

# **UNITEXT for Physics**

## **Series editors**

Michele Cini, Roma, Italy

Attilio Ferrari, Torino, Italy

Stefano Forte, Milano, Italy

Guido Montagna, Pavia, Italy

Oreste Nicrosini, Pavia, Italy

Luca Peliti, Napoli, Italy

Alberto Rotondi, Pavia, Italy

More information about this series at <http://www.springer.com/series/13351>

Vittorio Degiorgio · Ilaria Cristiani

# Note di fotonica

Seconda Edizione

 Springer

Vittorio Degiorgio  
Dipartimento di Ingegneria Industriale e  
dell'Informazione  
Università di Pavia  
Pavia  
Italy

Ilaria Cristiani  
Dipartimento di Ingegneria Industriale e  
dell'Informazione  
Università di Pavia  
Pavia  
Italy

ISSN 2198-7882

UNITEXT for Physics

ISBN 978-88-470-5786-9

DOI 10.1007/978-88-470-5788-3

ISSN 2198-7890 (electronic)

ISBN 978-88-470-5788-3 (eBook)

© Springer-Verlag Italia Srl. 2012, 2016

Quest'opera è protetta dalla legge sul diritto d'autore e la sua riproduzione è ammessa solo ed esclusivamente nei limiti stabiliti dalla stessa. Le fotocopie per uso personale possono essere effettuate nei limiti del 15 % di ciascun volume dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68. Le riproduzioni per uso non personale e/o oltre il limite del 15 % potranno avvenire solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da AIDRO, Corso di Porta Romana n.108, Milano 20122, e-mail [segreteria@aidro.org](mailto:segreteria@aidro.org) e sito web [www.aidro.org](http://www.aidro.org). Tutti i diritti, in particolare quelli relativi alla traduzione, alla ristampa, all'utilizzo di illustrazioni e tabelle, alla citazione orale, alla trasmissione radiofonica o televisiva, alla registrazione su microfilm o in database, o alla riproduzione in qualsiasi altra forma (stampata o elettronica) rimangono riservati anche nel caso di utilizzo parziale. La violazione delle norme comporta le sanzioni previste dalla legge. L'utilizzo in questa pubblicazione di denominazioni generiche, nomi commerciali, marchi registrati ecc., anche se non specificatamente identificati, non implica che tali denominazioni o marchi non siano protetti dalle relative leggi e regolamenti.

Printed on acid-free paper

This Springer imprint is published by Springer Nature  
The registered company is Springer-Verlag Italia Srl.

---

## Prefazione

Questa seconda edizione contiene diverse aggiunte, modifiche, aggiornamenti, ed anche alcune correzioni di errori. Precisamente, è stata aggiunta al Capitolo 1 una sezione riguardante i laser impulsati, ed al Capitolo 3 una sezione che descrive le guide d'onda ottiche. Inoltre ognuno dei Capitoli 1-6 è stato corredato da un insieme di esercizi. Infine è stata in parte modificata la struttura dei Capitoli 4-6, e sono state incorporate rispettivamente nel Capitolo 1 e nel Capitolo 4 le Appendici B e C.

Pavia, settembre 2015

*Vittorio Degiorgio  
Ilaria Cristiani*

### **Prefazione alla prima edizione**

L'invenzione del laser ha dato luogo ad una vera rivoluzione nella scienza e nella tecnologia. Con le sorgenti di luce disponibili fino al 1960 non si poteva fare molto di più che risolvere problemi di illuminazione e trattare processi di formazione di immagini (lenti, cannocchiali, microscopi). Con l'avvento del laser la descrizione delle proprietà della luce e delle sue interazioni con la materia ha avuto un grande sviluppo, e sono nate applicazioni di impatto eccezionale, quali, ad esempio, le comunicazioni in fibra ottica che sono alla base del funzionamento di Internet e del traffico telefonico su grandi distanze, i dischi ottici (CD, DVD, Blu-ray), la sensoristica ottica di tipo industriale ed ambientale, la lavorazione dei materiali mediante fasci di luce laser, l'illuminazione con i diodi emettitori di luce (LED), e le applicazioni in campo biomedico.

Il termine Fotonica designa l'area scientifica e tecnologica che si occupa della generazione, manipolazione e utilizzo della luce, comprendendo tutti gli aspetti riguardanti la fisica e la tecnologia delle sorgenti laser e delle relative applicazioni, ed estendendo l'interesse anche ai diodi emettitori di luce, ai sensori di immagini, agli schermi e alle celle fotovoltaiche. La rilevanza della Fotonica è tale che le nozioni di base e la conoscenza delle potenzialità applicative di questa disciplina dovrebbero ormai fare parte del bagaglio culturale di diversi settori dell'Ingegneria e della Fisica.

Poiché, dal punto di vista dei processi di assorbimento ed emissione di luce da parte della materia, l'onda elettromagnetica può essere descritta come un flusso di quanti di energia, detti fotoni, è stato coniato per questa disciplina il nome di Fotonica, in assonanza con il nome di Elettronica dato alla disciplina che tratta di flussi di elettroni.

