

Jacques
Bures



Optique guidée

Fibres optiques et composants passifs tout-fibre

Table des matières

Avant-propos.....	III
Symboles, opérateurs et systèmes de coordonnées.....	XI

Chapitre 1 Équations d'onde vectorielles

1.1 Équations de Maxwell pour les milieux diélectriques.....	1
1.2 Équations d'onde vectorielles inhomogènes.....	2
1.3 Équations d'onde vectorielles homogènes.....	4
1.4 Guides d'onde invariants en translation et modes de propagation.....	4
1.4.1 Composantes polaires cylindriques.....	5
1.4.2 Composantes cartésiennes.....	9
1.5 Modes <i>TE</i> et <i>TM</i>	12
1.5.1 Cas des guides d'onde plans invariants en y et z	13
1.5.2 Cas d'une distribution d'indice $n(r)$ à symétrie circulaire.....	15
1.5.3 Conclusion sur les modes <i>TE</i> et <i>TM</i>	16
1.6 Nature des solutions des équations d'onde vectorielles.....	16
1.7 Conclusion.....	19

Chapitre 2 Propriétés fondamentales des modes vectoriels

2.1 Théorèmes de réciprocité.....	21
2.2 Constante de propagation, vitesse de phase et conventions d'écriture.....	23
2.3 Orthonormalité des modes guidés.....	26
2.4 Énergie électromagnétique emmagasinée.....	28
2.5 Vecteur de Poynting et densité de puissance.....	29
2.6 Vitesse de groupe.....	30
2.6.1 Temps de parcours de groupe.....	32
2.6.2 Dispersion et élargissement des impulsions.....	32
2.7 Décomposition des champs sur la base des modes guidés.....	33
2.8 Profil d'indice et indice effectif.....	34
2.9 Fraction de puissance modale dans le cœur.....	36
2.10 Conclusion.....	36

Chapitre 3 Solutions vectorielles exactes pour les guides d'onde

3.1 Guides plans à une dimension.....	38
3.1.1 Guide plan symétrique à saut d'indice.....	38
3.1.2 Guide d'onde plan dissymétrique à saut d'indice.....	53
3.1.3 Guide d'onde plan symétrique multicouches à saut d'indice.....	58
3.2 Solutions exactes pour les fibres optiques à deux couches.....	65
3.2.1 Choix des solutions pour e_z et h_z	66
3.2.2 Équation aux valeurs propres.....	68
3.2.3 Modes <i>TE</i> et <i>TM</i> ($\nu = 0$).....	69

3.2.4	Modes hybrides HE et EH ($\nu \neq 0$)	71
3.2.5	Limites asymptotiques des équations aux valeurs propres des modes TE et TM	71
3.2.6	Limites asymptotiques des équations aux valeurs propres des modes HE et EH	72
3.2.7	Solutions numériques $U(V)$	76
3.2.8	Expressions analytiques des champs.....	77
3.2.9	Constantes de normalisation	83
3.2.10	Fraction de puissance véhiculée dans le cœur.....	85
3.2.11	Vitesse de groupe	92
3.2.12	Polarisation des champs électrique et magnétique transverses	92
3.2.13	Densité modale de puissance des modes hybrides	97
3.2.14	Distribution radiale des composantes des modes hybrides	100
3.3	Solutions exactes pour les fibres optiques multicouches à saut d'indice	102
3.3.1	Méthode matricielle	105
3.3.2	Méthode de proche en proche	106
3.3.3	Cas des modes TE et TM	108
3.3.4	Exemple de calcul pour la fibre SMF28 TM	108
3.3.5	Courbes des indices effectifs.....	110
3.3.6	Vitesse de groupe et dispersion intramodale pour HE_{11} et EH_{11} de la fibre SMF28 TM	111
3.3.7	Mode fondamental des fibres multicouches à saut d'indice.....	113
3.4	Solutions exactes pour les fibres optiques à gradient d'indice.....	116
3.5	Conclusion.....	117

