

réseaux et télécommunications

Télécoms sur fibres optiques

2^e édition revue et augmentée

Pierre Lecoy

HERMES

Sommaire

| | |
|--|----|
| Introduction | 13 |
| Historique | 13 |
| Avantages des fibres optiques | 13 |
| Domaines d'utilisation | 14 |
| Éléments d'un système de transmission sur fibre optique | 15 |
| Liste des notations utilisées | 17 |
| Chapitre 1. Propagation sur fibres optiques | 23 |
| 1.1. Propagation des rayons lumineux | 23 |
| 1.1.1. Equation de propagation d'une onde plane harmonique | 23 |
| 1.1.2. Définitions essentielles | 24 |
| 1.1.3. Rayons lumineux | 25 |
| 1.1.4. Le dioptre diélectrique | 26 |
| 1.1.5. Réflexion d'une onde plane sur un dioptre | 27 |
| 1.1.6. Réflexion d'une onde plane d'incidence quelconque | 28 |
| 1.1.7. Réflexion totale | 30 |
| 1.2. Le guide d'ondes diélectrique plan | 31 |
| 1.2.1. Modèle | 31 |
| 1.2.2. Propagation des rayons dans un guide plan | 32 |
| 1.2.3. Modes de propagation | 32 |
| 1.2.4. Calcul des modes | 33 |
| 1.2.5. Dispersion | 35 |
| 1.3. Fibres optiques multimodes | 37 |
| 1.3.1. Définition | 37 |
| 1.3.2. Fibres optiques multimodes à saut d'indice | 37 |
| 1.3.3. Fibres à gradient d'indice | 38 |
| 1.3.4. Trajectoire des rayons dans une fibre multimode | 39 |
| 1.3.5. Résolution de l'équation de propagation | 40 |
| 1.3.6. Différents types de rayons | 42 |
| 1.3.7. Modes de propagation | 43 |

| | |
|--|----|
| 1.3.8. Calcul du nombre de modes | 44 |
| 1.3.9. Expressions approchées de β | 46 |
| 1.4. Dispersion des fibres multimodes | 46 |
| 1.4.1. Dispersion intermodale | 46 |
| 1.4.2. Elargissement d'impulsion dans les fibres à saut d'indice | 47 |
| 1.4.3. Elargissement d'impulsion dans les fibres à gradient d'indice | 49 |
| 1.4.4. Dispersion chromatique | 50 |
| 1.4.5. Réponse impulsionnelle | 51 |
| 1.4.6. Bande passante des fibres multimodes | 51 |
| 1.4.7. Couplage de modes | 53 |
| 1.5. Calcul des champs dans une fibre optique | 54 |
| 1.5.1. Equations électromagnétiques | 54 |
| 1.5.2. Solution pour une fibre optique à saut d'indice | 55 |
| 1.5.3. Méthode de calcul des modes | 57 |
| 1.5.4. Modes transverses | 57 |
| 1.5.5. Modes hybrides | 58 |
| 1.5.6. Fréquences de coupure | 59 |
| 1.5.7. Pseudo-modes | 60 |
| 1.5.8. Allure des champs | 61 |
| 1.5.9. Modes dans une fibre à gradient d'indice | 62 |
| 1.6. Fibres monomodes | 63 |
| 1.6.1. Introduction | 63 |
| 1.6.2. Modèle gaussien de la fibre monomode | 63 |
| 1.6.3. Rappels sur les faisceaux gaussiens | 65 |
| 1.6.4. Paramètres des fibres monomodes | 66 |
| 1.6.5. Dispersion chromatique | 68 |
| 1.6.6. Fibres monomodes à dispersion nulle | 70 |
| 1.6.7. Fibres optiques à gaine interne déprimée | 71 |
| 1.7. Biréfringence dans les fibres optiques | 72 |
| 1.7.1. Etats de polarisation dans une fibre optique isotrope | 72 |
| 1.7.2. Biréfringence dans les fibres optiques | 73 |
| 1.7.3. Fibres intrinsèquement biréfringentes | 74 |
| 1.7.4. Biréfringence induite mécaniquement | 75 |
| 1.7.5. Biréfringence induite par des champs électromagnétiques | 76 |
| 1.8. Atténuation des fibres optiques | 77 |
| 1.8.1. Atténuation intrinsèque | 77 |
| 1.8.2. Fenêtres de transmission | 79 |
| 1.8.3. Pertes dues au guidage | 79 |
| 1.8.4. Pertes par courbure | 80 |
| 1.8.5. Pertes par microcourbures | 81 |
| 1.8.6. Pertes aux raccordements | 82 |
| 1.8.7. Optimisation des fibres optiques | 84 |