La tematica è molto vasta e fortemente interdisciplinare, perché combina concetti di elettromagnetismo, di meccanica quantistica e di scienza dei materiali, con argomenti riguardanti i circuiti e dispositivi elettronici, la teoria dei segnali, ed i metodi di trasmissione dell'informazione. Una volta individuato l'obiettivo del volume, che nel nostro caso è principalmente quello di fornire un testo per un corso del terzo anno di Ingegneria o Fisica, diventa estremamente importante decidere quali argomenti trattare e che taglio dare alla trattazione.

Poiché la Fotonica è nata con l'invenzione del laser, il testo affronta subito nel Capitolo 1 la descrizione del principio di funzionamento e delle proprietà di questa nuova sorgente, ed accenna ai principali tipi di laser. I due capitoli successivi discutono la propagazione di fasci di luce nel vuoto e in materiali isotropi ed anisotropi, e trattano tutti i componenti ottici più comunemente utilizzati per la manipolazione di fasci di luce. I Capitoli 4-6 toccano aspetti di importanza fondamentale per la comprensione e l'utilizzo delle tecniche fotoniche, quali le tecniche di modulazione di fasci luminosi, i dispositivi a semiconduttore, e le fibre ottiche. Il caso dei dispositivi a semiconduttore è particolarmente interessante perché mostra come si possa generare luce attraverso il passaggio di corrente elettrica (come avviene nel laser) e, reversibilmente, si possa generare una corrente elettrica attraverso l'assorbimento di luce (come avviene nella cella fotovoltaica). Le fibre ottiche offrono non solo la capacità di trasportare con basse perdite segnali ottici a grande distanza, ma anche la possibilità di realizzare amplificatori e laser di grande importanza applicativa. Il Capitolo 7 descrive in modo sintetico, dando soprattutto rilievo agli aspetti metodologici, le applicazioni principali della Fotonica. Tutta la trattazione è svolta con un taglio operativo, fornendo anche quelle valutazioni quantitative dei fenomeni descritti che permettano al lettore di impostare una progettazione dell'esperimento o del dispositivo.

Il livello della trattazione è adatto a studenti che abbiano superato gli esami dei primi due anni di Ingegneria o di Fisica. Per esigenze di completezza sono stati inseriti in alcuni capitoli degli approfondimenti, che possono essere omessi in una prima lettura. Poiché si è cercato di rendere autoconsistente la presentazione di tutti gli argomenti, riteniamo che il volume possa essere utile anche per dottorandi, ricercatori e progettisti che desiderino una introduzione sintetica ma non superficiale ai concetti ed ai metodi della Fotonica.

È importante tener presente che l'invenzione del laser ha avuto conseguenze molto importanti nella ricerca fondamentale, sia rivoluzionando aree di ricerca già esistenti, quali la spettroscopia, la diffusione di luce, l'ottica classica, la teoria della coerenza, sia creando nuovi campi di ricerca, quali la fisica delle sorgenti di luce coerente, l'ottica nonlineare e l'ottica quantistica. Il nostro testo non tocca, se non marginalmente, questi argomenti di carattere più avanzato, ma può essere visto come una necessaria introduzione agli approfondimenti di Fotonica che lo studente

potrebbe affrontare in corsi successivi di carattere più specialistico.

Vorremmo infine ringraziare sentitamente Francesca Bragheri e Roberto Piazza per il prezioso aiuto che ci hanno fornito nella redazione del volume.

Pavia, maggio 2012

*Vittorio Degiorgio*

*Ilaria Cristiani*

---

# Indice

<b>1</b>	<b>Il laser</b> .....	1
1.1	Lo spettro delle onde elettromagnetiche .....	1
1.2	Sorgenti di luce tradizionali .....	3
1.3	Origini del laser .....	5
1.4	Proprietà degli oscillatori .....	7
1.5	Emissione e assorbimento di luce .....	10
1.5.1	Coefficienti di assorbimento e di emissione stimolata .....	14
1.6	Amplificazione ottica .....	15
1.7	Schema e caratteristiche del laser .....	19
1.8	Equazioni di bilancio .....	21
1.9	Tipi di laser .....	24
1.10	Laser impulsati .....	28
1.10.1	Q-switching .....	29
1.10.2	Mode-locking .....	31
1.11	Proprietà della luce laser .....	34
	Esercizi .....	35
<b>2</b>	<b>Onde elettromagnetiche</b> .....	37
2.1	Onde elettromagnetiche nel vuoto .....	37
2.2	Spettro dei segnali ottici .....	39
2.3	Polarizzazione della luce .....	41
2.4	Approssimazione parassiale .....	43
2.4.1	Onda sferica .....	44
2.4.2	Onda sferica gaussiana .....	45
2.5	Diffrazione. Approssimazione di Fresnel .....	49
2.6	Diffrazione di Fraunhofer .....	53
2.6.1	Apertura rettangolare e circolare .....	55
2.6.2	Funzione di trasmissione periodica .....	57
	Esercizi .....	59



