



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE  
TESI DI LAUREA MAGISTRALE  
INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

PROGETTAZIONE E  
REALIZZAZIONE DI SISTEMI DI  
ILLUMINAZIONE LED ADATTIVI

RELATORE: Ch.mo Prof. Enrico Zanoni

CORRELATORE: Dr. Stefano Bonora, Dr. Matteo Meneghini

LAUREANDO: *Michele Piragnolo*

Padova, 17 aprile 2012



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>1</b>
<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>1 Illuminotecnica e spettro elettromagnetico</b>	<b>5</b>
1.1 Introduzione . . . . .	5
1.2 Fotometria . . . . .	5
1.2.1 Efficienza luminosa ed efficacia luminosa . . . . .	9
1.3 Spettro elettromagnetico . . . . .	10
1.3.1 Colori . . . . .	13
1.4 Percezione e occhio umano . . . . .	17
1.4.1 Linearità della visione umana . . . . .	19
<b>2 Ottica Geometrica</b>	<b>21</b>
2.1 Introduzione . . . . .	21
2.2 Riflessione e rifrazione . . . . .	21
2.2.1 Alcuni esempi applicativi . . . . .	23
2.3 Specchi . . . . .	24
2.4 Lenti . . . . .	26
2.4.1 Lenti sottili . . . . .	26
2.4.2 Combinazione di più lenti sottili . . . . .	28
2.5 Ottica adattiva . . . . .	29
<b>3 Piezoelettrici e fotostrizione</b>	<b>33</b>
3.1 I materiali dielettrici . . . . .	33
3.1.1 Materiali utilizzati . . . . .	34
3.2 Elettrostrizione, effetto piezoelettrico diretto e inverso . . . . .	35

3.2.1	Costanti e definizioni . . . . .	37
3.3	Attuatori piezoelettrici multistrato . . . . .	39
3.4	La fotostrizione . . . . .	41
3.4.1	Principali utilizzi . . . . .	42
3.5	Cenni storici . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Struttura e funzionamento del LED</b>	<b>45</b>
4.1	Evoluzione della tecnologia . . . . .	46
4.2	Semiconduttori, teoria delle bande e drogaggio . . . . .	46
4.3	Giunzione P-N . . . . .	50
4.4	Emissione luminosa . . . . .	51
4.5	Proprietà ottiche . . . . .	53
4.5.1	Efficienza quantica esterna . . . . .	53
4.5.2	Spettro di emissione . . . . .	54
4.5.3	Cono di fuga della luce . . . . .	56
4.6	LED utilizzati . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Dispositivi</b>	<b>61</b>
5.1	Lenti deformabili . . . . .	61
5.1.1	Lente regolabile elettricamente . . . . .	63
5.1.2	Lenti regolabili manualmente . . . . .	64
5.2	Specchi deformabili . . . . .	66
<b>6</b>	<b>Sistema e misure effettuate</b>	<b>69</b>
6.1	Sistema considerato . . . . .	69
6.1.1	Modello matematico . . . . .	69
6.1.2	Simulazioni MATLAB . . . . .	71
6.1.3	Simulazioni ZEMAX . . . . .	76
6.1.4	Confronto tra le simulazioni . . . . .	80
6.1.5	Osservazioni . . . . .	86
6.2	Misure sperimentali . . . . .	86
6.2.1	Caratterizzazione del disco piezoelettrico . . . . .	87
6.2.2	Variazione dell'apertura numerica . . . . .	93
6.2.3	Prototipi del sistema di illuminazione progettato . . . . .	100
6.2.4	Osservazioni . . . . .	116

6.3 Sistema che utilizza il principio della fotostrizione . . . . .	118
<b>Conclusioni</b>	<b>123</b>
<b>A Angolo solido e steradiante</b>	<b>125</b>
<b>B Caratteristiche dei dispositivi</b>	<b>127</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>131</b>



# Elenco delle figure

1.1	Spettro elettromagnetico. . . . .	11
1.2	Suddivisione delle frequenze dello spettro elettromagnetico. . . . .	12
1.3	Triangolo dei colori. . . . .	14
1.4	Particolarità nel triangolo dei colori. . . . .	16
1.5	Occhio umano. . . . .	17
1.6	Funzione di sensibilità di coni e bastoncelli. . . . .	18
1.7	Photonic sensitivity of the human eye, $V(\lambda)$ [3]. . . . .	18
2.1	Riflessione e rifrazione. . . . .	22
2.2	Rifrazione con $n_2 > n_1$ . . . . .	24
2.3	Rifrazione con $n_2 < n_1$ . . . . .	24
2.4	Specchio concavo. . . . .	25
2.5	Doppio diottro. . . . .	26
2.6	Lenti convergenti. . . . .	28
2.7	Lenti divergenti. . . . .	28
3.1	Cristallo piezoelettrico (a) a riposo; (b) sottoposto ad una compressione; (c) sottoposto ad una trazione; (d) sottoposto ad una tensione continua positiva; (e) sottoposto ad una tensione continua negativa; (f) sottoposto ad una tensione alternata. . . . .	36
3.2	Sistema di coordinate utilizzato. . . . .	37
3.3	Schematic presentation of a ring bender [12]. . . . .	40
3.4	Ring bender actuation principle [12]. . . . .	40
3.5	Fotostrizione [13]. . . . .	41
3.6	Experimental setup for the determination of the characterization of the bending of the P(VDF-TrFE) strip [14]. . . . .	42
4.1	Rappresentazione circuitale di un diodo LED. . . . .	45

4.2	Rappresentazione schematica delle bande di energia. . . . .	48
4.3	Diagramma a bande di un semiconduttore drogato n [16]. . . . .	49
4.4	Diagramma a bande di un semiconduttore drogato p [16]. . . . .	49
4.5	Giunzione P-N [15]. . . . .	50
4.6	Curva caratteristica di un diodo. . . . .	51
4.7	Processi di: a) assorbimento, b) emissione spontanea, c) emissione stimolata. . . . .	52
4.8	Materiali impiegati nella produzione di sistemi LED [15]. . . . .	53
4.9	Spettro di emissione teorico di un LED. FWHM = 1.8 kT [18]. . . . .	55
4.10	The relative spectrum emission of a red AlGaAs LED , normalized to the peak emission at 25 C. [18] . . . . .	56
4.11	(a) Definition of the escape cone by the critical angle $c$ . (b) Area element $dA$ . (c) Area of calotte-shaped section of the sphere defined by radius $r$ and angle $c$ . [18] . . . . .	57
4.12	LED Dragon. [20] . . . . .	58
5.1	Principio utilizzato da optotune [21]. . . . .	62
5.2	Misura FWHM e angolo [21]. . . . .	63
5.3	Focale in funzione della corrente [22]. . . . .	64
5.4	Cross section of a bimorph mirror [28]. . . . .	67
6.1	Sistema utilizzato. . . . .	70
6.2	R vs focale della lente deformabile, per vari diametri. . . . .	72
6.3	R vs focale della lente deformabile, per vari valori di $f_c$ . . . . .	72
6.4	R vs focale prima lente. . . . .	73
6.5	R vs NA. . . . .	74
6.6	R vs altezza sorgente, per vari diametri. . . . .	75
6.7	R vs altezza sorgente, per diverse NA. . . . .	75
6.8	Struttura per la simulazione in ZEMAX. . . . .	76
6.9	R vs focale della lente deformabile, per vari diametri. . . . .	77
6.10	R vs focale della lente deformabile, per vari valori di $f_c$ . . . . .	77
6.11	R vs focale prima lente. . . . .	78
6.12	R vs NA. . . . .	78
6.13	R vs altezza sorgente, per vari diametri. . . . .	79
6.14	R vs altezza sorgente, per diverse NA. . . . .	79



6.15 Confronto focale lente deformabile, dato il diametro. . . . .	80
6.16 Confronto focale lente deformabile, data $f_c$ . . . . .	81
6.17 Confronto focale prima lente. . . . .	82
6.18 Confronto NA. . . . .	83
6.19 Confronto altezza sorgente, dato il diametro. . . . .	84
6.20 Confronto altezza sorgente, dato NA. . . . .	85
6.21 Sistema per la caratterizzazione del piezoelettrico. . . . .	88
6.22 Disco piezoelettrico. . . . .	88
6.23 Ciclo d'isteresi, in radianti. . . . .	89
6.24 Ciclo d'isteresi della freccia. . . . .	90
6.25 Variazione del raggio di curvatura del piezo. . . . .	91
6.26 Variazione della focale. . . . .	92
6.27 Foto acquisite, sotto ogni coppia il diametro di apertura dell'iride, sorgente = 0.5 mm. . . . .	94
6.28 Confronto del rapporto per la sorgente di 0.5 mm. . . . .	94
6.29 Diagrammi polari con NA = 0.25 e NA = 0.48 rispettivamente. . . . .	95
6.30 Foto acquisite, sotto ogni coppia il diametro di apertura dell'iride, sorgente = 1 mm. . . . .	96
6.31 Confronto del rapporto per la sorgente di 1 mm. . . . .	96
6.32 Diagrammi polari con NA = 0.25 e NA = 0.48 rispettivamente. . . . .	97
6.33 Foto acquisite, sotto ogni coppia il diametro di apertura dell'iride, sorgente = 1.5 mm. . . . .	98
6.34 Confronto del rapporto per la sorgente di 1.5 mm. . . . .	98
6.35 Diagrammi polari con NA = 0.25 e NA = 0.48 rispettivamente. . . . .	99
6.36 Struttura delle lenti di Fresnel utilizzate [29]. . . . .	100
6.37 Sistema di misura acceso. . . . .	100
6.38 Sistema di misura lente A. . . . .	101
6.39 Foto lente A. Sotto ogni foto la tensione in Volt applicata al piezo. . . . .	102
6.40 Apertura del fascio in funzione della tensione applicata in orizzon- tale e verticale, lente A. . . . .	103
6.41 FWHM lente A. . . . .	104
6.42 Diagrammi polari, orizzontale e verticale, lente A. . . . .	105
6.43 Sistema di misura lente A. . . . .	106
6.44 Foto lente B. Sotto ogni foto la tensione in Volt applicata al piezo. . . . .	107

## *ELENCO DELLE FIGURE*

---

6.45	Apertura del fascio in funzione della tensione applicata in orizzontale e verticale, lente B. . . . .	108
6.46	FWHM lente B. . . . .	109
6.47	Diagrammi polari, orizzontale e verticale, lente B. . . . .	110
6.48	Sistema di misura lente C. . . . .	111
6.49	Foto lente C. Sotto ogni foto la tensione in Volt applicata al piezo. . . . .	112
6.50	Apertura del fascio in funzione della tensione applicata in orizzontale e verticale, lente C. . . . .	113
6.51	FWHM lente C. . . . .	114
6.52	Diagrammi polari, orizzontale e verticale, lente C. . . . .	115
6.53	Progetto del dispositivo di illuminazione. . . . .	117
6.54	Proiezione ortogonale del dispositivo di illuminazione. . . . .	117
6.55	Sistema di misura con fotostrizione. . . . .	118
6.56	Foto acquisite. Sotto ogni foto la corrente applicata alla sorgente LED blu. . . . .	119
6.57	Andamento in orizzontale e verticale dell'FWHM. . . . .	120
6.58	Diagrammi polari, verticale e orizzontale. . . . .	121
A.1	Angolo solido. . . . .	126

# Elenco delle tabelle

4.1	Caratteristiche LED Golden DRAGON Plus [20 . . . . .	59
6.1	Confronto focale lente deformabile, dato il diametro. . . . .	80
6.2	Confronto focale lente deformabile, data $f_c$ . . . . .	81
6.3	Confronto focale prima lente. . . . .	82
6.4	Confronto NA. . . . .	83
6.5	Confronto altezza sorgente, dato il diametro. . . . .	84
6.6	Confronto altezza sorgente, dato NA. . . . .	85
6.7	Confronto tra le tre lenti. . . . .	116
B.1	Fast electrically tunable lens, EL-10-30 [23]. . . . .	127
B.2	Manual tunable lens, ML-20-35 [24]. . . . .	128
B.3	ML-25-50 [25]. . . . .	129
B.4	ML-55-106-NOC-LD [26]. . . . .	129
B.5	Caratteristiche degli specchi deformabili [27]. . . . .	130

*ELENCO DELLE TABELLE*

---

## Sommario

Lo scopo di questo lavoro è stato quello di utilizzare i principi dell'ottica adattiva portandoli nell'ambito dell'illuminazione per realizzare un sistema ad apertura variabile. L'applicazione si deriva dall'utilizzo dei LED come nuove sorgenti per l'illuminazione ed a queste l'accostamento di sistemi adattivi per rendere l'illuminazione più dinamica.

Nella tesi sono presentati inizialmente quattro capitoli su temi che introducono all'argomento trattato per avere una visione ampia dell'argomento approfondendo parti relative all'illuminazione, all'ottica, ai LED. In seguito viene presentato il sistema su cui si è lavorato, una descrizione matematica dello stesso, una parte di simulazioni ed infine un riscontro pratico con misure sperimentali.

Dai dati estrapolati si evince la bontà del modello utilizzato e buoni risultati dati dall'utilizzo della combinazione tra lenti e attuatore piezoelettrico.

*SOMMARIO*

---

# Introduzione

In questo progetto di tesi ci si è prefissati di realizzare un sistema di illuminazione adattivo che utilizza come sorgente luminosa il LED.

Oltre alla fase di progettazione e realizzazione, lo scopo è quello di valutare le possibili applicazioni di un sistema di questo tipo ed il suo funzionamento volendo arrivare ad un prototipo che possa aumentare e diminuire in funzione della tensione o della corrente applicata l'angolo di apertura del fascio luminoso iniziale.

Per fare questo sono stati utilizzati vari elementi e sfruttati i principi fondamentali dell'ottica geometrica, l'effetto piezoelettrico e il principio della fotostriazione.

Proprio perchè sono state messe assieme diverse materie, la tesi è strutturata in sette capitoli, nei primi dei quali vengono presentate una serie di nozioni teoriche necessarie alla comprensione del problema e successivamente le varie prove effettuate:

- **Capitolo 1** definisce le principali unità di misura della fotometria, la struttura dello spettro elettromagnetico con particolare attenzione sullo spettro visibile e sui colori, infine una breve discussione sull'occhio umano e la sua capacità di percezione delle diverse lunghezze d'onda.
- **Capitolo 2** descrive le principali nozioni dell'Ottica Geometrica: dalla riflessione e rifrazione, agli specchi e le lenti fino a giungere all'Ottica Adattiva.

- **Capitolo 3** fornisce i principi fondamentali per la comprensione del fenomeno dell'effetto piezoelettrico e della fotostrizione, aggiungendo alla fine alcune notizie di carattere storico.
- **Capitolo 4** descrive la struttura e il funzionamento del diodo LED con una attenzione particolare relativamente alle proprietà ottiche.
- **Capitolo 5** in cui sono riportate le caratteristiche ottiche ed eventualmente elettriche di dispositivi presenti sul mercato, che realizzano o possono essere utilizzati per gli stessi scopi per cui è stata elaborata questa tesi.
- **Capitolo 6** dove sono riportati i metodi utilizzati, le simulazioni e le varie misure effettuate.
- **Conclusioni.**



# Capitolo 1

## Illuminotecnica e spettro elettromagnetico

### 1.1 Introduzione

L'illuminotecnica è la disciplina tecnico/scientifica che si occupa dell'illuminazione di spazi ed ambienti, sia interni che esterni, sfruttando la luce, sia solare che artificiale. Lo sviluppo dell'illuminotecnica è venuto insieme con quello delle sorgenti luminose artificiali. La progettazione della quantità e della qualità della luce in modo tecnico, programmato e non empirico è recente.

L'aumento sempre più intenso delle sorgenti luminose con la conseguente realizzazione di una gamma estremamente ampia di apparecchi di illuminazione hanno contribuito a trasformare una componente marginale del progetto in una disciplina completamente autonoma affrontata da specialisti. L'illuminotecnica deriva i suoi principi fondamentali e le grandezze in gioco dalla fotometria, disciplina che studia la luce in funzione dello stimolo prodotto sull'occhio umano [1].

### 1.2 Fotometria

L'occhio umano ha una risposta visiva diversa a seconda della lunghezza d'onda della radiazione incidente; la fotometria si occupa della misura della quantità di energia raggiante emessa da una sorgente, o ricevuta da una superficie, in relazione alle sensazioni prodotte nell'individuo attraverso l'occhio.

## 1. *ILLUMINOTECNICA E SPETTRO ELETTROMAGNETICO*

---

Le principali grandezze fotometriche sono [1][2]:

- Flusso luminoso (  $\Phi$ , unità di misura: lumen [ lm ] )

Questa grandezza indica la quantità di energia luminosa emessa nell'unità di tempo (1 secondo) da una sorgente. Per energia luminosa si intende, per convenzione, quella emessa nell'intervallo di lunghezze d'onda da 380 a 780 nm.

- Intensità luminosa (  $I$ , unità di misura: candela [ cd ] )

Indica la quantità di flusso luminoso emesso da una sorgente all'interno dell'angolo solido unitario (steradiano) in una direzione data.

Una sorgente luminosa puntiforme emette radiazioni della stessa intensità in tutte le direzioni, quindi il suo flusso luminoso si propaga uniformemente come generato dal centro di una sfera.

Le sorgenti luminose artificiali invece, non emettono luce in modo uniforme in tutte le direzioni dello spazio, quindi a seconda della direzione considerata si può avere una intensità diversa. Un sistema pratico per visualizzare la distribuzione della luce emessa da una sorgente nello spazio consiste nel rappresentare le intensità luminose come vettori applicati nel medesimo punto, come raggi uscenti dal centro di una sfera. I cataloghi degli apparecchi di illuminazione riportano spesso le curve fotometriche ossia le sezioni del solido fotometrico sui due piani principali, ortogonali tra loro, intersecati per l'asse di simmetria e rotazione.

La conoscenza della curva fotometrica è molto importante in quanto in base ad essa è possibile verificare che l'apparecchio di illuminazione scelto distribuisca la luce nel modo richiesto.

- Illuminamento (  $E$ , unità di misura: lux [ lx = lm / m<sup>2</sup> ] )

È il rapporto tra il flusso luminoso ricevuto da una superficie e l'area della superficie stessa. In altre parole indica la quantità di luce che colpisce un'unità di superficie.

- Luminanza(  $L$ , unità di misura: nit [ cd / m<sup>2</sup> or lm / m<sup>2</sup>· sr ] )

È il rapporto tra l'intensità luminosa emessa da una superficie in una data direzione e l'area apparente di tale superficie. L'area apparente è la proiezione della

superficie su un piano normale alla direzione considerata. In pratica indica la sensazione di luminosità che si riceve da una sorgente luminosa primaria o secondaria<sup>1</sup>.

È importante avere ben chiara la differenza esistente tra illuminamento e luminanza. Se la prima grandezza indica la quantità di luce, emessa da una sorgente, che colpisce la superficie considerata, la seconda indica la sensazione di luminosità che riceviamo da questa superficie; ciò vuol dire che su due superfici, una bianca e l'altra nera, possiamo avere lo stesso valore di illuminamento, ad esempio 500 lux, ma la sensazione di luminosità ricevuta, e quindi la luminanza, sarà completamente differente, in quanto quelle due superfici riflettono la luce in modo diverso. Nella progettazione illuminotecnica è necessario conoscere adeguatamente le une come le altre. L'efficacia di un progetto di illuminazione è il risultato ottenuto dallo sviluppo di due differenti analisi:

- quantitativa, data dalla determinazione del numero di sorgenti luminose e loro posizionamento;
- qualitativa, data dalla scelta del tipo di luce più adatto a svolgere una determinata attività e dalla sua distribuzione nello spazio.

La luce non è sempre uguale. Può essere più o meno bianca, fredda oppure calda. I colori delle cose appaiono differenti, variando il tipo di sorgente luminosa utilizzata. Per giudicare e classificare le lampade da un punto di vista qualitativo vengono utilizzati due parametri molto importanti:

- a) temperatura di colore;
- b) indice di resa dei colori.

---

<sup>1</sup>Si dice sorgente primaria un corpo che emette direttamente radiazioni; si dice sorgente secondaria un corpo che riflette le radiazioni emesse da una sorgente primaria.

### a) Temperatura di colore.

La temperatura di colore, espressa in Kelvin ( $K^2$ ), è un parametro utilizzato per individuare e catalogare, in modo oggettivo, il colore della luce di una sorgente luminosa confrontata con la sorgente campione (corpo nero). Dire che una lampada ha una temperatura di colore pari a 3000 K, significa che il corpo nero, a questa temperatura, emette luce della stessa tonalità. Le sorgenti luminose sono suddivise in tre gruppi, a seconda della temperatura di colore:

- da 3000 a 3500 K : colore bianco caldo;
- da 4000 a 5000 K : colore bianco neutro;
- da 5500 a 7000 K : colore bianco freddo.

### b) L'indice di resa dei colori.

Esprime l'effetto prodotto da una sorgente luminosa sull'aspetto cromatico di un oggetto confrontato con quello ottenuto per effetto di una sorgente luminosa campione di pari temperatura di colore.

La sorgente campione, a rigore il corpo nero, è in pratica un metallo, al quale viene somministrata una quantità di calore crescente, portandolo all'incandescenza. Aumentando la sua temperatura, cambierà di colore passando dal rosso cupo fino all'azzurro, passando per il bianco. L'illuminazione è legata profondamente al colore dei materiali.

Una superficie appare di un determinato colore, ad esempio il rosso, perché riflette le lunghezze d'onda corrispondenti al rosso assorbendone le rimanenti.

Se nello spettro di emissione della sorgente incidente non sono presenti le lunghezze d'onda del materiale osservato, il suo colore sarà alterato. È quindi importante per avere una buona resa dei colori che nello spettro di emissione della sorgente luminosa siano presenti tutte le lunghezze d'onda, ciascuna con valori quantitativi equilibrati.

---

<sup>2</sup>La temperatura assoluta è basata sul Kelvin. La temperatura di fusione del ghiaccio (valore di 273,15 K) corrisponde a 0 gradi centigradi.

La temperatura di colore non deve essere confusa con l'indice di resa dei colori, in quanto la prima indica il colore della luce emessa, ma non ci dice nulla riguardo la sua capacità di rendere i colori [1].

### 1.2.1 Efficienza luminosa ed efficacia luminosa

Il flusso luminoso,  $\Phi_{lum}$ , si ottiene dalla potenza luminosa radiometrica con l'equazione:

$$\Phi_{lum} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{\lambda} V(\lambda) P(\lambda) d(\lambda) \quad (1.1)$$

dove  $P(\lambda)$  è la densità spettrale di potenza, cioè la potenza della luce emessa per unità di lunghezza d'onda, e il fattore  $683 \text{ lm} / \text{W}$  è un fattore di normalizzazione dovuto all'unità di misura dell'intensità luminosa (candela). La potenza ottica emessa da una sorgente luminosa è poi data da:

$$P = \int_{\lambda} P(\lambda) d(\lambda) . \quad (1.2)$$

Un LED ad alte prestazioni può avere uno spettro visibile con un flusso luminoso di circa 10 - 100 lm con un iniezione di corrente di 100-1000 mA.

L'efficacia luminosa di radiazioni ottiche (chiamata anche la funzione di luminosità), misurata in unità di lumen per watt di potenza ottica, è l'efficienza di conversione di potenza ottica in flusso luminoso.

L'efficacia luminosa è definita come:

$$\text{Luminous efficacy} = \frac{\Phi_{lum}}{P} . \quad (1.3)$$

Per le fonti di luce strettamente monocromatiche, l'efficacia luminosa è pari alla funzione di sensibilità dell'occhio  $V(\lambda)$  moltiplicata per  $683 \text{ lm} / \text{W}$ . Tuttavia, per fonti di luce multicolore e soprattutto per le fonti di luce bianca, l'efficacia luminosa deve essere calcolata attraverso l'integrazione su tutte le lunghezze d'onda.

L'efficienza luminosa di una sorgente di luce è anch'essa misurata in unità di  $\text{lm} / \text{W}$ , ed è definita come il flusso luminoso della sorgente luminosa diviso per la potenza elettrica in ingresso:

$$\text{Luminous efficiency} = \frac{\Phi_{lum}}{IV} . \quad (1.4)$$

L'efficienza luminosa è una figura di merito di grande rilevanza per lo spettro visibile emesso da un LED. Si tratta di una misura della potenza della luce percepita normalizzata per l'energia elettrica consumata dal LED. Per le sorgenti luminose con una perfetta conversione di potenza elettro-ottica, l'efficienza di una sorgente luminosa è pari all'efficacia della radiazione emessa [3].

### 1.3 Spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico è l'insieme di tutte le possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche. Le radiazioni elettromagnetiche sono onde caratterizzate da tre parametri:

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

Il primo è un dato costante per tutte le radiazioni e vale:

$$c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s} \quad (1.5)$$

gli altri due sono variabili e inversamente proporzionali:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} . \quad (1.6)$$

L'onda elettromagnetica ha una intensità ( $E$ ) legata alla frequenza e ad un quanto di azione ( $h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ , costante di Plank), [ $E = h \cdot \nu$ ]. Per cui si è arrivati

alla conclusione che maggiore è la frequenza, maggiore è l'energia trasportata dall'onda elettromagnetica a parità di ampiezza.

Tale spettro (Figura 1.1) è di tipo continuo, tuttavia è possibile una suddivisione puramente convenzionale ed indicativa in vari intervalli o bande di frequenza (Figura 1.2), dettata a partire dallo spettro delle radiazioni visibili.

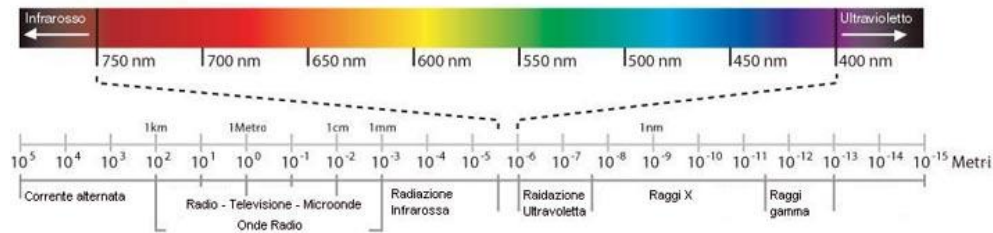


Figura 1.1: Spettro elettromagnetico.

Radiofrequenze:  $3 \cdot 10^6 \geq \lambda \geq 0.3 \text{ m}$ ,  $10^2 \leq \nu \leq 10^9 \text{ Hz}$ .

A questo intervallo delle onde elettromagnetiche è generalmente associata la trasmissione di segnali radio (da 500 kHz a 100 MHz), televisivi (100 MHz), e della telefonia mobile (900 MHz e 1800 MHz). A causa della bassa energia associata ai fotoni in questa banda di frequenze la loro interazione con la materia è generalmente trascurabile.

Microonde:  $0.3 \geq \lambda \geq 10^{-3} \text{ m}$ ,  $10^9 \leq \nu \leq 3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$ .

Vengono usate nelle telecomunicazioni e nei radar e sono di interesse nella radioastronomia. Sono inoltre in grado di eccitare il moto rotazionale di molecole in possesso di un momento di dipolo permanente come ad esempio l'acqua (che ha una frequenza di risonanza del proprio moto rotazionale a 2.45 GHz). Vale la pena di menzionare che la radiazione di fondo cosmico dell'Universo cade nella regione delle microonde.

Infrarosso:  $10^{-3} \geq \lambda \geq 0.78 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ,  $3 \cdot 10^{11} \leq \nu \leq 3.8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ .

L'interazione della radiazione infrarossa con la materia provoca essenzialmente il moto vibrazionale delle molecole nei gas e nella materia condensata. Incidentalmente, lo spettro di emissione di un corpo a  $37 \text{ }^\circ\text{C}$  si trova centrato intorno a  $10 \mu\text{m}$  e quello di un corpo a  $3000 \text{ K}$  a  $1 \mu\text{m}$ .

## 1. ILLUMINOTECNICA E SPETTRO ELETTROMAGNETICO

---

DENOMINAZIONE		SIGLA	FREQUENZA	LUNGHEZZA D'ONDA
FREQUENZE ESTREMAMENTE BASSE		ELF	0 - 3kHz	> 100Km
FREQUENZE BASSISSIME		VLF	3 - 30kHz	100 - 10Km
RADIOFREQUENZE	FREQUENZE BASSE (ONDE LUNGHE)	LF	30 - 300kHz	10 - 1Km
	MEDIE FREQUENZE (ONDE MEDIE)	MF	300kHz - 3MHz	1Km - 100m
	ALTE FREQUENZE	HF	3 - 30MHz	100 - 10m
	FREQUENZE ALTISSIME (ONDE METRICHE)	VHF	30 - 300MHz	10 - 1m
MICROONDE	ONDE DECIMETRICHE	UHF	300MHz - 3GHz	1m - 10cm
	ONDE CENTIMETRICHE	SHF	3 - 30GHz	10 - 1cm
	ONDE MILLIMETRICHE	EHF	30 - 300GHz	1cm - 1mm
INFRAROSSO		IR	0,3 - 385THz	1000 - 0,78mm
LUCE VISIBILE			385 - 750THz	780 - 400nm
ULTRAVIOLETTO		UV	750 - 3000THz	400 - 100nm
RADIAZIONI IONIZZANTI		X	> 3000THz	< 100nm

Figura 1.2: Suddivisione delle frequenze dello spettro elettromagnetico.

Visibile:  $0.78 \cdot 10^{-6} \geq \lambda \geq 0.38 \cdot 10^{-6}$  m,  $3.8 \cdot 10^{14} \leq \nu \leq 7.9 \cdot 10^{14}$  Hz.

L'interazione della luce visibile con la materia riguarda soprattutto l'eccitazione quantomeccanica degli elettroni di valenza degli atomi in livelli di energia superiore, detti stati eccitati. Il Sole, la cui superficie si trova a circa 6000 K, presenta uno spettro di emissione centrato nell'intervallo spettrale del visibile.

Lo spettro delle radiazioni visibili non ha dei limiti ben precisi, in quanto la sensibilità dell'occhio umano varia da individuo ad individuo.

Ultravioletto:  $0.38 \cdot 10^{-6} \geq \lambda \geq 6 \cdot 10^{-10}$  m,  $7.9 \cdot 10^{14} \leq \nu \leq 5 \cdot 10^{17}$  Hz.

Tale radiazione interagisce con molte sostanze provocando negli atomi l'eccitazione degli elettroni più interni. Per fotoni di energia che si avvicinano all'estremo dell'intervallo ultravioletto si possono avere fenomeni di ionizzazione degli atomi e delle molecole, che consistono nel definitivo allontanamento di uno o più elet-



troni dall'atomo o molecola considerati.

Raggi X:  $6 \cdot 10^{-10} \geq \lambda \geq 6 \cdot 10^{-12}$  m,  $5 \cdot 10^{17} \leq \nu \leq 3 \cdot 5 \cdot 10^{19}$  Hz.

I raggi X provocano la ionizzazione degli elettroni dagli atomi e dalle molecole anche dai livelli più profondi (ovvero vicini al nucleo) negli atomi più pesanti.

Raggi  $\gamma$ :  $\lambda < 6 \cdot 10^{-12}$  m,  $\nu > 5 \cdot 10^{19}$  Hz.

Vengono prodotti nelle reazioni nucleari e data la loro elevata energia producono effetti di ionizzazione secondaria legati ai prodotti della loro interazione con i nuclei degli atomi.

### 1.3.1 Colori

Lo spettro delle radiazioni visibili può essere a sua volta suddiviso in sei bande principali, ciascuna corrispondente ad una determinata sensazione cromatica:

380 - 436 nm: viola

436 - 495 nm: blu

495 - 566 nm: verde

566 - 589 nm: giallo

589 - 627 nm: arancio

627 - 780 nm: rosso

Per rappresentare i colori è stato realizzato un modello matematico astratto che li descrive come una combinazione di numeri; tipicamente tre o quattro valori detti componenti colore. Essendo il modello una rappresentazione astratta, a questo è stata associata una funzione di mappatura creando uno spazio dei colori.

Nel 1931 la Commission Internationale de l'Eclairage (Commissione Internazionale per l'Illuminazione) definì uno spazio di colore che comprendeva tutte le tinte visibili dall'occhio umano, a prescindere dalla luminanza. Infatti qualunque colore all'interno di questo spazio bidimensionale può avere una luminanza che varia dal bianco al nero e se si tiene conto anche di questo fattore (la luminanza) lo spazio così definito diviene tridimensionale e rappresentato mediante coordi-

nate XYZ.

