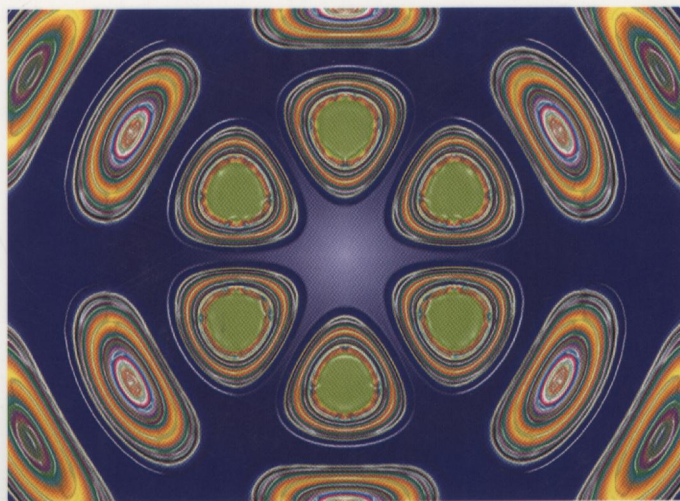


**Didier Dangoisse**  
**Daniel Hennequin**    **Véronique Zehnlé-Dhaoui**

*2<sup>e</sup> CYCLE • ÉCOLES D'INGÉNIEURS*

# **Les lasers**

Cours et exercices corrigés



DUNOD

# Table des matières

<b>I Principes de base et modélisation</b>	1
1 Interaction matière-rayonnement	4
1.1 Description du milieu matériel	4
1.2 Échanges d'énergie entre un système atomique à deux niveaux et un rayonnement	5
2 Modélisation du laser à deux niveaux	8
2.1 Dynamique des populations et du flux de photons sous l'effet de l'émission stimulée et de l'absorption	9
2.2 Dynamique des populations et du flux de photons en présence du processus de pompage et des relaxations	9
2.3 Équations du laser	10
2.4 Seuil d'oscillation et régimes stationnaires	12
2.5 Gain du laser	14
3 Conclusion	16
<b>Compléments</b>	16
A Coefficients d'Einstein	16
B Laser à trois niveaux	19
B.1 Évolution des populations	20
B.2 Équations du laser	20
B.3 Seuil et régimes stationnaires	21
C Laser à quatre niveaux	22
D Équations réduites du laser	23
E Stabilité des régimes stationnaires du laser	24
F Exercices	26
<b>II Faisceaux gaussiens</b>	29
1 Propagation d'un rayon lumineux : les matrices ABCD	29
2 Équations de Maxwell	32
2.1 Rappels	32
2.2 Approximation paraxiale	33
3 Faisceaux gaussiens	34

3.1	Mode fondamental . . . . .	34
3.2	Modes d'Hermite-Gauss . . . . .	39
3.3	Modes de Laguerre-Gauss . . . . .	40
4	Propagation d'un faisceau gaussien . . . . .	42
4.1	Loi ABCD pour les faisceaux gaussiens . . . . .	42
4.2	Focalisation d'un faisceau par une lentille . . . . .	44
<b>Compléments</b>	. . . . .	45
A	Quelques exemples de matrices ABCD . . . . .	45
B	Transformation des faisceaux gaussiens par une lentille mince . . . . .	49
C	Exercices . . . . .	50
<b>III Les cavités</b>	. . . . .	55
1	Résonateur de Perot-Fabry . . . . .	56
2	Stabilité des résonateurs avec miroirs sphériques . . . . .	58
2.1	Stabilité d'un système périodique . . . . .	60
2.2	Critère de stabilité d'un résonateur . . . . .	61
3	Modes propres de cavité . . . . .	63
3.1	Caractéristiques des modes propres de cavité . . . . .	63
3.2	Condition de résonance . . . . .	65
3.3	Quelques exemples de cavité . . . . .	66
4	Pertes dans un résonateur ouvert . . . . .	68
4.1	Pertes par absorption, diffusion et transmission . . . . .	68
4.2	Pertes par diffraction . . . . .	68
4.3	Coefficient de qualité . . . . .	69
5	Conclusion . . . . .	70
<b>Compléments</b>	. . . . .	71
A	Cavité en anneau . . . . .	71
B	Les cavités guide d'onde . . . . .	72
C	Optimisation du couplage vers l'extérieur . . . . .	73
D	Exercices . . . . .	74
<b>IV Théorie semi-classique du laser</b>	. . . . .	77
1	Interaction matière-rayonnement . . . . .	77
1.1	Équations de Maxwell . . . . .	79
1.2	Interaction d'un système à deux niveaux avec le rayonnement . . . . .	82
2	Équations de Maxwell-Bloch . . . . .	84
2.1	Régime stationnaire du laser . . . . .	85
2.2	Lien avec les équations de bilan . . . . .	90

