

Giovanni Giusfredi

# Manuale di Ottica

 Springer

# Indice

<b>Introduzione all'Ottica</b>	1
<b>Parte I Elettromagnetismo</b>	
<b>Cenni storici: le prime scoperte sul magnetismo e l'elettricità</b>	5
Gli albori	5
Le leggi dell'elettromagnetismo	9
La scoperta delle onde elettromagnetiche	16
Lecture consigliate	20
<b>1 Richiami di elettromagnetismo</b>	23
Introduzione	23
1.1 I fondamenti	23
1.1.1 Cariche e campi	23
1.1.2 I potenziali scalare e vettore	27
1.1.3 Formulazione relativistica dei campi e trasformazioni di Lorentz	29
1.2 Equazioni di Maxwell in mezzi macroscopici	33
1.2.1 Sviluppo delle equazioni	33
1.2.2 Proprietà dei mezzi	37
1.2.3 Condizioni al contorno su interfacce fra mezzi trasparenti	38
1.3 Rappresentazione complessa dei campi	40
1.3.1 Generalizzazione delle suscettibilità per i mezzi dispersivi	46
1.3.2 Media temporale del prodotto di variabili	49
1.4 Onde elettromagnetiche	50
1.4.1 Equazioni d'onda	50
1.4.2 Onde piane omogenee	51
1.4.3 Onde piane inomogenee	55
1.4.4 Onde sferiche	56
1.5 Flusso di energia e densità di energia e di momento	57
1.5.1 Derivazione e concetti generali	57
1.5.2 Flusso di energia in un mezzo semplice	60
1.5.2.1 Intensità di un'onda monocromatica	60
1.5.2.2 Intensità di un'onda quasi monocromatica	62
1.5.3 Quantità di moto dei fotoni e pressione di radiazione	63
1.6 Polarizzazione	64
1.6.1 Vettori di Jones per un'onda piana	64
1.6.2 Polarizzazione lineare	65
1.6.3 Polarizzazione circolare	66
1.6.4 Polarizzazione ellittica	69

1.6.5	Momento angolare della radiazione	71
1.6.6	Luce naturale	73
1.6.7	Matrice di coerenza e parametri di Stokes	74
1.7	Riflessione e rifrazione su di un'interfaccia piana	78
1.7.1	Leggi di riflessione e rifrazione per mezzi dielettrici omogenei	78
1.7.2	Formule di Fresnel	80
1.7.3	Riflettività e trasmittività	84
1.7.4	Angolo di Brewster	86
1.7.5	Riflessione totale	88
1.7.6	Onda evanescente	92
1.7.7	Applicazioni della riflessione totale	93
1.8	Teoria della dispersione	94
1.8.1	Dispersione ed estinzione in mezzi diluiti	95
1.8.2	Dispersione ed estinzione in mezzi densi	101
1.8.3	Relazione tra le parti reale ed immaginaria della permittività	104
1.8.4	Dispersione nei mezzi conduttori	108
1.8.5	Velocità di fase, di gruppo e di segnale	110
1.9	Ottica dei metalli e dei mezzi assorbenti	116
1.9.1	Riflessione e rifrazione da mezzi assorbenti	121
	Riferimenti bibliografici	126

## Parte II Ottica Geometrica

<b>Cenni storici: da Empedocle a Huygens</b>	129
Gli albori	129
Il periodo arabo	132
Il Medioevo	134
Il Rinascimento	135
La Scienza Nuova	138
La legge di rifrazione e la velocità della luce	144
Il dibattito sulla natura della luce	147
Letture consigliate	157
<b>2 Ottica geometrica</b>	159
Introduzione	159
2.1 Derivazione dell'ottica geometrica per $\lambda \rightarrow 0$	160
2.2 Proprietà di propagazione in ottica geometrica	164
2.2.1 I raggi di luce e la propagazione dell'energia luminosa	164
2.2.2 Propagazione della polarizzazione	166
2.3 Proprietà generali dei raggi	167
2.3.1 Legge di tracciamento dei raggi in mezzi omogenei	167
2.3.2 Curvatura e torsione dei raggi	169

