

Table des matières

Avant-propos	5
Table des matières	7
I Description générale	13
1 Introduction	15
1.1 Remarques préliminaires	15
1.2 Infrarouge lointain ou domaine térahertz	20
1.3 Sources de rayonnement térahertz	21
1.3.1 « Fossé » du térahertz	21
1.3.2 Sources « classiques »	22
1.3.3 Lasers moléculaires	25
1.3.4 Sources optoélectroniques	26
1.3.5 Lasers à cascade quantique	28
1.3.6 Bilan comparatif et perspectives	30
1.4 Détecteurs de rayonnement térahertz	30
1.4.1 Détecteurs « incohérents » : bolomètres...	30
1.4.2 Détecteurs optoélectroniques	34
1.5 Interaction entre les ondes térahertz et la matière	34
1.6 Applications entrevues et état actuel de leur développement	36
II Principes physiques de base	39
2 Notions physiques de base	41
2.1 Électromagnétisme	41
2.1.1 Équations de Maxwell	41
2.1.2 Équations de propagation du champ électromagnétique	43
2.1.3 Énergie électromagnétique	45
2.1.4 Électromagnétisme non linéaire	48
2.2 Photonique	54

2.2.1	Énergie du photon	54
2.2.2	Puissance lumineuse et statistique du flux de photons	55
2.3	Interaction lumière-matière	56
2.3.1	Généralités	56
2.3.2	Modèle classique de l'interaction dipolaire	57
2.3.3	Traitement quantique de l'interaction lumière-atome	59
2.3.4	Le corps noir	62
2.3.5	Interaction lumière-molécule	64
2.3.6	Interaction lumière-gaz	67
2.3.7	Interaction lumière-liquide	73
2.3.8	Interaction lumière-solide	73
2.3.9	Photogénération dans les semi-conducteurs	84
2.4	Lasers femtosecondes	88
2.4.1	Lasers à modes bloqués	88
2.4.2	Mise en phase des modes	89

III Composants 91

3 Composants pour le régime impulsionnel 93

3.1	Lasers femtosecondes	93
3.1.1	Introduction	93
3.1.2	Génération d'impulsions laser femtosecondes	94
3.1.3	Blocage de modes	95
3.1.4	Principaux lasers femtosecondes	99
3.2	Matériaux semi-conducteurs pour l'impulsionnel	100
3.2.1	Recombinaison des paires électrons-trous	100
3.2.2	L'épitaxie à basse température des semi-conducteurs III-V	102
3.2.3	Implantation et irradiation ionique	107
3.3	Génération	110
3.3.1	Génération à base de semi-conducteurs	110
3.3.2	Génération par redressement optique	125
3.3.3	Comparatif des sources	132
3.4	Détection	134
3.4.1	Détection photoconductrice	134
3.4.2	Détection par effet électro-optique	138

4 Composants pour le régime continu 155

4.1	Introduction	155
4.1.1	Photomélange par battement de deux lasers	156
4.1.2	Composants de transposition de fréquence par battement de lasers : photodétecteurs	162
4.1.3	Laser à cascade quantique (QCL)	167

4.2	Conclusion partielle	172
4.3	Technique de photomélangage : principe et limitations	173
4.4	Vers les grandes longueurs d'onde	174
4.4.1	Banc expérimental	175
4.4.2	Résultats expérimentaux	176
4.4.3	Perspectives	178
5	Composants passifs	179
5.1	Introduction	179
5.2	Éléments optiques pour la propagation en espace libre	180
5.2.1	Rôle crucial de la dispersion chromatique	180
5.2.2	Miroirs	182
5.2.3	Lentilles	184
5.2.4	Séparatrices	186
5.2.5	Prismes et réseaux de diffraction	187
5.2.6	Traitements antireflets	188
5.3	Traitement de la polarisation en espace libre	189
5.3.1	Degré de polarisation des émetteurs et détecteurs THz	189
5.3.2	Polariseurs à grille	190
5.3.3	Polarisation par séparation temporelle	191
5.3.4	Lames biréfringentes	191
5.4	Guides d'ondes	193
5.4.1	Quelques rappels sur le guidage des ondes électromagnétiques	193
5.4.2	Guides d'ondes diélectriques	195
5.4.3	Guides d'ondes métalliques	197
5.4.4	Dispersion et pertes des guides d'ondes	200
5.4.5	Comparatif des différents guides d'onde THz	201
5.4.6	Couplage dans les guides d'ondes	202
5.5	Cristaux photoniques et métamatériaux	202
5.5.1	Définition et caractéristiques	202
5.5.2	Dispositifs et filtres THz basés sur des cristaux photoniques	203
5.5.3	Ingénierie de la dispersion : cristaux photoniques et métamatériaux	207
IV	Techniques et systèmes	215
6	Techniques de mesure	219
6.1	Domaine temporel	220
6.1.1	Échantillonnage en temps équivalent d'impulsions THz ultrabrèves	220
6.1.2	Échantillonnage d'un signal continu	224