Il modello CIE 1931 (Figura 1.3) si basa, come altre codifiche note, sull'utilizzo di tre colori primari che, opportunamente miscelati tra loro in sintesi additiva, permettevano di ottenere tutti i colori che l'occhio umano può percepire.

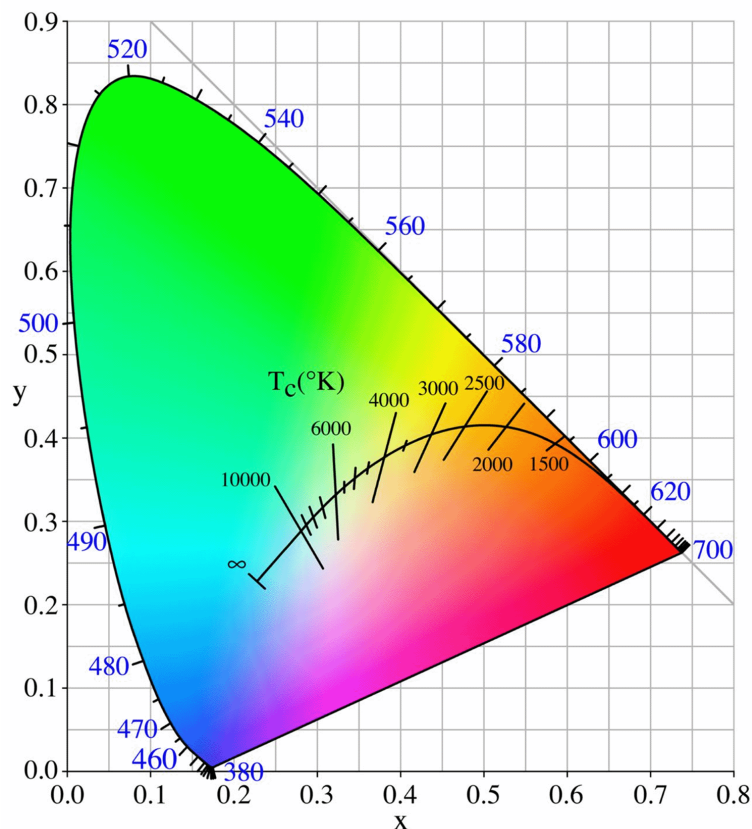


Figura 1.3: Triangolo dei colori.

Poiché può rappresentare tutte le tinte percepibili, lo spazio di colore del CIE è preso come riferimento per tutti gli altri, tuttavia nella pratica non viene molto usato a causa della sua complessità.

I primari scelti dalla CIE per generare tutti i colori visibili sono tinte ipersature: colori (in realtà, non essendo visibili, non dovrebbero essere indicati come tali) più saturi di quanto i nostri fotorecettori retinici siano in grado di decifrare. I tre primari immaginari sono stati denominati X, Y, e Z.

X corrisponde a un rosso violaceo ipersaturo contraddistinto da due picchi nello spettro cromatico rispettivamente intorno ai 450 nm e ai 600 nm (quest'ultimo

molto superiore al primo),  $Y$  e  $Z$  corrispondono a tinte spettrali (sempre irrealisticamente ipersature) con lunghezza d'onda dominante rispettivamente di 520 e 477 nm. Inoltre la tinta  $Y$  (quella corrispondente al verde ipersaturo) ha un andamento proporzionale alla nostra sensibilità alla luminosità delle tinte. Scelti i tre primari tramite i quali è possibile ottenere, per sintesi additiva, qualsiasi tinta reale, è possibile a questo punto utilizzare uno spazio tridimensionale avente per assi i tre primari utilizzati per catalogarle tutte.

Per non ricorrere ad un diagramma tridimensionale è possibile normalizzare le tinte facendo in modo che la loro somma sia sempre pari ad uno. Se  $X$ ,  $Y$ , e  $Z$  sono i tre valori che identificano un colore,  $X+Y+Z$  la loro somma, e poniamo:

$$x = \frac{X}{(X + Y + Z)} \quad (1.7)$$

$$y = \frac{Y}{(X + Y + Z)} \quad (1.8)$$

$$z = \frac{Z}{(X + Y + Z)}, \quad (1.9)$$

risulta, con semplici passaggi algebrici e stando attenti a minuscole e maiuscole, che  $x + y + z$  è sempre uguale ad 1 per qualsiasi valore originario di  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ . Da questo si ricava tra l'altro che:

$$z = 1 - x - y \quad (1.10)$$

ed è dunque possibile utilizzare due sole coordinate cromatiche ( $x$  e  $y$ , ad esempio) per identificare un colore essendo la terza ( $z$ , in questo caso) ricavabile sottraendo all'unità le altre due. Il vantaggio è evidente: normalizzando i colori col meccanismo della somma costante (uguale a 1) è possibile utilizzare un grafico bidimensionale per catalogare qualitativamente (e non quantitativamente) tutte le tinte reali.

Ovvero si tracciano tutti i colori possibili ed immaginabili la cui intensità totale è costante e pari ad uno: tutte le altre tinte sono ottenute semplicemente indicando, oltre ai valori  $x$  e  $y$  (il valore  $z$  si ottiene, come detto, dagli altri due) il suo grado di luminosità espresso, volendo, in forma percentuale.

## 1. ILLUMINOTECNICA E SPETTRO ELETTROMAGNETICO

---

Tutti i colori (reali e irreali) generabili con i primari  $x$  e  $y$  giacciono su un triangolo rettangolo avente come vertici l'origine  $(0,0)$  il punto massimo di  $x$  e minimo di  $y$   $(1,0)$  e il punto massimo di  $y$  e minimo di  $x$   $(0,1)$ . All'interno di questo triangolo rettangolo è tracciato il diagramma CIE dei colori reali: una campana che racchiude tutte le tinte possibili (Figura 1.4). Al di fuori della campana (ma sempre all'interno del triangolo) ci sono tutti i colori non visibili o non distinguibili da quelli presenti lungo il perimetro esterno. Il diagramma CIE gode, proprio per il modo in cui è stato generato, di alcune importanti caratteristiche che andiamo ora ad illustrare maggiormente in dettaglio.

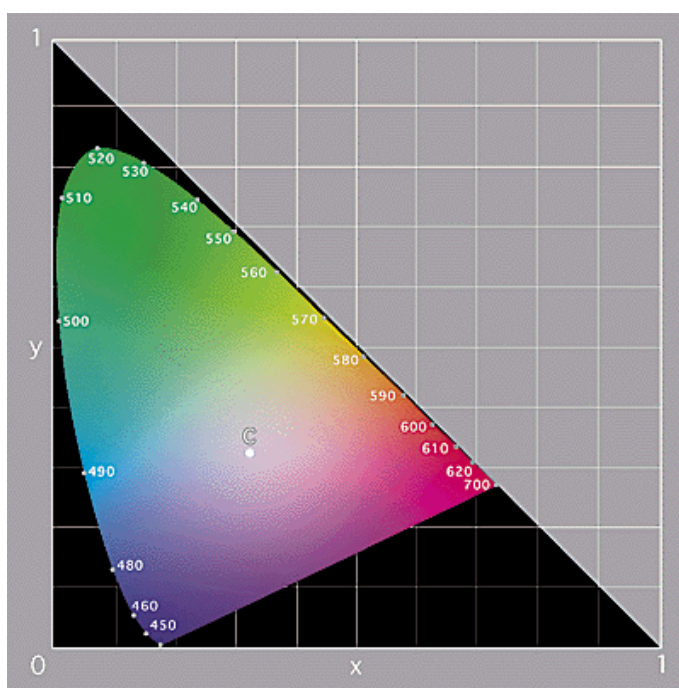


Figura 1.4: Particolarità nel triangolo dei colori.

Circa al centro del diagramma CIE è presente un punto (un colore), come si vedrà tra breve, di importanza strategica, indicato con la lettera C. È il cosiddetto Illuminante CIE, assunto come riferimento e corrispondente alla radiazione emessa da una superficie bianca illuminata da luce diurna media. Lungo il perimetro curvo della campana si trovano tutte le tinte spettrali alla loro massima saturazione. Nella parte alta del diagramma vivono le famiglie dei verdi; in basso a sinistra i blu, in basso a destra i rossi.

Sul segmento rettilineo che congiunge i due vertici inferiori della campana

si trovano i colori non spettrali alla loro massima saturazione. Tutti i colori non spettrali, dalla saturazione via via decrescente, sono situati nel triangolo delimitato in basso dal segmento delle porpore e avente come vertice il punto C [3] [4] [5].

## 1.4 Percezione e occhio umano

L'organo umano che ha il compito di dare al cervello le informazioni visive è l'occhio (Figura 1.5). Un'immagine si forma sulla retina grazie alla cornea (la copertura translucida dell'occhio) e dell'iride (che chiudendosi permette di dosare la quantità di luce). Questa è composta da piccoli bastoncelli e di coni.

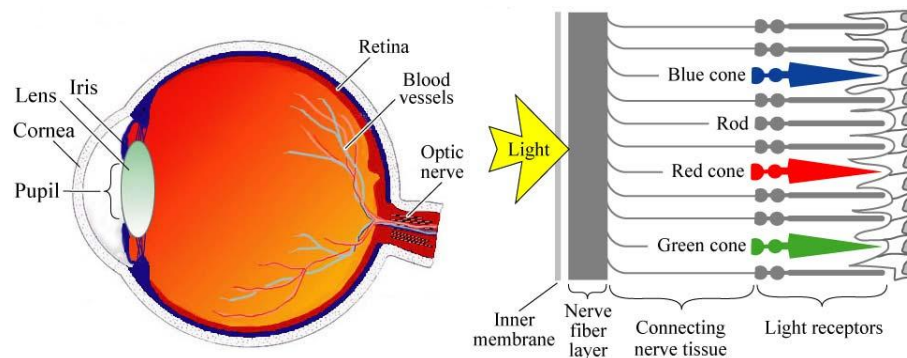


Figura 1.5: Occhio umano.

I bastoncelli (da 75 a 150 milioni circa), formati da una pigmentazione e posti ai bordi della retina, permettono di percepire la luminosità e il movimento operando in situazioni di scarsa visibilità (visione scotopica o notturna), mentre i coni (da 4 a 7 milioni circa), posti nella piccola regione centrale detta fovea, permettono di distinguere i colori e forniscono una visione precisa alla luce del giorno (visione fopica o diurna). In realtà esistono tre tipi di coni, un tipo per il rosso R (564 nm), un tipo per il verde V (533 nm) e un tipo per il blu B (437 nm) e il rapporto numerico fra i tre tipi di coni è circa:  $B:V:R = 1:20:40$  (Figura 1.6). Dalla combinazione dell'eccitazione di varie categorie di coni si avrebbe la percezione dei colori misti.

## 1. ILLUMINOTECNICA E SPETTRO ELETTROMAGNETICO

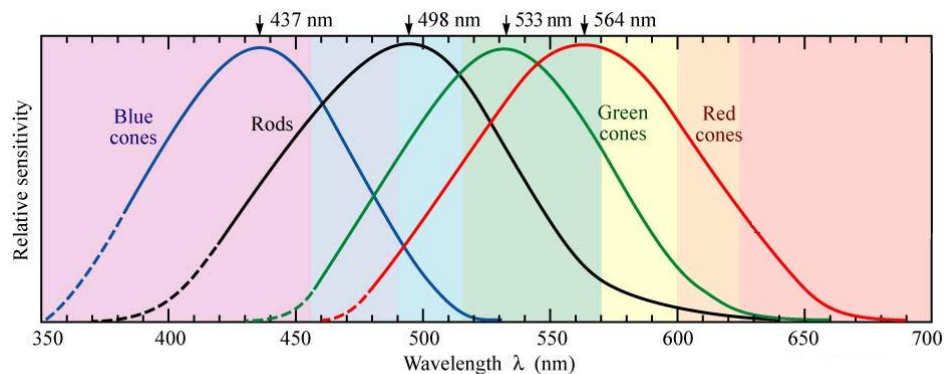


Figura 1.6: Funzione di sensibilità di coni e bastoncelli.

L'occhio umano è capace di vedere degli irraggiamenti la cui lunghezza d'onda è compresa tra 380 e 780 nanometri ed è fortemente selettivo, ovvero percepisce in modo diverso le varie componenti dello spettro visibile. Nello studio della risposta alle sollecitazioni elettromagnetiche dell'occhio, è necessario introdurre una ponderazione, il coefficiente di visibilità,  $V(\lambda)$ , il quale fornisce la reale cura di percezione di un colore, il cui massimo si trova nel verde a 555nm (Figura 1.7) [3].

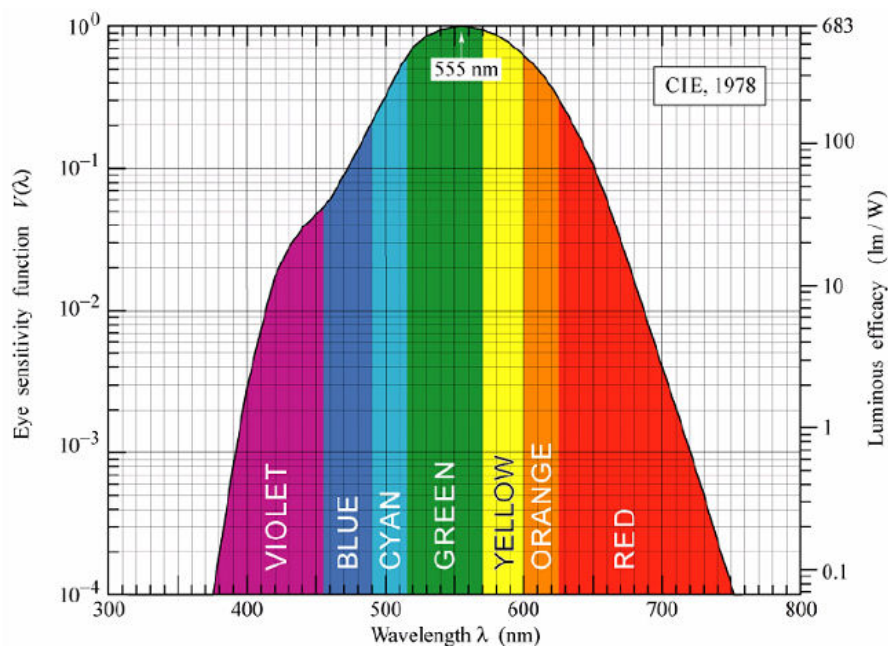


Figura 1.7: Photonic sensitivity of the human eye,  $V(\lambda)$  [3].

### 1.4.1 Linearità della visione umana

Nonostante il termine luminosità è usato frequentemente, manca una definizione standardizzata scientifica. L'uso frequente è dovuto al fatto che si utilizza più facilmente il termine luminosità rispetto ai termini fotometrici come luminanza e intensità luminosa. La luminosità è un attributo della percezione visiva ed è spesso usato come sinonimo di luminanza o (erroneamente) per la radianza, termine usato in radiometria.

Per quantificare la luminosità di una sorgente, è utile distinguere tra le fonti puntuali e di superficie. Per le fonti puntuali, la luminosità (in regime di visione fotopica) può essere approssimata con l'intensità luminosa (misurata in cd). Per le fonti di superficie, la luminosità (nel regime visione fotopica) può essere approssimata dalla luminanza (misurata in  $\text{cd}/\text{m}^2$ ). Tuttavia, a causa della mancanza di una definizione formale standardizzata della luminosità, è spesso evitata in pubblicazioni tecniche.

Nello standard CIE si assume che la visione umana sia lineare all'interno del regime fotopico. È chiaro che una sorgente puntiforme che emette isotropicamente blu e una sorgente che emette isotropicamente rosso, ciascuna con un flusso luminoso, per esempio, 5 lm, hanno la stessa intensità luminosa. Ipotizzando la linearità della visione fotopica, entrambe le fonti hanno ancora la stessa intensità luminosa se i flussi luminosi delle sorgenti aumentano per esempio da 5 a 5000 lm. Tuttavia, se i flussi luminosi delle due sorgenti sono ridotti in modo tale da rientrare nel regime di visione mesopica o scotopica, la sorgente blu apparirà più luminosa di quella rossa per lo spostamento della funzione di sensibilità dell'occhio a lunghezze d'onda nel regime scotopico.

È importante tenere presente che la linearità della visione umana all'interno del regime fotopica è un'approssimazione. La linearità semplifica chiaramente la fotometria, tuttavia, i soggetti umani possono percepire discrepanze tra l'esperienza di brillantezza e luminosità misurata di una sorgente di luce, soprattutto per le sorgenti di luce colorata se il flusso luminoso cambia di ordini di grandezza [3].

1. *ILLUMINOTECNICA E SPETTRO ELETTROMAGNETICO*

---



# Capitolo 2

## Ottica Geometrica

### 2.1 Introduzione

I fenomeni più interessanti nella propagazione della luce, come l'interferenza, la diffrazione e la polarizzazione, sono manifestazioni dirette del carattere ondulatorio della luce. È possibile interpretare la maggior parte delle osservazioni basandosi sul concetto di raggio luminoso e sulle due semplici leggi di riflessione e trasmissione. È questo il campo in cui opera l'Ottica Geometrica nella quale tutte le deduzioni si fanno con costruzioni geometriche che obbediscono alle suddette leggi.

Si tenga però presente che in ottica geometrica esiste sempre una zona di confine in corrispondenza della quale il carattere ondulatorio del fenomeno prevale e pone delle limitazioni all'applicazione delle leggi dell'ottica geometrica.

In effetti la luce utilizzata negli strumenti ottici attraversa fenditure e diaframmi nei quali viene selezionata solo una porzione del fronte d'onda e per effetto di ciò si presenta il fenomeno della diffrazione che contrasta con l'assunzione della propagazione rettilinea dei raggi di luce [6].

### 2.2 Riflessione e rifrazione

I raggi luminosi che attraversano un mezzo omogeneo si propagano in linea retta finché giungono alla superficie che separa il mezzo dallo spazio vuoto o da un secondo mezzo.

## 2. OTTICA GEOMETRICA

---

Considerando la propagazione di un singolo raggio si definisce piano d'incidenza il piano individuato dalla direzione dell'onda piana incidente e dalla normale alla superficie di separazione tra i due mezzi, nei quali la velocità di propagazione dell'onda vale rispettivamente:

$$v_1 = \frac{c}{n_1} \qquad v_2 = \frac{c}{n_2} \qquad (2.1)$$

dove  $n_1$  e  $n_2$  sono gli indici di rifrazione, calcolati come il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e la velocità della luce nel particolare mezzo:

$$n = \frac{c}{v} \qquad (2.2)$$

il valore dell'indice di rifrazione risulta quindi sempre maggiore o uguale a 1.

Nel punto di separazione dei mezzi il raggio (che trasporta una certa quantità di energia) si separa in due raggi: il primo si propaga nel mezzo originario e verrà chiamato raggio riflesso, il secondo penetra nel secondo mezzo e sarà chiamato raggio rifratto (Figura 2.1).

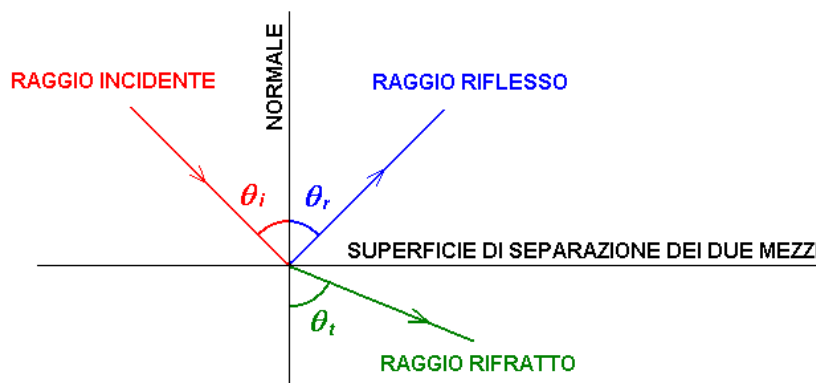


Figura 2.1: Riflessione e rifrazione.

Le leggi della riflessione e della rifrazione affermano:

- le direzioni dell'onda incidente, dell'onda riflessa e dell'onda trasmessa (rifratta) giacciono nel piano di incidenza;
- l'angolo di riflessione  $\theta_r$  è uguale all'angolo di incidenza  $\theta_i$

$$\theta_i = \theta_r ; \qquad (2.3)$$

- il rapporto tra il seno dell'angolo d'incidenza  $\theta_i$ , e il seno dell'angolo di rifrazione  $\theta_t$ , è costante e uguale al rapporto tra le velocità di propagazione:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{v_1}{v_2} \quad (2.4)$$

Tenendo conto dell'equazione 2.2 risulta:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (2.5)$$

nota anche come **legge di Snell**.

Per quanto riguarda la riflessione se la superficie di separazione non è liscia, i raggi saranno riflessi in varie direzioni, per cui la luce riflessa avrà perso la sua caratteristica di unidirezionalità, per cui si parla di luce diffusa [6] [7].

### 2.2.1 Alcuni esempi applicativi

Quando un'onda luminosa piana si propaga da un mezzo con indice di rifrazione  $n_1$  ad un mezzo con indice di rifrazione  $n_2 > n_1$  si ha:

$$\sin \theta_t = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \quad \Rightarrow \quad \theta_t < \theta_i \quad \text{se} \quad n_2 > n_1 \quad (2.6)$$

Nell'attraversare la superficie di separazione la direzione di propagazione dell'onda piana trasmessa si avvicina alla normale alla superficie (Figura 2.2).

Nel caso inverso, quando un'onda passa da un mezzo con indice di rifrazione  $n_1$  ad uno con indice di rifrazione  $n_2 < n_1$  si ha che la direzione di propagazione dell'onda piana trasmessa si allontana dalla normale alla superficie (Figura 2.3).

$$\sin \theta_t = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i \quad \Rightarrow \quad \theta_t > \theta_i \quad \text{se} \quad n_2 < n_1 \quad (2.7)$$

Si trova inoltre un caso limite, in cui al crescere dell'angolo di incidenza  $\theta_i$ , l'angolo di trasmissione  $\theta_t$ , che cresce più rapidamente, raggiunge ad un certo punto il valore  $\pi/2$ , precisamente in corrispondenza dell'angolo  $\theta_0$  che risulta essere:

$$\sin \theta_0 = \frac{n_2}{n_1} . \quad (2.8)$$

Per valori di  $\theta_i$  maggiori di  $\theta_0$  non esistono valori reali di  $\theta_t$ , l'onda incidente risulta totalmente riflessa all'interno del primo mezzo. Questo fenomeno prende il nome di riflessione totale e l'angolo  $\theta_0$  è detto angolo limite [6].

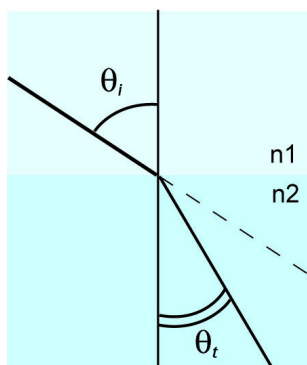


Figura 2.2: Rifrazione con  $n_2 > n_1$ .

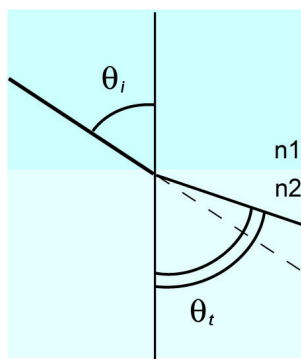


Figura 2.3: Rifrazione con  $n_2 < n_1$ .

### 2.3 Specchi

È detto specchio una superficie sulla quale avviene solamente un fenomeno di riflessione quando incontra la luce. Tutti i raggi di qualsiasi lunghezza d'onda provenienti dalla stessa direzione subiranno quindi la stessa deviazione.

In riferimento alla faccia della superficie sferica rivolta verso la luce incidente è possibile classificare gli specchi in concavi o convessi.

- **Specchio sferico concavo**

Considerando un oggetto puntiforme P posto sull'asse dello specchio ad una distanza  $p$  dallo stesso, il raggio di luce passante per P con un certo angolo, rispetto all'asse, subirà una riflessione dallo specchio con un determinato angolo e andrà ad intersecarne l'asse in un punto Q avente una certa di-

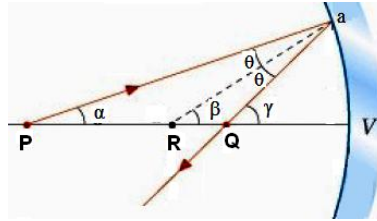


Figura 2.4: Specchio concavo.

stanza  $q$  (Figura 2.4).

Tenendo presente il raggio di curvatura dello specchio ( $R$ ) e la relazione fondamentale che lega gli angoli, risulta:

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = -\frac{2}{R} \quad (2.9)$$

che è l'equazione dello specchio sferico concavo.

Studiando la formula si può ipotizzare  $p = +\infty$ , cioè i raggi sono tutti paralleli all'asse dello specchio, da cui risulta

$$q = \frac{R}{2} = f \quad (2.10)$$

tutti i raggi si incontrano in un punto  $F$  posto ad una distanza pari alla metà del raggio di curvatura dello specchio, questo punto è chiamato fuoco dello specchio sferico concavo e la distanza  $f$  è detta distanza focale dello specchio.

È possibile quindi riscrivere la formula 2.9 utilizzando la distanza focale:

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = -\frac{1}{f} \quad (2.11)$$

nella quale  $f < 0$  poiché  $R < 0$  [6] [7].

- **Specchio sferico convesso**

Procedendo in modo analogo al paragrafo precedenti si ritrovano le stesse equazioni ottenute con lo specchio sferico concavo con la differenza che il raggio di curvatura  $R$  in questo caso risulta positivo [6] [7].

## 2.4 Lenti

Una lente è un sistema ottico consistente in due o più superfici rifrangenti almeno una delle quali curva.

Generalmente le superfici curve hanno i loro centri di curvatura su uno stesso asse (sistemi centrati) e nella maggior parte dei casi le superfici sono sferiche (al limite piane).

Una lente che consiste di un solo elemento e cioè ha solo due superfici rifrangenti è detta lente semplice; lente composta nel caso contrario. Inoltre una lente può essere sottile o spessa a seconda che il suo spessore sia trascurabile o meno.

È definito asse ottico la retta che congiunge i centri di curvatura delle due faccie della lente e centro ottico il punto dell'asse ottico che divide a metà lo spessore della lente [6].

In seguito verranno considerate solamente lenti sottili, nelle quali le due superfici rifrangenti sono molto vicine e quindi lo spessore risulta trascurabile.

### 2.4.1 Lenti sottili

La trattazione delle lenti sottili si basa sull'utilizzo delle proprietà dei diottri<sup>1</sup> sferici assumendone uno successivo all'altro (Figura 2.5).

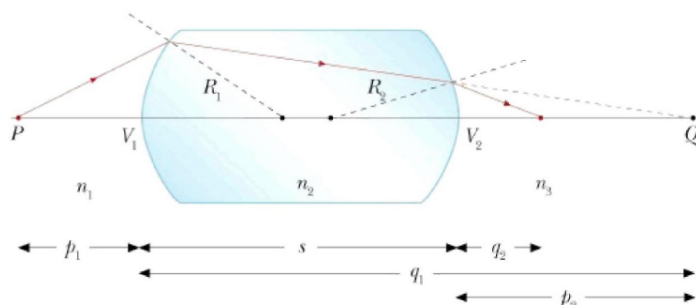


Figura 2.5: Doppio diottero.

---

<sup>1</sup>Superficie di contatto tra due mezzi con diverso indice di rifrazione.

Le equazioni del diottrio per le due superfici risultano:

$$\frac{n_1}{p_1} + \frac{n_2}{q_1} = \frac{n_2 - n_1}{R_1} \quad , \quad \frac{n_2}{p_2} + \frac{n_3}{q_2} = \frac{n_3 - n_2}{R_2} \quad (2.12)$$

inoltre viene considerata una terza equazione che esprime il fatto che l'immagine data dal primo diottrio funge da oggetto al secondo, in cui  $s$  è lo spessore della lente

$$p_2 = s - q_1 \quad (2.13)$$

Ponendo  $s = 0$  e  $n_3 = n_1$  si ottiene:

$$\frac{n_1}{p_1} + \frac{n_1}{q_1} = (n_2 - n_1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.14)$$

Ponendo inoltre:

$$\frac{1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.15)$$

nota come legge dei costruttori di lenti, in quanto lega  $f$  all'indice di rifrazione del materiale di cui è costruita la lente ai raggi di curvatura delle due superfici che la delimitano, si ottiene l'equazione della lente sottile:

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (2.16)$$

La quantità  $1/f$  è detta potere convergente della lente e si misura in diottrie ( $\text{m}^{-1}$ ); a seconda dei valori dei vari parametri in gioco questo valore può essere positivo o negativo.

Se la lente è biconvessa o piano-convessa, un fascio di luce collimato o parallelo all'asse ottico viene fatto convergere (o focalizzare) su un punto dell'asse, ad una certa distanza oltre la lente pari alla focale della lente. In questo caso la lente viene detta positiva o convergente (Figura 2.6).

Se invece è biconcava o piano-concava, un fascio collimato è fatto divergere e la lente è perciò detta negativa o divergente (Figura 2.7) [6] [7].

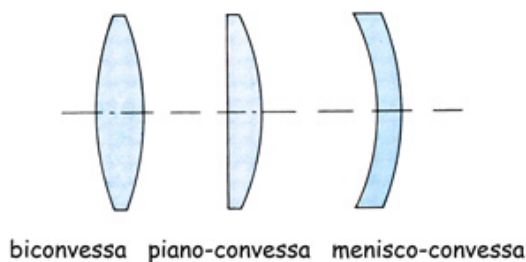


Figura 2.6: Lenti convergenti.

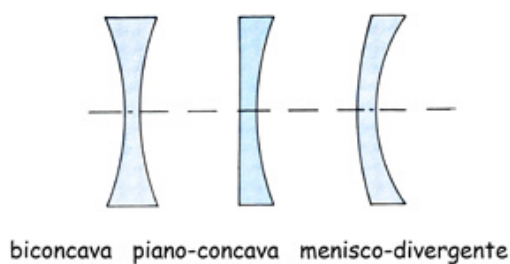


Figura 2.7: Lenti divergenti.

### 2.4.2 Combinazione di più lenti sottili

Un sistema ottico può essere costituito da più lenti ognuna delle quali con una certa focale e poste ad una certa distanza tra di loro. Combinando semplicemente due lenti sottili aventi lo stesso asse ottico risulta che la lunghezza focale complessiva è data da:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (2.17)$$

se la distanza tra loro è molto piccola rispetto alle corrispondenti focali.

Se  $N$  lenti sono poste a contatto e sono rispettate le condizioni delle lenti sottili, in generale si può scrivere che:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots + \frac{1}{f_N} \quad (2.18)$$



## 2.5 Ottica adattiva

L'ottica adattiva (OA) è una tecnologia utilizzata per migliorare le caratteristiche di un sistema ottico compensando le aberrazioni, agendo attivamente sul fronte d'onda del fascio luminoso. Queste possono essere causate da imperfezioni degli elementi ottici usati e/o da condizioni esterne. Di solito le aberrazioni peggiorano la qualità del segnale, creando distorsioni o riducendone intensità.

Può anche correggere disturbi derivanti dal sistema ottico stesso a causa per esempio di disallineamenti, o ottiche non perfette, oppure per disturbi di altra natura, come per esempio effetti di calore, o turbolenza atmosferica.

L'ottica adattiva è stata introdotta per la prima volta nel 1953 e si è sviluppata inizialmente nel campo dell'astronomia con lo scopo di compensare gli effetti atmosferici e migliorare la qualità delle osservazioni.

Attualmente si utilizza in molti campi dalle macchine industriali agli apparati medicali, sia per applicazioni di imaging che di non imaging.

