

Pierre Lecoy

Communications sur fibres optiques

4^e édition

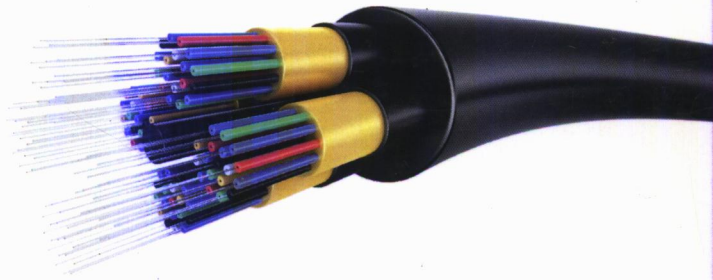


Table des matières

Préface	V
Introduction	1
1. Historique	1
2. Avantages des fibres optiques	2
3. Domaines d'utilisation	3
4. Éléments d'un système de communications par fibre optique	4
5. Réseaux sur fibres optiques	5
6. Liaisons infrarouges sans fibre	6

Chapitre 1 Fibres optiques multimodes

1. Bases d'optique	9
1.1. Introduction	9
1.2. Propagation des ondes planes harmoniques	9
1.3. Rayons lumineux	11
1.4. Dioptré diélectrique	12
1.5. Réflexion d'une onde plane sur un dioptré	13
1.6. Réflexion totale	15
2. Guide d'ondes diélectrique	16
2.1. Modèle du guide d'ondes diélectrique plan	16

2.2. Notion de modes de propagation.....	17
2.3. Cas du guide dissymétrique.....	18
2.4. Notion de dispersion	19
3. Fibres optiques multimodes	20
3.1. Définition	20
3.2. Fibres optiques multimodes à saut d'indice	21
3.3. Fibres optiques multimodes à gradient d'indice.....	22
4. Propagation dans les fibres optiques multimodes	23
4.1. Trajectoire des rayons.....	23
4.2. Résolution de l'équation de propagation.....	24
4.3. Différents types de rayons.....	25
4.4. Modes de propagation.....	26
5. Dispersion dans les fibres optiques multimodes	27
5.1. Dispersion intermodale.....	27
5.2. Calcul de l'élargissement d'impulsion.....	27
5.3. Dispersion chromatique	29
5.4. Réponse impulsionnelle des fibres multimodes.....	30
5.5. Bande passante des fibres multimodes.....	31
5.6. Couplage de modes	32

Chapitre 2

Fibres optiques monomodes

6. Calcul des champs dans une fibre optique	35
6.1. Équations électromagnétiques	35

6.2. Solution pour une fibre optique à saut d'indice	36
6.3. Méthode de calcul des modes	37
6.4. Nature des modes	38
6.5. Fréquences de coupure	39
6.6. Allure des modes	40
7. Caractéristiques des fibres monomodes	42
7.1. Condition de propagation monomode	42
7.2. Modèle gaussien de la fibre monomode	43
7.3. Paramètres des fibres monomodes	44
8. Dispersion chromatique dans les fibres monomodes	45
8.1. Calcul de la dispersion chromatique	45
8.2. Annulation de la dispersion chromatique	46
8.3. Fibres à gaine interne déprimée	47
8.4. Différents types de fibres monomodes	48
8.5. Compensation de la dispersion chromatique	49
9. Effets de polarisation dans les fibres monomodes	50
9.1. Biréfringence des fibres optiques	50
9.2. Biréfringence induite	51
9.3. Dispersion de polarisation	52
10. Effets non linéaires dans les fibres optiques	53
10.1. Introduction	53
10.2. Diffusion Raman	53
10.3. Diffusion Brillouin	55
10.4. Effet Kerr	56
10.5. Propagation de solitons	57

11. Fibres optiques microstructurées, dites « photoniques »	58
11.1. Introduction	58
11.2. Bande interdite photonique	60
11.3. Guides d'ondes photoniques	61
11.4. Fibres à cristal photonique	62
11.5. Fibres creuses	63

Chapitre 3

Technologie et mise en œuvre des fibres optiques

1. Matériaux et atténuation des fibres optiques	65
1.1. Différents types de fibres optiques	65
1.2. Atténuation intrinsèque des fibres optiques	66
1.3. Fibres plastiques	68
1.4. Autres matériaux	69
1.5. Fenêtres de transmission	69
2. Fabrication des fibres optiques	71
2.1. Principes	71
2.2. Fabrication des préformes pour fibres de silice	72
2.3. Fibrage (<i>drawing</i>)	73
2.4. Résistance mécanique	74
3. Câbles à fibres optiques et raccordements	74
3.1. Principe des câbles à fibres optiques	74
3.2. Différents types de câbles	75
3.3. Câbles aériens et sous-marins	77
3.4. Raccordement des fibres optiques	78

