottenuta:

- Ipotizzando segnali la cui intensità luminosa, alla massima temperatura di esercizio, non sia inferiore a 600 cd per l'aspetto Rosso, a 2000 cd per l'aspetto Giallo e 1500 cd per l'aspetto Verde.
- Ipotizzando una diminuzione dell'intensità luminosa pari all'errore di misura (poiché le nostre misurazioni non hanno individuato variazioni, sicuramente le eventuali variazioni presenti sono inferiori all'incertezza di misura).
- In accordo alla norma TM-21-11, il tempo di vita utile è conforme a 6 volte l'intervallo di test.

Le estrapolazioni a lungo termine, utilizzando l'equazione (7.1) conforme al modello 9 della norma TM-21-11, tuttavia ci permette di affermare cha la vita media sia "significativamente" superiore alle 60'000 ore; con questo modello di estrapolazione le vite utili risultano comprese tra 100'000÷200'000 ore.

Conclusioni 342

## Capitolo 8 Conclusioni

Il presente lavoro di ricerca è incentrato sull'applicazione dei LED all'interno di un importante, benché di "nicchia", settore illuminotecnico: il segnalamento.

Come abbiamo sottolineato più volte, l'intero mercato illuminotecnico attualmente è "sconvolto" dall'ingresso di questo nuovo dispositivo. Le sue grandi potenzialità come sorgente luminosa sono sotto gli occhi di tutti indicandola come la fonte luminosa più apprezzata sia dai produttori sia dagli utilizzatori finali.

Tuttavia, l'innovazione tecnica della tecnologia LED impone rinnovamento anche nelle metodologie di progettazione degli apparati. La dipendenza delle proprietà ottiche di questa nuova sorgente alla temperatura è forse la più importante novità che ha interessato tale mercato nell'ultimo secolo. I classici metodi d'illuminazione non sono in alcun modo influenzati dalle escursioni termiche, e questo è forse il motivo per cui si possono trovare sul mercato apparati con caratteristiche ottiche dinamiche non perfettamente in linea con le normative vigenti.

L'instabilità delle proprietà ottiche dei LED, tra cui ricordiamo lo shift colorimetrico e la variabilità di efficienza di trasduzione elettrica/luminosa, diventa fortemente critica nel settore del segnalamento. In quest'ultimo, come abbiamo evidenziato nel capitolo 3, le disposizioni normative degli apparati di segnalamento ricercano la cosiddetta "sicurezza della sensazione", cioè cercano di

Conclusioni 343

definire sorgenti luminose prive di ambiguità interpretative. L'instabilità delle sorgenti, dunque, può risultare deleteria e potenzialmente pericolosa.

Nei capitoli 4 e 5 si è mostrato come questa problematica sia ben sentita dagli addetti ai lavori. Le criticità osservate sperimentalmente e l'importante fermento tecnologico nella ricerca di stabilizzare le proprietà ottiche degli apparati, che fanno uso dei LED, sono a testimoniarne l'importanza.

In quest'ambito si inserisce il lavoro di ricerca qui esposto, il capitolo 6 descrive le soluzioni che sono state sviluppate. Di fatto si è dimostrato, attraverso la descrizione di un nuovo approccio progettuale, che tali dispositivi luminosi possono esser abilmente utilizzati nello sviluppo di illuminanti otticamente stabili.

La concezione di nuovi driver di alimentazione, variabili e dipendenti dalla temperatura "sentita" dall'apparato ottico, permette facilmente di realizzare sistemi di segnalamento che presentano intensità del fascio luminoso stabile. Inoltre l'utilizzo di tecniche di color mixing, associate alla tecnica precedente, permette di eliminare completamente qualsiasi tipo di instabilità nel funzionamento globale dell'apparato. Inoltre, questo nuovo approccio progettuale, consente maggiore libertà nella scelta dei LED che realizzano l'impianto ottico; ampliare le possibilità di scelta ha grande valenza a livello industriale.

Infine, l'approccio denominato "Controllo sulla Temperatura" (descritto nel § 6.2, dove si ipotizza un intervento sulle caratteristiche meccaniche e fisiche dei case degli apparati di segnalamento, che definiscono l'iterazione tra temperatura ambiente e temperatura sentita dai LED), definisce un innovativo raggio d'azione

Conclusioni 344

che consente di intervenire anche su apparati già realizzati che presentano criticità, consentendo un netto miglioramento delle stabilità fotometrica.