- Applicazioni di imaging: possono trarre vantaggio dall'uso dell'ottica adattiva per ottenere una migliore qualità delle immagini e possono essere divise in vari settori applicativi:
  - applicazioni biomedicali, per esempio l'oftalmologia, per correggere le aberrazioni dell'occhio umano. In questo modo è possibile ottenere immagini nitide della retina e di conseguenza diagnosi più accurate;
  - microscopia, che beneficia dell'OA per la correzione statica delle lenti;
  - microscopia a largo campo, per la quale si può ridurre drasticamente il costo, sostituendo obiettivi molto costosi con elementi adattivi e tecniche di OA;
  - optical coherence tomography (OCT)<sup>2</sup>, nella quale la profondità di scansione può essere aumentata grazie all'ottica adattiva;

---

<sup>2</sup>metodo di diagnostica che utilizza immagini, il metodo sfrutta la riflessione dei raggi infrarossi utilizzati.

## 2. OTTICA GEOMETRICA

---

- visione robotica, dove l'OA consente un aggiustamento real-time della visione;
  - sorveglianza, dove l'OA può venire impiegata per correggere gli effetti della turbolenza atmosferica e ottenere immagini più nitide, aumentando il campo sorvegliato;
  - astronomia, per cui può essere impiegata l'OA per la correzione della turbolenza atmosferica;
  - applicazioni di visione, come la sorveglianza ambientale in cui l'OA può essere uno strumento unico per aumentare la distanza, o per la cosiddetta hyper-vision;
  - infine nei sistemi di imaging tridimensionali, per aumentare la profondità di scansione.
- Applicazioni di non imaging: spaziano dall'ottimizzazione e controllo di sistemi laser (OA in cavità per la selezione dei modi o fuori cavità per il beam shaping) fino alle comunicazioni classiche e quantistiche in spazio libero, per l'attenuazione del rumore e il puntamento preciso, come anche in sistemi di misura laser o testing dove l'OA può aumentare la precisione della misura; alcuni esempi possono essere:
    - lavorazione dei materiali tramite laser. La qualità del processo di lavorazione aumenta utilizzando l'OA, per controllare e mantenere sotto controllo la forma e le dimensioni del fascio laser utilizzato per la lavorazione;
    - comunicazioni ottiche ad alta velocità in spazio libero, beneficiano della riduzione dei fattori di rumore e ottimizzando il puntamento tra sorgente e ricevitore.

In generale questi dispositivi si basano su un principio di funzionamento comune: vengono misurate le aberrazioni del fronte d'onda in arrivo e il sistema, in funzione di ciò che è stato misurato, si adatta in modo da correggere tali aberrazioni in tempo reale.

I dispositivi di ottica adattiva utilizzano quindi elementi ottici attivi (come uno specchio deformabile) in grado di modificare le proprie caratteristiche; è quindi fondamentale l'impiego di materiali che abbiano proprietà modificabili e controllabili.

## 2. OTTICA GEOMETRICA

---

# Capitolo 3

## Piezoelettrici e fotostrizione

In questo capitolo si presenta una breve descrizione della fenomenologia dell'effetto piezoelettrico e della fotostrizione, introducendo i principi e le grandezze fisiche essenziali per l'analisi di questo fenomeno. Viene anche riportata una breve storia della ricerca scientifica in questo campo e delle applicazioni tecniche della piezoelettricità.

### 3.1 I materiali dielettrici

Dal punto di vista del comportamento elettrico i materiali possono essere classificati in conduttori, semiconduttori e dielettrici o isolanti.

Un materiale dielettrico ideale non possiede cariche libere e quindi non consente il passaggio di correnti elettriche. Quando un dielettrico è sottoposto ad un campo elettrico esterno, i centri di carica positiva e negativa all'interno delle molecole di cui è composto si spostano dalle loro posizioni di equilibrio di alcune frazioni di diametro molecolare ed in versi opposti lungo le linee di campo; ogni singola molecola diventa così un dipolo elettrico e nasce uno stato di polarizzazione all'interno del materiale. Il contributo di tutti i dipoli elettrici molecolari ha l'effetto di alterare il campo elettrico all'interno del materiale in maniera significativa. La polarizzazione di un dielettrico può avvenire secondo tre modalità differenti: polarizzazione elettronica, polarizzazione ionica e polarizzazione per orientazione.

Nel primo caso i dipoli si formano a causa di uno spostamento degli elettroni rispetto al nucleo positivo. Nel secondo caso, applicabile a materiali la cui

struttura chimica contiene ioni, i dipoli sono generati da uno spostamento relativo tra ioni di carica opposta. Infine il terzo caso si applica a materiali le cui molecole, in assenza di campi elettrici esterni, sono dipoli elettrici permanenti orientati in maniera casuale; l'applicazione di un campo elettrico provoca un parziale ri-orientamento dei dipoli lungo le linee di campo con la conseguente comparsa di una polarizzazione netta nel materiale. Per una completa descrizione del campo elettrico all'interno di un dielettrico si introducono i vettori campo elettrico  $\mathbf{e}$  [newton/coulomb], intensità di polarizzazione elettrica  $\mathbf{p}$  [coulomb/m<sup>2</sup>] e spostamento elettrico  $\mathbf{d}$  [coulomb/m<sup>2</sup>], tra i quali esiste la relazione:

$$\mathbf{d} = \varepsilon_0 \mathbf{e} + \mathbf{p} \quad (3.1)$$

essendo  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  F/m la costante dielettrica del vuoto. Il vettore  $\mathbf{p}$  è pari a  $N\mathbf{p}_m$ , essendo  $N$  il numero di dipoli per unità di volume e  $\mathbf{p}_m$  il loro momento dipolare; tale vettore è proporzionale al campo elettrico locale all'interno del materiale e vale la relazione  $\mathbf{p} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{e}$ , essendo  $\chi$  una grandezza adimensionale detta suscettività elettrica del mezzo. Sostituendo quest'ultima relazione nella 3.1 si ottiene:

$$\mathbf{d} = \varepsilon \mathbf{e} \quad (3.2)$$

essendo  $\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \chi)$  la permeabilità del mezzo dielettrico. In mezzi anisotropi  $\chi$  e  $\varepsilon$  sono tensori del secondo ordine [8].

#### 3.1.1 Materiali utilizzati

Le ceramiche piezoelettriche appartengono al gruppo dei materiali ferroelettrici. I materiali ferroelettrici sono cristalli che possiedono un momento di dipolo senza un campo elettrico applicato. Questo stato è anche chiamato polarizzazione spontanea. Caratteristica di questo stato è la reversibilità termodinamicamente stabile dell'asse di polarizzazione sotto l'influenza di un campo elettrico, descritta graficamente da un ciclo di isteresi. La reversibilità della polarizzazione, e l'accoppiamento tra gli effetti meccanici ed elettrici sono di importanza cruciale per l'ampia utilizzazione della tecnologia piezoceramica.

I piezoceramici principali in uso oggi,  $\text{PbTiO}_3$  -  $\text{PbZrO}_3$  sono sintetizzati dagli ossidi di piombo, titanio e zirconio; viene anche utilizzato il  $\text{BaTiO}_3$ . Uno speciale

drogaggio di queste ceramiche può essere fatto ad esempio con Ni, Bi, Sb, che consentono di regolare i singoli parametri piezoelettrici nel modo richiesto.

Questi materiali non sono ferroelettrici al di sopra di una certa temperatura, nota come la temperatura di Curie. Sono in uno stato paraelettrico, cioè i dipoli non sono presenti. La costante dielettrica relativa distinta ha un massimo in prossimità della temperatura di Curie.

### **3.2 Elettrostrizione, effetto piezoelettrico diretto e inverso**

Quando un dielettrico è sottoposto ad un campo elettrico, all'interno del materiale sussiste un sistema di forze che bilancia l'azione del campo elettrico esterno sui dipoli elettrici molecolari. Come effetto al secondo ordine dello spostamento relativo tra le cariche, si hanno componenti del sistema di forze interne che comprimono il materiale perpendicolarmente alla direzione del campo elettrico; di conseguenza il materiale subisce un allungamento nella direzione del campo elettrico.

Invertendo il verso del campo elettrico si riscontra una deformazione dello stesso segno. Questo fenomeno è detto elettrostrizione ed è comune a tutti i solidi dielettrici; in esso la deformazione all'interno del materiale è un effetto quadratico rispetto al campo elettrico.

In alcuni corpi, comunque, le deformazioni che compaiono nel materiale in seguito all'applicazione di un campo elettrico (tensione) hanno una dipendenza lineare dal campo elettrico stesso, in modo tale che un'inversione del campo elettrico provoca deformazioni di segno opposto; tale fenomeno è detto effetto piezoelettrico inverso. Applicando una tensione AC genera un cambiamento ciclico nella geometria (ad esempio aumento o riduzione del diametro di un disco).

Ad esso si accompagna sempre l'effetto reciproco, cioè la comparsa di un campo elettrico all'interno del materiale in seguito ad una sua deformazione meccanica; tale fenomeno è detto effetto piezoelettrico diretto.

La deformazione genera degli spostamenti degli elementi reticolari della struttura atomica, positivi o negativi, che si manifestano in momenti di dipolo.

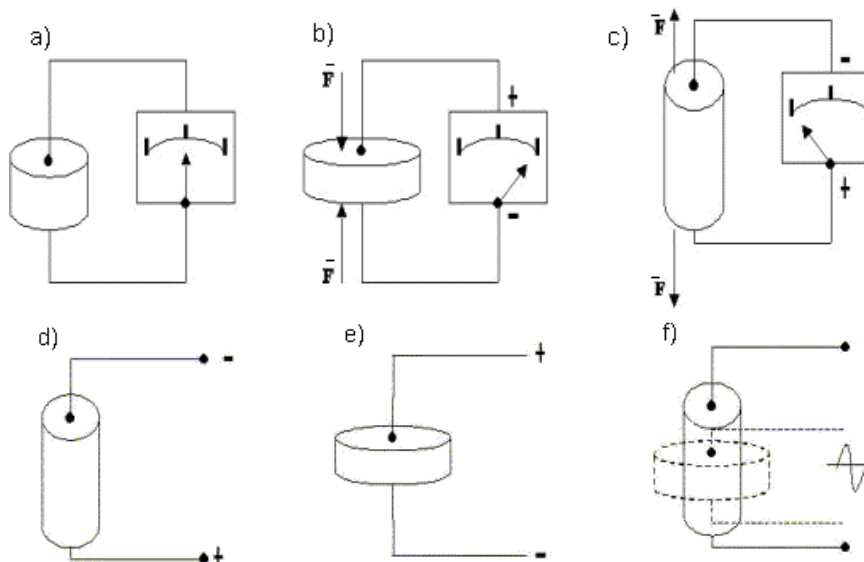


Figura 3.1: Cristallo piezoelettrico (a) a riposo; (b) sottoposto ad una compressione; (c) sottoposto ad una trazione; (d) sottoposto ad una tensione continua positiva; (e) sottoposto ad una tensione continua negativa; (f) sottoposto ad una tensione alternata.

Al contrario dell'elettrostrizione, l'effetto piezoelettrico non si riscontra in tutti i dielettrici ma soltanto in quelli la cui struttura non presenta un centro di simmetria per la carica elettrica, tale che una riflessione rispetto a tale centro lascia invariata la disposizione delle cariche elettriche. In presenza di un centro di simmetria, in ogni cella elementare di materiale i centri di carica positiva e negativa coincidono necessariamente con il centro di simmetria della carica; sottoponendo tale materiale ad una deformazione meccanica, i centri di carica positiva e negativa continuano a coincidere e la polarizzazione netta all'interno del materiale rimane nulla.

Solo in assenza di un centro di simmetria delle cariche lo spostamento delle cariche elettriche conseguente ad una deformazione meccanica può indurre una polarizzazione elettrica netta all'interno del materiale. Una spiegazione più formale si ottiene tenendo conto che il legame lineare tra deformazione e campo elettrico in un materiale piezoelettrico è espresso da un tensore del terzo ordine. Per un materiale dotato di centro di simmetria la riflessione rispetto a tale centro è ov-



viamente una trasformazione di simmetria e provoca un cambiamento di segno in tutte le componenti del tensore piezoelettrico; ciò implica che tale tensore deve essere necessariamente nullo. In particolare nei materiali isotropi, che possiedono tutte le simmetrie, non si può riscontrare l'effetto piezoelettrico.

L'effetto piezoelettrico diretto può essere utilmente sfruttato nella realizzazione di trasduttori di pressione, accelerometri e in genere nella realizzazione di sensori. L'effetto piezoelettrico inverso è sfruttato nella realizzazione di risonatori piezoelettrici, di motori lineari e rotativi piezoelettrici ed in generale nella costruzione di dispositivi di attuazione [8].

### 3.2.1 Costanti e definizioni

In questo paragrafo verranno definite alcune costanti e date alcune definizioni che caratterizzano il materiale piezoelettrico [9] [10]; ci si riferirà alle direzioni degli assi nello spazio secondo come riportato in Figura 3.2.

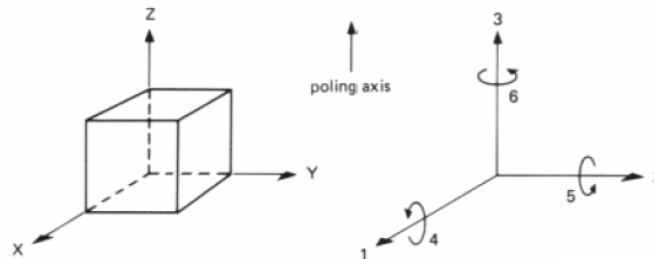


Figura 3.2: Sistema di coordinate utilizzato.

- Permittività, o costante dielettrica relativa, è una misura della polarizzabilità del materiale, è definita come lo spostamento dielettrico per unità di campo elettrico. Il primo indice indica la direzione dello spostamento del dielettrico, la seconda indica la direzione del campo elettrico. Per esempio  $\varepsilon_{33}^S$  indica che il campo elettrico e lo spostamento agiscono lungo la direzione 3, con il materiale sottoposto a deformazione.
- Costante di carica piezoelettrica ( $d_{ij}$  [m/V]) è una misura della polarizzazione elettrica indotta nel materiale in risposta ad una sollecitazione mec-

### 3. PIEZOELETTTRICI E FOTOSTRIZIONE

---

canica, o la deformazione meccanica ottenibile quando un campo elettrico viene applicato ( $T = \text{costante}$ ). Il primo indice si riferisce alla direzione di polarizzazione generata nel materiale, il secondo alla direzione della sollecitazione applicata o alla direzione della deformazione indotta.

Per esempio,  $d_{33}$  è la densità di carica sviluppata per stress meccanico, o, in alternativa, deformazione sviluppata per unità di intensità di campo elettrico, tutti nella direzione di polarizzazione.

- Costante di tensione piezoelettrica ( $g_{ij}$  [ $\text{m}^2/\text{C}$ ]) è definita come il campo elettrico prodotto nel materiale da una sollecitazione meccanica unitaria (nell'effetto diretto), oppure lo stress meccanico subito dal materiale per unità di spostamento elettrico applicato. Il primo indice si riferisce alla direzione del campo elettrico generato nel materiale o allo spostamento elettrico applicato, il secondo si riferisce rispettivamente alla direzione della sollecitazione applicata o alla direzione della deformazione indotta.

Se si divide la costante di carica piezoelettrica per il valore della permittività si ottiene  $g_{ij}$

$$g_{ij} = \frac{d_{ij}}{\varepsilon_{ij}} \quad (3.3)$$

- Costante elastica ( $s_{ij}$ ) è una misura il rapporto tra la deformazione rispetto alla sollecitazione meccanica applicata. Il primo indice si riferisce alla direzione di deformazione, il secondo alla direzione della sollecitazione.

Le ceramiche piezoelettriche sono generalmente suddivise in due gruppi: hard e soft doped, che si riferiscono alle proprietà di mobilità dei dipoli e quindi al comportamento di polarizzazione [11]:

- Hard doped.

Sono materiali che possono essere sottoposti ad elevate sollecitazioni elettriche e meccaniche e la stabilità delle loro caratteristiche li rende ideali per applicazioni ad alta potenza.

Alcuni esempi di materiali di questo tipo possono essere NCE41 e NCE40 adatti per applicazioni con ultrasuoni, e NCE80 per trasduttori di potenza.

- Soft doped.

Sono materiali facili da polarizzare caratterizzati da elevata permittività

relativa, sono adatti per realizzare attuatori, ricevitori e trasduttori a bassa potenza.

Ad esempio NCE51 e NCE57 sono particolarmente adatti per attuatori, NCE53 per sensori, e NCE55 e NCE59 sono utilizzati per applicazioni ad elevata sensibilità con un intervallo di temperatura limitato.

### 3.3 Attuatori piezoelettrici multistrato

I componenti piezoelettrici multistrato sono diventati negli anni una soluzione efficace per applicazioni di micro-posizionamento che cercano un elevato grado di precisione e di controllo.

Questi componenti, di spessore inferiore ai 3mm, richiedono una bassa tensione di pilotaggio ( $\leq 60V$ ), veloce tempo di risposta, precisione e basso consumo energetico e molte applicazioni richiedono in aggiunta che l'attuatore sia compatto e fornisca uno spostamento consistente.

Si è passati quindi dal classico bender ad un dispositivo a forma di anello che caratterizza la capacità massima di lavoro; infatti la concentrazione isotropa della ceramica piezoelettrica viene sfruttata in maniera vantaggiosa ortogonalmente all'asse di polarizzazione.

La struttura di questo nuovo attuatore presenta una struttura multistrato in cui sono disposti una serie di elettrodi sottili (Figura 3.3).

Il disco piezoelettrico viene progettato con un certo numero di strati di alcune decine di micron di spessore e, per muoversi completamente, l'attuatore ha bisogno di qualche centinaio di Volt. Gli elettrodi interni sono realizzati con una pasta metallica conduttiva e sono suddivisi in tre diverse sezioni a seconda che gli strati siano collegati a massa, al positivo o negativo dell'alimentazione. Ciascuna serie di elettrodi interni si estende orizzontalmente, sono equidistanti tra loro ed hanno una superficie leggermente più piccola di una sezione trasversale orizzontale (per l'isolamento) e hanno estensioni che possono raggiungere l'estremità della circonferenza. Queste estensioni, chiamate elettrodi esterni, sono collegate elettricamente tra loro ad una estremità mediante metallizzazione.

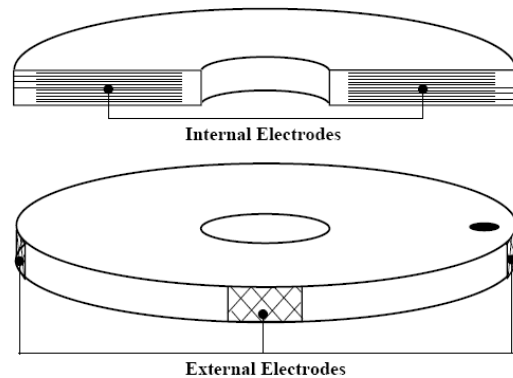


Figura 3.3: Schematic presentation of a ring bender [12].

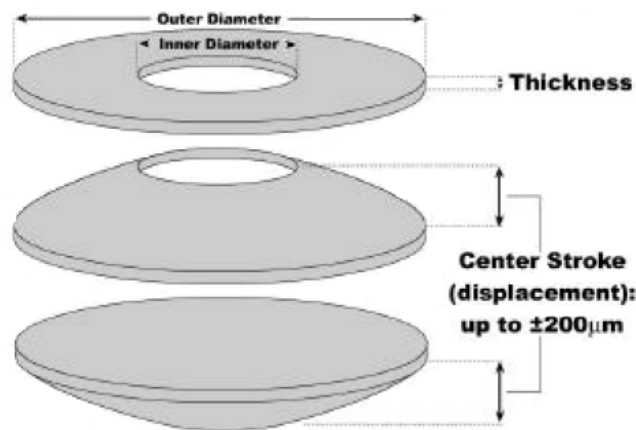


Figura 3.4: Ring bender actuation principle [12].

L'attuatore funziona nel seguente modo: quando una tensione appropriata viene applicata agli elettrodi esterni, la ceramica situata tra la serie di elettrodi interni collegati a massa e al riferimento positivo si contrae nella direzione radiale di questa regione; mentre nessuna contrazione avviene negli strati ceramici del piezoelettrico situati tra massa e il riferimento negativo. Questo comporta una deformazione dell'attuatore che assume una forma parzialmente sferica (Figura 3.4).

È quindi una valida soluzione per un'ampia gamma di applicazioni micro-mecchaniche come la messa a punto di uno specchio in un dispositivo ottico, o nell'allineamento delle fibre ottiche [12].

### 3.4 La fotostrizione

La fotostrizione è la generazione di una deformatazione in un materiale sottoposto a irraggiamento da una sorgente luminosa.

La teoria della fotostrizione può essere descritta in maniera più dettagliata dalla combinazione tra l'effetto fotovoltaico e quello piezoelettrico.

Il principio dell'effetto fotovoltaico è quello di trasformare la luce in elettricità che combinato all'effetto piezoelettrico, già illustrato nei paragrafi precedenti, crea un movimento meccanico.

La fotostrizione può essere osservata nei materiali ceramici (Figura 3.5). Una delle ceramiche che ha dimostrato di produrre questo effetto è quella formata da piombo, lantanio, zirconio e titanio (PLZT).

Altre due ceramiche sono: PMN-PT drogata con tungsteno e PZN-PT. A differenza della PLZT che è una ceramica artificiale creata in laboratorio, PMN-PT drogata con tungsteno e PZN-PT sono cristalli che sono letteralmente cresciuti con le corrette proprietà [13].

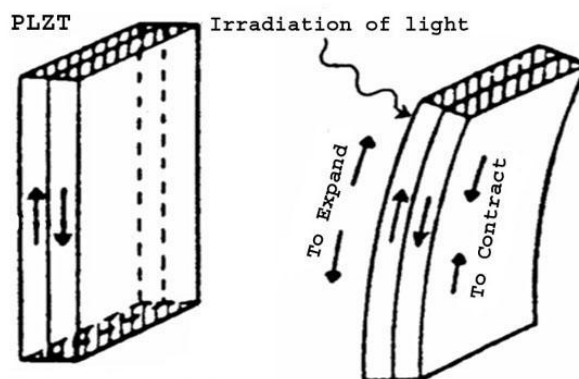


Figura 3.5: Fotostrizione [13].

Inoltre è possibile utilizzare come attuatore fotoattivo il copolimero polivinilidenefluoruro trifluoroetilene P(VDF-TrFE) contenente il 75% di polivinilidenefluoruro e il 25% di trifluoroetilene. È possibile effettuare lo studio di questo polimero valutando separatamente la componente termica e quella piezoelettrica

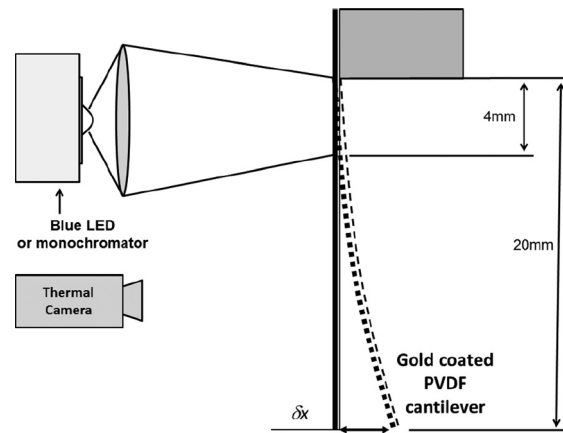


Figura 3.6: Experimental setup for the determination of the characterization of the bending of the P(VDF-TrFE) strip [14].

determinando la deformazione di una striscia del materiale considerato.

Per valutare la deformazione è stato utilizzato il sistema riportato in Figura 3.6 in cui è presente una striscia del copolimero con rivestimento in oro di  $30\mu\text{m}$  di spessore e lunghezza 20mm la quale è stata illuminata nei suoi primi 4mm da un LED blu che emette nell'intorno dei 488nm.

La sua deformazione è stata osservata e misurata tramite una telecamera effettuando la prova in funzione dell'intensità luminosa emessa dal LED blu e per due differenti valori di spessore del rivestimento in oro (50nm e 150nm) [14].

#### 3.4.1 Principali utilizzi

Ci sono, potenzialmente, molti possibili usi per le conoscenze acquisite attraverso la ricerca sulla fotostrizione anche se la teoria riguardante il fenomeno, non è ancora ben sviluppata.

Alcuni esempi di utilizzo riguardano [13]:

- Foto-attuatori: la fotostrizione può essere utilizzata per sviluppare foto-attuatori che possono essere utilizzati nelle centrali elettriche e in altre aree commerciali e scientifiche.

- Foto-acustica: si può utilizzare il fenomeno nel campo dei laser e delle fibre ottiche. È possibile trasmettere dati vocali attraverso questi mezzi e decodificare nuovamente in suoni udibili.
- dispositivi in grado di seguire sorgenti luminose. Questa tecnologia potrebbe essere utilizzata in numerosi campi della scienza spaziale.

### 3.5 Cenni storici

La scoperta dell'effetto piezoelettrico diretto avvenne ad opera dei fratelli Curie nel 1880; tale scoperta non giunse inattesa in quanto Pierre Curie aveva già condotto studi sulla piroelettricità ed in particolare sul suo legame con la struttura cristallina di un materiale. Tali studi avevano consentito ai fratelli Curie di prevedere anche l'effetto piezoelettrico diretto e di capire in quale tipo di materiali si potesse riscontrare; i risultati di tale ricerca apparvero sulla rivista *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences de Paris* nel 1880.

L'effetto piezoelettrico diretto fu riscontrato in diversi cristalli come il clorato di sodio, la boracite, la tormalina, il quarzo, il sale di Rochelle ecc.

L'effetto piezoelettrico inverso fu predetto da Lippman sulla base di considerazioni termodinamiche e fu verificato successivamente dai Curie. Fu Voigt che diede un assetto definitivo alla teoria della piezoelettricità determinando tra le 32 classi di simmetria cristallina, le 20 nelle quali si riscontra l'effetto piezoelettrico.

La piezoelettricità trovò la sua prima applicazione nella realizzazione di misuratori di carica, ad esempio della carica emessa dal radio, ad opera dello stesso Pierre Curie. Fu durante la Prima guerra mondiale che si ebbero le prime applicazioni industriali della piezoelettricità con la costruzione di risonatori al quarzo per generare onde acustiche; tali apparecchi, realizzati da Paul Langevin, erano utilizzati come sonar per individuare i sottomarini in immersione. Una applicazione successiva fu la costruzione di interferometri acustici per la misura della velocità del suono e della dispersione in differenti gas al variare della composizione del gas e della sua temperatura. I cristalli di quarzo furono largamente impiegati anche nella radiotecnica per la realizzazione di filtri selettivi.

Da quel momento i materiali piezoelettrici furono impiegati nella realizzazione di varie tipologie di attuatori e trasduttori, grazie alla loro capacità di trasformare energia meccanica in elettrica e viceversa [8].

### 3. *PIEZOLETTRICI E FOTOSTRIZIONE*

---



## Capitolo 4

# Struttura e funzionamento del LED

Per tutta la durata della tesi è stata utilizzata come sorgente luminosa il LED.

Un LED è per definizione un diodo che emette luce. Un diodo è un dispositivo elettronico a due terminali che permette il passaggio di corrente elettrica in una sola direzione; l'intensità di corrente dipende dalla differenza di potenziale ai capi del dispositivo.

Il LED è un chip di materiale semiconduttore opportunamente drogato per formare quella che viene chiamata una giunzione PN. Il polo positivo della giunzione è chiamato anodo, quello negativo catodo, in Figura 4.1 è rappresentato il simbolo circuitale di un LED.

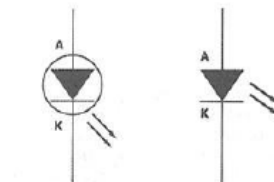


Figura 4.1: Rappresentazione circuitale di un diodo LED.

Per capire il funzionamento del LED è necessario analizzare a livello microscopico la struttura dei materiali.

### 4.1 Evoluzione della tecnologia

Dopo circa un secolo di rapido sviluppo, i LED (Light Emitting Diodes) iniziano ad essere considerati pronti a sostituire le lampade ad incandescenza e fluorescenti. La definizione dei fattori rilevanti che influiscono sulla qualità di queste nuove sorgenti rappresenta un aspetto chiave per la progettazione e la produzione di tali dispositivi elettrici.

Il primo diodo che emetteva luce fu realizzato nel 1907, ma non si fece uso pratico di questa scoperta fino all'invenzione del primo vero LED che fu introdotto solo nel 1962, ed era caratterizzato da un'emissione luminosa molto debole. Da quel momento, la costante implementazione della tecnologia LED ha prodotto miglioramenti incredibili in termini di efficienza luminosa, spettro di emissione, durata di vita, intensità, costo, affidabilità e potenzialità applicative.

I primi LED combinavano Gallio, Arsenico e Fosforo per produrre luce rossa a 655nm. Man mano che la tecnologia progrediva divennero disponibili colori differenti, aumentò il flusso luminoso, e divennero sufficientemente luminosi da poter essere utilizzati dapprima all'interno di applicazioni non elettroniche e infine per l'illuminazione [15].

### 4.2 Semiconduttori, teoria delle bande e drogaggio

Le proprietà elettriche di un materiale dipendono dalla sua struttura atomica. Per questo motivo i materiali solidi vengono classificati in tre categorie in base alla loro resistività ( $\rho$  [ $\Omega$  cm]):

1. isolanti ( $\rho > 10^5$ );
2. semiconduttori ( $10^{-3} < \rho < 10^5$ );
3. conduttori ( $\rho < 10^{-3}$ ).

Gli elettroni dei diversi atomi orbitano attorno al nucleo in livelli di energia o bande: essi riempiono le bande che sono in ordine energetico crescente man

mano che ci si allontana dal nucleo. Utilizzando il modello dell'atomo idrogenoide (atomo a cui sono stati tolti tutti gli elettroni tranne uno), secondo la meccanica quantistica i livelli energetici permessi sono:

$$E_n = \frac{-13.6}{n^2} \text{ [eV]} \quad (4.1)$$

con  $n$  numero intero positivo, ogni livello energetico può ospitare al massimo due elettroni con spin opposto (per il principio di esclusione di Pauli).

Avvicinando tra loro  $N$  atomi i livelli energetici si sdoppiano andando a formare una banda di stati permessi dall'elettrone. Con  $N$  atomi si avranno  $2N$  stati permessi.

Ogni banda contiene quindi, un numero predefinito di elettroni e l'ultima che ne contiene (quella più esterna) è detta banda di valenza (VB).

Il primo livello vuoto al di sopra della banda di valenza è chiamato banda di conduzione (CB). Tra queste due bande può trovarsi una banda proibita (Energy Gap,  $E_g$ ) che è l'insieme dei livelli energetici che gli elettroni del materiale non possono assumere.

In Figura 4.2 sono illustrati i diagrammi a bande di energia delle tre classi di materiali solidi.

Negli isolanti gli elettroni di valenza formano legami molto forti con gli atomi adiacenti. Questi legami sono difficili da rompere, e di conseguenza non ci sono elettroni liberi che possono prendere parte al fenomeno della conduzione. Per questo motivo l'energy gap ( $\sim 9\text{eV}$ ) è molto esteso. Viceversa nei materiali conduttori la banda di valenza è solo parzialmente riempita e si sovrappone alla banda di valenza in modo tale che non vi sia banda proibita. Questa sovrapposizione permette ad un numero elevato di elettroni di spostarsi su livelli energetici disponibili, di energia solo di poco più alta, acquistando energia cinetica e instaurando senza difficoltà il fenomeno della conduzione di corrente.

Nei materiali semiconduttori invece, i legami tra atomi vicini sono moderatamente forti, pertanto le vibrazioni di origine termica possono riuscire a spezzare alcuni di questi, generando un elettrone e una lacuna liberi. La banda proibita non essendo molto estesa ( $\sim 1\text{eV}$ , 1.2 per il silicio) permette ad alcuni elettroni con sufficiente energia di passare dalla banda di valenza a quella di conduzione. Applicando un campo elettrico esterno, sia gli elettroni della banda di conduzione

#### 4. STRUTTURA E FUNZIONAMENTO DEL LED

---

che le lacune della banda di valenza acquisiscono energia cinetica e conducono elettricità.

