

Tullio Rozzi - Andrea Di Donato

COMPONENTI & CIRCUITI OTTICI



Pitagora Editrice Bologna

Indice

Capitolo 1

| | |
|---------------------------|---|
| Introduzione | 1 |
|---------------------------|---|

| | |
|------------------------------|---|
| 1.1 Guide Dielettriche | 1 |
|------------------------------|---|

| | |
|------------------------------|---|
| 1.2 Dispositivi Ottici | 3 |
|------------------------------|---|

Capitolo 2

| | |
|--|---|
| Principi di Elettromagnetismo | 7 |
|--|---|

| | |
|--------------------------------|---|
| 2.1 Equazioni di Maxwell | 7 |
|--------------------------------|---|

| | |
|---|---|
| 2.2 Equazione d'Onda in un Mezzo Isotropo | 9 |
|---|---|

| | |
|-------------------------------|----|
| 2.3 Teorema di Poynting | 10 |
|-------------------------------|----|

| | |
|--------------------------------------|----|
| 2.4 Propagazione di Onde Piane | 12 |
|--------------------------------------|----|

| | |
|--------------------------|----|
| 2.5 Polarizzazione | 15 |
|--------------------------|----|

Capitolo 3

| | |
|-------------------------------|----|
| Mezzi Anisotropi | 17 |
|-------------------------------|----|

| | |
|------------------------|----|
| 3.1 Introduzione | 17 |
|------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 3.2 Materiali Utilizzati in Ottica | 17 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 3.3 Caratterizzazione di un Mezzo Anisotropo | 19 |
|--|----|

| | |
|---------------------------------|----|
| 3.3.1 Tensore Dielettrico | 20 |
|---------------------------------|----|

| | |
|---|----|
| 3.3.2 Tensore di Impermeabilità Elettrica | 23 |
|---|----|

| | |
|-------------------------------------|----|
| 3.3.3 Ellissoide degli Indici | 24 |
|-------------------------------------|----|

| | |
|---|----|
| 3.3.4 Classificazione dei Cristalli | 27 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 3.4 Propagazione in un Mezzo Anisotropo | 30 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| 3.4.1 Propagazione lungo una direzione arbitraria | 31 |
|---|----|

| | |
|----------------------------------|----|
| 3.4.2 Equazione di Fresnel | 35 |
|----------------------------------|----|

| | |
|--------------------------|----|
| 3.4.3 Modi Normali | 41 |
|--------------------------|----|

| | |
|--------------------------------------|----|
| 3.4.4 Relazione di dispersione | 43 |
|--------------------------------------|----|

| | |
|--|----|
| 3.4.5 Determinazione dei modi normali mediante l'ellissoide degli indici | 46 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 3.5 Propagazione nei Cristalli Uniassici | 48 |
|--|----|

| | |
|--|----|
| 3.6 Propagazione dell' Energia nei Cristalli Uniassici | 52 |
| 3.7 Birifrangenza nei Cristalli Uniassici | 56 |
| 3.7.1 Legge di Snell..... | 57 |

Capitolo 4

| | |
|---|-----------|
| Guide Dielettriche Planari..... | 61 |
| 4.1 Introduzione | 61 |
| 4.2 Barra dielettrica simmetrica | 67 |
| 4.2.1 Modi TE pari | 67 |
| 4.2.2 Modi TE dispari | 73 |
| 4.2.3 Modi TM | 77 |
| 4.3 Risonanza Trasversa | 80 |
| 4.3.1 Osservazioni Sul Circuito Equivalente Trasverso..... | 86 |
| 4.4 Modi Continui in Una Barra Dielettrica Simmetria..... | 88 |
| 4.4.1 Spettro dei Modi Continui | 93 |
| 4.5 Ortogonalità tra Modi | 98 |
| 4.6 Descrizione del Campo Elettromagnetico Generato da una Sorgente | 103 |
| 4.7 Costante Dielettrica Efficace | 106 |
| 4.8 Spettro Completo di una Barra Dielettrica Asimmetrica | 111 |
| 4.9 Modi Guidati in una Barra Dielettrica Asimmetrica..... | 116 |

Capitolo 5

| | |
|--|------------|
| Guide Dielettriche Reali | 121 |
| 5.1 Introduzione | 121 |
| 5.2 Guida a costola..... | 122 |
| 5.2.1 Analisi della guida Rib mediante il metodo EDC | 128 |
| 5.3 Guide Dielettriche Anisotrope | 137 |
| 5.3.1 Modi Guidati Leaky | 137 |
| 5.3.2 Condizione di guidaggio | 139 |