Nel nostro studio ci si è inoltre interessati a un importante parametro qualitativo degli impianti di segnalamento: il tempo di vita. Attraverso la realizzazione di un innovativo test sperimentale sugli apparati a nostra disposizione si è cercato di fornire una risposta a una delle domande più speculate in questo settore, dove logiche commerciali avvolte hanno la meglio sui processi divulgativi. Le misure sperimentali tuttavia ci hanno permesso di apprezzare la bontà delle caratteristiche di questi dispositivi, verificando come il tempo di vita sia una delle caratteristiche migliori di questa nuova tecnologia illuminotecnica, ma evidenziando ulteriormente come le instabilità delle proprietà ottiche dei LED possano determinare comportamenti globali degli apparati non accettabili. Infatti come mostrano le misure sperimentali, a temperature ambienti non estreme gli apparati possono risultare fuori norma.

In conclusione, la presente ricerca ha permesso di individuare e "sperimentare" i grandi punti di forza della tecnologia LED e come un'attenta realizzazione tecnica può permettere di realizzare apparati illuminotecnici performanti e con prestazioni nettamente migliorative rispetto alle classiche metodologie di realizzazione, che ancora rappresentano la fetta importante di mercato.

## Bibliografia

- [1] Suozzo M., Borg N., Frering D., Lucas M., Vrabel P.; "LED Traffic Lights: Signaling a Global Transformation", Proc. American Council for an Energy Efficient Economy Summer Study on Energy Efficiency in Buildings (ACEEE), Panel 6: Market Transformation, pp. 6.391-6.402, 2000.
  - http://www.eceee.org/conference\_proceedings/ACEEE\_buildings/2000/Panel\_6/p6\_34/paper.
- [2] Nobuo W., "Recent LED display devices," Japanese Railway Engineering, 119, 6-8 (1992).
- [3] Navigant Consulting Inc., Report: Energy Savings Estimates of Light Emitting Diodes in Niche Lighting Applications, Building Technologies Program, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy, Nov. 2003.
  - http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/niche\_final\_re\_port.pdf
- [4] Hong E., Narendran N.; "A Method for Projecting Useful Life of LED Lighting Systems," 3rd International Conference on Solid State Lighting, Vol. 5187, 2004, pp. 93-99. doi:10.1117/12.509682

- [5] Zheludev N.; "The Life and Times of the LED—A 100- Year History," Nature Photonics, Vol. 1, No. 4, 2007, pp. 189-192. doi:10.1038/nphoton.2007.34
- [6] Lewin I., Corbin J., Janoff M.; "The Application of Light Emmitting Diodes to Traffic Signals", Journal of Illuminating Engineering Society, Winter 1997. http://www.ies.org/PDF/100Papers/055.pdf
- [7] Barton H.; "LED CLUSTER TECHNOLOGY IN RAILWAY SIGNALS", Proceedings of the International Conference and Exhibition Railway Engineering 2003, Held London, UK, 30 APRIL 1 MAY 2003.
- [8] Bullough J. D., Snyder J. D., Smith A. M., Klein T. R.; *Replacement Processes for Light Emitting Diode (LED) Traffic Signals*, Final Report for National Cooperative Highway Research Program, August 2009.
- [9] Schubert E. F., 2006, *LIGHT-EMITTING DIODES*, 2° ed., New York: Cambridge University Press. Cap. 5.
- [10] Schubert E. F., 2006, *LIGHT-EMITTING DIODES*, 2° ed., New York: Cambridge University Press. Cap. 1.
- [11] Dupuis R.D., Krames, M.R.; , "History, Development, and Applications of High-Brightness Visible Light-Emitting Diodes," Lightwave Technology, Journal, vol.26, no.9, pp.1154-1171, May 1, 2008 doi: 10.1109/JLT.2008.923628
- [12] Gugliermetti F., Bisegna F., Barbalace M., (Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento DIAEE), *STATO DELL'ARTE DEI LED (LIGHT EMITTING DIODES)*, 2011. Disponibile su: <a href="http://www.enea.it/it/Ricerca\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-">http://www.enea.it/it/Ricerca\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-</a>

<u>elettrico/illuminazione-pubblica/rds-197.pdf</u> [ultima data di accesso 23/12/2012].