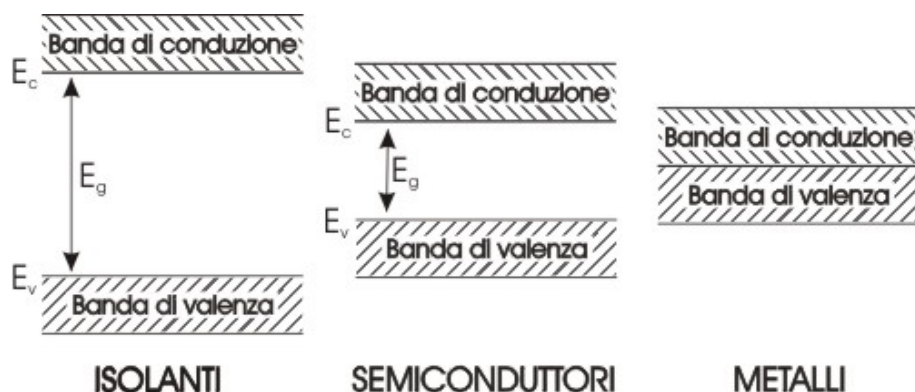


Figura 4.2: Rappresentazione schematica delle bande di energia.

Per modificare le proprietà del materiale, per avere una buona conduzione si introducono nel semiconduttore delle impurità, il semiconduttore diventa così estrinseco (o drogato) e si introducono i livelli energetici delle impurità.

L'aggiunta di impurità pentavalenti (Sb, As, P) introduce elettroni liberi che non partecipano ai legami covalenti, e aumentano la conduttività del semiconduttore che viene detto di tipo  $n$ . Gli atomi pentavalenti donano un elettrone e vengono così definiti: donatori.

Si crea un livello energetico vicino alla banda di conduzione, a temperatura ambiente tutti i donatori sono ionizzati (Figura 4.3).

Mentre l'aggiunta di impurità trivalenti (B, Al, Ga) crea delle assenze di elettroni di valenza (lacune), il semiconduttore viene detto di tipo  $p$ . Gli atomi trivalenti accettano un elettrone e per questo vengono detti: accettori.

Si crea un livello energetico vicino alla banda di valenza e a temperatura ambiente tutti gli accettori sono ionizzati (Figura 4.4).

Sia per i semiconduttori intrinseci (non drogati) che per quelli estrinseci quando il processo di generazione/ricombinazione elettrone-lacuna è in equilibrio vale

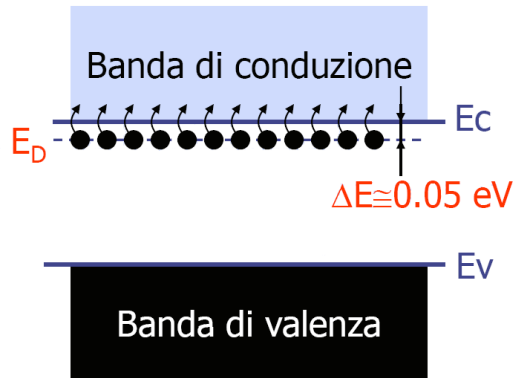


Figura 4.3: Diagramma a bande di un semiconduttore drogato n [16].

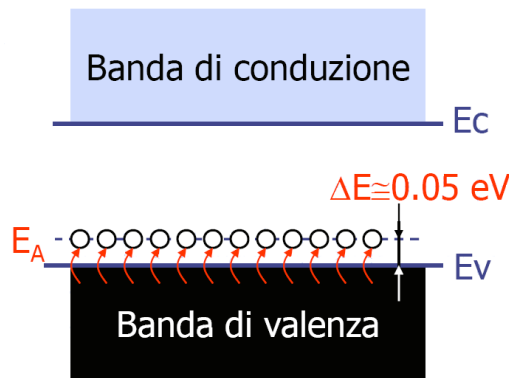


Figura 4.4: Diagramma a bande di un semiconduttore drogato p [16].

la legge di azione di massa:

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (4.2)$$

con  $n_i^2$  densità degli elettroni presenti in un semiconduttore intrinseco, si può trovare inoltre che:

$$n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (4.3)$$

con  $N_C$  la densità degli stati vicino al bordo inferiore della banda di conduzione,  $N_V$  la densità degli stati vicino al bordo superiore della banda di valenza e  $k$  la costante di Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  [J K<sup>-1</sup>]) [15] [16].

### 4.3 Giunzione P-N

Quando vengono unite due barrette di semiconduttore una di tipo  $p$  e l'altra di tipo  $n$  si genera nella zona di giunzione una diffusione delle cariche, lacune dalla zona  $p$  alla zona  $n$ , ed elettroni dalla zona  $n$  alla  $p$ . Questa diffusione genera un campo elettrico opposto al flusso di cariche che genera una condizione di equilibrio con corrente nulla. In equilibrio in prossimità della giunzione si trova una regione completamente svuotata dove la concentrazione dei portatori è nulla: essa viene detta regione di svuotamento o regione di carica spaziale.

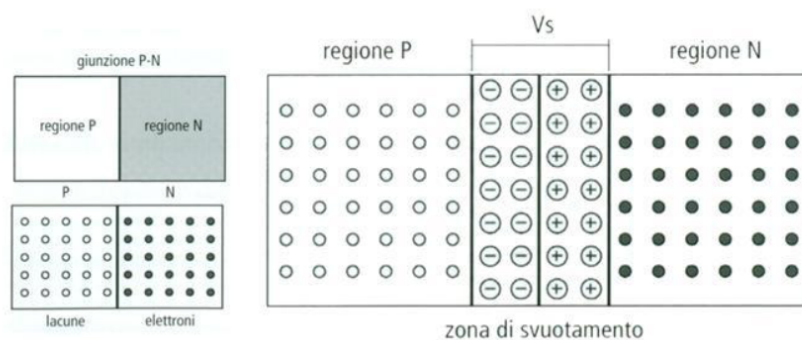


Figura 4.5: Giunzione P-N [15].

Il campo elettrico nella regione di svuotamento determina la tensione di soglia ( $V_\gamma$ ) del dispositivo. Tensione al di sotto della quale non vi è conduzione di corrente elettrica, anche se il diodo-LED è inserito con polarizzazione diretta.

Polarizzare una giunzione P-N significa applicare una certa tensione ai suoi estremi: si ha polarizzazione diretta quando viene applicata una tensione positiva tra il morsetto del lato  $p$  e quello del lato  $n$ , in questo caso la tensione applicata abbassa la barriera di potenziale favorendo lo spostamento degli elettroni dalla zona  $n$  alla zona  $p$  mentre viceversa le lacune dalla zona  $p$  si spostano verso la zona  $n$ , la loro somma crea una corrente diretta nel diodo; mentre si ha polarizzazione inversa quando viene applicata una tensione negativa tra il morsetto del lato  $p$  e quello del lato  $n$ , in questo caso la tensione applicata provoca un aumento della barriera di potenziale, dunque una riduzione delle cariche maggioritarie, cioè gli elettroni dal lato  $n$  e le lacune dal lato  $p$  sono impediti ad attraversare la barriera; non sono influenzati invece i portatori di carica minoritari, cioè le

lacune dal lato  $n$  e gli elettroni dal lato  $p$ , che quindi contribuiscono a creare una piccola corrente, chiamata corrente di saturazione inversa  $I_0$ .

Superata una certa tensione, però si raggiunge quella che viene chiamata tensione di breakdown ( $V_z$ ) oltre la quale si generano scariche elettriche tali da provocare la distruzione del diodo poiché si ha un aumento elevato e improvviso della corrente.

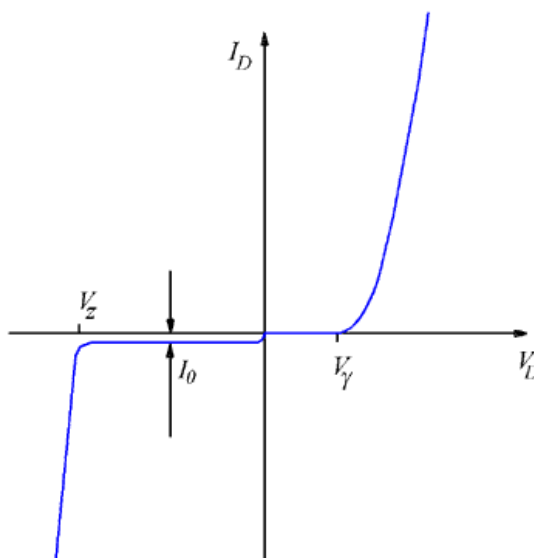


Figura 4.6: Curva caratteristica di un diodo.

In Figura 4.6 è rappresentata la curva caratteristica V-I di un diodo LED, a destra dell'asse delle ordinate è la zona di polarizzazione diretta a sinistra la zona di polarizzazione inversa.

La relazione che lega tensione e corrente è data da:

$$I = I_0 (e^{(qV/kT)} - 1) \quad (4.4)$$

## 4.4 Emissione luminosa

Esistono tre processi fondamentali di interazione tra elettrone e fotone: assorbimento, emissione spontanea ed emissione stimolata.

Si considerino due livelli energetici che un atomo può assumere, ogni transizione tra questi stati comporta l'assorbimento o l'emissione di un fotone (Figura 4.7). A temperatura ambiente, la maggior parte degli atomi si trova nello stato fondamentale. Tale situazione viene perturbata quando un fotone di energia pari a

#### 4. STRUTTURA E FUNZIONAMENTO DEL LED

$E_g$  incide sul sistema. Un atomo del livello fondamentale può assorbire il fotone e di conseguenza passare allo stato eccitato. Questo cambiamento dello stato energetico è detto assorbimento.

Lo stato eccitato dell'atomo è instabile, dopo poco tempo l'elettrone ritorna nello stato fondamentale emettendo un fotone di energia pari a  $E_g$ , se siamo in presenza di un semiconduttore con energy gap diretto<sup>1</sup> in quanto viene conservato il momento. In caso contrario (energy gap indiretto) l'interazione avviene con l'emissione di un fonone. Questo processo è detto emissione spontanea.

Quando un fotone colpisce un atomo mentre questo è nello stato eccitato l'atomo viene stimolato a compiere una transizione verso lo stato fondamentale ed emettere un fotone in fase con la radiazione incidente. Questo processo prende il nome di emissione stimolata.

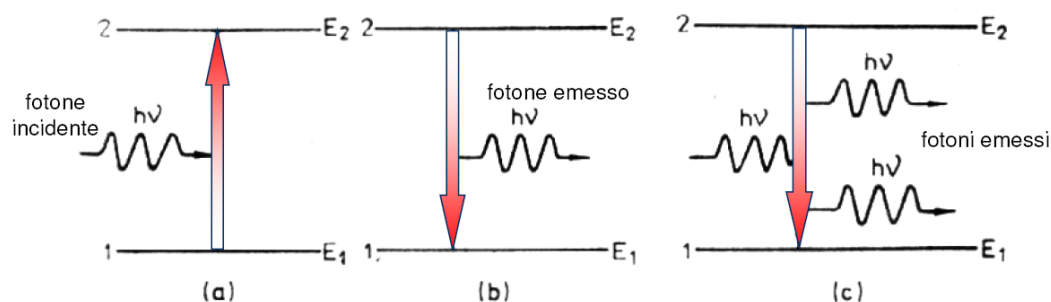


Figura 4.7: Processi di: a) assorbimento, b) emissione spontanea, c) emissione stimolata.

L'emissione di luce nei LED è dovuta principalmente al fenomeno dell'emissione spontanea, in cui i fotoni sono prodotti nella giunzione P-N dalla ricombinazione di elettroni e lacune, in grado di emettere radiazioni nell'ultravioletto, nel visibile o nell'infrarosso.

A determinare la lunghezza d'onda della luce emessa, concorrono il materiale utilizzato per la creazione della giunzione P-N e il livello di drogaggio del materiale (Figura 4.8) [15] [17].

<sup>1</sup>Se il minimo della banda di conduzione è allineato con il massimo della banda di valenza



Materiali semiconduttori	Colore dell'emissione del LED
AlGaAs	Rosso e IR
AlGaP	Verde
AlGaInP	Arancione-rosso brillante, arancione, giallo
AlGaN	UV vicino e lontano
AlN	UV vicino e lontano
C (diamante)	UV
GaAsP	Rosso, rosso-arancio, arancio, giallo
GaP	Rosso, giallo, verde
GaN	Verde, verde smeraldo, blu
GaN con barriera AlGan	Blu, bianco
InGaN	Blu-verde, blu
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (zaffiro) come substrato	Blu
Si (silicone) come substrato	Blu (in fase di sviluppo)
SiC	Blu
ZnSe	Blu

Figura 4.8: Materiali impiegati nella produzione di sistemi LED [15].

## 4.5 Proprietà ottiche

Alcune delle caratteristiche più interessanti dei LED sono le proprietà ottiche, ed enormi sforzi sono stati fatti per migliorare la loro efficienza ottica. A questo continuo miglioramento contribuisce non solo l'aumento dell'efficienza quantica interna ma anche i vari metodi che sono adottati nella progettazione sia del chip che della lente epossidica per ottenere una maggiore estrazione di fotoni dalla regione attiva.

Verrà quindi descritto in questo paragrafo il comportamento ottico di un LED, dalla relazione tra gli stati di energia e la potenza luminosa, alla configurazione del cono di fuga della luce.

### 4.5.1 Efficienza quantica esterna

Se si vuole valutare l'efficienza totale di un LED, dall'iniezione di corrente all'estrazione di fotoni, devono essere valutati tre differenti contributi:

- L'efficienza di iniezione è la capacità di iniettare coppie elettrone-lacuna alla regione di carica spaziale prima che ricombinino fuori di essa, cioè:

$$\eta_{inj} = \left(1 + \frac{\mu_h N_A L_e}{\mu_e N_D L_h}\right)^{-1}, \quad (4.5)$$

dove  $L_{e,h}$  è la lunghezza di ricombinazione,  $\mu_{e,h}$  rispettivamente di elettroni e lacune.

- L'efficienza quantica interna che è il numero di ricombinazioni radiative (nonché il numero di fotoni emessi dalla regione attiva) rispetto al numero totale di ricombinazioni:

$$\eta_{int} = \frac{P_{int}/h\nu}{I/q}, \quad (4.6)$$

con  $P_{int}$  la potenza ottica emessa dalla regione attiva, e  $I$  la corrente iniettata.

- L'efficienza di estrazione che risulta il rapporto tra il numero di fotoni emessi all'esterno del package e il numero di fotoni emessi dalla regione attiva:

$$\eta_{extraction} = \frac{P/h\nu}{P_{int}/h\nu}, \quad (4.7)$$

dove  $P$  è la potenza ottica emessa.

Questo parametro è strettamente dipendente dalla progettazione della struttura del LED: quanto più lungo è il percorso che devono attraversare i fotoni più alta è la probabilità che essi rimangono intrappolati all'interno del dispositivo per venire assorbiti dalla metallizzazione o da alcune impurità con un energy gap inferiore.

Ora è possibile valutare l'efficienza ottica complessiva utilizzando il parametro definito efficienza quantica esterna:

$$\eta_{ext} = \eta_{int}\eta_{extraction} = \frac{P/h\nu}{I/q}. \quad (4.8)$$

### 4.5.2 Spettro di emissione

Idealmente, poiché l'energy gap è definito per ogni semiconduttore e vale la relazione  $E_g = h\nu$ , ogni ricombinazione e il rispettivo rilascio di un fotone è accompagnata da una radiazione monocromatica.

Considerando che la distribuzione degli elettroni e delle lacune è definita dalla statistica di Fermi, in un semiconduttore reale ci sono elettroni con un decadimento di energia più grande dell'energy gap, quindi la radiazione emessa non sarà monocromatica.

Analizzato la distribuzione parabolica della banda di valenza e di conduzione rispetto al moto degli elettroni, per la conservazione dell'energia si ha:

$$h\nu = E_g + \frac{(h/2\pi)^2 k^2}{2m_r^*}, \quad (4.9)$$

con  $1/m_r^* = 1/m_e^* + 1/m_h^*$  la massa ridotta.

Si può dimostrare che la densità degli stati permessi ha una dipendenza parabolica dall'energia. Cioè vale la relazione:

$$\text{densità degli stati} = \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_r^*}{(h/2\pi)^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_g}, \quad (4.10)$$

mentre le energie degli elettroni sono distribuite secondo la funzione di Boltzmann:

$$f_B(E) = e^{E/kT} \quad (4.11)$$

essendo l'intensità della radiazione emessa da un LED proporzionale al prodotto delle equazioni 4.9 e 4.10 (Figura 4.9):

$$I(E) \propto \sqrt{E - E_g} e^{E/kT}. \quad (4.12)$$

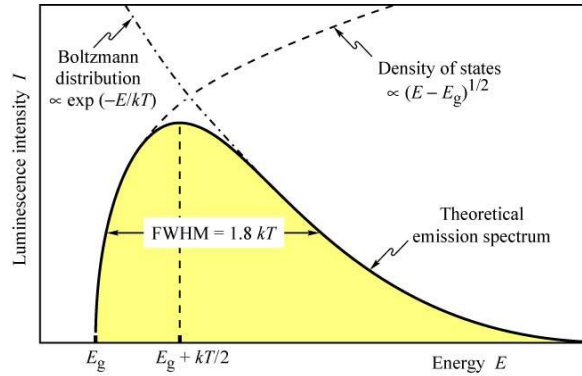


Figura 4.9: Spettro di emissione teorico di un LED. FWHM = 1.8 kT [18].

Se si aumenta la corrente di alimentazione l'andamento dello spettro si allarga, questo è dovuto all'occupazione degli stati più energetici, che porta ad un maggior numero di ricombinazioni ad alta energia.

La dipendenza della funzione Boltzmann dalla temperatura è anch'essa importante in quanto porta ad una variazione dello spettro, sia quando il dispositivo

si trova a differenti temperature ambiente sia quando la temperatura aumenta a causa dell'auto-riscaldamento. Una temperatura più alta dà un aumento del numero di elettroni più energetici sulla banda di conduzione aumentando così la probabilità di fuga. In queste condizioni la radiazione complessiva sarà data dagli elettroni che rimangono intrappolati all'interno delle barriere, i quali presentano un minore energy gap e pertanto il processo radiativo darà origine a fotoni a bassa frequenza. Lo spettro quindi subirà uno spostamento verso lunghezze d'onda maggiori al crescere della temperatura (Figura 4.10).

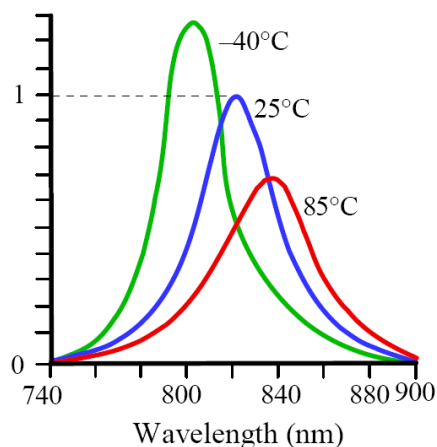


Figura 4.10: The relative spectrum emission of a red AlGaAs LED , normalized to the peak emission at 25 C. [18]

### 4.5.3 Cono di fuga della luce

Al fine di prevenire la riflessione interna totale della radiazione all'interno del chip, viene spesso applicata una cupola emisferica dove la luce deve essere estratta; per questo è possibile stimare l'angolo di fuga che dà origine al cono di fuga all'interno del quale la luce viene irradiata nello spazio libero.

Per calcolare la porzione di luce emessa nel cono di fuga si considera l'area della calotta sferica pari a  $2\pi r^2(1 - \cos \phi_c)$  (Figura 4.11), e se la sorgente è considerata puntiforme la radiazione che può uscire risulta:

$$P_{escape} = P_{source} \frac{2\pi r^2(1 - \cos \phi_c)}{4\pi r^2} = P_{source} \frac{1}{2}(1 - \cos \phi_c) \quad (4.13)$$

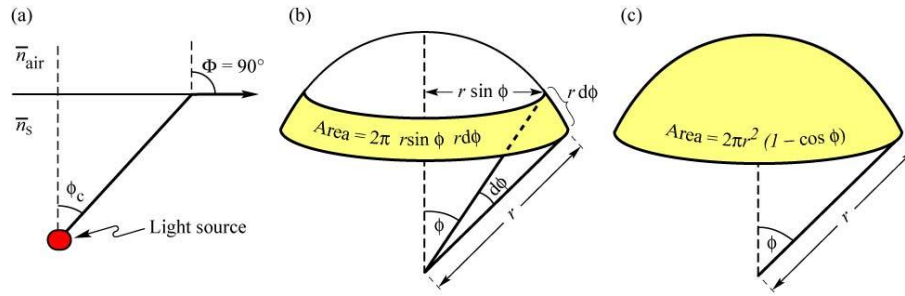


Figura 4.11: (a) Definition of the escape cone by the critical angle  $c$ . (b) Area element  $dA$ . (c) Area of calotte-shaped section of the sphere defined by radius  $r$  and angle  $c$ . [18]

che dipende dall'angolo critico  $\phi_c$

$$\phi_c = \frac{n_{air}}{n_s}, \quad (4.14)$$

dove  $n_{air} \simeq 1$  e  $n_s > 1$  sono gli indici di rifrazione rispettivamente dell'aria e del semiconduttore.

Per semiconduttori ad elevato indice di rifrazione, l'angolo critico per la riflessione totale è piccolo, sviluppando il coseno in serie si ottiene:

$$\frac{P_{escape}}{P_{source}} \approx \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\phi_c^2}{2} \right) \right] = \frac{1}{4} \phi_c^2 \approx \frac{1}{4} \frac{n_{air}^2}{n_s^2} \quad (4.15)$$

in molti semiconduttori si ha  $n_s > 2.5$ , in questo caso solo una piccola percentuale della luce generata riesce ad uscire.

## 4.6 LED utilizzati

Nel corso della tesi, come già detto, sono stati utilizzati come sorgente luminosa i LED, più precisamente LED bianchi della famiglia Golden Dragon Plus prodotti dalla OSRAM (Figura 4.12).

Questo tipo di LED ad alta potenza emettono il massimo di luce da una sorgente piccola; sono disponibili vari colori ed un ampio range di temperature di bianco.

Il LED maggiormente utilizzato il LUX W5AM KXKZ produce una luce bianco freddo e ha una temperatura di colore compresa tra 5700K e 6500K le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 4.1 [19].

#### 4. STRUTTURA E FUNZIONAMENTO DEL LED

---

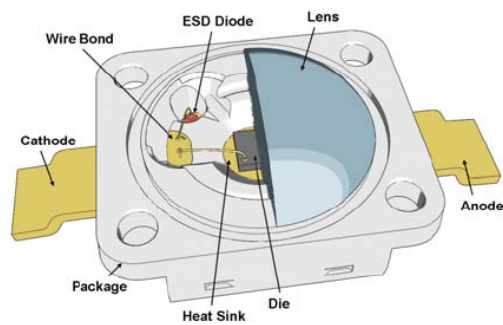


Figura 4.12: LED Dragon. [20]

Alcune applicazioni di questo tipo di LED possono essere [20]:

- backlighting (illuminated advertising, general lighting);
- reading lamps;
- indoor and outdoor commercial and residential architectural lighting;
- decorative and entertainment lighting;
- street lighting;
- tunnel lighting.

<b>Package</b>	white SMD package with clear silicone lens chip level
<b>Conversion Luminous Flux</b>	116 lm at 350 mA up to 273 lm at 1000 mA
<b>Feature of the device</b>	high efficient lightsource at low space
<b>Color</b>	$C_x = 0.31$ , $C_y = 0.32$ acc. to CIE 1931 (white); CTR = 6500 K
<b>Technology</b>	InGaAlP Thinfilm (amber); ThinGaN (blue)
<b>Optical efficiency (max.)</b>	146 lm/W at 100 mA
<b>Grouping parameter</b>	luminous flux color coordinates
<b>Assembly methods</b>	suitable for all SMT assembly methods
<b>Soldering methods</b>	Reflow soldering
<b>Packing unit</b>	24 mm tape with 200 pcs. on $\varnothing$ 180 mm reel, 0 pcs. on $\varnothing$ 330 mm reel
<b>ESD-withstand voltage</b>	8 kV acc. to JESD22-A114-F

Tabella 4.1: .

]Caratteristiche LED Golden DRAGON Plus [20].

#### 4. *STRUTTURA E FUNZIONAMENTO DEL LED*

---



# Capitolo 5

## Dispositivi

Nel progetto seguito in questa tesi si è andati a osservare e valutare lo stato dell'arte dei dispositivi già prodotti e presenti nel mercato che potevano essere utili ai nostri scopi.

### 5.1 Lenti deformabili

Il grande vantaggio di lenti con messa a fuoco sintonizzabile è il grado di libertà aggiuntivo offerto ai progettisti di ottica dalla sintonizzabilità della messa a fuoco dell'obiettivo. Un cambiamento del raggio della lente di alcuni micrometri può avere lo stesso effetto ottico di spostare l'intera lente di diversi centimetri. I sistemi ottici possono quindi essere progettati più compatti, con meno lenti e con minore o nessun movimento traslatorio. Ciò significa che non c'è più la necessità di costosi attuatori meccanici. Meno movimento porta anche ad un modello più efficace, che può essere completamente chiuso in modo che la polvere non possa entrare. Inoltre, i materiali impiegati sono tutti più leggeri del vetro, risparmiando sul peso complessivo. Meno movimento e peso significa anche minore consumo di energia e che il tempo di risposta dei sistemi con lenti sintonizzabili può essere molto basso, nell'ordine dei millisecondi. Un altro vantaggio diventa evidente durante la produzione: il fatto che le parti ottiche vengano meno spostate, combinato con la sintonizzabilità del raggio della lente comporta tassi di rendimento più elevati.

Di particolare interesse sono stati alcuni dispositivi prodotti da optotune che utilizzano il principio dell'ottica adattiva per modificare la larghezza del fascio luminoso emesso da una sorgente LED.

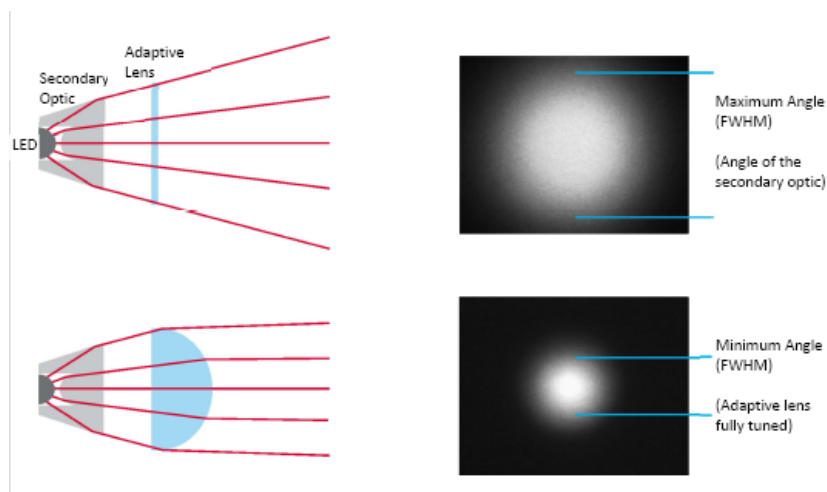


Figura 5.1: Principio utilizzato da optotune [21].

Come si può vedere in Figura 5.1, il progetto include il LED, un'ottica secondaria e la lente adattativa per la messa a fuoco. L'ottica secondaria definisce l'angolo massimo del fascio. La lente sintonizzabile viene quindi aggiunta come ottica terziaria. Quando la lente è completamente piana la luce la attraversa senza alcuna deviazione; pertanto l'angolo di apertura del fascio è definito solamente dalla struttura dell'ottica secondaria. Con l'espansione della lente adattiva l'apertura del fascio viene ristretta.

Affinché la lente adattiva possa lavorare nel modo più efficiente possibile è necessario che la luce uscente dall'ottica secondaria sia il più possibile uniforme.

La misurazione illustrata in Figura 5.2 mostra la distribuzione della luce, dalla quale è stato ricavato l'angolo di apertura del fascio. In generale si può dire che una combinazione tra LED e ottica secondaria che abbia un angolo di  $35^\circ$  o superiore a FWHM avrà una adeguata distribuzione dell'intensità luminosa.

Quindi, maggiore è l'angolo migliore è la distribuzione dell'intensità luminosa, che si traduce in un risultato migliore [21].

Ci sono due tipi differenti di lenti di interesse: nella prima la focale viene variata elettricamente e nella seconda invece manualmente.

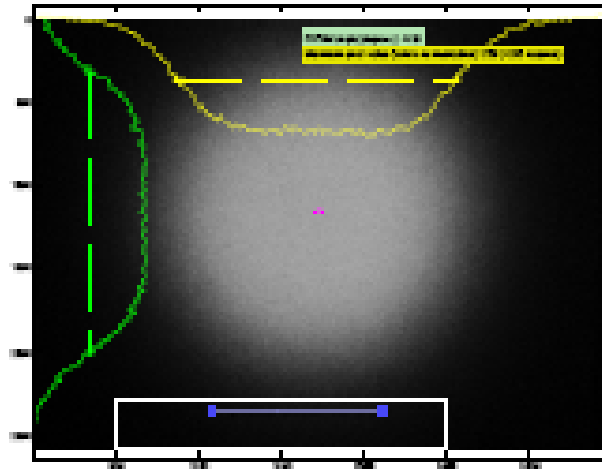


Figura 5.2: Misura FWHM e angolo [21].

### 5.1.1 Lente regolabile elettricamente

Questo tipo di lente (EL-10-30 Series, le cui caratteristiche sono riportate in tabella B.1), ha diverse applicazioni:

- Fast auto-focus;
- Optical zoom;
- NIR laser processing;
- Illumination;
- Laser shows.

EL-10-30 è una lente piano-convessa con lunghezza focale variabile. Il raggio della lente sferica può essere regolato elettricamente per ottenere diverse distanze focali.

La lente è guidata da una corrente elettrica, in altre parole, la lunghezza focale della lente è una funzione della corrente elettrica. Maggiore è l'intensità della corrente, minore è la lunghezza focale. La Figura 5.3 mostra il tipico rapporto tra la corrente di azionamento e la lunghezza focale, le barre di errore indicano la deviazione standard poiché il rapporto può variare leggermente da obiettivo a obiettivo.

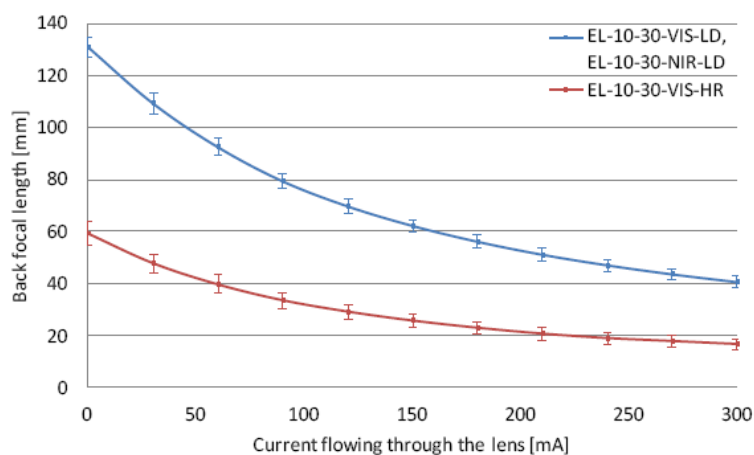


Figura 5.3: Focale in funzione della corrente [22].

L'elettronica di controllo per questa lente può essere progettata in modo da poter utilizzare la modulazione PWM (Pulse Width Modulation). in questo caso la frequenza dovrebbe essere compresa tra 20 e 50 kHz [22] [23].

### 5.1.2 Lenti regolabili manualmente

Questo tipo di lente (ML-20-35 Series, le cui caratteristiche sono riportate in tabella B.2), ha diverse applicazioni:

- LED illumination;
- Optics R&D (e.g. beam expander);
- Education;
- Ophtalmology;
- System prototyping.

La curvatura della lente può essere cambiata manualmente da convessa a piana o concava, ruotando l'anello di regolazione esterno attaccato alla lente. La lunghezza focale può essere scelta e regolata finemente su un valore desiderato [24].

Altri tipi di lenti regolabili manualmente sono le classi: ML-25-50 Lumilens (Tabella B.3) e ML-55-106 Lumilens (Tabella B.4) [25] [26].

La forma di entrambe le lenti può essere modificata da piana a fortemente convessa sempre ruotando un anello di regolazione.

Questo tipo di lenti sono adatte all'illuminazione con sistemi basati sui LED. Combinate con un'ottica secondaria adeguata permettono una grande variazione dell'angolo di apertura del fascio luminoso, mantenendo una qualità eccellente della luce e una elevata efficienza ottica.