3.5. Connecteurs optiques	79
4. Pertes extrinsèques des fibres optiques	81
4.1. Pertes par courbures	81
4.2. Pertes aux raccordements	82
4.3. Optimisation des fibres optiques	84
5. Mesures sur les fibres optiques	85
5.1. Classification	85
5.2. Mesure d'atténuation spectrale	86
5.3. Mesure de réflectométrie	87
5.4. Interprétation de la courbe de réflectométrie	88
5.5. Mesures de dispersion	90

Chapitre 4

Optique intégrée

1. Principes	91
1.1. Introduction : classification des composants	91
1.2. Technologies utilisées	92
1.3. Guides plans en optique intégrée	92
1.4. Guidage latéral	93
1.5. Pertes dans les guides	94
2. Le couplage de modes et ses applications	95
2.1. Formalisation	95
2.2. Couplage à l'intérieur d'un même guide	96
2.3. Couplage entre guides	97

3. Réseaux de diffraction	99
3.1. Principe	99
3.2. Fonctionnement	99
3.3. Application au couplage de la lumière dans un guide	100
3.4. Réseaux de Bragg	102
3.5. Réseaux de Bragg photo-inscrits dans les fibres optiques	103

Chapitre 5

Composants optiques

1. Composants optiques passifs non sélectifs	105
1.1. Définitions	105
1.2. Coupleurs optiques	106
1.3. Isolateurs et circulateurs	107
1.4. Atténuateurs optiques	108
2. Multiplexeurs en longueur d'onde	109
2.1. Différents types de multiplexage en longueur d'onde	109
2.2. Multiplexeurs à filtres	109
2.3. Multiplexeurs à coupleurs	110
2.4. Multiplexage dense en longueur d'onde	111
2.5. Multiplexage d'insertion-extraction	112
3. Composants optiques actifs	114
3.1. Principes	114
3.2. Effet électro-optique	114
3.3. Coupleur électro-optique directif	115
3.4. Modulateur de Mach-Zehnder	116

3.5. Modulateur à électro-absorption.....	118
4. Commutateurs optiques	119
4.1. Fonctions	119
4.2. Technologies de commutateurs.....	120
4.3. Exemple de matrices de commutation micromécaniques.....	120
4.4. Multiplexeurs d'insertion-extraction reconfigurables (ROADM).....	122

Chapitre 6

Émetteurs optoélectroniques

1. Principes des composants optoélectroniques	125
1.1. Principe de l'électroluminescence	125
1.2. Matériaux électroluminescents.....	127
1.3. Principe de la photodétection	128
1.4. Utilisation d'hétérojonctions	130
1.5. Structures à puits quantiques	131
1.6. Principes de l'amplification optique.....	133
2. Diodes électroluminescentes (DEL)	134
2.1. Structure	134
2.2. Principales caractéristiques des diodes électroluminescentes	135
2.3. Émetteurs à diodes électroluminescentes.....	136
2.4. Autres types de diodes électroluminescentes.....	136
3. Diodes laser	137
3.1. Principe	137
3.2. Diodes laser à structure Fabry Pérot	138
3.3. Diodes laser DFB.....	139

3.4. Diodes laser à cavité verticale (VCSEL).....	140
3.5. Diodes laser accordables en longueur d'onde	142
4. Interface optique d'émission	143
4.1. Description.....	143
4.2. Modulation interne des diodes laser	144
4.3. Modulation externe des diodes laser	145
4.4. Bruit des émetteurs	146
4.5. Module d'émission à diode laser.....	147
5. Comparaison des émetteurs optoélectroniques	148

Chapitre 7

Récepteurs optoélectroniques

1. Photodétecteurs	151
1.1. Photodiode PIN.....	151
1.2. Caractéristiques de la photodiode.....	152
1.3. Photodiode à avalanche	153
1.4. Matériaux utilisés en photodétection.....	154
1.5. Phototransistor	156
2. Interface optique de réception	157
2.1. Structure	157
2.2. Bruit des photodiodes.....	158
2.3. Modélisation du récepteur optique.....	159
2.4. Calcul du courant de bruit.....	160
2.5. Calcul du rapport signal à bruit	160
2.6. Optimisation du rapport signal à bruit	161