- [13] Rudan M., Tavole di Microelettronica, Pitagora Tecnoprint, 3ª Ed., 2001.
- [14] Schubert E. F., 2006, *LIGHT-EMITTING DIODES*, 2° ed., New York: Cambridge University Press. Cap. 2
- [15] Toigo F., 2011, *Appunti di Struttura della Materia*, Padova. Disponibile su:

  http://www.padova.infm.it/toigo/didattica/struttura/Appunti/CAppunti.pdf
  - [ultima data di accesso 23/12/2012].
- [16] Pappalardo M., 2001, *Elettronica. Fondamenti dei dispositivi e dei circuiti*, col. Ingegneria elettrica, Franco Angeli.
- [17] Shah J. M., Li Y.-L., Gessmann Th., Schubert E. F., 2003; "Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors n>>2.0 in AlGaN/GaN p-n junction diodes." J. Appl. Phys. 94, 2627 (2003). doi: 10.1063/1.1593218.
- [18] Mottier P., 2009. *LEDs for Lighting Applications*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc.
- [19] Schubert E. F., 2006, *LIGHT-EMITTING DIODES*, 2° ed., New York: Cambridge University Press. Cap. 4.
- [20] Polyakov A. Y., Smirnov N. B., Govorkov A. V., Kim J., Luo B., Mehandru R., Ren F., Lee K. P., Pearton S. J., Osinsky A. V., Norris, P. E.; "Enhanced tunneling in GaN/InGaN multi-quantum-well heterojunction diodes after short-term injection annealing," J. Appl. Phys., vol.91, no.8, pp.5203-5207, April 2002. doi: 10.1063/1.1465119

- [21] Franssen G., Litwin-Staszewska E., Piotrzkowski R., Suski T., Perlin P.; "Optical and electrical properties of homoepitaxially grown multiquantum well InGaN/GaN light-emitting diodes," J. Appl. Phys., vol.94, no.9, pp.6122-6128, Nov 2003. doi: 10.1063/1.1616637
- [22] Lasance C.J.M.; "On the standardisation of thermal characterisation of LEDs Part I: Comparison with IC packages and proposal for action," Thermal Inveatigation of ICs and Systems, 2008. THERMINIC 2008. 14th International Workshop, pp.208-212, 24-26 Sept. 2008. doi: 10.1109/THERMINIC.2008.466991
- [23] Poppe A., Lasance C.J.M.; "On the standardisation of thermal characterisation of LEDs Part II: Problem definition and potential solutions," Thermal Inveatigation of ICs and Systems, 2008. THERMINIC 2008. 14th International Workshop, pp.213-219, 24-26 Sept. 2008. doi: 10.1109/THERMINIC.2008.4669911
- [24] Todorov D. G., Kapisazov L. G.; "LED Thermal Management", ELECTRONICS' 2008, Sozopol, 24-26 September 2008, pp. 139-144.
- [25] Krames M.R., Shchekin O.B., Mueller-Mach R., Mueller G.O., Ling Zhou, Harbers G., Craford M.G.; "Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting," Display Technology, Journal, vol.3, no.2, pp.160-175, June 2007. doi: 10.1109/JDT.2007.895339
- [26] Hangleiter A.; "Optical properties of nitride heterostructures", Volume 0, Issue 6, pages 1816–1834, September 2003. doi: 10.1002/pssc.200303127

[27] Zhang J., Tansu N.; "Spontaneous Emission Characteristics of InGaN Quantum Wells Light-Emitting Diodes on Ternary InGaN Substrates", Proceedings of SPIE 8278, 827809 (2012).