- **ML-25-50 Lumilens**

Applicazioni:

- Shop lighting;
- Architectural lighting;
- Museum lighting;
- Machine vision lighting;
- Microscopy lighting.

Vantaggi:

- One spot light suits various applications;
- Excellent spot quality for all tuning states (no intensity rings as in fixed lens shifting);
- No color errors due to low-dispersion lens material;
- Highest optical efficiency (low light loss);
- Easy to motorize.

- **ML-55-106 Lumilens**

Vantaggi:

- One spot light suits various applications;
- Excellent spot quality for all tuning states (no intensity rings as in fixed lens shifting);
- No color errors due to low-dispersion lens material;
- Highest optical efficiency (low light loss).

## 5.2 **Specchi deformabili**

Questa tecnologia aumenta la capacità del sistema ottico in cui questi specchi vengono inseriti, ma risultano anche la soluzione di ottica adattiva che, per dimensioni e costi ridotti, si integra meglio in sistemi ottici in via di progettazione, aumentandone così le prestazioni [27].

Sono realizzati utilizzando il principio degli specchi bimorfi (Figura 5.4) in cui lo specchio è costituito da diversi strati. Il primo è uno strato di materiale piezoelettrico sul quale viene appoggiato uno strato di materiale passivo, questi sono uniti da uno strato di materiale adesivo, infine viene creata una superficie liscia per permettere la riflessione.

Il dispositivo si deforma quando allo strato piezoelettrico è applicato un campo elettrico che può generare una contrazione oppure una espansione del dispositivo. Lo strato piezoelettrico è a sua volta suddiviso in due strati che agiscono contemporaneamente nella stessa direzione o in direzione opposta; se agiscono nella stessa direzione si ha una espansione dello specchio.

Nella realizzazione di uno specchio bimorfo è bene prestare attenzione allo spessore, all'uniformità e alle proprietà elastiche del materiale utilizzato per lo strato adesivo poiché potrebbe assorbire l'espansione dello strato piezoelettrico nascondendone l'effetto. È preferibile un adesivo a bassa viscosità e, importante, con caratteristiche costanti nel tempo [28].

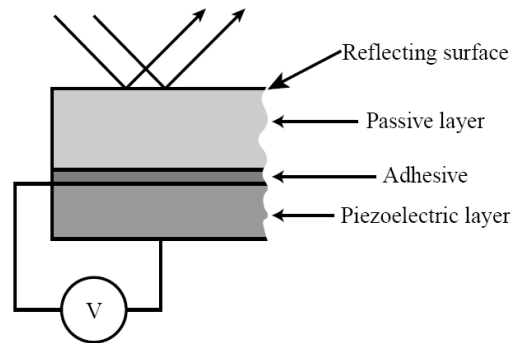


Figura 5.4: Cross section of a bimorph mirror [28].

Sono stati realizzati differenti tipi di specchi che possono essere utilizzati per varie applicazioni tra cui: applicazioni biomedicali, microscopia, compensazione di mezzi aberranti, tomografia a coerenza ottica (OCT), visione robotica, imaging 3D, astronomia, sorveglianza, ottimizzazione laser, comunicazioni, focusing dinamico, tool da laboratorio e operazioni ad alta frequenza.

Le principali caratteristiche di alcuni di questi specchi sono riportate in Tabella B.5 e i principi fisici che stanno alla base di questi specchi sono l'attrazione elettrostatica e l'effetto piezoelettrico; i vantaggi sono [27]:

- nuova tecnologia push pull;
- facile da integrare;
- compatibile con montaggi di alcuni pollici;
- planarità iniziale molto buona;
- alto potere ottico;
- acromatico;
- basso costo;
- bassa tensione di controllo.

## 5. *DISPOSITIVI*

---



# Capitolo 6

## Sistema e misure effettuate

### 6.1 Sistema considerato

Per la realizzazione del modello, delle simulazioni e delle misure, è stato preso in considerazione un sistema formato da tre elementi fondamentali.

Il primo è la sorgente luminosa che nel nostro caso è un LED bianco, il secondo una lente di fresnel<sup>1</sup> necessaria a realizzare la collimazione<sup>2</sup> del fascio luminoso emesso dalla sorgente LED, infine l'ultimo una lente deformabile che nel caso particolare è un disco piezoelettrico (il cui funzionamento è descritto nel paragrafo 3.3) sul quale è stata applicata una pellicola riflettente.

#### 6.1.1 Modello matematico

Prima di effettuare misurazioni, sul sistema posto in analisi (Figura 6.1) è stato realizzato un modello matematico che lo descrivesse, anche in maniera approssimata, tenendo conto di tutti i parametri in gioco.

Utilizzando questo modello si è andati a ricercare una espressione matematica che fornisse l'apertura del fascio luminoso ad una certa distanza dalla seconda lente.

---

<sup>1</sup>La lente Fresnel permette la costruzione di ottiche di grande dimensione e piccola distanza focale senza l'ingombro, lo spessore ed il peso del materiale necessario per costruire una lente sferica convenzionale di equivalente potere diottrico.

<sup>2</sup>Quando i raggi della luce sono tutti paralleli tra di loro.

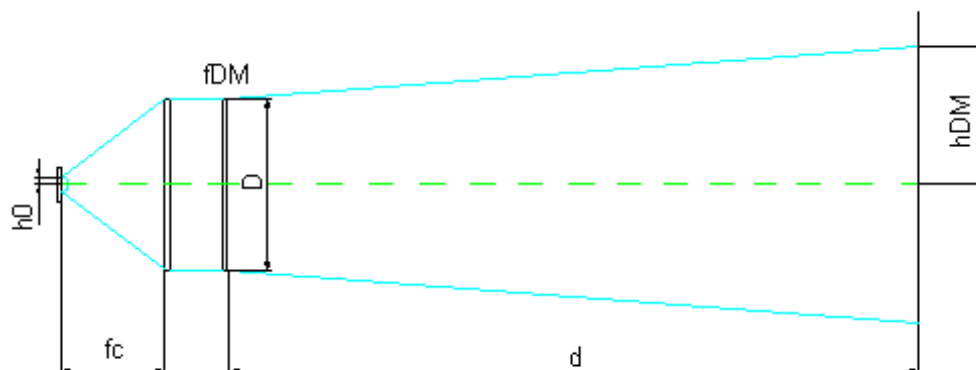


Figura 6.1: Sistema utilizzato.

Per realizzare ciò si è innanzitutto considerata l'apertura numerica:

$$NA = n \sin\left(\frac{D}{2f_c}\right), \quad (6.1)$$

dove l'indice di rifrazione  $n \simeq 1$  poiché siamo in aria,  $D$  è il diametro di apertura della lente e  $f_c$  la sua distanza focale.

Dati questi parametri avendo una sorgente con una certa altezza (non è puntiforme) si ha un'angolo di divergenza proprio del sistema che non può essere eliminato che è calcolato come:

$$\alpha = \frac{h_0}{f_c} \text{ [rad]}. \quad (6.2)$$

Con queste premesse si è calcolata:

$$h_{DM} = \frac{NA}{2} f_c + \alpha d - \frac{NA}{2} \frac{f_c}{f_{DM}} d, \quad (6.3)$$

dove  $d$  è la distanza a cui viene effettuata la misura (distanza dalla seconda lente) e  $f_{DM}$  la focale della lente deformabile, la cui focale varia da infinito a  $d$ , poiché questo modello matematico ha validità finché  $f_{DM} \geq d$ . Il primo termine è l'apertura massima del fascio dipendente dall'apertura numerica e dalla focale della lente di collimazione, il secondo è il contributo della divergenza intrinseca del sistema e il terzo termine è stato ricavato considerando l'angolo di divergenza  $\beta$  dato da:

$$\beta = \frac{NA}{2} \frac{f_c}{f_{DM}}. \quad (6.4)$$

L'espressione può essere poi semplificata raccogliendo alcuni termini comuni, risultando in conclusione:

$$h_{DM} = \frac{NA}{2} f_c \left( 1 - \frac{d}{f_{DM}} \right) + \alpha d, \quad (6.5)$$

A questo punto si è andati a calcolare il rapporto tra le due grandezze di riferimento fornite dalla (6.5):

$$R = \frac{h_{DM-}}{h_{DM+}} \quad (6.6)$$

in cui i pedici + e - indicano il segno della focale della lente deformabile.

### 6.1.2 Simulazioni MATLAB

Una volta realizzato il modello matematico sono state effettuate varie simulazioni MATLAB andando a verificare come cambia il rapporto R al variare dei parametri in gioco: focale della lente deformabile, focale della prima lente, diametro della prima lente, altezza della sorgente, apertura numerica; alcune di queste dipendono l'una dall'altra come visto nelle equazioni precedenti.

Per ogni simulazione è stata fissata a un metro la distanza tra la lente deformabile e il piano di riferimento su cui viene calcolato il rapporto.

- **R al variare della focale della lente deformabile.**

Per valutare il rapporto R al variare di  $f_{DM}$  compreso tra 1 e 100 metri sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- area attiva (altezza) della sorgente pari a 1x1 mm;
- diametro della prima lente da 25 a 100 mm;
- focale della prima lente di 50 mm;

con cui si è ricavata la Figura 6.2 e una seconda misurazione (Figura 6.3) con:

- area attiva (altezza) della sorgente pari a 1x1 mm;
- diametro della prima lente di 50 mm;
- focale della prima lente da 10 a 100 mm.

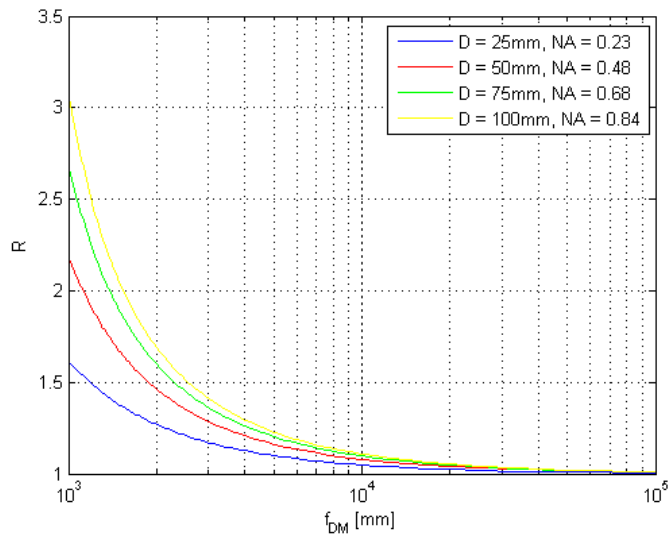


Figura 6.2:  $R$  vs focale della lente deformabile, per vari diametri.

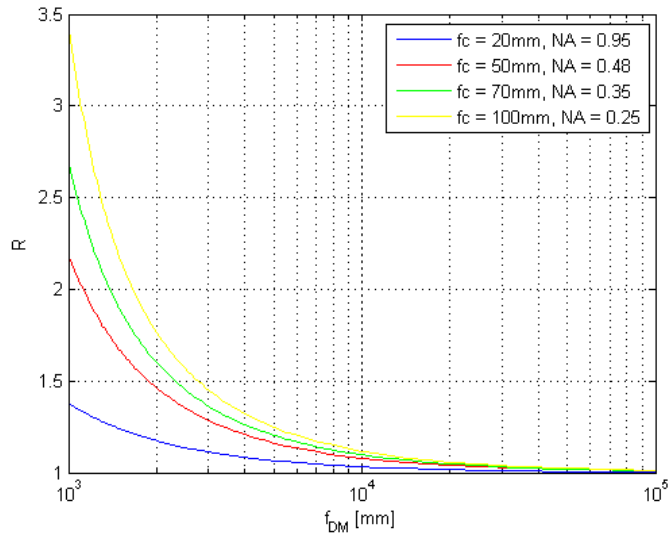


Figura 6.3:  $R$  vs focale della lente deformabile, per vari valori di  $f_c$ .

- **$R$  al variare della focale della prima lente.**

Per stimare il rapporto  $R$  al variare della focale della prima lente ( $f_c$ ) com-

presa tra 1 e 100 millimetri si è ricavata la Figura 6.4 utilizzando i seguenti parametri:

- area attiva (altezza) della sorgente pari a 1x1 mm;
- $f_{DM} = 2000$  mm;
- NA variabile da cui è stato ricavati il diametro della lente utilizzando l'inverso della (6.1).

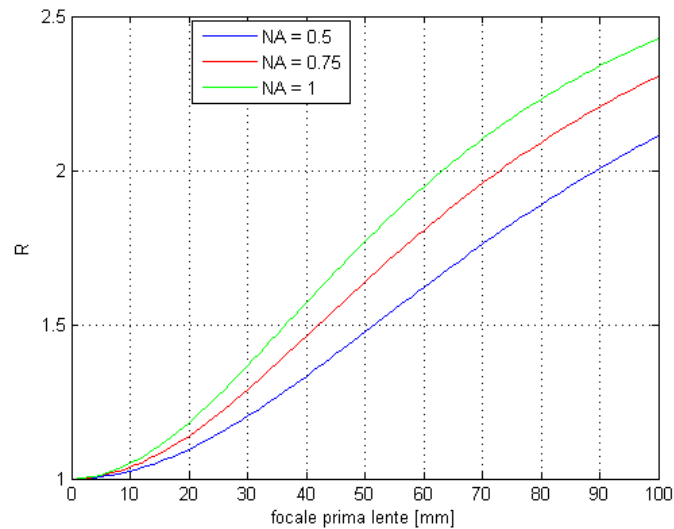


Figura 6.4: R vs focale prima lente.

- **R al variare dell'apertura numerica**

Per calcolare il rapporto R al variare di NA compreso tra 0.22 e 1 sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- area attiva (altezza) della sorgente pari a 1x1 mm;
- diametro della prima lente da 25 a 100 mm;
- $f_{DM} = 10000$  mm;
- focale della prima lente ricavata dall'apertura numerica utilizzando l'inverso della (6.1);

con cui si è ricavata la Figura 6.5.

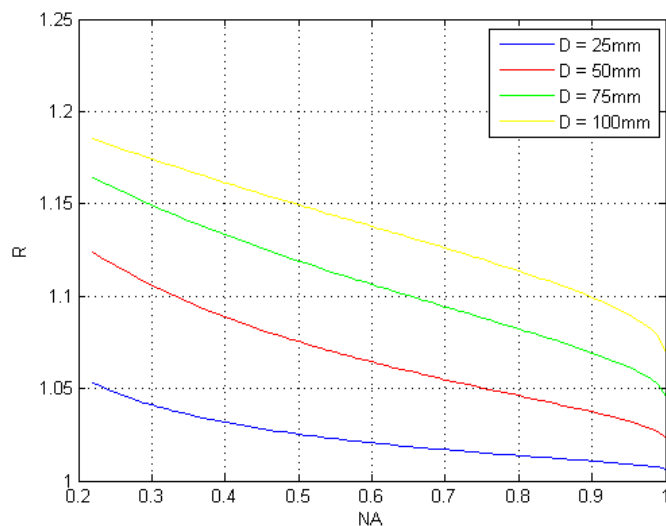


Figura 6.5: R vs NA.

- **R al variare dell'altezza della sorgente**

Per valutare il rapporto R al variare dell'altezza della sorgente compresa tra 0.1 e 3 mm sono stati utilizzati i seguenti parametri con cui si sono ricavate la Figura 6.6 e la Figura 6.7:

- $f_{DM} = 10000$  mm;
- diametro della prima lente da 25 a 100 mm e  $NA = 1$  da cui è stata ricavata la focale della prima lente;
- NA variabile tra 0.3 e 1 e diametro pari a 50 mm da cui è stata ricavata la focale della prima lente.

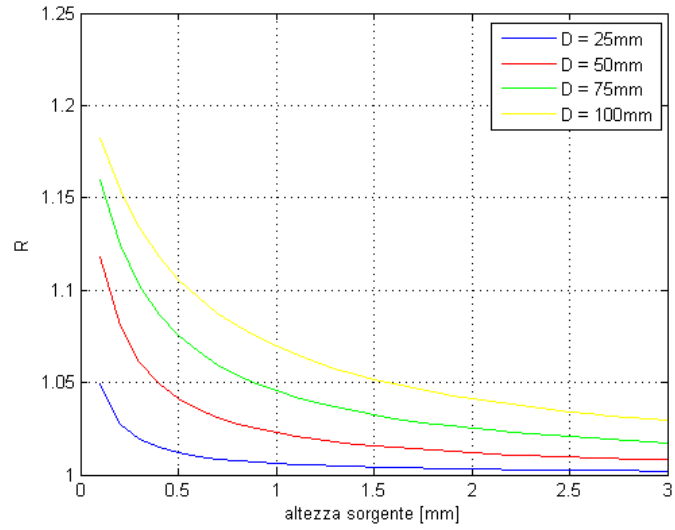


Figura 6.6: R vs altezza sorgente, per vari diametri.

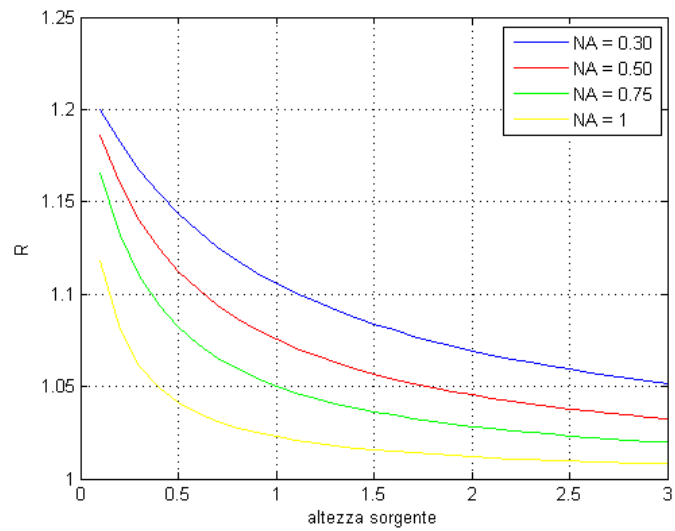


Figura 6.7: R vs altezza sorgente, per diverse NA.

### 6.1.3 Simulazioni ZEMAX

Un altro tipo di simulazione è stata effettuata utilizzando il software ZEMAX, che permette la simulazione di sistemi ottici, grazie al quale è possibile disegnare il sistema che viene utilizzato e successivamente inserire e modificare i vari parametri della sorgente e delle lenti (Figura 6.8).

Con il software è possibile far partire dalla sorgente un certo numero di raggi e disponendo il piano riferimento ad una certa distanza si può semplicemente valutare l'apertura del fascio di luce, questo è il procedimento utilizzato per riuscire a trovare il rapporto R.

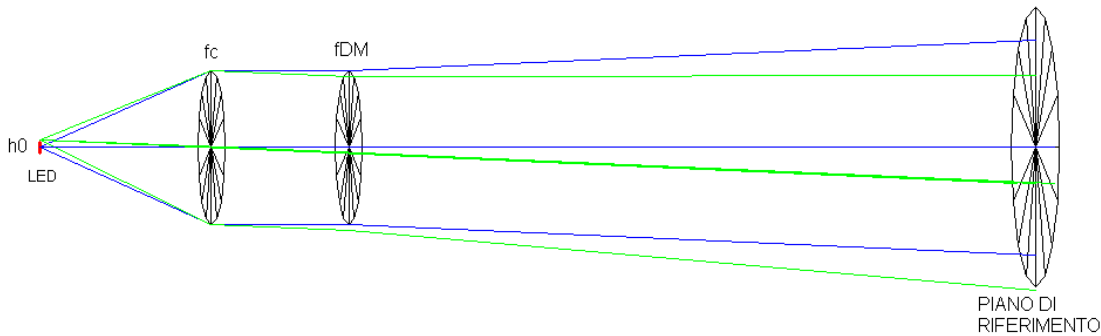


Figura 6.8: Struttura per la simulazione in ZEMAX.

Sono state quindi effettuate le simulazioni utilizzando gli stessi valori presi in considerazione per le precedenti simulazioni con MATLAB.

Per semplicità in seguito non sono riportati tutti i parametri ma solo i valori utilizzati nell'asse delle ascisse dei vari grafici.

- R al variare della focale della lente deformabile.

$$f_{DM} = \left[ 1 \quad 1.5 \quad 2 \quad 3 \quad 5 \quad 7.5 \quad 10 \quad 20 \quad 50 \quad 100 \right] \text{ m}$$



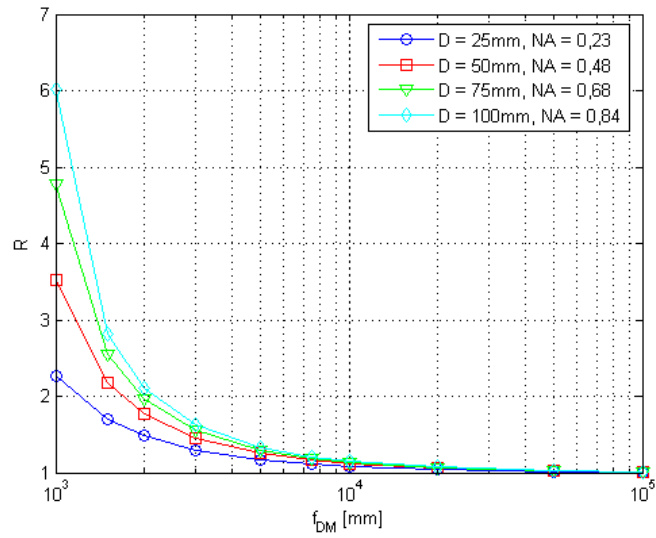


Figura 6.9: R vs focale della lente deformabile, per vari diametri.

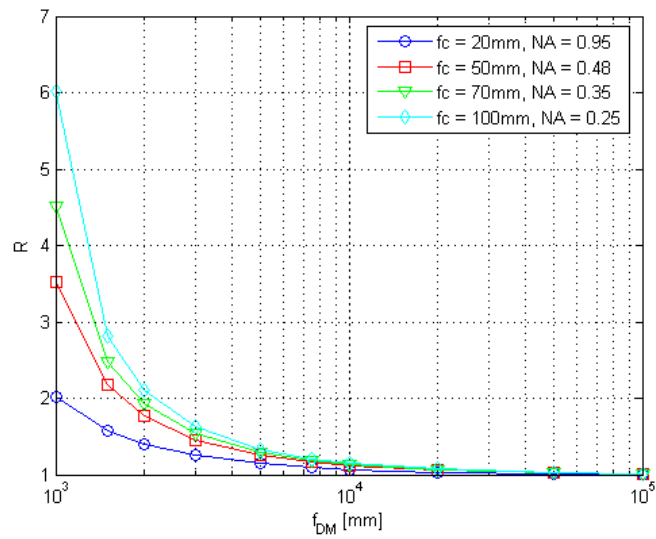


Figura 6.10: R vs focale della lente deformabile, per vari valori di  $f_c$ .

- R al variare della focale della prima lente.

$$f_c = \left[ 1 \quad 10 \quad 25 \quad 40 \quad 50 \quad 65 \quad 80 \quad 100 \right] \text{ mm}$$

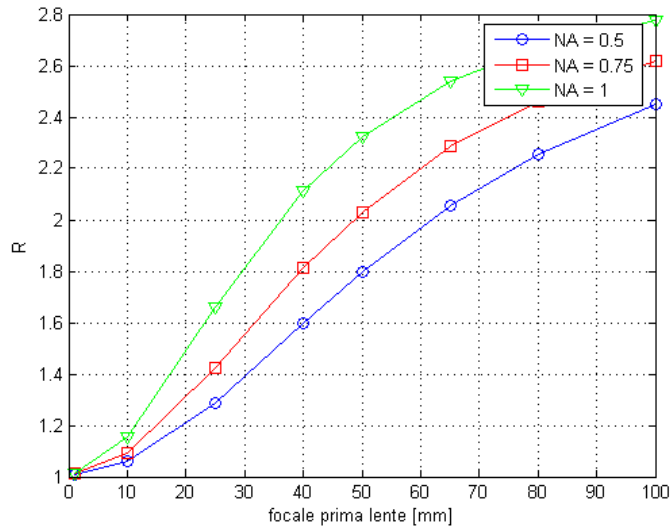


Figura 6.11: R vs focale prima lente.

• R al variare dell'apertura numerica

$$NA = [ 0.22 \quad 0.3 \quad 0.4 \quad 0.5 \quad 0.6 \quad 0.7 \quad 0.8 \quad 0.9 \quad 0.95 \quad 1 ]$$

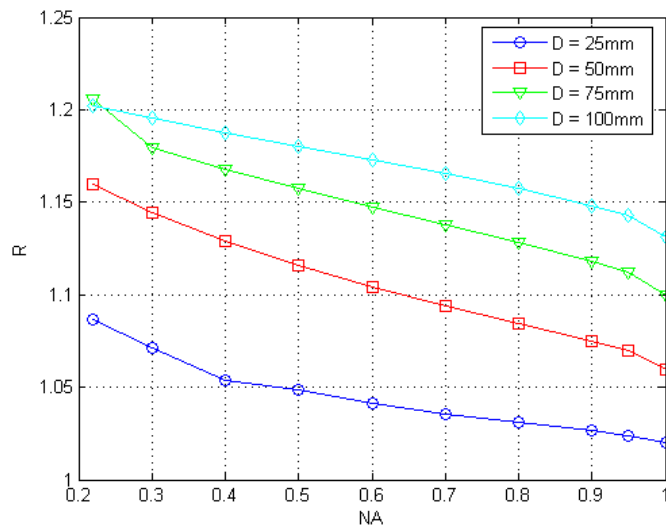


Figura 6.12: R vs NA.

- R al variare dell'altezza della sorgente

$$\text{altezza sorgente} = [ 0.1 \ 0.3 \ 0.5 \ 0.75 \ 1 \ 1.5 \ 2 \ 2.5 \ 3 ] \text{ mm}$$

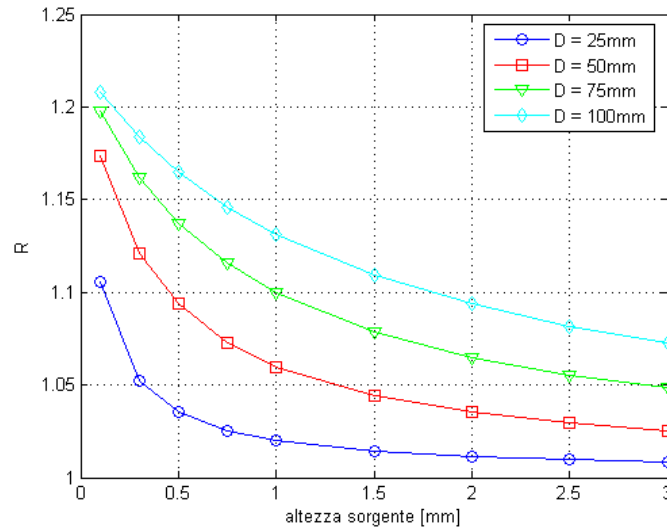


Figura 6.13: R vs altezza sorgente, per vari diametri.

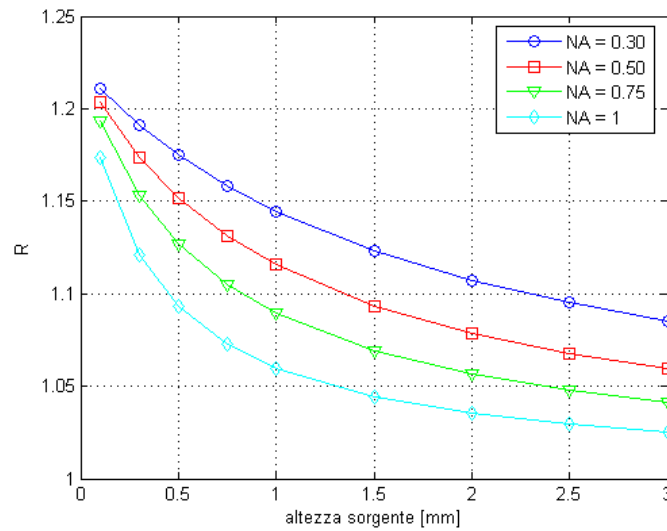


Figura 6.14: R vs altezza sorgente, per diverse NA.

### 6.1.4 Confronto tra le simulazioni

Dopo aver effettuato queste prime simulazioni si sono presi particolari valori dei parametri e sono state messe a confronto le curve degli andamenti del rapporto (MATLAB e ZEMAX) e si è calcolato quanto queste differiscono in percentuale.

- **R al variare della focale della lente deformabile.**

$f_{DM}$ [mm]	differenza %
1000	93
10000	4.2
100000	0.41

D = 100mm, NA = 0.84

Tabella 6.1: Confronto focale lente deformabile, dato il diametro.

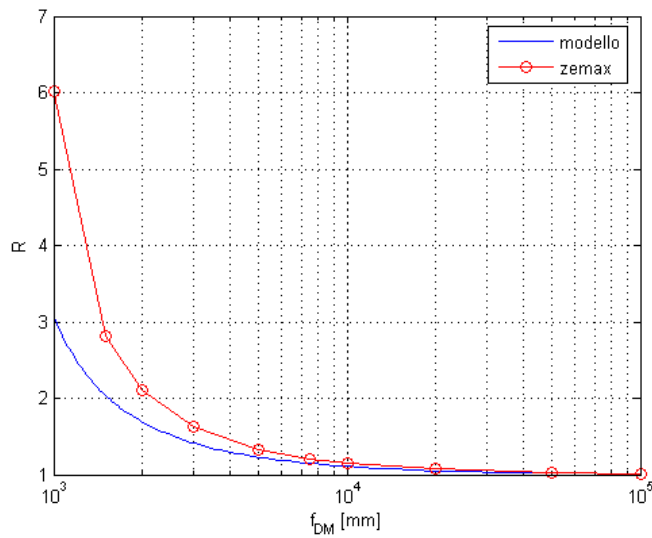


Figura 6.15: Confronto focale lente deformabile, dato il diametro.

$f_c = 100\text{mm}$ ,  $NA = 0.25$

$f_{DM}$ [mm]	differenza %
1000	73.3
10000	3.31
100000	0.33

Tabella 6.2: Confronto focale lente deformabile, data  $f_c$ .

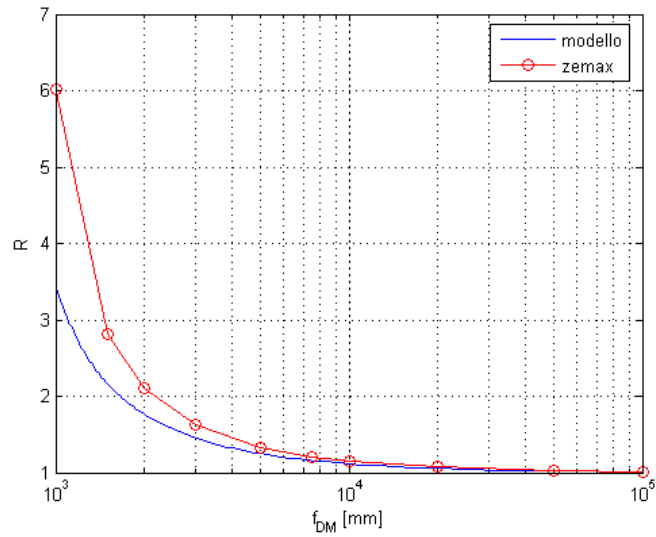


Figura 6.16: Confronto focale lente deformabile, data  $f_c$ .

- R al variare della focale della prima lente.

NA = 1

$f_c$ [mm]	differenza %
1	1.1
100	14.2

Tabella 6.3: Confronto focale prima lente.

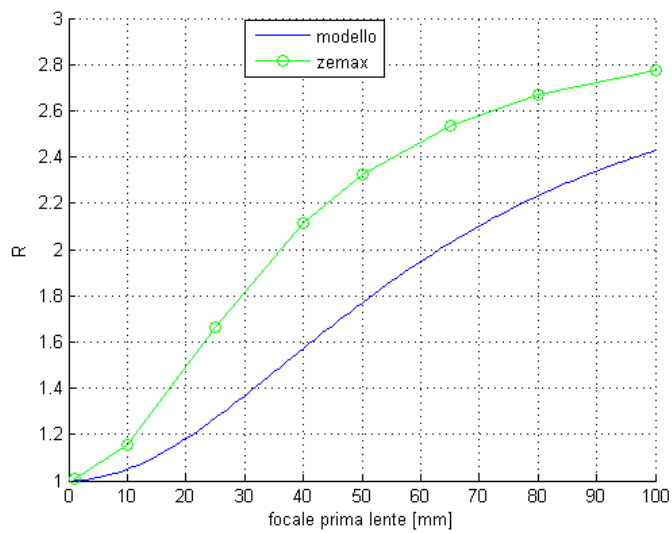


Figura 6.17: Confronto focale prima lente.