	2.3.2.1	Propagazione in mezzi con simmetria sferica	171
	2.3.2.2	Rifrazione atmosferica	172
	2.3.3	Il cammino ottico	175
	2.3.4	Proprietà collettive dei raggi	175
	2.3.5	Le leggi di rifrazione e riflessione in ottica geometrica	177
	2.3.6	Il teorema di Malus - Dupin	179
	2.3.7	Il principio di Fermat	180
	2.3.8	Fronti d'onda e caustiche in un mezzo omogeneo	184
2.4		Le immagini ottiche	190
	2.4.1	Introduzione	190
	2.4.2	Teoremi generali	192
	2.4.3	Superfici aplanatiche di una sfera rifrattiva	194
	2.4.4	Superfici asferiche	195
2.5		Immagini ideali	198
	2.5.1	L'omografia	198
	2.5.2	Convenzioni sui segni	199
	2.5.3	Omografia non telescopica	200
	2.5.3.1	Piani focali	200
	2.5.3.2	Punti coniugati	201
	2.5.3.3	Piani coniugati	202
	2.5.3.4	Ingrandimento laterale e longitudinale	202
	2.5.3.5	Piani principali	203
	2.5.3.6	Punti cardinali e costruzioni grafiche	204
	2.5.4	Il caso telescopico	205
	2.5.5	Combinazione di due omografie	206
	2.5.6	Considerazioni finali	210
2.6		Ottica parassiale	211
	2.6.1	Dominio di validità	211
	2.6.2	Rifrazione attraverso una superficie sferica	213
	2.6.3	Riflessione da uno specchio sferico	216
	2.6.4	Relazione fra le due distanze focali	217
	2.6.5	Gli ingrandimenti laterale, angolare, longitudinale, e l'invariante ottico di Smith - Helmholtz - Lagrange	218
	2.6.6	La lente	221
	2.6.7	Varietà di lenti semplici	225
	2.6.8	Centro ottico di una lente.	231
	2.6.9	Combinazione di due lenti sottili	232
	2.6.9.1	Telescopi	233
	2.6.9.2	Microscopi	235
2.7		Il metodo delle matrici	237
	2.7.1	Matrici 2x2	237
	2.7.2	Tracciamento generalizzato dei raggi mediante matrici 4x4 in assenza di simmetria assiale	242
	2.7.3	Algoritmo per il calcolo della matrice	244

2.7.4	Curvatura di una superficie quadrica	255
2.7.5	Trasformazione del fronte d'onda	257
2.7.6	Relazioni di simmetria e cammino ottico	261
2.8	Aperture di un sistema ottico	265
2.8.1	Diaframma d'apertura e pupille di ingresso e uscita	265
2.8.2	Apertura relativa, od $f$ -numero, ed apertura numerica	266
2.8.3	Raggi principali	268
2.8.4	Diaframma di campo e finestre di ingresso e di uscita	268
2.8.5	Vignettatura	269
2.9	Aberrazioni	270
2.9.1	Le funzioni di aberrazione per un sistema ottico assiale	272
2.9.2	Il teorema dei coseni, la condizione dei seni di Abbe e la condizione di Herschel	278
2.9.3	L'aberrazione sferica	281
2.9.4	Il coma	285
2.9.5	Astigmatismo e curvatura di campo	287
2.9.6	Distorsione	291
2.9.7	Aberrazioni di una lente sottile	292
2.9.8	Aberrazioni cromatiche	294
2.10	Specchi piani e prismi	298
2.10.1	Specchi piani	299
2.10.2	Prismi riflettenti	301
2.10.3	Prismi dispersivi	304
	Riferimenti bibliografici	309