6.1.3	Passage temps–fréquence : la transformée de Fourier	225
6.1.4	Mesures pompe optique – sonde THz	228
6.1.5	Extraction du signal	233
6.2	Domaine fréquentiel	238
7	Spectroscopie	241
7.1	Spectroscopie THz dans le domaine temporel (THz-TDS) . . .	241
7.1.1	Principe de la spectroscopie THz dans le domaine temporel	241
7.1.2	Cas particuliers	245
7.1.3	Matériaux magnétiques	246
7.1.4	Performances de la THz TDS	250
7.2	Sources optoélectroniques utilisées en spectroscopie THz . . .	252
7.3	Spectroscopie dans le domaine fréquentiel	253
7.3.1	Quelques principes de base sur l'instrumentation . . .	253
7.3.2	Spectromètres à réseau ou à étalon	254
7.3.3	Spectromètre infrarouge à transformée de Fourier . . .	255
7.3.4	Spectroscopie avec une source THz monochromatique de longueur d'onde ajustable	262
7.3.5	Comparaison des techniques	265
8	Imagerie	267
8.1	Introduction	267
8.2	Principes de l'imagerie THz	268
8.2.1	Extension des propriétés spectroscopiques	268
8.3	Résolution spatiale	268
8.3.1	Limite de la diffraction	269
8.3.2	Imagerie en champ proche	269
8.4	Principes d'un microscope THz	269
8.4.1	Différentes techniques en champ proche	270
8.4.2	Champ proche et contraste de champ proche	271
8.4.3	Imagerie par balayage	271
8.4.4	Imagerie par détecteurs bidimensionnels	273
8.4.5	Tomographie	273
8.4.6	Imagerie <i>in situ</i>	273
8.5	Conclusion	273
V	Applications et perspectives	275
9	Applications des ondes THz	277
9.1	Introduction	277
9.2	Pourquoi choisir le THz ?	277
9.3	Choix d'un système THz	278

9.3.1	Du système complexe aux composants dédiés	278
9.3.2	Système CW ou impulsif	282
9.3.3	Classement des systèmes par degrés de complexité	284
10	Familles d'applications THz	293
10.1	Introduction	293
10.2	Contrôle qualité	294
10.2.1	Principe	294
10.2.2	Exemple	295
10.3	Maintenance préventive	297
10.3.1	Principe	297
10.3.2	Exemples	298
10.4	Sécurité et défense	299
10.4.1	Principe	299
10.4.2	Exemples	299
10.5	Télécommunications	302
10.5.1	Principe	302
10.5.2	Exemples	303
10.6	Biologie et biomédical	304
10.6.1	Principe	304
10.6.2	Exemple	305
11	Détection et quantification de gaz en THz	307
11.1	Introduction	307
11.2	Détermination des concentrations par spectroscopie	309
11.3	Exemple de la fumée de cigarette	313
11.4	Molécules ciblées	315
11.5	Applications en astrophysique	316
11.6	Bases de données et simulation de spectres	318
11.6.1	Littérature scientifique	318
11.6.2	Compilations	319
11.6.3	Bases de données informatiques	319
11.6.4	Simulation de spectres	324
11.6.5	Absorption de l'atmosphère	325
12	Le THz : phénomène de mode ou technologie du troisième millénaire ?	329
	Bibliographie	333