- R al variare dell'apertura numerica

D = 100mm	$f_c$ [mm]	differenza %
	0.22	1.43
	1	5.73

Tabella 6.4: Confronto NA.

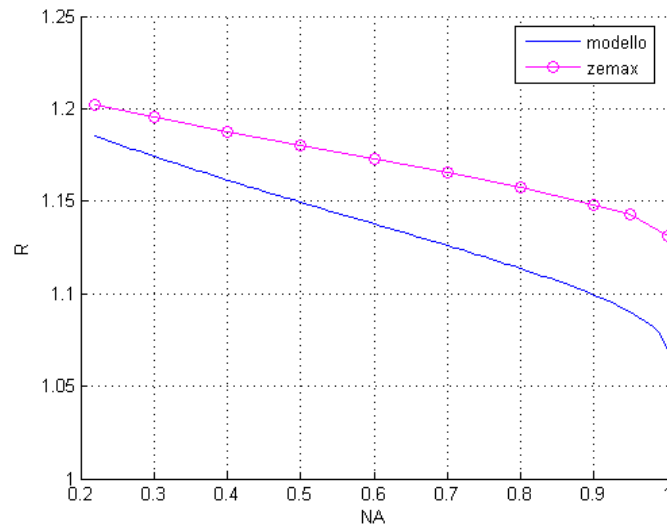


Figura 6.18: Confronto NA.

• R al variare dell'altezza della sorgente

D = 100mm	$f_c$ [mm]	differenza %
	0.1	2.14
	3	4.22

Tabella 6.5: Confronto altezza sorgente, dato il diametro.

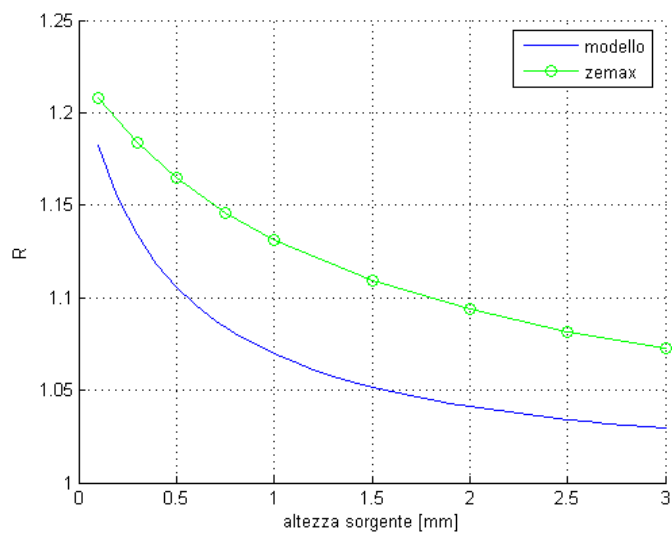


Figura 6.19: Confronto altezza sorgente, dato il diametro.



$f_c$ [mm]	differenza %
0.1	4.95
3	1.71

Tabella 6.6: Confronto altezza sorgente, dato NA.

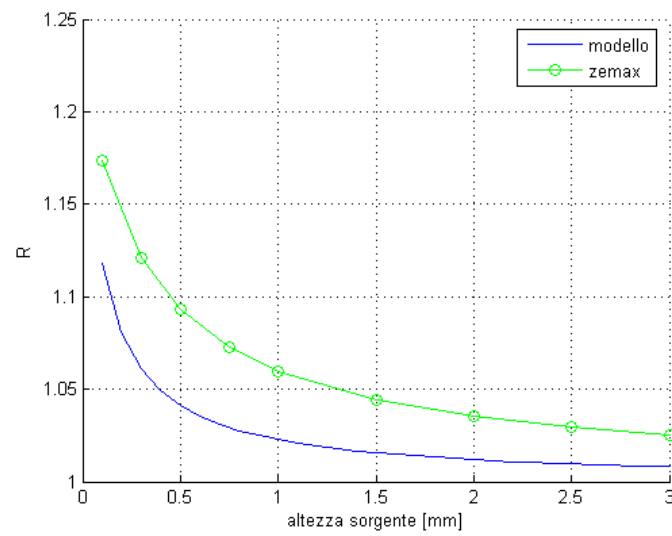


Figura 6.20: Confronto altezza sorgente, dato NA.

### 6.1.5 Osservazioni

Le varie simulazioni effettuate hanno avuto lo scopo di valutare inizialmente il sistema che si sta studiando per capirne il comportamento e per verificare quanto il modello realizzato possa ben approssimare il caso reale.

Di particolare rilevanza il confronto tra i differenti metodi; come si può notare dai grafici riportati nelle pagine precedenti, (Figure da 6.15 a 6.20) l'andamento delle curve poste a confronto nei diversi casi è pressochè lo stesso, differendo per valori compresi all'interno di un 5%.

Si può notare inoltre nei primi due grafici (Figura 6.15 e Figura 6.16) come il modello realizzato abbia dei limiti; infatti con focale positiva non è possibile valutare il rapporto con una focale della lente deformabile inferiore a quella a cui viene posto il piano di riferimento (nel nostro caso  $f_{DM} = 1\text{m}$ ).

## 6.2 Misure sperimentali

Sono state effettuate varie misure secondo con il seguente ordine:

- caratterizzazione del disco piezoelettrico;
- valutazione del comportamento variando l'apertura numerica;
- valutazione del sistema con opportune lenti;

la seconda e la terza utilizzato lo stesso schema di principio visto finora (Figura 6.1).

Alcune attenzioni sono state prese nell'effettuare le misure, per cercare di limitare rumore ed errori:

- il luogo della misura doveva essere buio, l'unica sorgente luminosa doveva essere il LED;
- nel montaggio del sistema era necessario allineare perfettamente i vari componenti sia in orizzontale che in verticale;
- misurare correttamente le distanze tra i componenti e il piano di riferimento;
- evitare che nell'acquisizione delle immagini queste potessero saturare compromettendo la misura;

- ogni volta che la fotocamera veniva spostata controllare la messa a fuoco e riprendere il riferimento di misura (la corrispondenza di 1cm nella foto);
- variare lentamente la tensione per non superare i punti di misura desiderati, per non ripetere tutto a causa del ciclo d'isteresi del disco piezoelettrico.

Per l'esecuzione di tutte le misure sono stati utilizzati due generatori di tensione:

- TENMA 72-8695, 0-32V 0-3A, DC POWER SUPPLY;
- ATTEN INSTRUMENTS, REGULATED DC POWER SUPPLY, 0-30V 0-5A;

e per l'acquisizione delle immagini una fotocamera collegata al pc per valutare saturazione, messa a fuoco e bilancio dei colori in tempo reale.

### 6.2.1 Caratterizzazione del disco piezoelettrico

Poiché non si conoscevano le caratteristiche di funzionamento del disco piezoelettrico, oltre alla tensione di alimentazione, si è andati a valutare in modo molto semplice come varia la sua focale in funzione della tensione applicata.

Per fare ciò si è incollato sul bordo del disco un piccolo pezzo di silicio e si è utilizzato un laser.

Il metodo utilizzato prevede che il fascio emesso dalla sorgente LASER sia il più possibile parallelo al disco piezoelettrico; e il fascio riflesso risultante dall'incidenza con il silicio è stato misurato su un piano di riferimento posto ad una certa distanza (nel nostro caso 60 cm) valutando quanto si spostava rispetto allo stato iniziale, cioè con tensione di 0V (Figura 6.21).

Il disco piezoelettrico (Figura 6.22) necessita di una opportuna tensione di alimentazione:

- GIALLO: massa;
- ROSSO: 30, 60V;
- BLU:  $\pm 30$ , 0/60 V

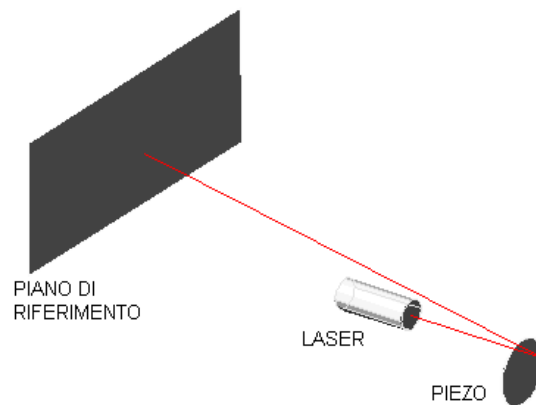


Figura 6.21: Sistema per la caratterizzazione del piezoelettrico.

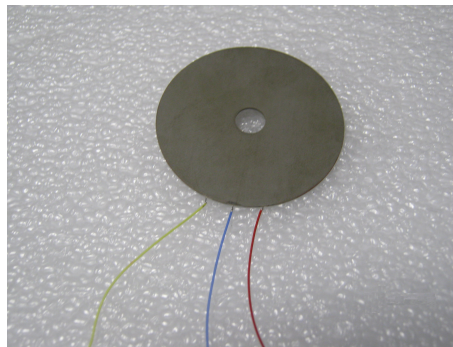


Figura 6.22: Disco piezoelettrico.

Nella fase di caratterizzazione avendo a disposizione soltanto due generatori di tensione e dovendo alimentare il LASER si sono applicati all'ingresso ROSSO 30V e al BLU una tensione variabile da 0 a 30V.

Con questo semplice procedimento sono stati caratterizzati entrambi i dischi piezoelettrici a disposizione.

Una volta eseguita la misura si sono estrapolati i dati, cioè di quanto si spostava il fascio, e si è calcolato il valore dell'angolo corrispondente allo spostamento in radianti (Figura 6.23) e in gradi in funzione della tensione applicata utilizzando:

$$y' = \arctan\left(\frac{\text{spostamento del fascio}}{\text{distanza di riferimento}}\right) \quad (6.7)$$

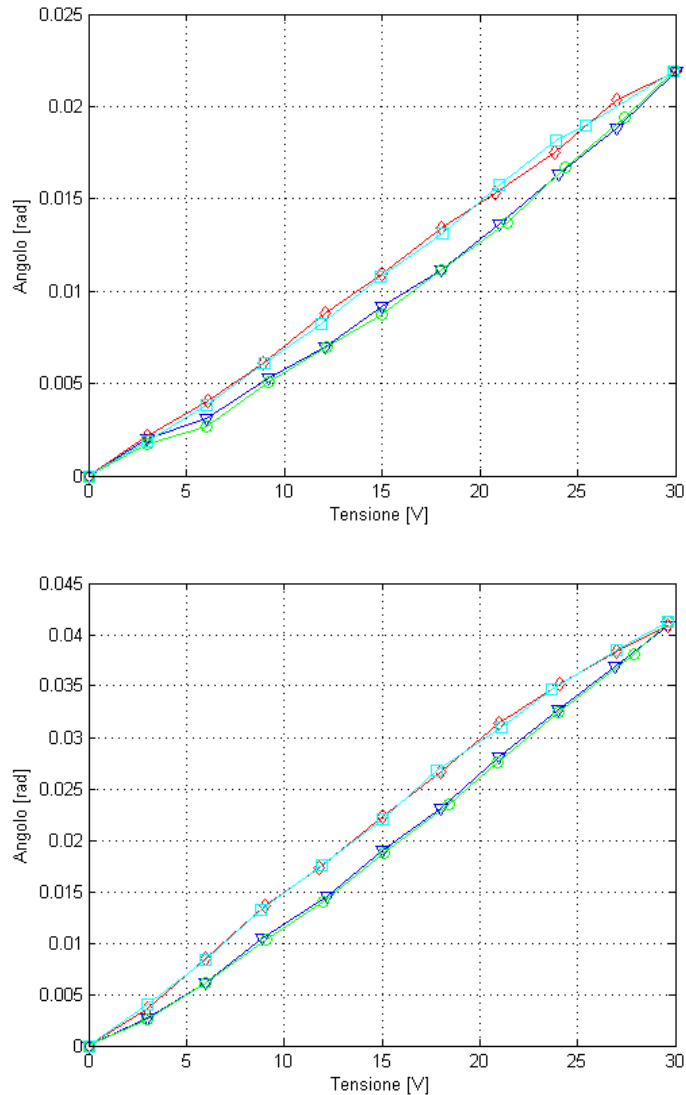


Figura 6.23: Ciclo d'isteresi, in radianti.

In seguito è stata calcolata, sempre in funzione della tensione, l'andamento della freccia (Figura 6.24) che è stata ricavata utilizzando il seguente procedimento dall'equazione della parabola:

$$y = ax^2 \quad (6.8)$$

se ne calcola la derivata

$$y' = 2ax \quad (6.9)$$

dai dati:

$$a = \frac{y'}{2x} . \quad (6.10)$$

## 6. SISTEMA E MISURE EFFETTUATE

---

Conoscendo il raggio dell'attuatore pari a 22 mm (quindi il valore di  $x$ ) e di  $y'$  che è il valore dell'angolo precedentemente calcolato, si ha che:

$$freccia = ar^2 \quad (6.11)$$

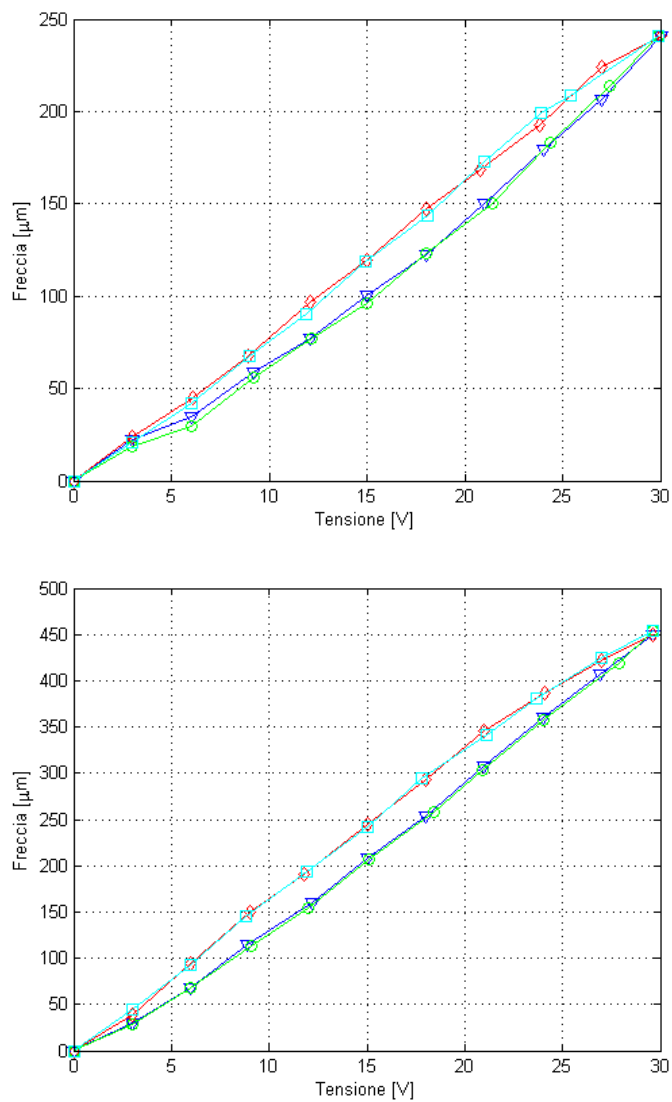


Figura 6.24: Ciclo d'isteresi della freccia.

Conoscendo la freccia è possibile calcolare il raggio della deformazione del disco (Figura 6.25):

$$R = \frac{r^2}{2 \cdot \text{freccia}} , \quad (6.12)$$

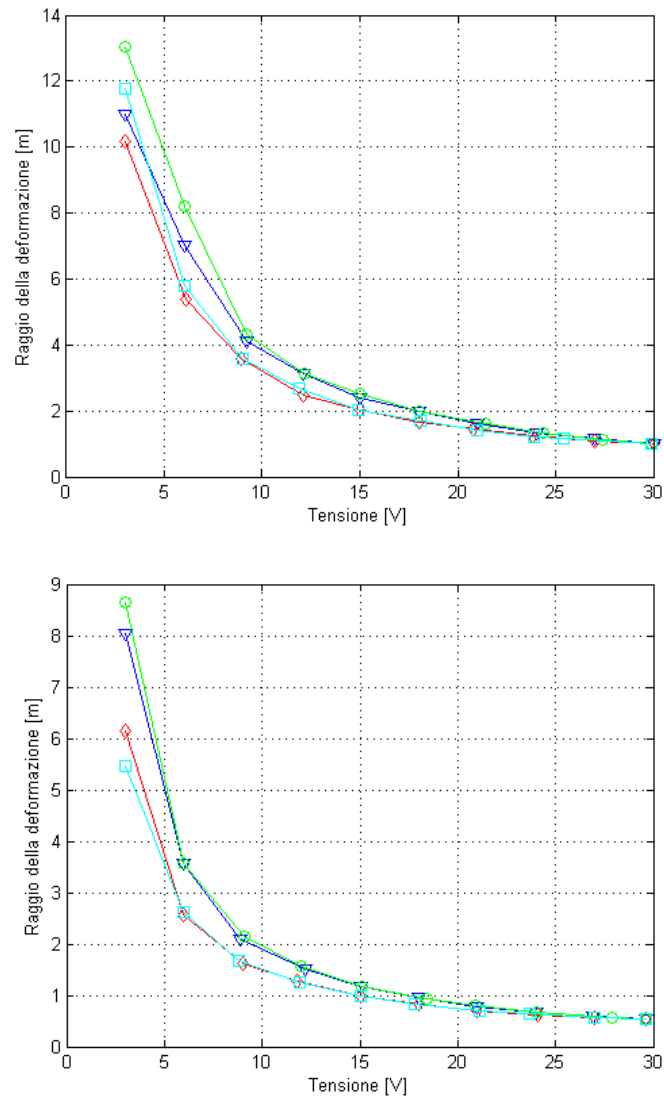


Figura 6.25: Variazione del raggio di curvatura del piezo.

e quindi la focale che risulta:

$$focale = \frac{R}{2} \quad (6.13)$$

## 6. SISTEMA E MISURE EFFETTUATE

---

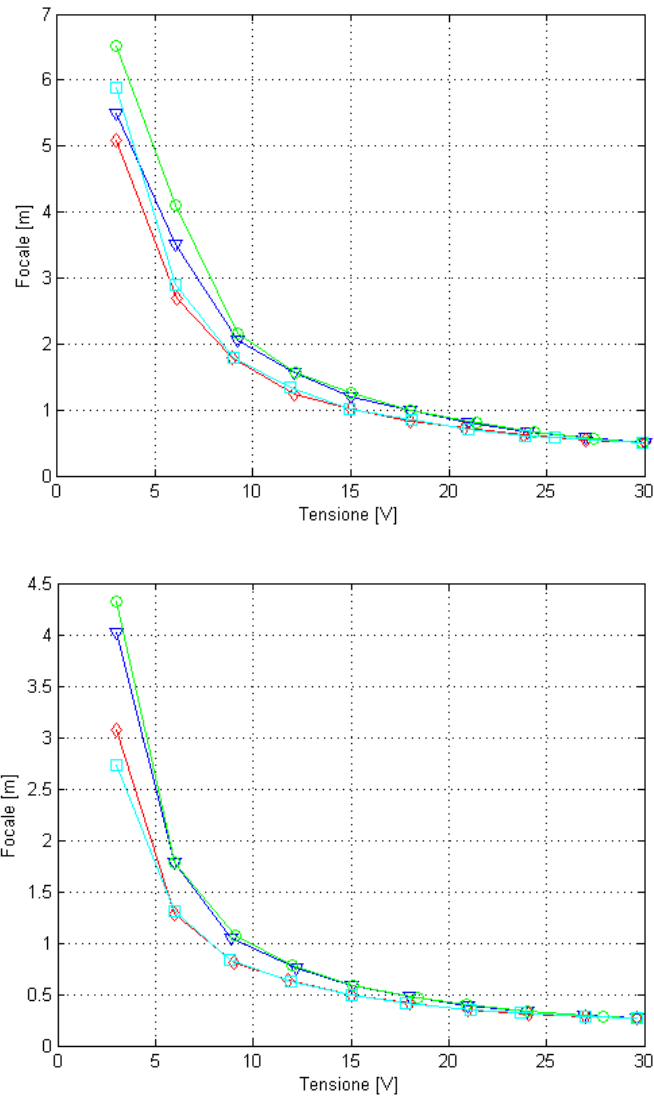


Figura 6.26: Variazione della focale.

Poiché è stata utilizzata per eseguire la prova una tensione pari a metà di quella nominale si possono ricalcolare freccia, raggio delle deformazione e focale, raddoppiando la freccia; ne risulta che la focale a 60V è la metà di quella fornita dai dati precedenti, si ha quindi circa 250 mm per il primo disco e circa 125 mm per il secondo.



### 6.2.2 Variazione dell'apertura numerica

Una prima serie di misurazioni sono state realizzate andando a modificare l'apertura numerica della lente di collimazione, utilizzando un'iride posta il più vicino possibile alla lente, per poi verificare il comportamento del sistema misurato con le simulazioni in MATLAB e ZEMAX.

Il sistema considerato prevedeva una distanza tra la sorgente e l'iride pari a 4 cm, subito dopo questa veniva posta la lente e il piezoelettrico a una distanza di 6 cm. Il piano di riferimento sul quale veniva valutata l'apertura del fascio era posto a 1 m dal disco piezoelettrico.

La tensione applicata all'attuatore variava tra 0 e 60V e il diametro con il quale veniva calcolata l'apertura numerica era di 6, 20, 30, 40 mm.

Queste prove sono state realizzate con il disco piezoelettrico la cui focale variava tra infinito a 0V e -250mm a 60V.

La focale è negativa come verificato sperimentalmente in quanto il fascio luminoso si allarga passando da focale infinita a quella calcolata. Il disco piezoelettrico si comporta quindi come una lente divergente.

Quindi il rapporto calcolato è stato:

$$Rapporto = \frac{\text{apertura del fascio con focale infinita}}{\text{apertura del fascio con focale di -250mm}} \quad (6.14)$$

Sono state effettuate varie prove con sorgenti LED che differivano per l'ampiezza della zona attiva e sono state riportate in seguito le foto acquisite, il grafico dell'andamento del rapporto con il confronto tra la misura e le simulazioni e due diagrammi polari con diversa apertura numerica.

## 6. SISTEMA E MISURE EFFETTUATE

---

### 1. Altezza sorgente = 0.5 mm

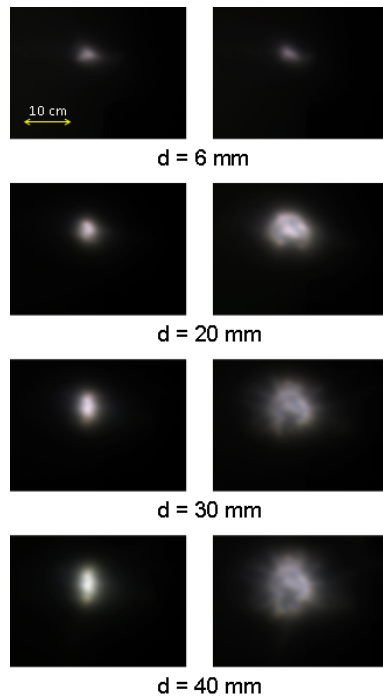


Figura 6.27: Foto acquisite, sotto ogni coppia il diametro di apertura dell'iride, sorgente = 0.5 mm.

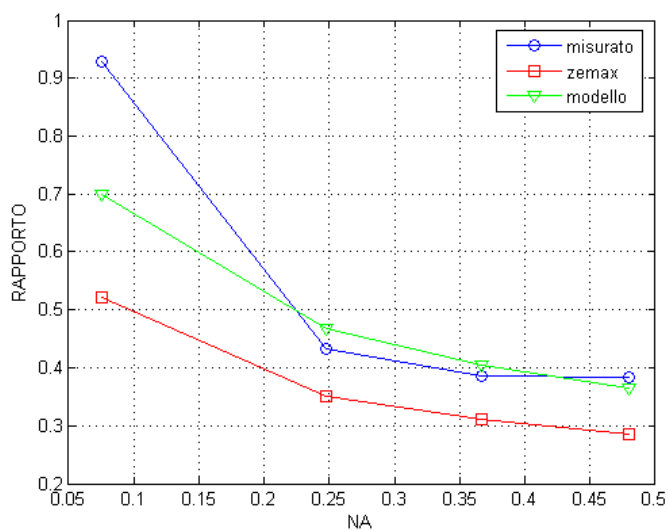


Figura 6.28: Confronto del rapporto per la sorgente di 0.5 mm.

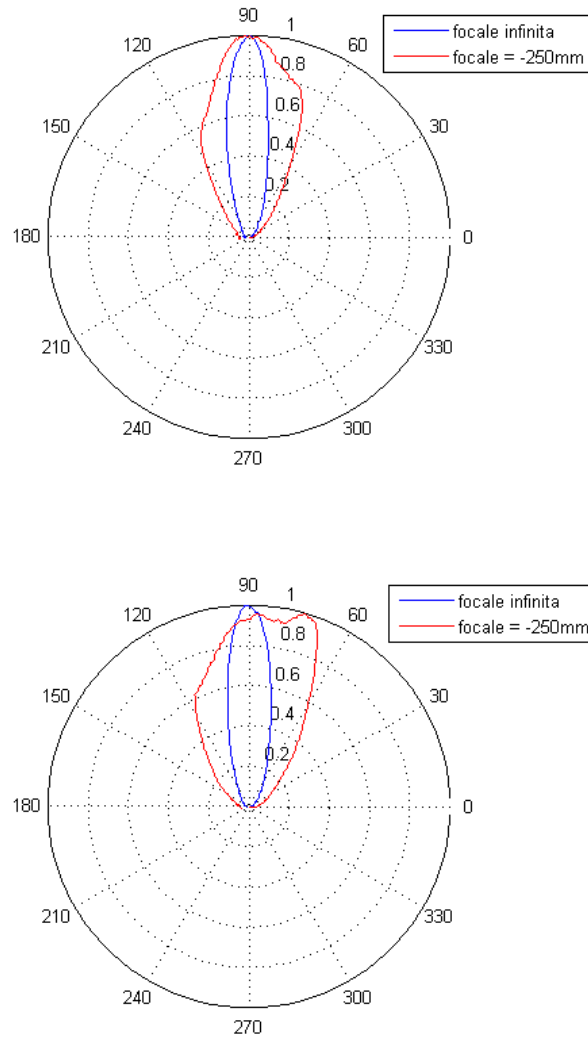


Figura 6.29: Diagrammi polari con  $NA = 0.25$  e  $NA = 0.48$  rispettivamente.

## 6. SISTEMA E MISURE EFFETTUATE

---

### 2. Altezza sorgente = 1 mm

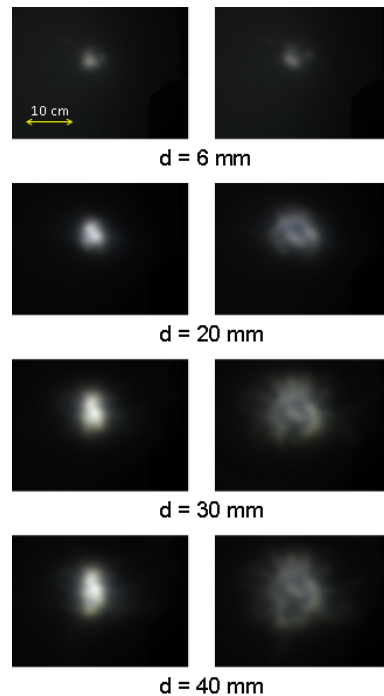


Figura 6.30: Foto acquisite, sotto ogni coppia il diametro di apertura dell'iride, sorgente = 1 mm.

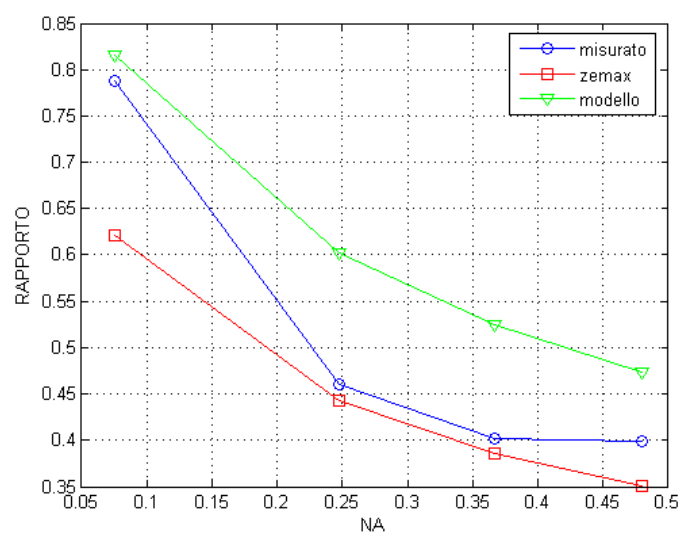


Figura 6.31: Confronto del rapporto per la sorgente di 1 mm.

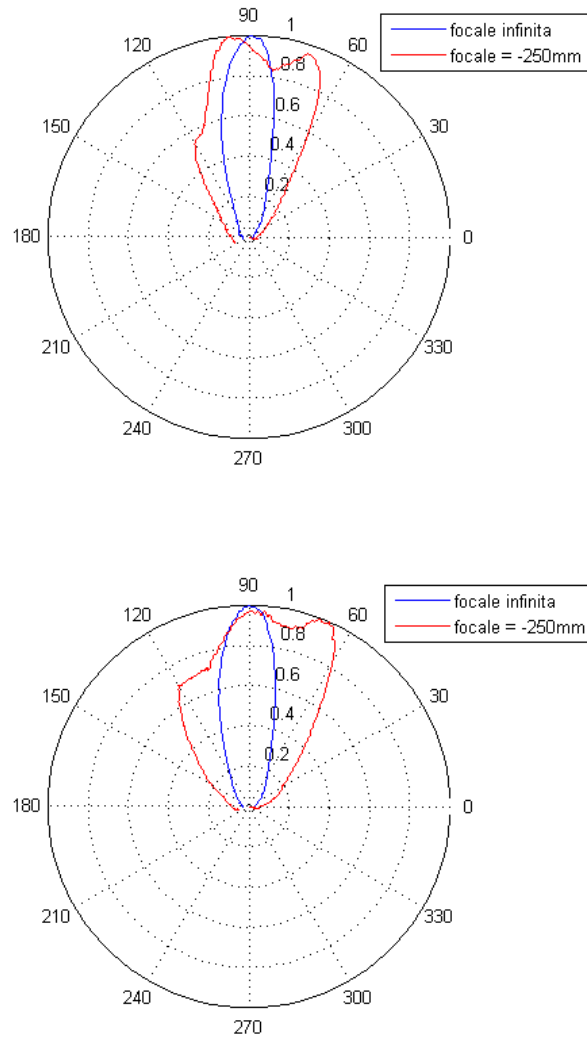


Figura 6.32: Diagrammi polari con  $NA = 0.25$  e  $NA = 0.48$  rispettivamente.

3. Altezza sorgente = 1.5 mm

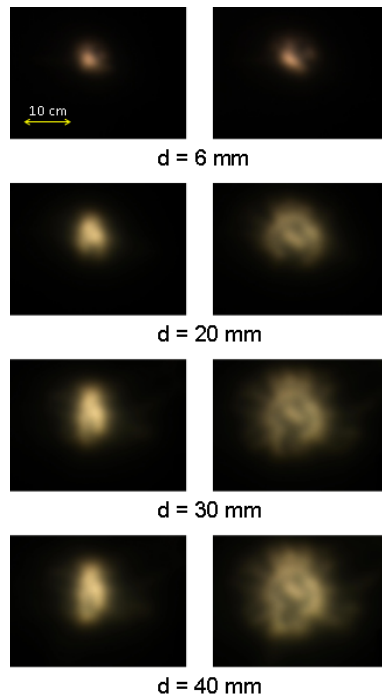


Figura 6.33: Foto acquisite, sotto ogni coppia il diametro di apertura dell'iride, sorgente = 1.5 mm.