### Parte III Ottica Fisica

<b>Cenni storici: Da Newton a Fresnel</b>	313
L'Ottica di Newton	313
I progressi del '700	320
La teoria dell'emissione e la velocità della luce	321
Young ed il principio di interferenza	324
Fresnel	332
L'etere e l'aberrazione stellare	334
La diffrazione e l'interferenza	335
La Mémoire couronné	342
Gli studi sulla polarizzazione	345
La trasversalità delle onde	346
La riflessione	350
La propagazione nei mezzi anisotropi	352
Epilogo	357
Lecture consigliate	358

<b>3. Interferenza</b>	361
Introduzione	361
3.1 Generalità sull'interferenza	362
3.1.1 Il principio di sovrapposizione lineare	362
3.1.2 Interferenza fra onde piane monocromatiche	363
3.1.3 Interferenza prodotta da due sorgenti puntiformi	365
3.2 Interferenza a due onde	369
3.2.1 Classificazione dei metodi di interferenza	369
3.2.2 Interferenza per divisione del fronte d'onda	370
3.2.2.1 Esperimento di Young	370
3.2.2.2 Doppio specchio e biprisma di Fresnel	371
3.2.2.3 Specchio di Lloyd	373
3.2.3 Tautocronismo dei sistemi ottici	373
3.2.4 Importanza delle dimensioni delle sorgenti luminose	374
3.2.5 Interferenza per divisione di ampiezza	380
3.2.5.1 Lamina a facce parallele	380
3.2.5.2 Frange di uguale inclinazione con una lamina a facce parallele	382
3.2.5.3 Frange di Hooke o di uguale spessore	386
3.2.6 Localizzazione delle frange di interferenza	391
3.2.7 Interferometri	396
3.2.7.1 Interferometro di Michelson	396
3.2.7.2 Interferometro di Twyman-Green	398
3.2.7.3 Interferometro di Fizeau	399
3.2.7.4 Interferometri di Jamin e di Mach-Zehnder	402
3.2.7.5 Interferometri a cammino comune	405
3.2.7.6 Interferometri a traslazione laterale ( <i>shearing interferometers</i> )	407
3.2.7.7 Interferometria stellare	411
3.3 Interferenza ad onde multiple	412
3.3.1 Interferometri Fabry-Perot: introduzione	412
3.3.2 Funzione di trasmissione (funzione di Airy) di un Fabry-Perot a specchi piani e paralleli	414
3.3.2.1 Interferenza a più onde piane	414
3.3.2.2 Autoconsistenza del campo con le condizioni al contorno	415
3.3.2.3 Intensità dell'onda trasmessa	417
3.3.2.4 Intensità dell'onda riflessa	419
3.3.2.5 Finezza	420
3.3.2.6 Cammino ottico e sfasamento fra due successive riflessioni	421
3.3.3 Applicazioni degli interferometri Fabry-Perot	422
3.3.3.1 Il sistema di frange in trasmissione	422

3.3.3.2	Intervallo spettrale libero e sovrapposizione di ordini	424
3.3.3.3	Potere risolutivo di un Fabry-Perot	427
3.3.3.4	Registrazione degli spettri	430
3.3.3.5	Limitazioni alla finezza di un Fabry-Perot	431
3.4	Film dielettrici a strati multipli	434
3.4.1	Riflessione e trasmissione	434
3.4.2	Propagazione in strutture periodiche	441
3.4.3	Reciprocità ed inversione temporale: le relazioni di Stokes	443
3.4.4	Applicazioni	446
3.4.4.1	Trattamenti antiriflesso	448
3.4.4.2	Specchi dielettrici	449
3.4.4.3	Filtri interferenziali	452
3.4.4.4	Cubo polarizzatore	453
3.4.5	Dispersione di fase e filtraggio di ampiezza su di un'onda non monocromatica	454
3.4.6	<i>Chirped mirrors</i>	456
	Riferimenti bibliografici	457
<b>4</b>	<b>Diffrazione</b>	459
	Introduzione	459
4.1	Teoria scalare della diffrazione	461
4.1.1	Premesse generali	461
4.1.2	La formulazione di Kirchhoff della diffrazione	463
4.1.3	La formulazione di Rayleigh - Sommerfeld	466
4.1.4	Diffrazione da schermi piani: confronto fra le teorie di Kirchhoff e Rayleigh - Sommerfeld	468
4.1.5	Il principio di Huygens - Fresnel	470
4.1.6	Il principio di Babinet	471
4.1.7	Diffrazione da uno schermo nero: teoria di Kottler	472
4.1.8	Cenno ai metodi di calcolo degli integrali di diffrazione	474
4.1.9	Diffrazione con radiazione quasi-monocromatica	477
4.2	Diffrazione di Fresnel e Fraunhofer	479
4.2.1	Evoluzione delle figure di diffrazione con la distanza dalla apertura	479
4.2.2	Approssimazioni iniziali	481
4.2.3	Approssimazione di Fresnel	482
4.2.4	Autoconsistenza della diffrazione di Fresnel	485
4.2.5	Approssimazione di Fraunhofer	486
4.2.6	Approssimazione di Debye	488
4.2.7	Diffrazione attraverso un sistema ottico descritto da una matrice $\mathcal{ABCD}$	490
4.3	Esempi di diffrazione di Fraunhofer	492
4.3.1	Apertura rettangolare	493