Chapitre 4 Théorie des modes scalaires

4.1	Équation d'onde scalaire	122
4.2	Fibres à deux couches à saut d'indice	124
4.2.1	Équation aux valeurs propres	125
4.2.2	Valeurs limites de $U(V)$	126
4.2.3	Nomenclature des modes	128
4.2.4	Polarisation des modes LP	129
4.2.5	Graphique universel $U(V)$	130
4.2.6	Graphique $n_{\text{eff}}(V)$	131
4.2.7	Normalisation des modes	131
4.2.8	Exemples de calcul de profils radiaux $\Psi(r)$	133
4.2.9	Fraction de puissance véhiculée dans le cœur.....	135
4.2.10	Vitesse de groupe	137
4.3	Fibres multicouches à saut d'indice	139
4.3.1	Équation aux valeurs propres	139
4.3.2	Exemples de calculs numériques.....	141
4.3.3	Normalisation des modes	144
4.3.4	Vitesse de groupe	144
4.3.5	Fraction de puissance véhiculée dans le cœur.....	145
4.4	Fibres à gradient d'indice.....	145

4.4.1	Résolution de l'équation d'onde scalaire	146
4.4.2	Autres calculs	147
4.4.3	Exemple de calcul numérique	147
4.5	Conclusion.....	149

Chapitre 5 Dégénérescence des modes vectoriels et corrections de polarisation

5.1	Dégénérescence des modes vectoriels en guidage faible (fibre à deux couches)	152
5.1.1	Formes dégénérées de l'équation aux valeurs propres	152
5.1.2	Formes dégénérées des composantes des champs.....	153
5.1.3	Dégénérescence des polarisations	156
5.1.4	Combinaisons des modes dégénérés en modes <i>LP</i>	159
5.1.5	Généralisation aux fibres multicouches et à gradient d'indice.....	163
5.2	Corrections de polarisation pour les fibres à deux couches	163
5.2.1	Formule générale.....	164
5.2.2	Approximation des champs voisins.....	165
5.2.3	Fibres à symétrie circulaire	165
5.3	Corrections de polarisation pour les autres fibres à symétrie circulaire.....	171
5.3.1	Exemple 1 : la fibre à saut d'indice à <i>N</i> couches.....	172
5.3.2	Exemple 2 : la fibre à profil d'indice continu	172
5.3.3	Exemple 3 : la fibre à profil d'indice composé	173
5.4	Conclusion.....	173

Chapitre 6 Couplage de modes et réseaux de Bragg

6.1	Équations générales de couplage de modes	176
6.1.1	Équation de couplage pour un mode progressif <i>j</i>	176
6.1.2	Équation de couplage pour un mode régressif <i>-j</i>	178
6.1.3	Équations générales de couplage.....	179
6.1.4	Conservation de l'énergie	180
6.1.5	Couplage de deux modes en présence d'une perturbation périodique et réseaux de Bragg	181
6.2	Couplage de deux modes codirectionnels	182
6.2.1	Résolution des équations couplées	183
6.2.2	Réponse en fréquence des réseaux de Bragg opérant en transmission.....	185
6.3	Couplage de deux modes contradirectionnels	188
6.3.1	Résolution des équations couplées.....	188
6.3.2	Réponse en fréquence des réflecteurs de Bragg.....	193
6.4	Réalisation expérimentale des réseaux de Bragg	197
6.4.1	Réseau réflecteur de Bragg obtenu par onde stationnaire	197
6.4.2	Réseau réflecteur de Bragg obtenu par masque de phase	204
6.4.3	Réseau de Bragg à long pas obtenu par décharge électrique	209
6.4.4	Réseau de Bragg à long pas obtenu par laser CO ₂	211
6.5	Conclusion.....	213