- [28] Gessmann Th., Schubert E. F., "High-efficiency AlGaInP light-emitting diodes for solid-state lighting applications", J. Appl. Phys. 95, 2203 (2004); http://jap.aip.org/resource/1/japiau/v95/i5/p2203\_s1.
- [29] Guo X., Schubert E. F.; "Current crowding in GaN/InGaN light emitting diodes on insulating substrates," J. Appl. Phys., vol.90, no.8, pp.4191-4195, Oct 2001. doi: 10.1063/1.1403665
- [30] Vurgaftman I., Meyer J. R., Ram-Mohan L. R.; "Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys". J. Appl. Phys. 89, 5815 (2001); doi: 10.1063/1.1368156
- [31] Cheong M. G., Suh E.-K., Lee H.J.; "Properties of InGaN/GaN quantum wells and blue light emitting diodes", Journal of Luminescence, Volume 99, Issue 3, October 2002, Pages 265-272, ISSN 0022-2313, doi:10.1016/S0022-2313(02)00345-9.
- [32] Ponce F. A., Srinivasan S., Bell A., Geng L., Liu R., Stevens M., Cai1 J., Omiya H., Marui H., Tanaka S.; "Microstructure and electronic properties of InGaN alloys", Volume 240, Issue 2, pages 273–284, November 2003. doi: 10.1002/pssb.200303527.
- [33] Noad Asaf Shapiro, 2002. *Radiative transitions in InGaN quantum-well structures*. Prova finale in "Engineering Materials Science and Mineral Engineering". University of California, Berkeley.

[34] Mukai T., Yamada M., Nakamura S.; "Characteristics of InGaN-Based UV/Blue/Green/Amber/Red Light-Emitting Diodes". Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) pp. 3976-3981. doi: 10.1143/JJAP.38.3976

- [35] Ott M.; "Capabilities and reliability of LEDs and laser diodes". What's New in Electronics 2000; 20, no. 6.
- [36] Barton D.L., Osinski M., Perlin P., Helms C.J., Berg N.H.; "Life tests and failure mechanisms of GaN/AlGaN/InGaN light emitting diodes," Reliability Physics Symposium, 1997. 35th Annual Proceedings., IEEE International, pp.276-281, 8-10 Apr 1997. doi: 10.1109/RELPHY.1997.584273
- [37] Manyakhin F., Kovalev A., Yunovich A. E.; "Aging mechanisms of InGaN/AlGaN/GaN light emitting diodes operating at high currents," MRS Internet J. Nitride Semicond. Res., vol. 3, p. 53, 1998
- [38] Meneghesso G., Levada S., Zanoni E., Podda S., Mura G., Vanzi M., Cavallini A., Castaldini A., Du S., Eliashevich I.; "Failure modes and mechanisms of DC-aged GaN LEDs," Phys. Stat. Sol. (a), vol. 194, no. 2, pp. 389–392, 2002. doi: 10.1002/1521-396X(200212)194:2<389::AID-PSSA389>3.0.CO;2-O
- [39] Grillot P.N., Krames M.R., Hanmin Zhao, Seng Hup Teoh; "Sixty Thousand Hour Light Output Reliability of AlGaInP Light Emitting Diodes," IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, vol.6, no.4, pp.564-574, (2006). doi: 10.1109/TDMR.2006.887416
- [40] Rossi F., Pavesi M., Meneghini M., Salviati G., Manfredi M. et al.; "Influence of short-term low current dc aging on the electrical and optical

properties of InGaN blue light-emitting diodes" J. Appl. Phys. 99, 053104 (2006); http://dx.doi.org/10.1063/1.2178856

- [41] Bürmen M., Pernuš F., Likar B.; "Prediction of intensity and color degradation of LEDs," Proc. SPIE 6486, Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications XI, 64860M (February 13, 2007); doi:10.1117/12.698987
- [42] Altieri-Weimar P., Jaeger A., Lutz T., Stauss P., Streubel K., Thonke K., Sauer R.; "Influence of doping on the reliability of AlGaInP LEDs", Journal Article 2008 0957-4522, Journal of Materials Science: Materials in Electronics 19, n. 1, p: 338-341, Springer US. doi: 10.1007/s10854-008-9575-7
- [43] Meneghini M., Tazzoli A., Mura G., Meneghesso G., Zanoni E.; "A Review on the Physical Mechanisms That Limit the Reliability of GaN-Based LEDs," IEEE Transactions on Electron Devices, vol.57, no.1, pp.108-118, Jan. 2010. doi: 10.1109/TED.2009.2033649
- [44] Vázquez M., Núñez N., Nogueira E., Borreguero A., "Degradation of AlInGaP red LEDs under drive current and temperature accelerated life tests", Microelectronics Reliability, Volume 50, Issues 9–11, September– November 2010, Pages 1559-1562, ISSN 0026-2714. doi: 10.1016/j.microrel.2010.07.057.
- [45] IES Testing Procedures Committee, IES LM-80-08, IES Approved Method for Measuring Lumen Maintenance or LED Light Sources, New York; Illuminating Engineering Society of North America, 2008.
- [46] DR03: LM-80 Test Report, Philips; 2010

[47] IES Testing Procedures Committee, IES TM-21-11, Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources, New York; Illuminating Engineering Society of North America, 2011.