4.3.2	Apertura circolare	494
4.3.3	Fenditura singola	498
4.3.4	Fenditura doppia	499
4.4	Esempi di diffrazione di Fresnel	500
4.4.1	Zone di Fresnel	500
4.4.2	Apertura circolare	503
4.4.3	Il paradosso di Poisson	506
4.4.4	Lamina a zone	508
4.4.5	Apertura rettangolare	509
4.4.6	Fenditura e spigolo rettilineo	513
	Riferimenti bibliografici	513

## Parte IV Ottica di Fourier

<b>Cenni storici: da Fourier a Fizeau</b>	517
I Matematici	517
Nuovi vetri e strumenti ottici	518
Le ricerche sulla velocità della luce e sull'etere	521
La fotografia	523
Gli studi sul colore e sulla fisiologia dell'occhio	525
Lecture consigliate	526
<b>5 Ottica di Fourier</b>	529
Introduzione	529
5.1 Preliminari matematici	529
5.1.1 Qualche funzione speciale di uso frequente	529
5.1.2 La trasformata di Fourier	532
5.1.3 La trasformata di Hankel	537
5.1.4 La trasformata di Fourier in coordinate polari	537
5.1.5 Relazione di indeterminazione	540
5.2 Teoremi di campionamento	542
5.2.1 Serie di Fourier	542
5.2.2 Teorema di campionamento in coordinate cartesiane	544
5.2.3 Teorema di campionamento in coordinate polari	547
5.2.4 La trasformata di Fourier discreta	550
5.2.4.1 Funzioni delimitate spazialmente e di banda limitata	555
5.2.4.2 Funzioni periodiche e di banda limitata	555
5.2.5 La Fast Fourier Transform	556
5.3 Applicazioni della trasformata di Fourier alla diffrazione	557
5.3.1 Applicazione della FFT alla diffrazione di Fresnel	559
5.3.2 Spettro angolare del campo su di un'apertura	562
5.3.3 Ricostruzione del campo diffratto	563