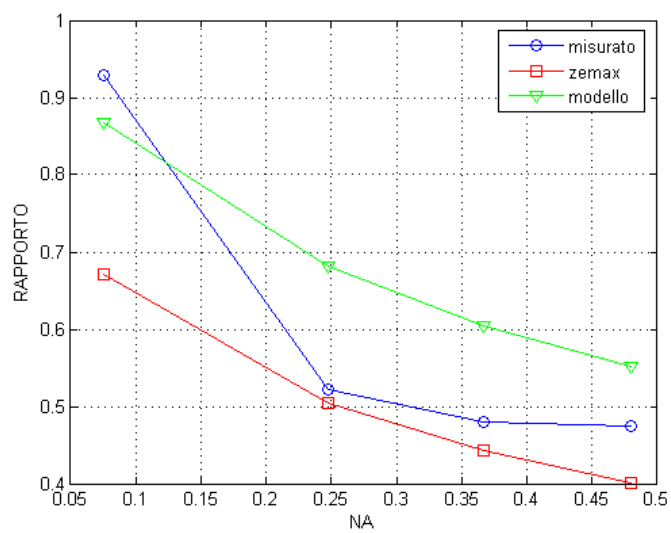


Figura 6.34: Confronto del rapporto per la sorgente di 1.5 mm.

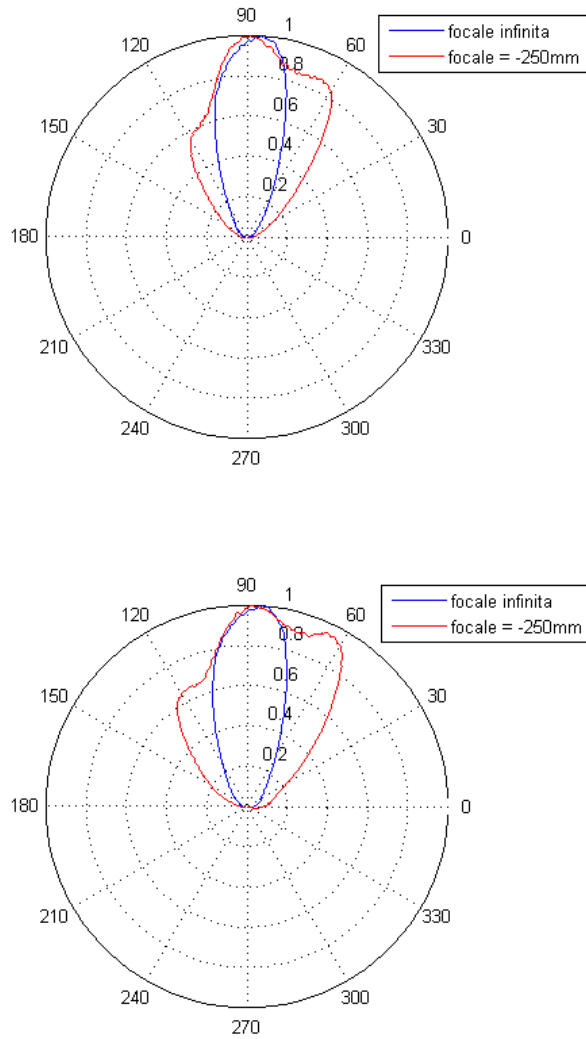


Figura 6.35: Diagrammi polari con  $NA = 0.25$  e  $NA = 0.48$  rispettivamente.

### 6.2.3 Prototipi del sistema di illuminazione progettato

Successivamente alle prime sperimentazioni sono state acquistate, dopo aver valutato i parametri in gioco, tre lenti di Fresnel (Figura 6.36) le cui caratteristiche, in particolar modo focale e diametro, erano compatibili con la realizzazione del prototipo del sistema di illuminazione progettato (Figura 6.37). I risultati delle misure sono riportati in seguito.

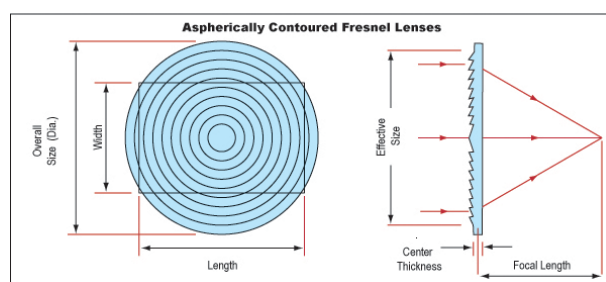


Figura 6.36: Struttura delle lenti di Fresnel utilizzate [29].

Per ogni misurazione è presentato il sistema di misura con le specifiche distanze tra i vari componenti.

La tensione applicata al disco piezoelettrico varia da 0 a 54V circa con passi di 6V.

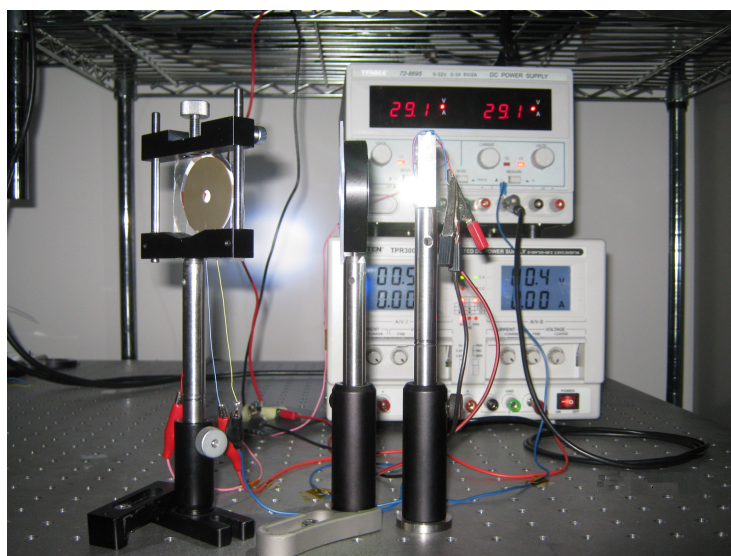


Figura 6.37: Sistema di misura acceso.



### 1. LENTE A

La prima lente utilizzata ha un lunghezza focale di 3.81 cm e un diametro di 5.08 cm.

- sistema di misura:

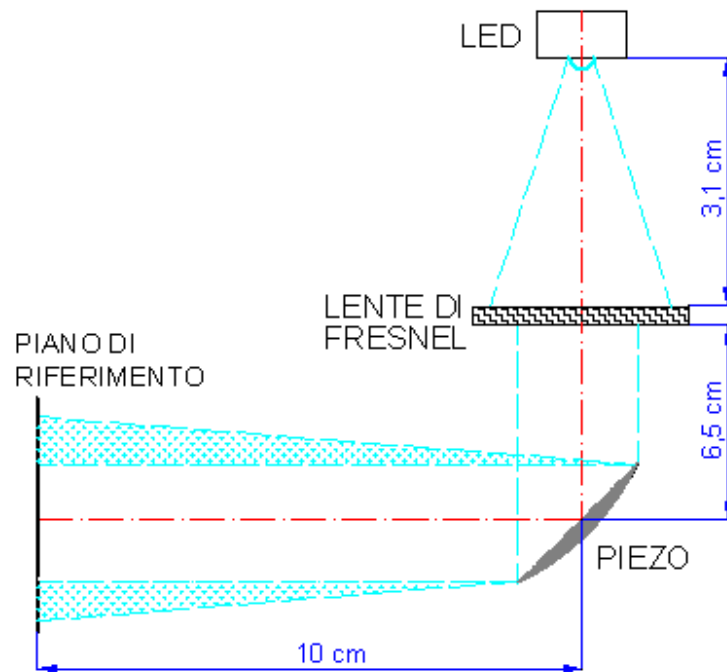


Figura 6.38: Sistema di misura lente A.

- risultati:

Dalle foto acquisite durante la misura, riportate in Figura 6.39, si è ricavato l'FWHM (Figura 6.40 e Figura 6.41) dal quale risulta che il fascio luminoso aumenta la sua apertura di circa 2.73 volte in orizzontale e di circa 2.33 volte in verticale rispetto al valore iniziale.

In seguito è riportato anche il diagramma polare con il confronto tra la prima misura 0V (in blu) e l'ultima 54V (in rosso).

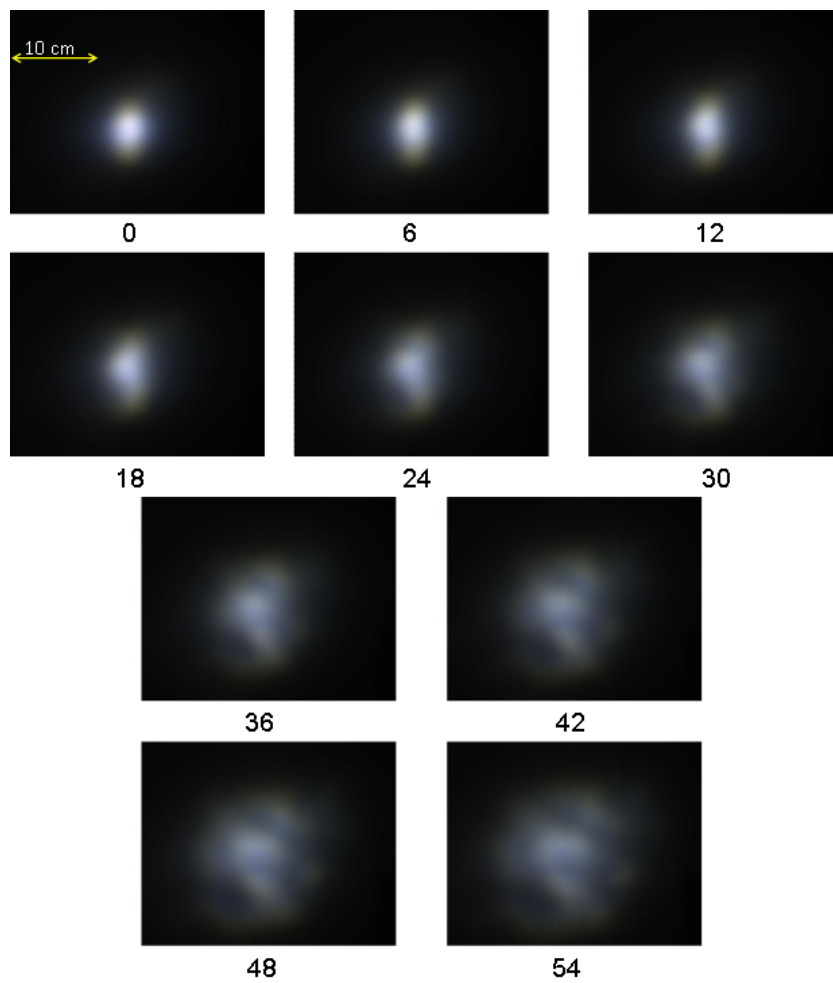


Figura 6.39: Foto lente A. Sotto ogni foto la tensione in Volt applicata al piezo.

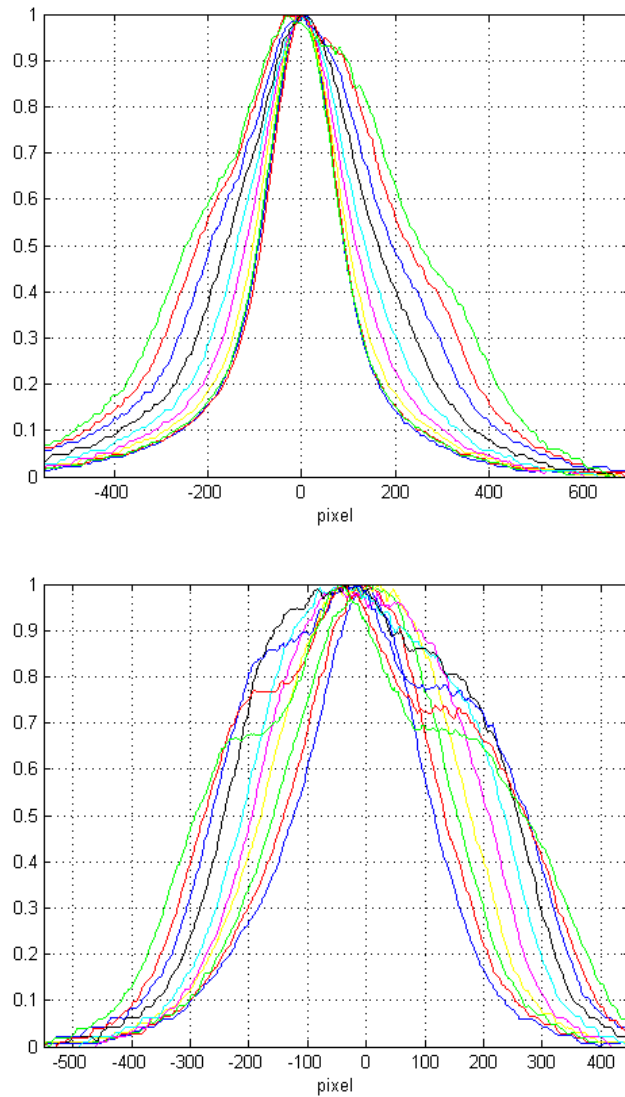


Figura 6.40: Apertura del fascio in funzione della tensione applicata in orizzontale e verticale, lente A.

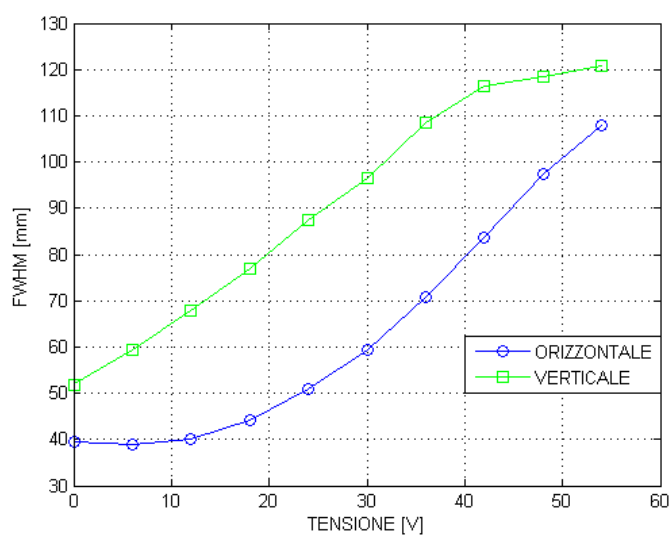


Figura 6.41: FWHM lente A.

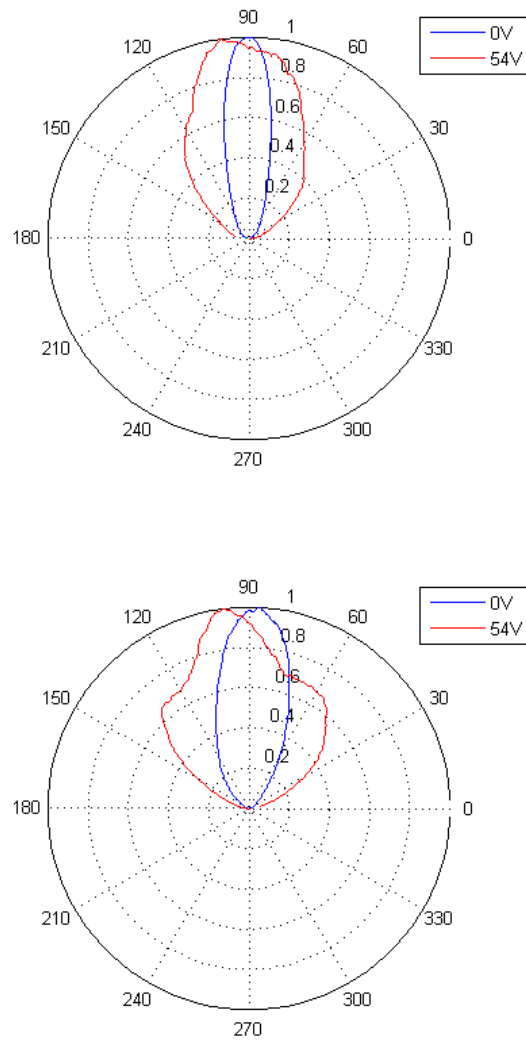


Figura 6.42: Diagrammi polari, orizzontale e verticale, lente A.

## 2. LENTE B

La seconda lente utilizzata ha un lunghezza focale di 3.302 cm e un diametro di 5.08 cm.

- sistema di misura:

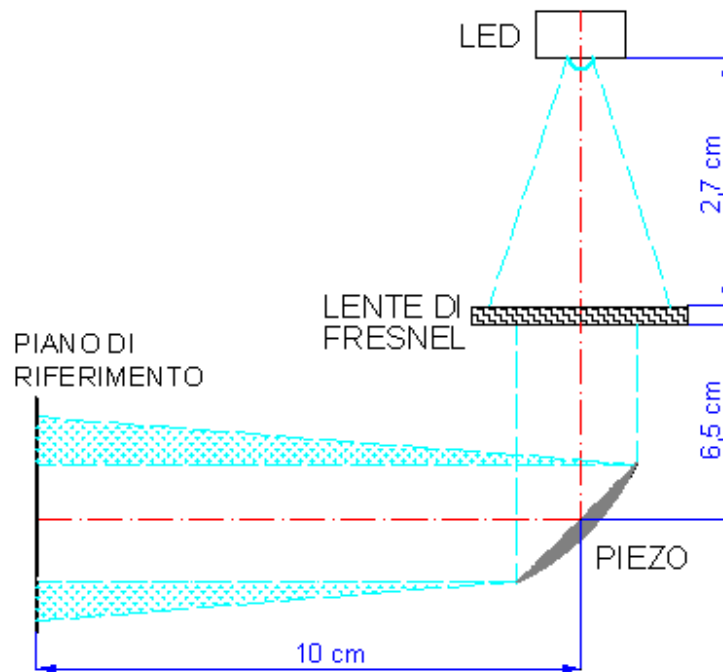


Figura 6.43: Sistema di misura lente A.

- risultati:

Dalle foto acquisite durante la seconda misura (Figura 6.44), si è ricavato l'FWHM (Figura 6.45 e Figura 6.46) dal quale risulta che il fascio luminoso si espande di circa 3.1 volte in orizzontale e di circa 2.7 volte in verticale rispetto al valore iniziale e sono quindi riportati i diagrammi polari con il confronto tra la prima misura 0V (in blu) e l'ultima 54V (in rosso).

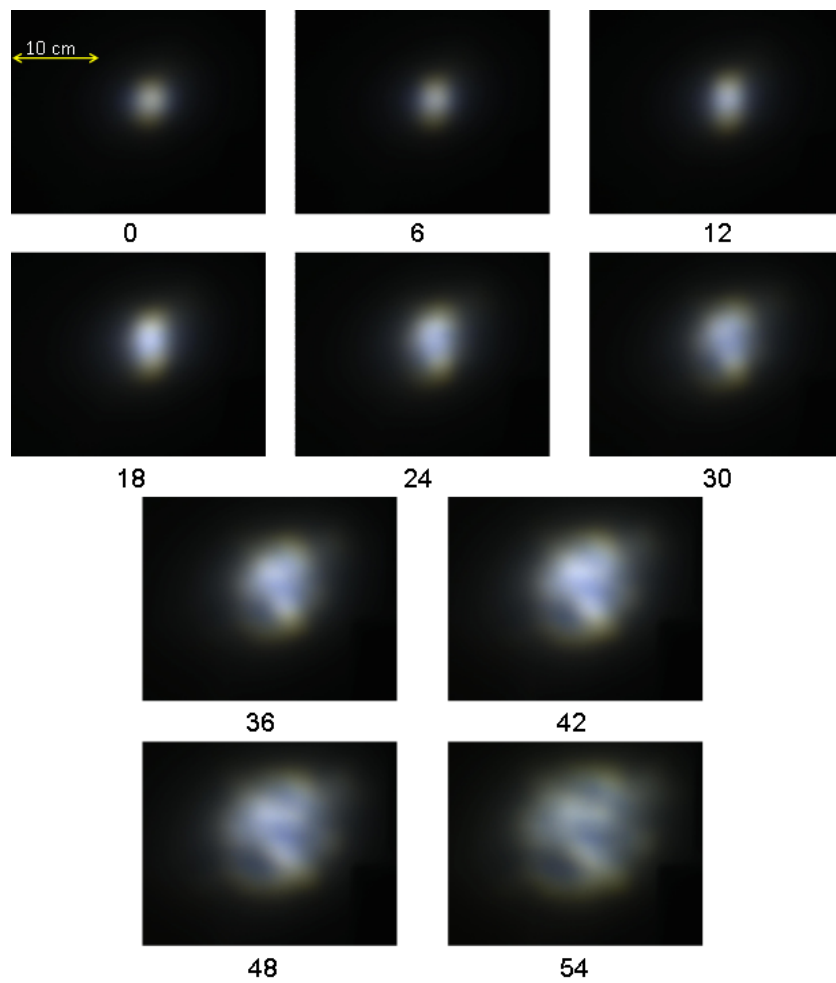


Figura 6.44: Foto lente B. Sotto ogni foto la tensione in Volt applicata al piezo.

## 6. SISTEMA E MISURE EFFETTUATE

---

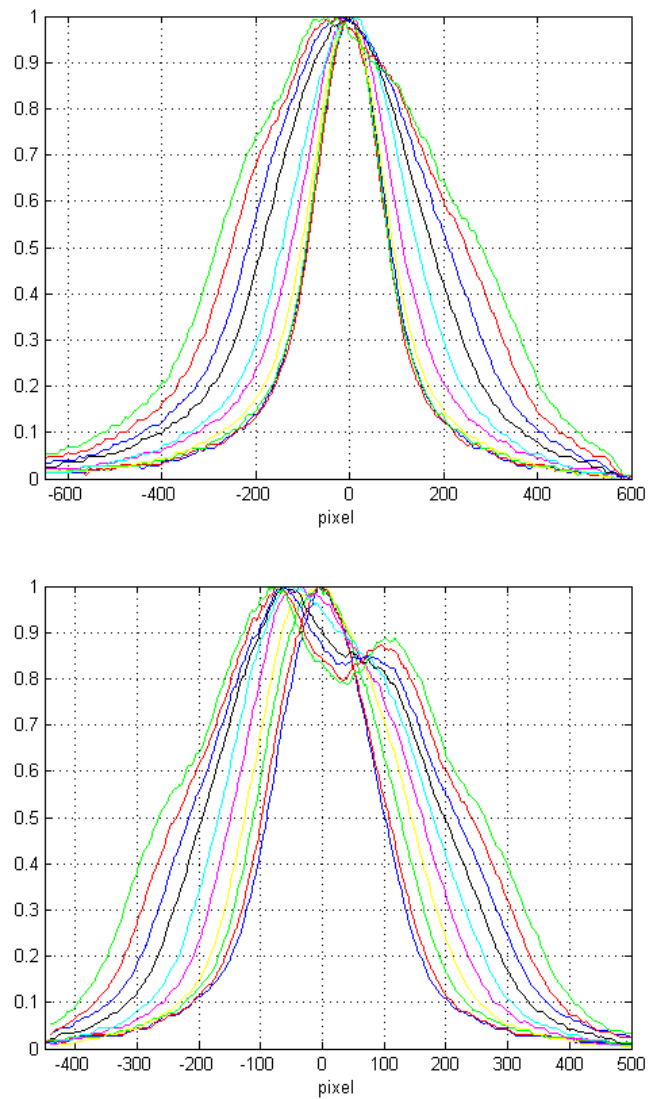


Figura 6.45: Apertura del fascio in funzione della tensione applicata in orizzontale e verticale, lente B.



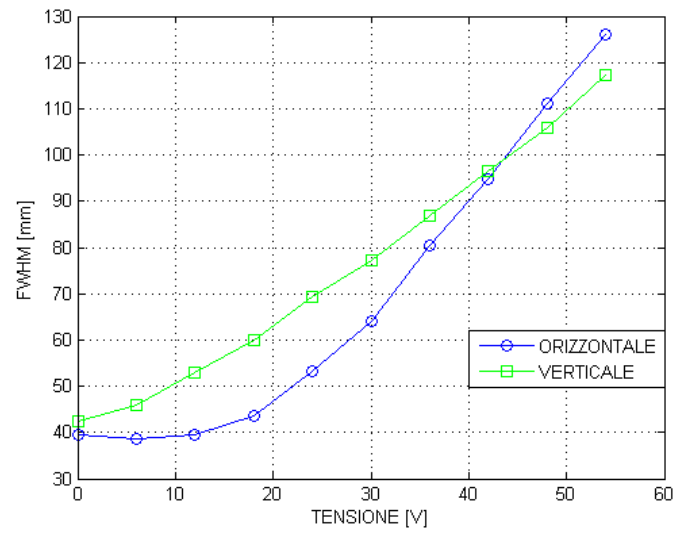


Figura 6.46: FWHM lente B.

## 6. SISTEMA E MISURE EFFETTUATE

---

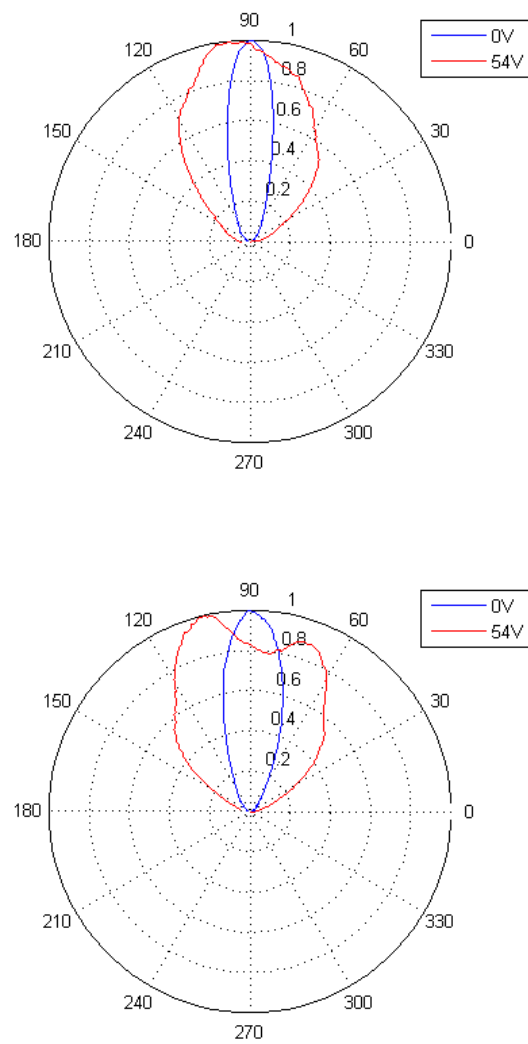


Figura 6.47: Diagrammi polari, orizzontale e verticale, lente B.

### 3. LENTE C

La terza ed ultima lente utilizzata ha un lunghezza focale di 5.08cm e un diametro sempre di 5.08 cm.

- sistema di misura:

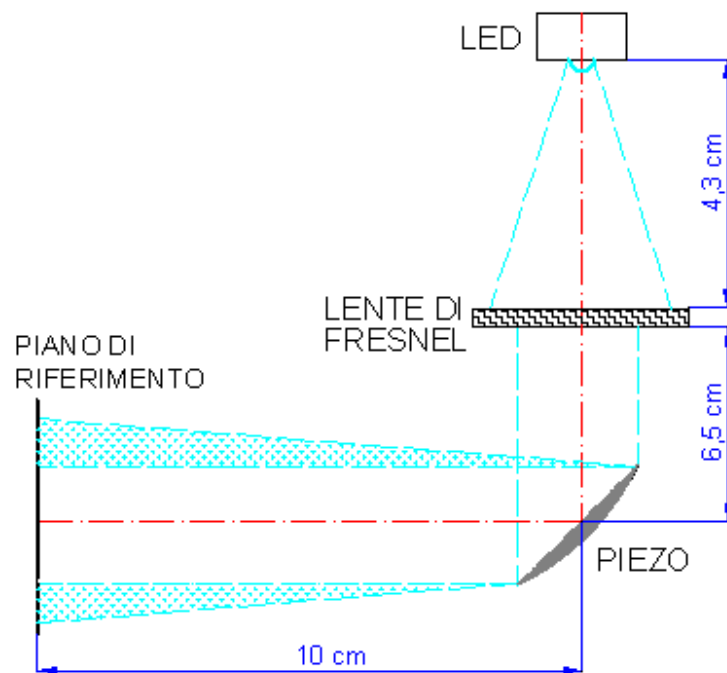


Figura 6.48: Sistema di misura lente C.

- risultati:

Dalla misura sono state acquisite le foto riportate in Figura 6.49, quindi ricavato l'andamento dell'FWHM (Figura 6.50 e Figura 6.51) da cui si può vedere come il fascio luminoso aumenta la sua apertura di circa 4.13 volte in orizzontale e di circa 2.4 volte in verticale rispetto al valore iniziale.

Infine riportati i diagrammi polaricon con il confronto tra la prima misura 0V e l'ultima 54V.

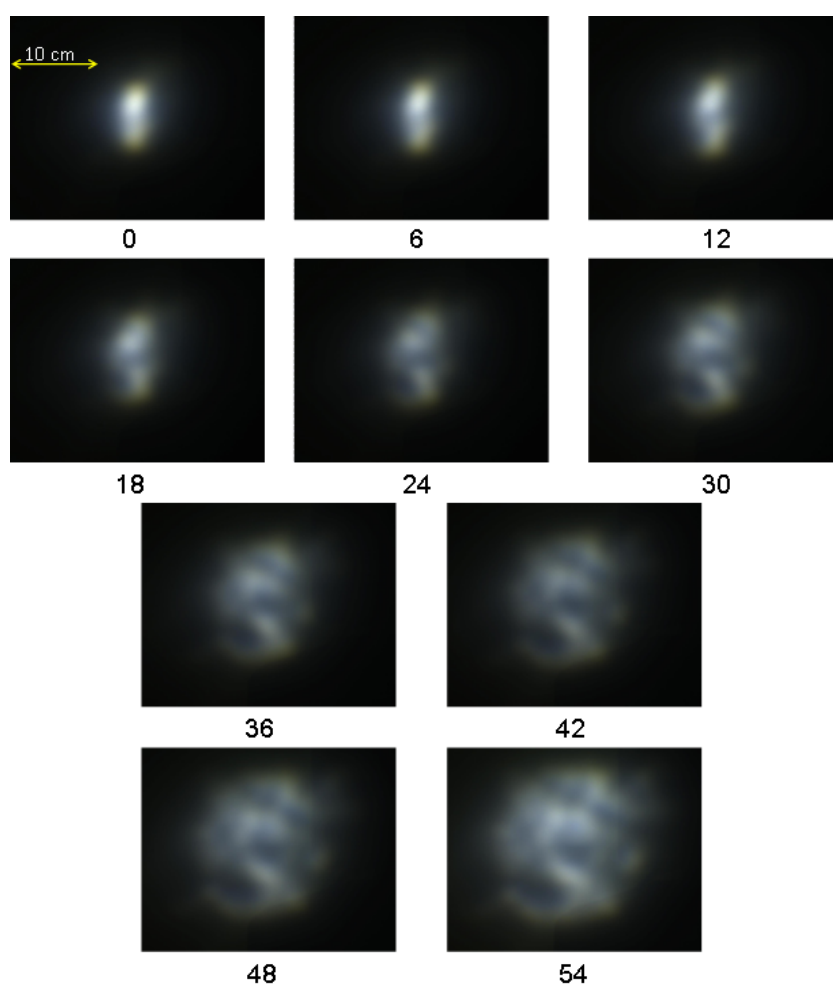


Figura 6.49: Foto lente C. Sotto ogni foto la tensione in Volt applicata al piezo.