3. Autres schémas de photodétection	162
3.1. Détection hétérodyne	162
3.2. Détection équilibrée	164

Chapitre 8

Amplification optique

1. Amplification optique dans les verres dopés	167
1.1. Introduction	167
1.2. Principe de l'amplification optique dans les verres dopés à l'erbium	168
1.3. Gain de l'amplification optique	169
1.4. Puissance du signal amplifié	170
1.5. Bruit de l'amplification optique	171
2. Amplificateurs à fibres dopées erbium	172
2.1. Description	172
2.2. Caractéristiques	173
2.3. Paramètres de gain d'un amplificateur optique	174
2.4. Facteur de bruit	175
3. Calcul du bruit sur les liaisons amplifiées	176
3.1. Bruit en réception en présence d'un amplificateur optique	176
3.2. Cas d'un récepteur à préamplificateur optique	176
3.3. Calcul du bruit sur les liaisons longues	177
4. Autres types d'amplificateurs optiques	178
4.1. Amplificateurs optiques à semi-conducteurs (SCOA)	178
4.2. Autres applications des SCOA	179

4.3. Comparaison des amplificateurs optiques	180
4.4. Amplification Raman.....	181

Chapitre 9

Systèmes de transmission sur fibres optiques

1. Structure d'une liaison numérique sur fibres optiques	183
1.1. Différents systèmes	183
1.2. Liaisons longue distance sur fibres optiques.....	184
1.3. Terminaux de ligne	185
1.4. Codes en ligne	186
1.5. Transmissions optiques cohérentes	187
2. Conception des liaisons numériques	189
2.1. Filtrage.....	189
2.2. Choix de la bande passante de la fibre	189
2.3. Calcul de la probabilité d'erreur	190
2.4. Calcul de la puissance moyenne nécessaire en réception	191
2.5. Limite quantique.....	193
2.6. Bilan de liaison.....	193
3. Systèmes de transmission numériques	195
3.1. Liaisons point à point sans répéteurs	195
3.2. Liaisons à amplification optique.....	196
3.3. Liaisons multiplexées en longueur d'onde	197
3.4. Effet des dispersions.....	198
4. Nouveaux systèmes à très haut débit	200
4.1. Modulations duobinaires.....	200

4.2. Modulations de phase différentielle.....	201
4.3. Modulations de phase à 4 états.....	202
4.4. Systèmes DP-QPSK à 100 Gbit/s.....	203
4.5. Systèmes au-delà de 100 Gbit/s.....	204
5. Systèmes de transmission de type analogique.....	206
5.1. Transmissions analogiques classiques.....	206
5.2. Déport micro-ondes sur fibres optiques.....	207
6. Annexe.....	209
6.1. Principe du démodulateur QPSK.....	209

Chapitre 10

Réseaux sur fibres optiques

1. Réseaux locaux.....	211
1.1. Introduction.....	211
1.2. Réseaux optiques passifs.....	212
1.3. Conception d'un réseau passif.....	212
1.4. Réseaux Ethernet sur fibres optiques.....	214
1.5. <i>Fiber channel</i>	216
2. Réseaux d'accès (FTTH).....	218
2.1. Historique.....	218
2.2. Différentes architectures FTTx.....	219
2.3. Réseaux optiques passifs (PON).....	220
2.4. Fonctionnement d'un PON.....	222
2.5. Évolution.....	223

3. Réseaux longue distance	224
3.1. Systèmes de la hiérarchie SDH/SONET	224
3.2. Constitution des trames de la hiérarchie numérique synchrone	225
3.3. Anneaux SDH	226
3.4. Brassage optique	227
3.5. Réseau de transport optique (OTN)	228
3.6. Couche optique de l'OTN	229
3.7. Liaisons et réseaux sous-marins par fibres optiques	231
4. Vers les réseaux tout optiques	232
4.1. Réseaux multiplexés en longueur d'onde	232
4.2. Routage en longueur d'onde	232
4.3. Réseaux optiques sur puce (ONoC, <i>optical networks on chips</i>)	234
4.4. Architectures de réseaux tout optiques	236
4.5. Protocoles MPLS	236

Chapitre 11

Capteurs et instrumentation à fibres optiques

1. Les fibres optiques en instrumentation	239
1.1. Introduction	239
1.2. Transmission de signaux de mesure	240
1.3. Instrumentation de mesure optique à fibres	241
1.4. Classification des capteurs à fibres optiques	242
2. Capteurs non cohérents à fibres optiques	242
2.1. Capteurs de grandeurs géométriques et mécaniques	242
2.2. Capteurs par courbures ou microcourbures	244

2.3. Capteurs extrinsèques de température.....	244
2.4. Capteurs intrinsèques et répartis.....	245
3. Capteurs cohérents.....	246
<hr/>	
3.1. Capteurs interférométriques.....	247
3.2. Capteurs à réseaux de Bragg.....	249
3.3. Interféromètres en anneau.....	250
3.4. Capteurs polarimétriques.....	251
4. Réseaux de capteurs a fibres optiques.....	252
<hr/>	
4.1. Capteurs répartis.....	252
4.2. 4.2. Multiplexage temporel.....	252
4.3. 4.3. Multiplexage en longueur d'onde.....	253
Lexique.....	255
Bibliographie.....	263
Index.....	267