| | |
|---|-----------|
| 1.9. Effets non linéaires dans les fibres optiques | 85 |
| 1.9.1. Introduction | 85 |
| 1.9.2. Diffusion Raman : description | 86 |
| 1.9.3. Diffusion Raman stimulée et applications | 87 |
| 1.9.4. Diffusion Brillouin | 89 |
| 1.9.5. Effet Kerr | 90 |
| 1.9.6. Mélange 4 photons | 91 |
| Exercices relatifs au chapitre 1 | 93 |
| Chapitre 2. Technologie et mise en œuvre des fibres optiques | 97 |
| 2.1. Matériaux des fibres optiques | 97 |
| 2.1.1. Différents types de fibres optiques | 97 |
| 2.1.2. Fibres plastiques | 97 |
| 2.1.3. Fibres silice-silicone | 99 |
| 2.1.4. Fibres en verres fluorés | 99 |
| 2.2. Fabrication des fibres optiques | 100 |
| 2.2.1. Principes | 100 |
| 2.2.2. Fabrication des préformes par le procédé MCVD | 101 |
| 2.2.3. Fabrication des préformes par le procédé PCVD | 102 |
| 2.2.4. Fabrication des préformes par le procédé OVPO | 102 |
| 2.2.5. Fabrication des préformes par le procédé VAD | 103 |
| 2.2.6. Fibrage | 104 |
| 2.2.7. Résistance mécanique | 105 |
| 2.3. Câbles à fibres optiques | 105 |
| 2.3.1. Principes des câbles à fibres optiques | 105 |
| 2.3.2. Câbles à structure serrée | 106 |
| 2.3.3. Câbles à structures libres | 106 |
| 2.3.4. Câbles à structures compactes | 107 |
| 2.3.5. Câbles rubans | 108 |
| 2.3.6. Câbles aériens et sous-marins | 109 |
| 2.4. Raccordement des fibres optiques | 110 |
| 2.4.1. Différents types de raccords | 110 |
| 2.4.2. Raccordements par épissure | 110 |
| 2.4.3. Connecteurs optiques | 110 |
| 2.4.4. Critères de choix d'un connecteur optique | 111 |
| 2.4.5. Principaux types de connecteurs | 112 |
| 2.5. Mesures sur les fibres optiques | 113 |
| 2.5.1. Classification | 113 |
| 2.5.2. Mesures géométriques sur fibres multimodes | 113 |
| 2.5.3. Mesure des paramètres des fibres monomodes | 114 |
| 2.5.4. Mesure du profil d'indice | 116 |
| 2.5.5. Mesure d'atténuation spectrale | 117 |
| 2.5.6. Mesure de réflectométrie, ou rétrodiffusion | 118 |

| | |
|--|------------|
| 2.5.7. Mesure de bande passante | 121 |
| 2.5.8. Mesure de dispersion chromatique | 122 |
| Exercices relatifs au chapitre 2 | 125 |
| Chapitre 3. Composants optiques et optique intégrée | 127 |
| 3.1. Composants des systèmes sur fibres optiques | 127 |
| 3.1.1. Classification | 127 |
| 3.1.2. Technologies utilisées | 128 |
| 3.2. Principes de l'optique intégrée | 128 |
| 3.2.1. Guides plans en optique intégrée | 128 |
| 3.2.2. Modes dans un guide plan | 129 |
| 3.2.3. Guidage latéral | 131 |
| 3.2.4. Modes dans un guide rectangulaire | 131 |
| 3.3. Couplage de modes | 132 |
| 3.3.1. Modélisation | 132 |
| 3.3.2. Couplage à l'intérieur d'un même guide | 133 |
| 3.3.3. Couplage entre guides voisins | 134 |
| 3.3.4. Couplage entre guides désaccordés | 135 |
| 3.4. Réseaux de diffraction | 136 |
| 3.4.1. Principe | 136 |
| 3.4.2. Fonctionnement | 136 |
| 3.4.3. Réseaux de Bragg | 137 |
| 3.4.4. Réseaux de Bragg en optique intégrée | 138 |
| 3.4.5. Applications des réseaux de Bragg | 139 |
| 3.4.6. Réseaux de Bragg intégrés dans des fibres optiques | 139 |
| 3.5. Pertes dans les composants d'optique intégrée | 140 |
| 3.5.1. Pertes par absorption et diffusion | 140 |
| 3.5.2. Pertes par rayonnement | 141 |
| 3.5.3. Pertes aux accès | 141 |
| 3.5.4. Couplage par un prisme | 142 |
| 3.5.5. Couplage par un réseau de diffraction | 142 |
| 3.6. Composants optiques passifs | 143 |
| 3.6.1. Définitions | 143 |
| 3.6.2. Coupleurs optiques | 144 |
| 3.6.3. Multiplexeurs en longueur d'onde | 145 |
| 3.6.4. Isolateurs | 146 |
| 3.6.5. Atténuateurs | 147 |
| 3.7. Composants optiques actifs | 148 |
| 3.7.1. Introduction | 148 |
| 3.7.2. Effet électro-optique | 148 |
| 3.7.3. Coupleur électro-optique directif | 149 |
| 3.7.4. Applications du coupleur électro-optique directif | 150 |
| 3.7.5. Autres modulateurs en optique intégrée | 151 |
| 3.7.6. Modulateur à électro-absorption | 152 |
| Exercices relatifs au chapitre 3 | 155 |