<b>3</b>	<b>Componenti e metodi ottici</b> . . . . .	61
3.1	Onde elettromagnetiche nella materia . . . . .	61
3.2	Riflessione e rifrazione . . . . .	64
3.2.1	Interfaccia dielettrica . . . . .	64
3.2.2	Riflessione da una superficie metallica . . . . .	69
3.2.3	Strato dielettrico antiriflettente . . . . .	71
3.2.4	Specchio a strati dielettrici multipli . . . . .	74
3.2.5	Divisore di fascio . . . . .	76
3.2.6	Prisma a riflessione totale . . . . .	77
3.2.7	Onda evanescente . . . . .	78
3.2.8	Lente sottile e specchio sferico . . . . .	80
3.2.9	Focalizzazione dell'onda sferica . . . . .	83
3.2.10	Focalizzazione dell'onda sferica gaussiana . . . . .	84
3.2.11	Matrici ABCD . . . . .	85
3.3	Ottica di Fourier . . . . .	87
3.4	Misure di spettro . . . . .	89
3.4.1	Prisma dispersivo . . . . .	90
3.4.2	Reticolo di trasmissione . . . . .	91
3.4.3	Reticolo di riflessione . . . . .	93
3.4.4	Interferometro di Fabry-Perot . . . . .	95
3.5	Onde in mezzi anisotropi . . . . .	99
3.5.1	Polarizzatori e lamine birfrangenti . . . . .	103
3.5.2	Matrici di Jones . . . . .	105
3.5.3	Potere rotatorio . . . . .	108
3.5.4	Effetto Faraday . . . . .	110
3.5.5	Isolatori ottici . . . . .	111
3.6	Guide d'onda ottiche . . . . .	113
	Esercizi . . . . .	116
<b>4</b>	<b>Modulazione</b> . . . . .	119
4.1	Effetto elettro-ottico lineare . . . . .	119
4.1.1	Modulazione di fase . . . . .	122
4.1.2	Modulazione di ampiezza . . . . .	125
4.2	Effetto elettro-ottico quadratico . . . . .	132
4.2.1	Modulatori a cristalli liquidi . . . . .	133
4.3	Effetto acusto-ottico . . . . .	135
4.3.1	Modulazione acusto-ottica . . . . .	138
4.3.2	Deflessione acusto-ottica . . . . .	141
	Esercizi . . . . .	142
<b>5</b>	<b>Dispositivi a semiconduttore</b> . . . . .	145
5.1	Proprietà ottiche dei semiconduttori . . . . .	145
5.2	Laser a semiconduttore . . . . .	148
5.2.1	Laser a omogiunzione . . . . .	148
5.2.2	Diodi laser a doppia eterogiunzione . . . . .	150

5.2.3	Proprietà di emissione .....	154
5.3	Amplificatori a semiconduttore .....	158
5.4	Diodi emettitori di luce .....	158
5.4.1	LED .....	159
5.4.2	OLED .....	161
5.5	Rivelatori di luce .....	161
5.5.1	Rivelatori a effetto fotoelettrico .....	162
5.5.2	Rivelatori a semiconduttore .....	164
5.5.3	Sensori di immagini CCD .....	166
5.6	Modulatori ad elettro-assorbimento .....	167
	Esercizi .....	168
<b>6</b>	<b>Fibre ottiche</b> .....	<b>169</b>
6.1	Proprietà delle fibre ottiche .....	169
6.1.1	Apertura numerica .....	170
6.1.2	Proprietà modali .....	171
6.2	Attenuazione .....	174
6.3	Dispersione .....	176
6.3.1	Propagazione dispersiva di impulsi di luce .....	176
6.4	Tipi di fibre .....	180
6.5	Componenti ottici in fibra .....	183
6.6	Amplificatori in fibra ottica .....	185
6.7	Laser in fibra ottica .....	188
	Esercizi .....	190
<b>7</b>	<b>Applicazioni</b> .....	<b>193</b>
7.1	Tecnologie dell'informazione e delle comunicazioni .....	193
7.1.1	Comunicazioni ottiche .....	194
7.1.2	Memorie ottiche .....	196
7.1.3	Circuiti ottici integrati .....	198
7.2	Metrologia e sensoristica ottica .....	199
7.2.1	Misure di distanza e di vibrazione .....	199
7.2.2	Misure di velocità .....	202
7.2.3	Sensori di grandezze fisiche .....	204
7.3	Applicazioni industriali dei laser .....	206
7.4	Applicazioni biomedicali .....	207
7.4.1	Oftalmologia .....	208
7.4.2	Immagini biologiche .....	209
7.5	Schermi a cristalli liquidi .....	210
7.6	Applicazioni dei LED .....	211
7.7	Celle fotovoltaiche .....	212
	<b>Appendice Costanti fondamentali e prefissi delle unità di misura</b> .....	<b>215</b>
	<b>Lecture consigliate</b> .....	<b>217</b>

**Indice analitico** ..... 219