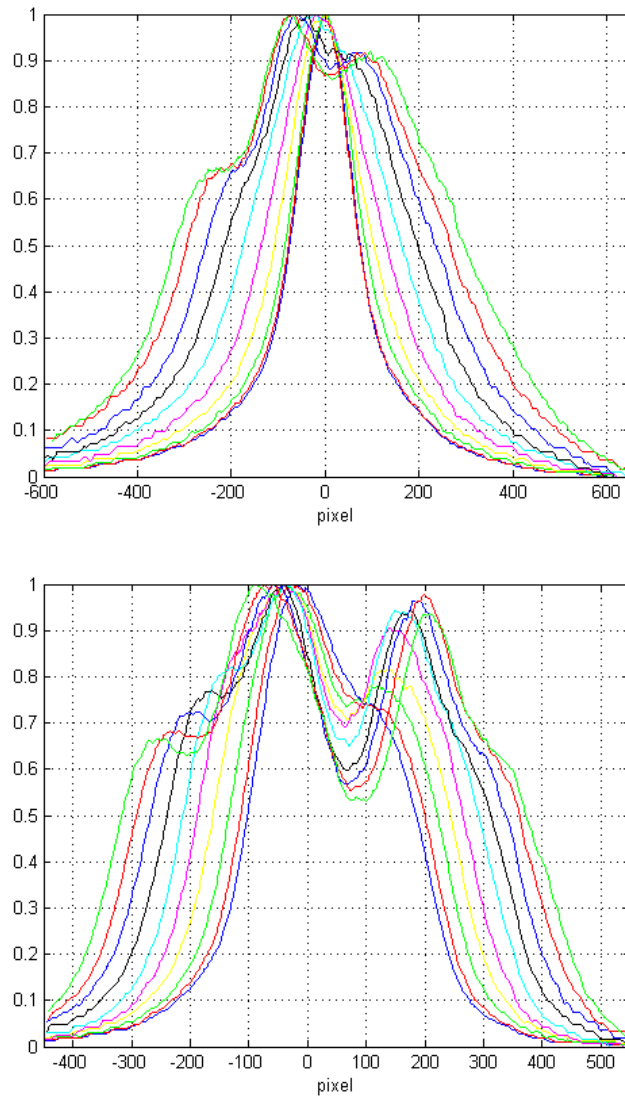


Figura 6.50: Apertura del fascio in funzione della tensione applicata in orizzontale e verticale, lente C.

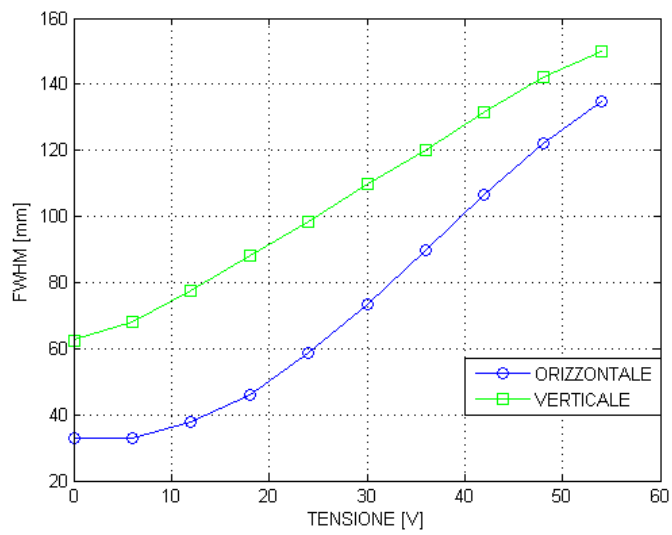


Figura 6.51: FWHM lente C.

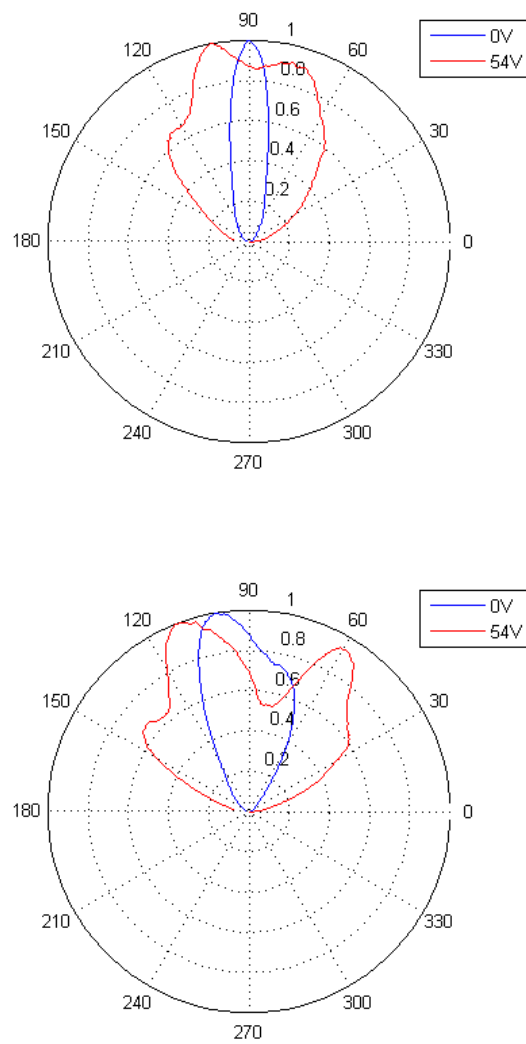


Figura 6.52: Diagrammi polari, orizzontale e verticale, lente C.

### 6.2.4 Osservazioni

Dai risultati ottenuti dalle misure effettuate variando l'apertura numerica della lente di collimazione si può notare come i valori ottenuti sono in tutti e tre i casi compresi tra i valori ottenuti da simulazione con ZEMAX e con il modello proposto. Ciò indica, sia la validità del modello matematico realizzato, sia la bontà delle misurazioni effettuate in laboratorio.

Per quanto riguarda le misure effettuate con le tre diverse lenti, è riportato in Tabella 6.7 un riassunto dei parametri fondamentali delle lenti e dei risultati ottenuti.

LENTE	FOCALE(cm)	$\varnothing$	$\Delta\alpha_{FWHM}$ (orizzontale)	$\Delta\alpha_{FWHM}$ (verticale)
A	3.81	5.08	1.96°	1.97°
B	3.302	5.08	2.47°	2.14°
C	5.08	5.08	2.93°	2.49°

Tabella 6.7: Confronto tra le tre lenti.

Si può notare come l'angolo di apertura del fascio vari tra due e tre gradi come ci si poteva aspettare dai risultati ottenuti durante la fase di caratterizzazione del disco piezoelettrico.

La non omogeneità nella proiezione del fascio luminoso sul piano di riferimento è dovuta all'applicazione sul disco piezoelettrico di una pellicola riflettente provvisoria che è stata utilizzata in questa fase di misure.

Infine si riporta la struttura pensata per la realizzazione di un prototipo del sistema di illuminazione (Figura 6.53).

La prima sezione della struttura è interamente chiusa e contiene la sorgente LED con la sua alimentazione e la lente che realizza la collimazione del fascio, nella seconda sezione invece in parte aperta per permettere la fuoriuscita della luce si trova il disco piezoelettrico fissato semplicemente ai bordi estremi, con una angolazione rispetto alla lente di 45°, per permetterne il movimento.

In Figura 6.54 è riportata anche la proiezione ortogonale della struttura con le



relative misure in millimetri, le misure della prima sezione sono relative all'utilizzo della lente B.

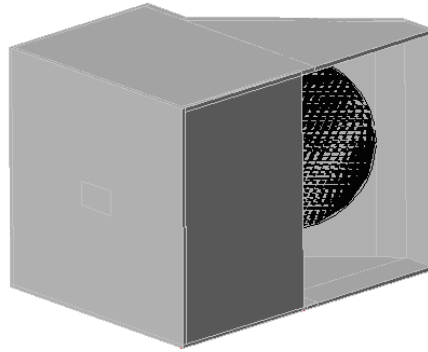


Figura 6.53: Progetto del dispositivo di illuminazione.

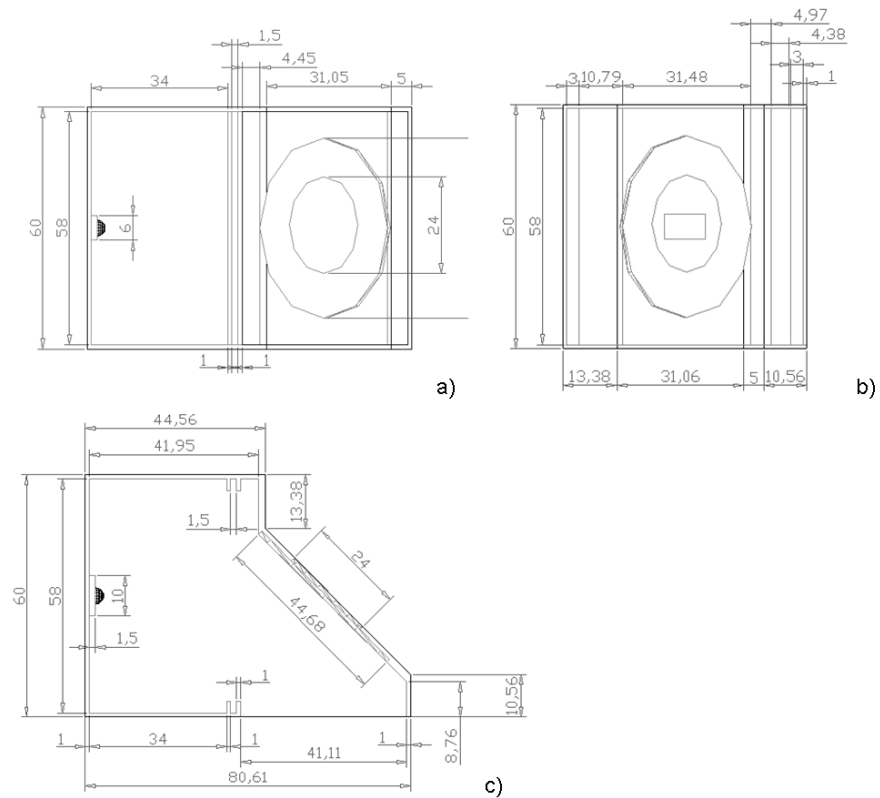


Figura 6.54: Proiezione ortogonale del dispositivo di illuminazione.

### 6.3 Sistema che utilizza il principio della fotostrizione

Il sistema di misura rappresentato in Figura 6.55 e composto da un LED bianco che fornisce il fascio luminoso a cui si riferisce la misura, e da un secondo LED di colore blu sul quale è posta una piccola membrana di materiale fotosensibile che viene deformato poiché utilizza il principio della fotostrizione visto in precedenza.

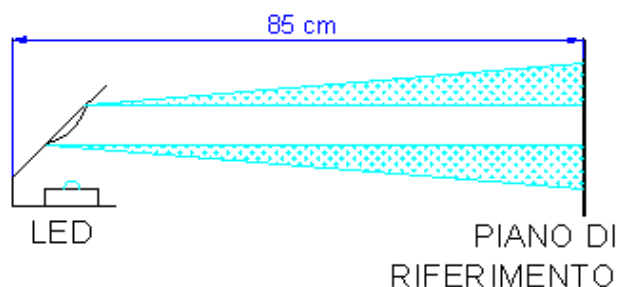


Figura 6.55: Sistema di misura con fotostrizione.

Il sistema di misura è molto simile a quello utilizzato nei paragrafi precedenti con il fascio proiettato su un piano di riferimento distante dalla sorgente 850 mm, e le immagini acquisite tramite fotocamera.

La sorgente bianca è alimentata con un generatore di tensione a 280mA mentre la sorgente blu è alimentata con corrente variabile tra 10 e 500mA, più si aumenta la corrente più la sorgente aumenta le sua intensità luminosa.

Sono quindi riportate le foto effettuate durante la misura (Figura 6.56), l'andamento dell'FWHM sia in orizzontale che in verticale (Figura 6.57) e i diagrammi polari riferiti alla prima e all'ultima misurazione (Figura 6.58).

Si ha un allargamento del fascio luminoso di 1.2 volte circa in verticale e di circa 2.75 volte in orizzontale.

### 6.3 SISTEMA CHE UTILIZZA IL PRINCIPIO DELLA FOSTRIZIONE

---

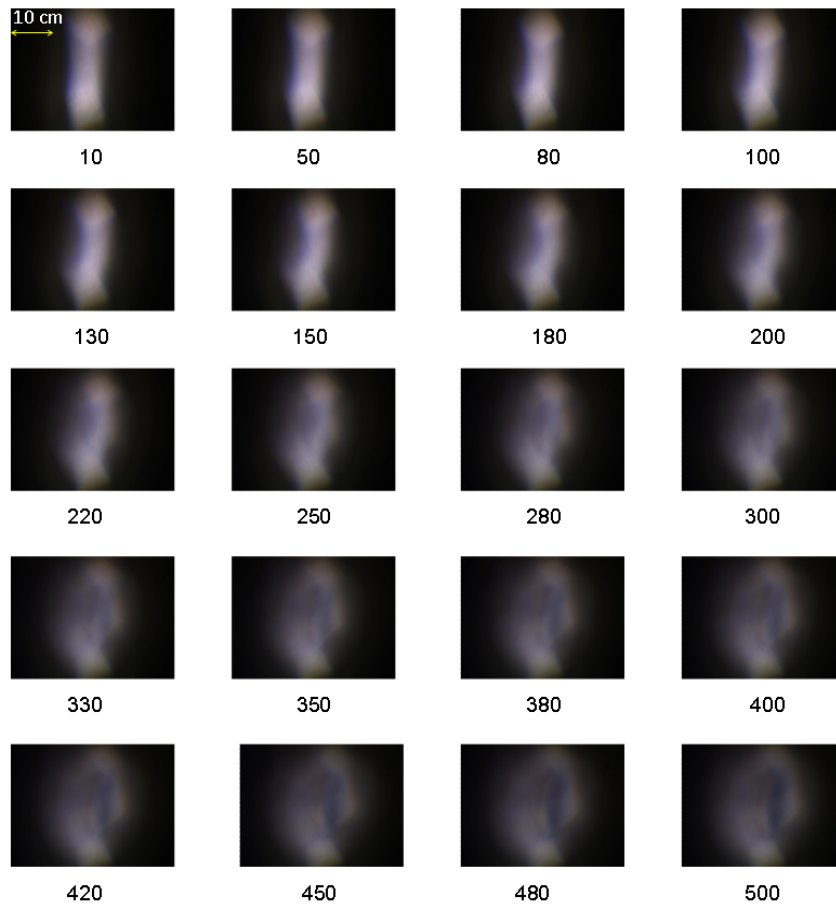


Figura 6.56: Foto acquisite. Sotto ogni foto la corrente applicata alla sorgente LED blu.

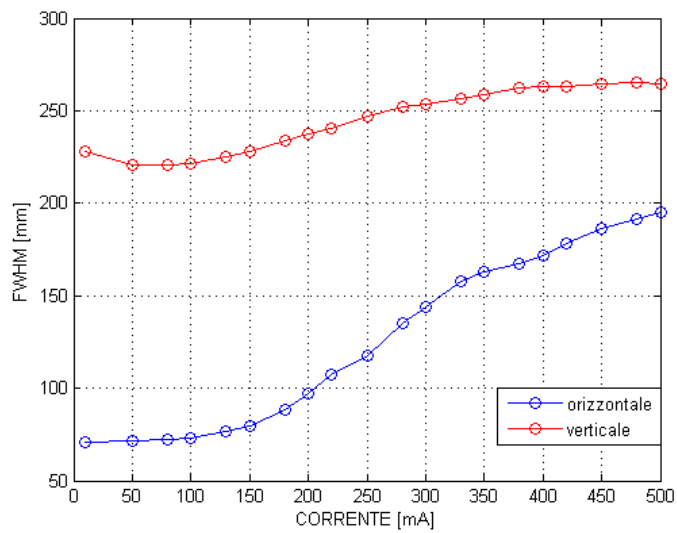


Figura 6.57: Andamento in orizzontale e verticale dell'FWHM.

6.3 SISTEMA CHE UTILIZZA IL PRINCIPIO DELLA FOTOSTRIZIONE

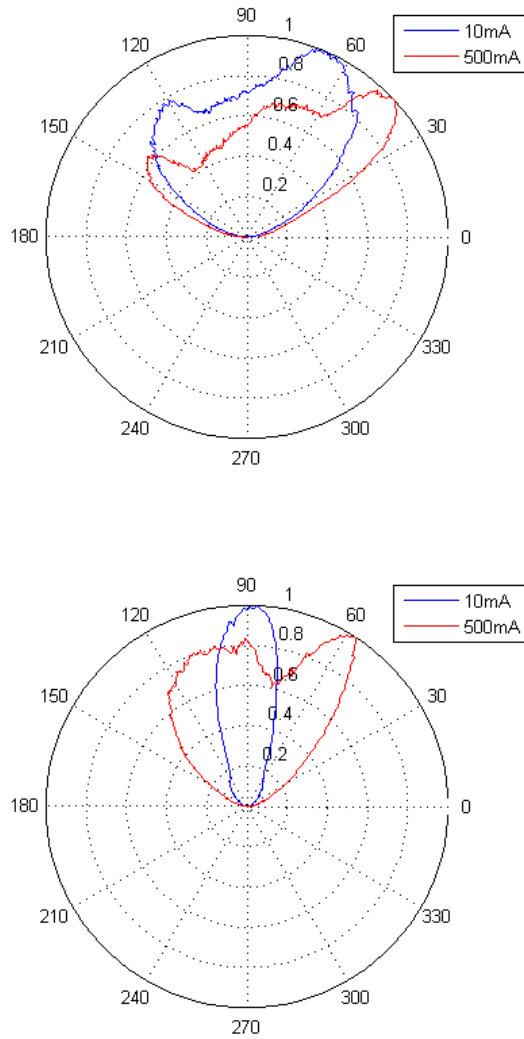


Figura 6.58: Diagrammi polari, verticale e orizzontale.

6. *SISTEMA E MISURE EFFETTUATE*

---

# Conclusioni

Lo scopo che ci si era preposti era la progettazione e la realizzazione di un sistema di illuminazione variabile.

La struttura di base del progetto ha visto la combinazione tra l'ultima sorgente impiegata per l'illuminazione, il LED, delle semplici lenti di Fresnel e un disco di materiale piezoelettrico che ha rappresentato la parte più importante del lavoro.

Dai dati che sono risultati da simulazioni e misure è evidente, dalla corrispondenza tra gli andamenti dei grafici, una buona fase di progettazione. Anche dalle misure, dove le acquisizioni riportate ben rendono il risultato, si è evidenziato come l'utilizzo del disco piezoelettrico sia stato funzionale allo scopo prefissato; infatti l'allargamento del fascio luminoso (per le differenti tensioni applicate) è mediamente di circa tre volte. Una considerazione va fatta anche in relazione alla tensione applicata in quanto il fatto che fosse compresa tra 0 e 60V continua permette una complessità inferiore nel progetto in quanto possono essere applicate le norme relative alla bassissima tensione ( $< 120$  V).

Durante la fase di valutazione del progetto si è cercato di comprendere quali potessero essere le eventuali applicazioni, industriali e civili, di un sistema di questo tipo in relazione alla dimensione del fascio emesso: si è visto che si può utilizzare per applicazioni di illuminazione interna in cui sia necessario illuminare una precisa zona a breve distanza. (il riferimento utilizzato in tutte le misure è stato posto ad un metro dal disco piezoelettrico)

Si può inoltre facilmente osservare dai risultati ottenuti che disponendo di dispositivi che siano in grado di raggiungere una focale ancora più corta, rispetto a quella che forniva il disco piezoelettrico utilizzato, si sarebbe in grado di au-

## *CONCLUSIONI*

---

mentare ancora l'angolo di apertura del fascio luminoso.

Oltre a ciò si può notare osservando la Tabella 6.7 che maggiore è la focale della lente che effettua la collimazione migliore è la prestazione complessiva del sistema.



# Appendice A

## Angolo solido e steradiante

L'angolo solido (Figura A.1) è un'estensione allo spazio tridimensionale al concetto di angolo piano,  $\theta$  in radianti come  $s/r$ , dove  $s$  è la lunghezza dell'arco di cerchio di raggio  $r$  sotteso da  $\theta$ .

Esso è definito come ciascuna delle due regioni in cui viene suddiviso lo spazio dalla superficie formata dalle semirette passanti per uno stesso punto (chiamato vertice dell'angolo solido) e per i punti di una curva chiusa semplice tracciata su di una superficie non contenente il vertice (una sfera di raggio  $r$ ). L'unità di misura dell'angolo solido è lo steradiante [sr].

La misura in steradiani dell'angolo solido  $\omega$  è definita come  $A/r^2$ , dove  $A$  è l'area della porzione di superficie sferica di raggio  $r$  vista sotto l'angolo  $\omega$ .

L'angolo solido sotteso dall'intera superficie sferica misura evidentemente  $4\pi$ . Per avere la misura in gradi quadrati si moltiplica il valore in steradiani per  $(180/\pi)^2$ .

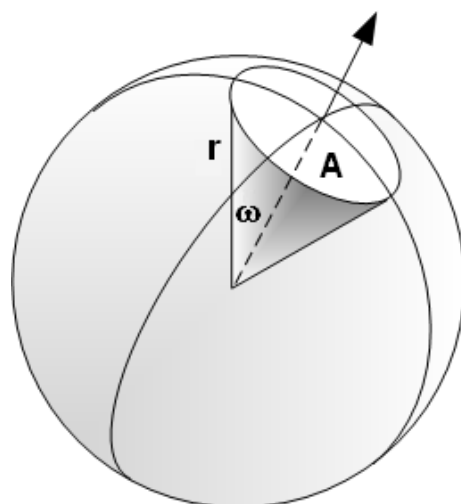


Figura A.1: Angolo solido.

# Appendice B

## Caratteristiche dei dispositivi

### Mechanical specifications:

External diameter	30	mm
Clear aperture	10	mm
Thickness	9.8	mm
Weight	22.6	g
Lifecycles	>10000000	

### Electrical specifications:

Control voltage	0 to 5	V
Response time (10% - 90% step)	10	ms
Power consumption	0 - 2	W

### Optical specifications:

	EL-10-30-VIS-HR	EL-10-30-VIS-LD, EL-10-30-NIR-LD
<b>Focal tuning range @ 525nm</b>	+20 to +60 mm	+45 to +120 mm
<b>Dispersion</b>		
$n_F$ (486.1nm)	1.572	1.302
$n_D$ (589.3nm)	1.559	1.300
$n_C$ (656.3nm)	1.554	1.299
Abbe number V	31	100
<b>Lens type</b>	plano-convex	

Tabella B.1: Fast electrically tunable lens, EL-10-30 [23].

**Mechanical specifications:**

<b>External diameter</b>	35	mm
<b>Clear aperture</b>	20	mm
<b>Thickness</b>	8	mm
<b>Weight</b>	11.35	g
<b>Lifecycles</b>	>100000	

**Optical specifications:**

	ML-20-35-VIS-HR	ML-20-35-VIS-LD, ML-20-35-NIR-LD
<b>Focal tuning range @ 525nm</b>	-40...inf...+40 mm	-80...inf...+80 mm
<b>Dispersion</b>		
$n_F$ (486.1nm)	1.572	1.302
$n_D$ (589.3nm)	1.559	1.300
$n_C$ (656.3nm)	1.554	1.299
Adde number V	31	100
<b>Lens type</b>	plano-convex to plano-concave	

Tabella B.2: Manual tunable lens, ML-20-35 [24].

---

<b>Dimensions (<math>\varnothing</math> x thickness)</b>	50mm x 19mm
<b>Clear aperture</b>	25mm
<b>Focal length range (EFFL)</b>	From +31mm to infinity
<b>Lens Type</b>	plano convex
<b>Transmission (visible)</b>	>90%
<b>Refractive Index <math>n_D</math></b>	1.4580
<b>Abbe number <math>V_d</math></b>	55
<b>Operating Temperature</b>	-20°C to +80°C

Tabella B.3: ML-25-50 [25].

<b>Dimensions (<math>\varnothing</math> x thickness)</b>	106mm x 50mm
<b>Clear aperture</b>	55mm
<b>Focal length range (EFFL)</b>	From +92mm to infinity
<b>Lens Type</b>	plano convex
<b>Transmission (visible)</b>	>90%
<b>Refractive Index <math>n_D</math></b>	1.300
<b>Abbe number <math>V_d</math></b>	100
<b>Operating Temperature</b>	-20°C to +80°C

Tabella B.4: ML-55-106-NOC-LD [26].

	<b>Saturn</b>	<b>Pan</b>	<b>Rhea</b>
<b>Technology</b>	Elettrostatica	Elettrostatica	Piezolettrica
<b>Size</b>	Esterna circolare 2"	Esterna circolare 30 mm di diametro	12.5mm
<b>Actuators</b>	32 nel retro, 16 frontali, Bidirezionale	32, Unidirezionale	1
<b>Active Area</b>	11 mm Diameter	11 mm Diameter	11mm
<b>Max Stroke</b>	> 10 $\mu\text{m}$ (typ. 14) Bidirezionale	> 10 $\mu\text{m}$ (typ. 14)	+/- 8 $\mu\text{m}$
<b>Control Voltage</b>	0-250 V dc in	0-250 V dc in	+250V, -250V

Tabella B.5: Caratteristiche degli specchi deformabili [27].

# Bibliografia

- [1] Dispense di Illuminotecnica per i corsi di Fisica Tecnica di Carletti, Scieurpi, Secchi (Tratte dalla tesi di laurea di Roberto Bartolo Progetto illuminotecnico della base antartica italiana avanzata, A.A. 1999-2000).
- [2] Giacomo Torzo, *Nozioni elementari di fotometria*, ICIS-CNR, INFM-PD e Dipartimento di Fisica - Università di Padova.
- [3] *Human eye sensitivity and photometric quantities*, disponibile su: <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/Sample-Chapter.pdf>.
- [4] Angelo V. Arecchi, Tahar Messadi, R. John Koschel, *Field Guide to Illumination*, John E. Greivenkamp, Series Editor. Spie Press, 2007.
- [5] G. V. Fracastoro, *Fisica Tecnica Ambientale, Parte VI: Illuminotecnica*, Politecnico di Torino, giugno 2003.
- [6] P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, *Elementi di fisica - onde*, EdiSES, seconda edizione.
- [7] Frank L. Pedrotti, Leno S. Pedrotti, *Introduction to Optics*, Prentice Hall International. Inc. 1993.
- [8] Carpinteri Alberto, Davini Cesare, Lembo Marzio, Caruso Giovanni, *Laminati piezoelettrici: modellazione, algoritmi di calcolo ed ottimizzazione della risposta dinamica*, tesi di dottorato, Università degli studi di Roma Tor Vergata, 2000.
- [9] PI Ceramic, *Piezo Materials Tutorial*, disponibile su: [http://www.piceramic.com/piezo\\_effect.php](http://www.piceramic.com/piezo_effect.php).

- [10] Morgan TechnicalCeramics Electro Ceramics,  
<http://www.morganelectroceramics.com/resources/guide-to-piezoelectric-dielectric-ceramic/>.
- [11] NOLIAC, *Piezo ceramics*, disponibile su:  
[http://www.noliac.com/Piezo\\_ceramics-38.aspx](http://www.noliac.com/Piezo_ceramics-38.aspx).
- [12] NOLIAC, *Application-Specific Piezoelectric Components: High Displacement in a Small Component Size*, disponibile su:  
[http://www.noliac.com/files/billeder/pdf/manufacturing\\_\\_test\\_and\\_performance\\_of\\_ring\\_benders.pdf](http://www.noliac.com/files/billeder/pdf/manufacturing__test_and_performance_of_ring_benders.pdf).
- [13] Montana State University, *Photostriction At MSU* ,  
<http://www.physics.montana.edu/eam/photostriction/index.htm>.
- [14] S. Bonora, M. Meneghini, A. Marrani, M. Bassi, I. Falco, E. Zanoni,  
*Photostrictive effect in a polyvinylidene fluoride-trifluoroethylene copolymer*,  
Applied Physics Letters, Volume 99, published 20 July 2011.
- [15] F. Bisegna, F. Gugliermitti, M. Barbalace, L. Monti, *Stato dell'arte dei LED (Light Emitting Diodes)*, ENEA, Giugno 2010.
- [16] Corso di Dispositivi Optoelettronici, anno accademico 2010/2011
- [17] Simon M. SZE, *Dispositivi a semiconduttore*, Edizione italiana Ulrico Hoepli  
Milano, 1991.
- [18] <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/>.
- [19] OSRAM, *Datasheet: LUW W5AM - ultra white - Lead (Pb) Free Product - RoHS Compliant*, Update: 21.01.2011, disponibile su:  
<http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?fav0id=000000200005c3a038f0023&act=showBookmark>.
- [20] OSRAM, *Application Note: Golden DRAGON Plus*, Update: 01.10.2008,  
disponibile su:  
<http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?fav0id=000000200005c3a038f0023&act=showBookmark>.



- 
- [21] Optotune, focus tunable lens, *Application Note: ML-25-50 Lumilens*, Update: 17.08.2011, disponibile su:  
<http://www.optotune.com/images/products/Optotune%20application%20note%20ML-25-50%20Lumilens.pdf>.
- [22] Optotune, focus tunable lens, *Operating instructions: EL-10-30-Series Electrically focus tunable lens*, Date: 10.01.2012, disponibile su:  
<http://www.optotune.com/images/products/Optotune%EL-10-30%20operating%20instructions.pdf>.
- [23] Optotune, focus tunable lens, *Datasheet: EL-10-30-Series Fast Electrically Tunable Lens*, Update: 10.01.2012, disponibile su:  
<http://www.optotune.com/images/products/Optotune%20EL-10-30.pdf>.
- [24] Optotune, focus tunable lens, *Datasheet: ML-20-35 Manually Tunable Lens*, Update: 14.12.2011, disponibile su:  
<http://www.optotune.com/images/products/Optotune%20ML-20-35.pdf>.
- [25] Optotune, focus tunable lens, *Application Note: ML-25-50 Lumilens*, Update: 17.08.2011, disponibile su:  
<http://www.optotune.com/images/products/Optotune%20application%20note%20ML-25-50%20Lumilens.pdf>.
- [26] Optotune, focus tunable lens, *Application Note: ML-55-106 for lighting*, Update: 29.12.2011 disponibile su:  
<http://www.optotune.com/images/products/Optotune%20application%20note%20ML-55-106%20Lumilens.pdf>.
- [27] Adaptica, prodotti, specchi deformabili, disponibile su:  
<http://www.adaptica.com/site/en/pages/deformable-mirrors>.
- [28] Edric Mark Ellis, *Low-cost Bimorph Mirrors in Adaptive Optics*, IMPERIAL COLLEGE OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND MEDICINE UNIVERSITY OF LONDON, April 1999.
- [29] Edmund optics: <http://www.edmundoptics.eu>.

*BIBLIOGRAFIA*

---

## Ringraziamenti

È stato un lungo ed appassionante viaggio, ormai giunto alla sua conclusione. In queste ultime righe di tesi volevo ringraziare tutti coloro che mi hanno sostenuto, sopportato e capito in questi ultimi quasi sei anni.

Prima di tutto i miei genitori che mi hanno sempre supportato permettendomi di poter raggiungere questo grande traguardo. Se sono arrivato fino a qui è soprattutto grazie a loro e alla fiducia che hanno sempre riposto in me, incoraggiandomi nei momenti difficili.

Vorrei anche ringraziare il mio relatore Enrico Zanoni per avermi dato questa possibilità di tesi, a Matteo e in particolar modo Stefano per avermi accompagnato e seguito in tutti questi mesi di lavoro passo dopo passo con grande pazienza.

Un grazie lo devo anche agli amici universitari Matteo, Alessandro, Massimo, Michele e Matteo, e ai due vecchi compagni di classe delle superiori Alessandro e Giovanni con cui, nonostante le diverse strade intraprese, si trova sempre il modo di vedersi e uscire.

Ed infine, non posso non ringraziare tutti gli amici con cui ho condiviso tanti momenti ed esperienze che ricordo sempre con molto piacere ed in modo particolare tra questi, il gruppo Educatori di quest'anno: Francesca con la quale ormai da tre anni conduco il gruppo, che bel rapporto abbiamo instaurato e quante ne abbiamo fatte, Massimo il mio braccio destro con cui è un piacere preparare e fare le attività ma soprattutto parlare, ridere e scherzare, Maria Luisa discutere con lei è un'esperienza da provare, Davide senza il quale probabilmente non avrei mai iniziato a suonare, Fabio, mio fratello, che ha intrapreso questa strada, Giulia e le sue famose combinazioni di colori, Semma un artista "pazzo" e Pippo con le sue barzellette. Senza però dimenticare Silvia, Ciwi, Maci, Monica, MariaGloria e Pupo.

**A tutti voi posso solo dire grazie del bellissimo tempo passato insieme!**