| | |
|--|-----|
| Chapitre 4. Composants et interfaces opto-électroniques | 157 |
| 4.1. Principes des composants opto-électroniques | 157 |
| 4.1.1. Principe de l'électroluminescence | 157 |
| 4.1.2. Matériaux électroluminescents | 158 |
| 4.1.3. Principe de la photodétection | 159 |
| 4.1.4. Utilisation d'hétérojonctions | 160 |
| 4.1.5. Principes de l'amplification optique | 161 |
| 4.2. Diodes émettrices | 163 |
| 4.2.1. Diode électroluminescente (DEL) | 163 |
| 4.2.2. Principales caractéristiques des DEL | 163 |
| 4.2.3. Diodes laser : principe | 164 |
| 4.2.4. Diodes laser à structure Fabry Péro | 166 |
| 4.2.5. Diodes laser DFB | 167 |
| 4.2.6. Guidage latéral dans les diodes laser | 168 |
| 4.2.7. Structures à puits quantiques | 169 |
| 4.2.8. Diodes laser accordables en longueur d'onde | 170 |
| 4.3. Interface optique d'émission | 171 |
| 4.3.1. Description | 171 |
| 4.3.2. Emetteurs à diodes électro-luminescentes | 172 |
| 4.3.3. Modulation des diodes laser | 172 |
| 4.3.4. Bruit des émetteurs | 174 |
| 4.3.5. Couplage laser-fibre optique | 174 |
| 4.3.6. Tête optique | 175 |
| 4.3.7. Comparaison des émetteurs optoélectroniques | 177 |
| 4.4. Photodétecteurs | 178 |
| 4.4.1. Photodiode PIN | 178 |
| 4.4.2. Caractéristiques de la photodiode | 178 |
| 4.4.3. Photodiodes à avalanche | 180 |
| 4.4.4. Bruit des photodiodes | 181 |
| 4.4.5. Bruit des photodiodes à avalanche | 182 |
| 4.4.6. Matériaux utilisés en photodétection | 183 |
| 4.4.7. Phototransistor | 184 |
| 4.5. Interface optique de réception | 185 |
| 4.5.1. Description | 185 |
| 4.5.2. Modélisation du récepteur optique | 185 |
| 4.5.3. Structures de préamplificateurs | 187 |
| 4.5.4. Bruit du transistor d'entrée | 187 |
| 4.5.5. Choix de la structure | 188 |
| 4.5.6. Calcul du rapport porteuse à bruit | 189 |
| 4.5.7. Optimisation du rapport porteuse à bruit | 190 |
| Exercices relatifs au chapitre 4 | 193 |