5.3.4	Applicazione della FFT ad un campo delimitato spazialmente e di banda limitata	566
5.3.5	Estensione dell'intervallo di applicazione del metodo angolare	567
5.3.6	Effetto Talbot	574
5.4	Analisi dei sistemi ottici mediante la teoria dei sistemi lineari	576
5.4.1	Gradi di libertà dei segnali ottici	579
5.4.2	Comportamento di una lente in approssimazione parassiale	581
5.4.3	Formazione di immagine	583
5.4.4	Come una lente fa la trasformata di Fourier	585
5.4.5	Comportamento in tre dimensioni	586
5.4.6	Formazione di immagini con un generico sistema ottico	587
5.4.7	Immagini con illuminazione incoerente	592
5.4.8	Risoluzione	595
5.4.9	L'Optical Transfer Function	597
5.4.10	Apodizzazione	603
5.5	Coerenza	605
5.5.1	Processi <i>random</i>	606
5.5.2	Spettro di potenza di processi random	608
5.5.3	Teoria della coerenza parziale	610
5.5.3.1	Coerenza temporale	614
5.5.3.2	Coerenza e correlazione spaziale	614
5.5.3.3	Equazioni d'onda per la coerenza mutua	616
5.5.3.4	Teorema di van Cittert - Zernike	617
5.5.4	Interferometro di Hanbury Brown e Twiss	620
5.5.5	Un esperimento classico	621
5.5.6	Propagazione della coerenza in un sistema ottico	622
5.5.7	Coerenza parziale e microscopia	625
5.6	Filtraggio spaziale	629
5.6.1	Filtri binari	632
5.6.2	Filtro <i>schlieren</i>	634
5.6.3	Filtri di intensità e fase	636
5.6.4	Microscopi a contrasto di fase	638
5.6.5	Filtri di VanderLugt	639
5.7	Reticoli di diffrazione	642
5.7.1	Legge di riflessione e rifrazione dei reticoli	643
5.7.2	Efficienza di diffrazione	647
5.7.3	Risoluzione	654
5.7.4	Tipi di reticoli	655
5.7.5	Produzione	657
5.7.6	Strumenti di analisi e sintonia spettrale	658
5.7.7	Reticolo di Ronchi	662
	Riferimenti bibliografici	663

**Parte V Propagazione**

<b>Cenni storici: da Kirchhoff ad Einstein</b>	669
La Relatività	669
La radiazione di corpo nero	671
Il fotone	679
Lecture consigliate	684
<b>6 Propagazione di fasci laser in mezzi lineari</b>	685
Introduzione	685
6.1 L'equazione d'onda parassiale	686
6.2 Propagazione del modo fondamentale	688
6.3 Modi di ordine più alto	692
6.3.1 Modi in coordinate cartesiane	692
6.3.2 Modi in coordinate cilindriche	696
6.3.3 Polarizzazione dei modi	697
6.4 Note pratiche	698
6.4.1 Intensità di un fascio gaussiano $TEM_{00}$	698
6.4.2 Misura del diametro $2w$ di un modo $TEM_{00}$	698
6.5 Trasformazioni indotte dalle lenti e da sistemi ottici assiali	700
6.5.1 Legge ABCD	700
6.5.2 Effetti di una lente sottile	702
6.5.3 Collimazione dei fasci gaussiani	706
6.5.4 Effetti di un diottrio	708
6.5.5 Determinazione della posizione di cintura mediante la legge ABCD	709
6.5.6 Ampiezza e fase di un fascio Gaussiano trasmesso da un sistema ottico con simmetria assiale	710
6.6 Propagazione in sistemi ottici parassiali astigmatici	713
6.6.1 Fasci astigmatici	713
6.6.2 Legge ABCD per la propagazione in un sistema non assiale	717
6.7 Onde di Bessel	723
6.8 Fasci di Bessel-Gauss	727
6.8.1 Fasci di Bessel-Gauss di ordine zero	727
6.8.2 Fasci di Bessel-Gauss generalizzati	730
6.8.3 Propagazione di un fascio di Bessel-Gauss attraverso un sistema ottico assiale	732
6.9 Cavità risonanti	734
6.9.1 Modi risonanti	736
6.9.2 Frequenza dei modi	741
6.9.3 Cavità multipasso	745
6.9.4 Cavità confocali	747
Riferimenti bibliografici	749