Capitolo 6

| | |
|---------------------------|------------|
| Fibre Ottiche..... | 145 |
|---------------------------|------------|

| | |
|---|-----|
| 6.1 Introduzione | 145 |
| 6.2 Tipologie di fibre ottiche..... | 145 |
| 6.3 Fibre monomodali | 147 |
| 6.3.1 Approssimazione LP | 147 |
| 6.3.2 Soluzione dell'equazione d'onda mediante il metodo variazionale | 150 |
| 6.3.3 Costante di propagazione normalizzata..... | 157 |
| 6.3.4 Distribuzione trasversa della potenza..... | 159 |
| 6.4 Fibre multimodali..... | 162 |
| 6.4.1 Degenerazione modale | 162 |
| 6.4.2 Soluzione dell'equazione d'onda | 166 |
| 6.4.3 Distribuzione trasversa dei campi..... | 170 |
| 6.4.4 Equazione di dispersione..... | 175 |
| 6.4.5 Costante di propagazione e taglio dielettrico | 177 |
| 6.4.6 Distribuzione trasversa della potenza..... | 180 |
| 6.5 Analisi rigorosa..... | 184 |
| 6.6 Fibra ad indice graduale..... | 186 |
| 6.6.1 Equazione d'onda in una guida ad indice graduale..... | 188 |
| 6.6.2 Costante di propagazione del modo fondamentale | 190 |
| 6.6.3 Soluzione in coordinate rettangolari | 194 |
| 6.6.4 Costante di propagazione dei modi di ordine superiore..... | 196 |
| 6.6.5 Soluzione in coordinate cilindriche..... | 197 |
| 6.6.6 Polinomi di Laguerre..... | 198 |
| 6.7 Meccanismi di perdita in fibra | 199 |
| 6.7.1 Perdite per assorbimento | 200 |
| 6.7.2 Perdite per diffrazione (Rayleigh scattering) | 200 |
| 6.7.3 Perdite per assorbimento di radicali liberi..... | 201 |
| 6.7.4 Perdite specifiche delle guide dielettriche..... | 202 |
| 6.8 La dispersione nelle fibre ottiche..... | 205 |
| 6.8.1 Dispersione del materiale | 212 |
| 6.8.2 Dispersione dovuta alla guida d'onda | 213 |
| 6.8.3 Dispersione multimodale..... | 215 |
| 6.9 Angolo di accettazione..... | 217 |
| 6.10 Fibre birifrangenti | 218 |
| 6.10.1 Origine del fenomeno..... | 221 |
| 6.10.2 Birifrangenza generata dalla geometria della guida | 222 |
| 6.10.3 Birifrangenza indotta dalla curvatura della fibra..... | 224 |

Capitolo 7

| | |
|--|-----|
| Teoria dei Modi Accoppiati | 225 |
| 7.1 Introduzione | 225 |
| 7.2 Accoppiamento Tra Guide Dielettriche | 225 |
| 7.3 Teorema Di Lorentz | 228 |
| 7.4 Ortogonalità Tra Modi | 234 |
| 7.5 Equazioni dei Modi Accoppiati | 238 |
| 7.5.1 Guide Accoppiate | 242 |
| 7.6 Accoppiatore Direzionale | 248 |
| 7.6.1 Andamento delle Potenze | 250 |
| 7.6.2 Calcolo del Coefficiente di Accoppiamento | 254 |
| 7.7 Reticoli Ottici | 257 |
| 7.8 Filtri a Rilezione di Banda | 261 |
| 7.8.1 Analisi mediante la teoria dei modi accoppiati | 262 |
| 7.9 Accoppiamento tra un Modo Guidato ed un'Onda Piana | 276 |
| 7.9.1 Accoppiamento mediante prisma | 277 |
| 7.9.2 Accoppiamento mediante reticolo | 282 |
| 7.10 Accoppiamento tra Guide mediante Reticoli | 285 |
| 7.11 Accoppiamento tra Onde Piane mediante Reticoli | 286 |

Capitolo 8

| | |
|--|-----|
| Effetto Elettro-Ottico | 289 |
| 8.1 Introduzione | 289 |
| 8.2 Effetto Elettro-Ottico | 289 |
| 8.3 Effetto Elettro-Ottico nei Mezzi Anisotropi | 293 |
| 8.4 Tensore di Impermeabilità Elettrica in presenza di un Effetto Elettro-Ottico Lineare | 297 |
| 8.5 Ellissoide degli Indici | 299 |
| 8.6 Modi Normali in presenza di un Effetto Elettro-Ottico Lineare | 301 |
| 8.7 Calcolo Analitico dei Modi Normali in un Cristallo Uniassico | 302 |