| | |
|---|-----|
| Chapitre 5. Systèmes de transmission sur fibres optiques | 197 |
| 5.1. Transmissions numériques sur fibres optiques | 197 |
| 5.1.1. Introduction aux liaisons numériques | 197 |
| 5.1.2. Terminaux | 198 |
| 5.1.3. Répéteurs-régénérateurs | 200 |
| 5.1.4. Transmissions optiques cohérentes | 201 |
| 5.2. Conception des liaisons numériques | 203 |
| 5.2.1. Filtrage et égalisation | 203 |
| 5.2.2. Choix de la bande passante de la fibre | 204 |
| 5.2.3. Calcul de la probabilité d'erreur | 204 |
| 5.2.4. Calcul de la puissance moyenne en réception | 206 |
| 5.2.5. Limite quantique | 207 |
| 5.2.6. Bilan de liaison | 207 |
| 5.2.7. Familles de liaisons numériques | 209 |
| 5.3. Transmissions analogiques sur fibres optiques | 211 |
| 5.3.1. Transmission analogique en bande de base | 211 |
| 5.3.2. Calcul de la liaison | 212 |
| 5.3.3. Transmission par modulation de fréquence d'une sous-porteuse ... | 212 |
| 5.3.4. Transmissions d'images de télévision | 213 |
| 5.3.5. Réseaux de vidéocommunications | 214 |
| 5.3.6. Transmission de signaux de mesure | 216 |
| 5.4. Réseaux de données sur fibres optiques | 217 |
| 5.4.1. Transmission de données par fibres optiques | 217 |
| 5.4.2. Réseaux optiques passifs | 218 |
| 5.4.3. Conception d'un réseau | 219 |
| 5.4.4. Exemple: réseaux locaux Ethernet sur fibres optiques | 219 |
| 5.4.5. Réseau FDDI | 220 |
| 5.4.6. Réseau FIP | 221 |
| Exercices relatifs au chapitre 5 | 223 |
| Chapitre 6. Systèmes à amplification optique | 227 |
| 6.1. Amplification optique dans les verres dopés | 227 |
| 6.1.1. Introduction | 227 |
| 6.1.2. Principe de l'amplification dans les verres dopés à l'erbium | 228 |
| 6.1.3. Gain de l'amplification optique | 229 |
| 6.1.4. Bruit de l'amplification optique | 230 |
| 6.2. Répéteurs à amplification optique | 231 |
| 6.2.1. Description | 231 |
| 6.2.2. Caractéristiques | 232 |
| 6.2.3. Principaux paramètres d'un amplificateur optique | 233 |
| 6.2.4. Facteur de bruit d'un amplificateur optique | 234 |
| 6.2.5. Bruit en réception en présence d'amplification optique | 235 |

| | |
|---|------------|
| 6.3. Liaisons à amplification optique | 236 |
| 6.3.1. Description | 236 |
| 6.3.2. Calcul du bruit sur les liaisons | 237 |
| 6.3.3. Effet de la dispersion | 238 |
| 6.3.4. Propagation de solitons | 239 |
| 6.3.5. Systèmes de transmission à solitons | 241 |
| Exercices relatifs au chapitre 6 | 243 |
| Chapitre 7. Capteurs et instrumentation à fibres optiques | 245 |
| 7.1. Les fibres optiques en instrumentation | 245 |
| 7.1.1. Introduction | 245 |
| 7.1.2. Classification | 246 |
| 7.1.3. Instrumentation optique à fibres | 246 |
| 7.1.4. Transmission d'images | 247 |
| 7.2. Capteurs non cohérents à fibres optiques | 248 |
| 7.2.1. Classification des capteurs à fibres optiques | 248 |
| 7.2.2. Capteurs extrinsèques, non cohérents, de grandeurs géométriques et mécaniques | 249 |
| 7.2.3. Capteurs par courbures ou microcourbures | 251 |
| 7.2.4. Capteurs extrinsèques de température par fibres optiques | 251 |
| 7.2.5. Capteurs intrinsèques non cohérents | 252 |
| 7.3. Capteurs interférométriques | 253 |
| 7.3.1. Généralités | 253 |
| 7.3.2. Interféromètres à deux bras | 253 |
| 7.3.3. Interférométrie intermodale | 255 |
| 7.3.4. Interféromètres à une fibre | 256 |
| 7.3.5. Interféromètres en anneau (ou de Sagnac) | 257 |
| 7.3.6. Capteurs polarimétriques | 258 |
| 7.4. Réseaux de capteurs à fibres optiques | 259 |
| 7.4.1. Capteurs répartis | 259 |
| 7.4.2. Multiplexage temporel | 260 |
| 7.4.3. Multiplexage en longueur d'onde | 261 |
| 7.4.4. Multiplexage de cohérence | 262 |
| Exercices relatifs au chapitre 7 | 263 |
| Problèmes de révision | 265 |
| Lexique | 273 |
| Bibliographie | 279 |