<b>7 Propagazione della luce in mezzi anisotropi</b>	751
Introduzione	751
7.1 Cristallografia	752
7.1.1 Reticoli bidimensionali	753
7.1.2 Reticoli in tre dimensioni	753
7.1.3 Operazioni di simmetria "puntuale" in tre dimensioni	756
7.1.4 Sistemi cristallini	757
7.1.5 Classi cristalline	758
7.1.6 Gruppi spaziali	759
7.2 Il tensore dielettrico	762
7.3 Classi cristalline e assi principali	766
7.4 Modi di propagazione per il campo D	768
7.4.1 Equazione d'onda ed autovettori	768
7.4.2 Equazioni di Fresnel	772
7.4.3 Superficie dei vettori d'onda	775
7.4.4 Autovettori	776
7.4.5 Assi ottici	779
7.4.6 Superficie della velocità di fase	782
7.5 Modi di propagazione per il campo E	784
7.5.1 Velocità di gruppo e dell'energia	784
7.5.2 Teorema di inversione	788
7.5.3 Autovettori ed autovalori	789
7.5.4 Superficie della velocità di gruppo	790
7.6 Relazioni fra le superfici della velocità di fase, della velocità di gruppo e dei vettori d'onda	791
7.7 Rifrazione all'interfaccia con un mezzo anisotropo	793
7.7.1 Costruzioni grafiche	795
7.7.2 Metodo analitico	798
7.7.3 Rifrazione con cristalli uniassici	801
7.7.4 Rifrazione conica	804
7.8 Interferenza con lamine birifrangenti	810
7.8.1 Interferenza con un cristallo uniassiale	814
7.8.2 Interferenza con un cristallo biassiale	817
7.9 Bianisotropia	818
7.9.1 Attività ottica	819
7.9.2 Equazioni costitutive	821
7.9.3 Equazioni di Maxwell	827
7.9.4 Simmetrie e reciprocità	829
7.9.4.1 Inversione spaziale	829
7.9.4.2 Inversione temporale	830
7.9.4.3 Reciprocità	831
7.9.5 Effetto Fresnel - Fizeau	832
7.9.6 Effetto Faraday	834
7.9.7 Velocità di fase e potere rotatorio	835

7.9.7.1	Effetto Fresnel - Fizeau	835
7.9.7.2	Attività ottica	836
7.9.7.3	Effetto Faraday	838
7.9.7.4	Potere rotatorio	840
7.9.8	Cristalli otticamente attivi	844
7.9.8.1	Attività ottica del quarzo	847
7.10	Birifrangenza di forma	850
7.11	Dispositivi di manipolazione ed analisi della polarizzazione	852
7.11.1	Calcolo dell'evoluzione di stati puri di polarizzazione mediante i vettori e le matrici di Jones	853
7.11.2	Calcolo della propagazione di radiazione parzialmente polarizzata mediante i parametri di Stokes e le matrici di Mueller	855
7.11.3	Polarizzatori	859
7.11.3.1	Polarizzatori dicroici	860
7.11.3.2	Polarizzatori a riflessione dielettrica	861
7.11.3.3	Polarizzatori a birifrangenza	862
7.11.4	Lamine di ritardo	869
7.11.4.1	Effetto di una lamina di ritardo sulla polarizzazione	874
7.11.4.2	Materiali utilizzati per la realizzazione di lamine di ritardo	878
7.11.4.3	Lamine di ordine multiplo	879
7.11.4.5	Lamine di ordine zero	880
7.11.4.6	Lamine acromatiche	881
7.11.4.7	Compensatori	881
7.11.4.8	Ruotatori a birifrangenza circolare	883
7.11.5	Depolarizzatori	884
7.11.6	Combinazione di lamine birifrangenti ruotate tra loro	886
7.11.7	Filtri spettrali a birifrangenza	888
7.11.7.1	Filtri di Lyot	890
7.11.7.2	Filtri di Lyot in cavità laser	893
7.11.7.3	Filtri di Sole	894
7.11.8	Isolatori ottici	897
	Riferimenti bibliografici	899
<b>Appendice A Convenzioni sull'elettromagnetismo</b>		<b>903</b>
<b>Appendice B Relazioni matematiche</b>		<b>907</b>
B.1	Formule vettoriali	907
B.2	Teoremi sugli integrali	907
B.3	Funzioni di Bessel	908
B.4	Integrali di Fresnel	909
B.5	Error function	910

**Appendice C I padri fondatori dell'Ottica**

911

**Indice degli autori**

915

**Indice analitico**

923