Capitolo 9**Modulatori Ottici 309**

| | |
|--|-----|
| 9.1 Introduzione | 309 |
| 9.2 Modulatori di Fase | 310 |
| 9.3 Modulatori di Fase Longitudinali | 313 |
| 9.4 Modulatori di Fase Trasversali | 319 |
| 9.5 Modulatori di Ampiezza | 323 |
| 9.6 Limiti della Modulazione..... | 327 |
| 9.6.1 Effetti capacitivi | 327 |
| 9.7 Modulazione ad Alta Frequenza | 329 |
| 9.7.1 Tempo di transito | 333 |
| 9.8 Modulatori di Fase ad Onda Viaggiante | 335 |
| 9.9 Modulatori Indipendenti dalla Polarizzazione | 337 |
| 9.10 Modulatore ad Elettro-Assorbimento..... | 339 |
| 9.11 Modulatore Bi-canale..... | 341 |
| 9.12 Modulatore ad Effetto Bragg | 345 |
| 9.13 Commutatore Monocanale..... | 351 |

Capitolo 10**Laser a Semiconduttore..... 355**

| | |
|--|-----|
| 10.1 Introduzione | 355 |
| 10.2 Principi di Meccanica Quantistica | 356 |
| 10.2.1 Equazione di Schrodinger | 357 |
| 10.2.2 Principio di indeterminazione | 360 |
| 10.2.3 Energia di un sistema di particelle | 361 |
| 10.2.4 Livelli energetici in un cristallo di semiconduttore..... | 363 |
| 10.2.5 Densità degli stati | 367 |
| 10.2.6 Probabilità di occupazione | 369 |
| 10.2.7 Transizione tra banda di conduzione e di valenza..... | 371 |
| 10.2.8 Rata di transizione..... | 373 |
| 10.2.9 Rata netta di emissione stimolata | 376 |
| 10.2.10 Emissività totale | 379 |
| 10.2.11 Tempo di riassetto elettronico..... | 383 |
| 10.2.12 Guadagno ottico | 384 |
| 10.3 Fenomeno di Emissione Stimolata..... | 385 |

| | |
|--|------------|
| 10.3.1 La giunzione p-n..... | 385 |
| 10.3.2 La doppia eterogiunzione..... | 387 |
| 10.3.3 Geometria interna di una cavità laser..... | 389 |
| 10.3.4 Confinamento elettromagnetico..... | 391 |
| 10.4 Guadagno di Soglia..... | 393 |
| 10.5 Equazioni di Rata..... | 396 |
| 10.5.1 Soluzione in regime stazionario..... | 400 |
| 10.5.2 Curva caratteristica di emissione..... | 403 |
| 10.5.3 Efficienza di emissione..... | 404 |
| 10.5.4 Termine di generazione spontanea..... | 407 |
| 10.6 Selezione della Frequenza di Emissione..... | 408 |
| 10.7 Selezione della Polarizzazione di Emissione..... | 413 |
| 10.8 Diodi ad Emissione Luminosa (LED)..... | 417 |
| 10.9 Amplificatori Ottici..... | 419 |
| 10.10 Modello con Diffusione di Carica..... | 422 |
| 10.10.1 Modello a due regioni..... | 422 |
| 10.11 Coefficiente di Riflessione e Diagramma di Radiazione..... | 430 |
| 10.12 Diagramma di Radiazione..... | 434 |
| 10.13 Il Laser come Risonatore..... | 435 |
| 10.14 Variazione della Frequenza di Emissione..... | 440 |
| 10.15 Confinamento Ottico mediante Indice di Rifrazione Complesso..... | 444 |
| 10.16 Modulazione delle Sorgenti Laser..... | 451 |
| 10.17 Risposta ad un Gradino di Corrente..... | 456 |
| 10.18 Stabilità di una Sorgente Laser..... | 457 |
| 10.19 Modello di un Laser con Guadagno Non Uniforme..... | 462 |
| 10.20 Modello Autoconsistente di un Laser..... | 467 |
| 10.21 Laser con guida a Costola..... | 473 |
| 10.22 Fronti d'Onda Concavi e Convessi..... | 475 |
| 10.23 Coerenza di una Sorgente Laser..... | 478 |
| Bibliografia..... | 489 |
| Indice Analitico..... | 491 |