- [48] ENERGY STAR® Program Requirements (Eligibility Criteria Version 1.0, Draft 2).
- [49] Adrian W.; "Uber die Sichbarkeit von Stassenverkehrs Signalen (On the Visibility of traffic Signals)," apparso su Lichttechnik, vol. 15, n. 3, 1963.
- [50] Jainski P., Schmidt-Clausen J.; (1967). "Uber den Einfluss der Schwellenleuchtdicten auf das Erkennen Farbiger Signallichter (The Effect of Intensity on the Perception of Colored Signal Lights)." *Lichttechnik*, 19(1).
- [51] Cole B.L., Brown B.; "Optimum Intensity of Red Traffic Signal Lighting for normal and Protanopic Observers", Journal of the Optical Society of America, 56(4), 1966.
- [52] Cole B.L., Brown B.; "Specification of Road Traffic Signal Light Intensity", Human Factors, 10(3), pp. 245-254, 1968
- [53] Bullough J. D., Boyce P. R., Bierman A., Conway K. M., Huang K., O'Rourke C. P., Hunter C. M., Nakata A.; "Luminous Intensity for Traffic Signals: A Scientific Basis for Performance Specifications", Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York 12180-3590, 30th November 1999. CIE Publ. n. 15.2, Colorimetry, Second Edition, 1986.

[54] Fischer A., Cole B.; "The Photometric Requirements of Vehicular Traffic Signal Lanterns", Paper No. A46, Australian Road Research Board Proceedings, 7(5), pp. 246-265, 1974.

- [55] Cole B.L., Brown B.; "Optimum Intensity of Red Traffic Signal Lighting for normal and Protanopic Observers", Journal of the Optical Society of America, 56(4), 1966.
- [56] Boisson H., Pages R.; "Determination du Seuil de Perception des Signaux Routiers (Determination of the Visual Perception of Roadway Signals)", Proceedings of the Commission Internationale De L'Éclairage (CIE) 15th Session, Publication No. 11D, 1964.
- [57] CIE Publ. n. 15.2, Colorimetry, Second Edition, 1986.
- [58] Transportation Cromaticity Standard, Disponibile su: <a href="http://www.dialight.com/Assets%5CApplication">http://www.dialight.com/Assets%5CApplication</a> Notes%5CSignaling%5 <a href="http://www.dialight.com/Assets%5CApplication">CTransportation%20Chromaticity%20Standards.pdf</a> [ultima data di accesso 03/03/2013].
- [59] CIE (Commission Internationale De L'Éclairage), *A Guide for the Design of Road Traffic Lights*, Publication No. 79, 1st Edition, 1988.
- [60] Patrick M., "Sun phantom led traffic signal", US 6509840, 21-01-2003.
- [61] Patrick M., "Sun phantom led traffic signal", US 6731222, 04-05-2004.
- [62] CEN UNI EN 12368:2006, Traffic control equipment Signal heads.
- [63] UNI 9296 (UNIFER), Colore dei segnali luminosi ferroviari, Ottobre 1988.

[64] ITE, Vehicle Traffic Control Signal Heads (VTCSH) and VTCSH Part 2: LED Vehicle Signal Modules, Institute of Transportation Engineers, Washington, DC.