Chapitre 7 Fibres effilées

7.1	Modes locaux	218
7.1.1	Modes normaux d'un guide local uniforme	218
7.1.2	Modes locaux de la fibre effilée	219
7.1.3	Orthonormalité des modes locaux	219
7.1.4	Décomposition sur la base des modes locaux	220
7.2	Équations de couplage des modes locaux	221
7.2.1	Équations de couplage et première forme des coefficients	221
7.2.2	Symétrie des C_{jm}	223
7.2.3	Deuxième forme des coefficients de couplage	223
7.2.4	Autre écriture des équations de couplage	225
7.3	Cas des guides à N sauts d'indice et à symétrie circulaire	227
7.3.1	Modes vectoriels	227
7.3.2	Mode scalaires en guidage faible	228
7.4	Comportement modal des fibres effilées	229
7.4.1	Zones caractéristiques du guide	230
7.4.2	Interférométrie modale	231
7.5	Étude expérimentale d'une fibre effilée	233
7.5.1	Puissance transmise pendant l'étirage	233
7.5.2	Réponse en longueur d'onde	234
7.5.3	Réponse en fonction de l'indice extérieur	235
7.6	Applications technologiques des fibres effilées	236
7.6.1	Capteur de température	236
7.6.2	Capteur de déplacement et de courbure	237
7.6.3	Filtre spectral passe (λ_p)/stoppe (λ_s)	237
7.6.4	Filtre spectral passe bande	241
7.6.5	Concentrateur de puissance	243
7.6.6	Fibres effilées à pentes très abruptes ou très faibles : adiabaticité ..	250
7.7	Conclusion	252

Chapitre 8 Épaisures entre fibres

8.1	Transmission et réflexion à l'épissure	255
8.1.1	Calcul des amplitudes des modes réfléchis et transmis	256
8.1.2	Calcul des intégrales de recouvrement I_{jk}	258
8.1.3	Exemple de calcul numérique	259
8.2	Interféromètre modal en réflexion	260
8.3	Interféromètre bimodal en transmission	263
8.4	Réflexion et transmission à l'entrée d'une fibre	265
8.5	Conclusion	270

Chapitre 9 Coupleurs 2×2

9.1	Couplage par recouvrement des champs d'une fibre sur l'autre	277
9.1.1	Équations et coefficients de couplage	279
9.1.2	Fibres unimodales et coupleur adiabatique	281
9.1.3	Interprétation de la quantité $n^2(x, y, z) - \bar{n}^2(x, y, z)$	282

9.1.4	Expression de $C_{1,1}^{12}$ pour deux fibres identiques à saut d'indice n_c et n_g	283
9.1.5	Expression de $C_{1,1}^{11}$, correction de $\bar{\beta}_{01}$ du mode LP_{01} de la fibre 1	285
9.1.6	Calcul numérique de $C_{1,1}^{12}$ et de $C_{1,1}^{11}$	286
9.1.7	Résolution des équations couplées pour le coupleur adiabatique à fibres identiques	287
9.1.8	Matrice de transfert	288
9.1.9	Coupleur avec $b_1^{(2)}(0) = 0$ et $b_1^{(1)}(0) = 1$	289
9.1.10	Exemples de calculs numériques et de modélisation d'un coupleur	289
9.1.11	Expression du coefficient de couplage $C_{j,k}^{12}$ pour deux fibres différentes.....	293
9.1.12	Couplages autres que codirectionnel ou en désaccord de phase	296
9.2	Couplage par battements entre les supermodes	296
9.2.1	Illustration des premiers supermodes d'un coupleur 2×2 à fibres identiques	297
9.2.2	Couplage par battements entre les deux premiers supermodes.....	300
9.2.3	Calcul des supermodes.....	301
9.2.4	Modélisation de la structure partiellement fusionnée.....	303
9.2.5	Recherche des valeurs propres	305
9.3	Comparaison numérique des deux méthodes	307
9.4	Résultats expérimentaux	309
9.4.1	Présentation et analyse des résultats.....	309
9.4.2	Modélisation des effets de la polarisation	313
9.5	Coupleurs spéciaux	314
9.5.1	Coupleurs diviseurs de puissance indépendants de la longueur d'onde.....	314
9.5.2	Coupleurs à réponse abrupte	317
9.5.3	Coupleurs à réponse élargie	319
9.5.4	Coupleurs en boucle	320
9.5.5	Coupleurs séparateurs de modes	325
9.6	Conclusion.....	327
Problèmes et solutions		331
Annexe A	Fonctions de Bessel et modifiées de Bessel d'ordre entier	363
Annexe B	Démonstration de l'identité utilisée pour établir la formule de la vitesse de groupe.....	373
Annexe C	Méthode pour discerner les modes vectoriels HE et EH d'une fibre multicouche.....	377
Annexe D	Définitions des indices de réfraction	385
Index		389