3	Forme de raie . . . . .	91
3.1	Élargissement inhomogène : l'effet Doppler . . . . .	91
3.2	Lasers multimodes longitudinaux . . . . .	92
4	Résumé . . . . .	94
<b>Compléments</b>	. . . . .	95
A	Modèle de l'électron élastiquement lié . . . . .	96
B	Équations de Bloch du laser . . . . .	96
C	Classification des différents lasers . . . . .	99
D	Lamb dip . . . . .	100
E	Solutions stationnaires du laser . . . . .	101
F	Exercices . . . . .	103
<b>V Comportement dynamique des lasers</b>	. . . . .	105
1	Comportement dynamique intrinsèque . . . . .	106
1.1	Laser de classe A . . . . .	106
1.2	Laser de classe B . . . . .	108
1.3	Laser de classe C . . . . .	109
2	Modulation des paramètres du laser . . . . .	111
2.1	Modulation de la pompe . . . . .	111
2.2	Modulation sinusoïdale des pertes du laser . . . . .	113
2.3	Modes déclenchés . . . . .	115
3	Synchronisation de modes . . . . .	118
4	Laser à signal injecté . . . . .	120
<b>Compléments</b>	. . . . .	122
A	Le chaos déterministe . . . . .	122
B	Laser à absorbant saturable . . . . .	125
C	Laser bimode . . . . .	128
D	Exercices . . . . .	131
<b>VI Principaux lasers</b>	. . . . .	133
1	Lasers à semi-conducteur . . . . .	134
1.1	Laser à homojonction . . . . .	135
1.2	Laser à hétérojonction . . . . .	138
1.3	Principales caractéristiques . . . . .	140
2	Autres lasers . . . . .	141
2.1	Lasers à gaz . . . . .	141
2.2	Lasers à état solide . . . . .	146

2.3 Lasers à colorant organique . . . . .	149
2.4 Laser X et laser à électrons libres . . . . .	150
<b>Compléments</b> . . . . .	151
A Bandes d'énergie dans un semi-conducteur . . . . .	151
B Dopage d'un semi-conducteur . . . . .	154
<b>VII Optique non linéaire</b> . . . . .	157
1 Polarisation non linéaire . . . . .	159
1.1 Équations d'onde dans un milieu non linéaire . . . . .	162
1.2 Classification des différents effets . . . . .	164
2 Mélange à trois ondes . . . . .	165
2.1 Équation des amplitudes en régime stationnaire . . . . .	166
2.2 Génération de seconde harmonique . . . . .	168
2.3 Amplification et oscillation paramétrique . . . . .	169
3 Mélange à quatre ondes . . . . .	173
3.1 Effet Kerr optique . . . . .	173
3.2 Conjugaison de phase . . . . .	174
4 La diffusion stimulée . . . . .	178
4.1 Effet Raman . . . . .	179
4.2 Effet Brillouin . . . . .	181
<b>Compléments</b> . . . . .	182
A Oscillateur forcé dans un potentiel anharmonique . . . . .	182
B Accord de phase par biréfringence . . . . .	184
C Conversion paramétrique de fréquence . . . . .	186
D Effet Pockels . . . . .	187
E Modèle classique de diffusion Raman . . . . .	188
F Modèle classique de diffusion Brillouin . . . . .	190
F1 Amplitude de l'onde acoustique . . . . .	191
F2 Évolution de l'onde optique . . . . .	192
F3 Accord de phase . . . . .	193
G Exercices . . . . .	193
<b>VIII Quelques applications des lasers</b> . . . . .	195
1 Applications grand public . . . . .	195
1.1 L'imprimante laser . . . . .	195
1.2 Le disque laser . . . . .	197
1.3 Le lecteur de codes barres . . . . .	199
2 Applications métrologiques . . . . .	201

2.1	Alignement optique . . . . .	201
2.2	Holographie . . . . .	201
2.3	Télémétrie . . . . .	202
2.4	Vélocimétrie Doppler . . . . .	204
2.5	Le gyrolaser . . . . .	205
2.6	Télécommunications . . . . .	206
3	Applications scientifiques . . . . .	207
3.1	La spectroscopie . . . . .	207
3.2	Le LIDAR . . . . .	208
3.3	Le refroidissement des atomes . . . . .	209
3.4	La fusion nucléaire . . . . .	211
4	Applications médicales . . . . .	212
4.1	Propriétés exploitées . . . . .	212
4.2	Quelques applications . . . . .	213
5	Applications industrielles . . . . .	214
5.1	Soudage . . . . .	216
5.2	Découpe, gravure . . . . .	216
	<b>Compléments</b> . . . . .	216
A	Balayage d'un faisceau . . . . .	216
B	Sécurité laser . . . . .	217
	<b>Solutions des exercices</b> . . . . .	221
	<b>Bibliographie</b> . . . . .	225
	<b>Index des notations</b> . . . . .	227
	<b>Index</b> . . . . .	229

Didier Dangoisse  
Daniel Hennequin  
Véronique Zehnlé-Dhaoui

## LES LASERS

### Cours et exercices corrigés

Cet ouvrage présente de manière aussi simple et pédagogique que possible les fondements de la physique des lasers.

Les premiers chapitres abordent la théorie des lasers, de façon progressive, depuis les concepts de base (amplification lumineuse et modélisation, théorie des faisceaux gaussiens, cavités lasers) jusqu'à la théorie semi-classique. Ils sont suivis d'une description des principaux lasers d'utilisation courante et d'une introduction à l'optique non linéaire. L'ouvrage se termine par un aperçu des principales applications faisant appel aux lasers.

Chaque chapitre offre deux niveaux de lecture : un texte de base suivi de compléments qui détaillent certains points ou qui abordent des questions plus spécialisées, et se termine par une série d'exercices, dont les corrigés figurent à la fin du livre.

Cet ouvrage est tout particulièrement destiné aux étudiants de deuxième et troisième cycles universitaires et des écoles d'ingénieurs qui veulent se familiariser avec la physique des lasers.



DIDIER DANGOISSE  
est professeur à l'université  
des Sciences et Technologies  
de Lille.

DANIEL HENNEQUIN  
est chargé de recherches  
au CNRS.

VÉRONIQUE  
ZEHNLÉ-DHAOUI  
est maître de conférences à  
l'université des Sciences et  
Technologies de Lille.

MATHÉMATIQUES

PHYSIQUE

CHIMIE

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INFORMATIQUE

SCIENCES DE LA NATURE  
ET DE LA VIE



9 782100 041039

ISBN 2 10 004103 7  
Code 044103

<http://www.dunod.com>



DUNOD