- [65] Fedele L., Furlanetto L., Saccardi D.; *Progettare e gestire la manutenzione*, McGraw-Hill, Milano 2004.
- [66] MILITARY HANDBOOK RELIABILITY PREDICTION OF ELECTRONIC EQUIPMENT, MIL-HDBK-217F dicembre 1991.
- [67] U.S. Department of Energy (DOE), "2012 Project Portfolio: Solid-State Lighting", February 2012.
- [68] Schubert E. F., 2006, *LIGHT-EMITTING DIODES*, 2° ed., New York: Cambridge University Press. Cap. 19-21.
- [69] Muthu S., Gaines J.; "Red, green and blue LED-based white light source: implementation challenges and control design," Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the , vol.1, pp. 515-522 vol.1, 12-16 Oct. 2003. doi: 10.1109/IAS.2003.1257549
- [70] MRGBiCS, Integral RGB Sensor LCC8, MAZeT GmbH.
- [71] Application Note Osram, "Driving LEDs with a PIC Microcontroller", November 24, 2003.
- [72] Application Note Osram, "Color Stabilization of RGB LEDs in an LED Backlighting Example", January 15, 2004.
- [73] Hochstein P. A., Troy MI, Jul 21, 1998; US PATENT: 5783909, "Maintaining LED luminous intensity".

[74] Chen-Ho Wu, Han-Jen Chuang, August 29, 2000; US PATENT: 6111739, "LED power supply with temperature compensation".

- [75] Dussureault G., Montreal (CA), May 22, 2001; US PATENT: 6236331 B1, "LED traffic light intensity controller".
- [76] Sam Yonghong Guo, Russel K. J., Feb. 17, 2004; US PATENT: 6693394 B1, "Brightness compensation for LED lighting based on ambient temperature".
- [77] Ta-Yung Yang, Jul. 17, 2007; US PATENT: 7245090 B2, "Switching LED driver with temperature compensation to Program LED current".
- [78] Cottrell B., Aug 18, 2011; US PATENT: 2011/0199013 A1, "Constant Temperature LED Driver Circuit".
- [79] OptoSemicondutors OSRAM, LS E6SF, LR E6SF, LA E6SF, LO E6SF, LY E6SF, datasheet.
- [80] Groh A., Brückner S., Quoc Khanh T.; "The temperature-dependent changes of the photometrical and colorimetrical parameters of today high power LEDs", Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL 2007 Munchen), 622-629 (2007).
- [81] Chia-Hung Wang, Tai-Ping Sun, Hsiu-Li Shieh, Chiang-Der Chang, Shiang-Feng Tang; "A novel automatic power control system for a light emitting diode driving system," Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conference, pp.2232-2235, 25-27 May 2009. doi: 10.1109/ICIEA.2009.5138596
  - [82] Chia-Hung Wang, Tzu-Lun Hung, Tai-Ping Sun; "PWM photo-power control for light-emitting diode lighting system without photo-diode

detection," 2010 the 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), vol., no., pp.1313-1316, 15-17 June 2010. doi: 10.1109/ICIEA.2010.5514937

- [83] S. Winder, *Power Supplies for LED Drivers*, Elsevier, 2008.
- [84] TLD5085EJ, aplication datasheet, Infineon® Power LED Driver, 16 Dec. 2009.
- [85] LED Drivers for High-Brightness Lighting, application note, National Semiconductor, vol. 1 2011.
- [86] LED Reference Design Cookbook: Multiple Application for LED Lighting, application note, Texas Instruments, 2010.
- [87] EPCOS, Application Notes, "SMD NTC Thermistors", June 2011
- [88] Garcia J., Lamar D.G., Dalla-Costa M.A., Alonso J.M., Rico M.S.; "An estimator of luminous flux for enhanced control of high brightness LEDs," Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE, pp.1852-1856, 15-19 June 2008. doi: 10.1109/PESC.2008.4592213
- [89] Stitt R.M., Kunst D.; "DIODE-BASED TEMPERATURE MEASUREMENT", Burr Brown, sept. 1991, Application bulletin.
- [90] CUFFIA PER GRUPPO SEMAFORICO CAT.825/462 DIS. 857/04N.T. IS 352 ED91, Omnia Plastica SpA.
- [91] Frank Kreith, *Principi di trasmissione del calore*, Liguori Editore; collana: Termodinamica applicata, Trasmissione del calore, Condizionamenti ambientali.

[92] Bondi, Stefanizzi, "Appunti di Fisica Tecnica (2001-02)". Disponibile su: <a href="http://digilander.libero.it/fisicatecnica/Appunti%202001/parte7\_pareti.pdf">http://digilander.libero.it/fisicatecnica/Appunti%202001/parte7\_pareti.pdf</a> [ultima data di accesso 06/03/2013].