

—— コロナ社創立 70 周年記念出版〔創立 1927 年〕 ——

光エレクトロニクス教科書シリーズ ②

# 光 波 工 学

工学博士 栖原 敏明 著

コロナ社

## 刊行のことば

「光エレクトロニクス」は、レーザ光を利用した電子技術に関する学問であり、この15年間に急速に発展してきた。そして、今後ますますエレクトロニクスの広い範囲に浸透していくものと思われる。したがって、この分野の重要な基本事項をよく整理して学んでおくことは、これからの技術者にとって非常に大切なことである。

このたび、大学の学部学生および高専の学生あるいは若い技術者を対象に、光エレクトロニクス全体をバランスよく扱った平易な教科書シリーズの出版を企画した。本シリーズの第1巻は光エレクトロニクス全般を解説しており、全体の道しるべの役をし、続巻は光エレクトロニクスを代表する分野を扱っている。すなわち、光波の性質の基礎、半導体レーザなどの光デバイス、光ファイバを中心とする光通信、光ディスクで代表される光情報工学、および計測、加工などのレーザ応用工学である。執筆者はそれぞれの分野で第一線の研究者として活躍しておられる方々である。

コロナ社創立70周年記念出版として本シリーズを世に贈ることは、次代の電子技術を担うことが期待されている学生諸君、ならびに若い技術者に対する光エレクトロニクス分野の基礎学力涵養に貢献することになり、誠に意義深いことであると考えます。

1997年10月

企画世話人

大阪大学教授 工学博士	西原 浩
東京大学教授 工学博士	神谷 武志

## まえがき

光通信や光ディスクに代表される光情報処理や光応用計測・光エネルギー利用などの技術分野では、各種のレーザで発生されるコヒーレントな光の空間的および時間的な波動としての特性がたくみに利用されている。このような光波の応用技術は光エレクトロニクスの最も重要な柱の一つであり、近年ますます発展するとともに身近な技術となり重要性が高まっている。

本書は、この光波工学の理論的な基礎を電気系または応用物理学系の大学学部高学年または高専での通年または半年の講義で効率よく学ぶことを目的とした教科書である。専門的な学習や研究に進むための基礎固めにも利用できるよう考慮した。初歩的な電磁理論の知識とマクスウェルの方程式を出発点として、光波の一般的・基本的な法則や現象および特性を飛躍することなく平易に解説する。また工学的応用の諸技法について述べ、光波応用デバイスやシステムの基本的概念を明らかにする。

執筆にあたっては、内容を厳選し、正確かついねいに解説した。物理的意味を含めた正確な理解を容易にするため工夫した図やグラフを多用したことも本書の特長である。各章の内容の脈絡が明確になるよう注意し、数式は正確さを損なわない範囲で簡潔なものとし、その導出過程を含めて詳しく説明することにより、体系的な理解ができるよう配慮した。

本書が読者の勉学に少しでも役立つことができれば著者の至上の喜びである。おわりに日ごろからご指導ご鞭撻いただくとともに、本書執筆の機会を与えてくださった西原浩先生、神谷武志先生に厚くお礼申し上げる。また、本書の出版に関してご尽力いただいたコロナ社の各位にお礼申し上げる。

1998年5月

栖原敏明

# 目 次

## 1. 光波工学の概要

1.1 光の本質と光波 .....	1
1.2 コヒーレント光の特徴 .....	3
1.3 コヒーレント光の発生 .....	5
1.4 光波工学の応用分野 .....	6
1.5 本書の構成 .....	6
演習問題 .....	7

## 2. 光波の基本的性質

2.1 光波の基本方程式 .....	8
2.1.1 マクスウェルの方程式 .....	8
2.1.2 媒質の方程式 .....	9
2.1.3 境界条件 .....	11
2.1.4 波動方程式 .....	11
2.1.5 エネルギー密度とパワー密度 .....	12
2.2 単一周波数の光波の取扱い .....	13
2.2.1 単一周波数の光波の複素表示 .....	13
2.2.2 マクスウェルの方程式と波動方程式 .....	14
2.2.3 複素ポインティングベクトル .....	14
2.3 光波の自由伝搬 .....	15
2.3.1 波面 .....	15
2.3.2 電界・磁界ベクトルと波動インピーダンス .....	19
2.3.3 偏光 .....	21

2.3.4 減 衰 .....	25
2.3.5 位相速度と群速度 .....	26
2.3.6 ガウシアンビーム .....	28
2.4 光波の屈折と反射 .....	30
2.4.1 入射面と偏光 .....	30
2.4.2 電 磁 界 成 分 .....	31
2.4.3 屈 折 の 法 則 .....	32
2.4.4 フレネルの公式 .....	33
2.4.5 反射率と透過率 .....	34
2.4.6 ブルースター角 .....	36
2.4.7 全反射とエバネッセント波 .....	36
2.5 幾何光学近似 .....	40
2.5.1 アイコナル方程式 .....	40
2.5.2 光線と光線方程式 .....	41
2.5.3 フェルマーの原理 .....	42
演 習 問 題 .....	44

### 3. 光波の干渉と回折

3.1 光 波 の 干 渉 .....	45
3.1.1 光波干渉の基本式 .....	45
3.1.2 2光波干渉の具体例 .....	47
3.1.3 多 重 干 渉 .....	51
3.1.4 異なる周波数の光波の干渉 .....	56
3.2 光波のコヒーレンス .....	58
3.2.1 光波の周波数スペクトルと時間波形 .....	58
3.2.2 時間的コヒーレンス .....	60
3.2.3 空間的コヒーレンス .....	63
3.3 光 波 の 回 折 .....	64
3.3.1 ホイヘンス-フレネルの原理 .....	64
3.3.2 回 折 積 分 .....	65
3.3.3 平 面 波 展 開 .....	67

3.3.4	フレネル回折	68
3.3.5	フラウンホーファ回折	71
3.3.6	レンズによる集光・結像とフーリエ変換	75
3.3.7	グレーティングによる回折	82
演習問題		87

## 4. 光波の伝送

4.1	光導波路の基本原則と構造	88
4.2	導波路内の光波の一般的性質	90
4.2.1	マクスウェルの方程式と波動方程式	90
4.2.2	導波路の光波モード	91
4.2.3	モード間直交性とパワーフロー	92
4.2.4	モード展開表示	94
4.3	プレーナ導波路	94
4.3.1	波動方程式	94
4.3.2	ステップ屈折率導波路	95
4.3.3	グレーデッド屈折率導波路	104
4.4	チャンネル導波路	107
4.5	光ファイバ	109
4.5.1	ステップ屈折率ファイバの解析モデル	109
4.5.2	波動方程式と解	110
4.5.3	導波モードの特性方程式	112
4.5.4	直線偏光モード	113
4.5.5	放物関数型屈折率分布光ファイバ	117
4.5.6	伝送帯域	119
4.6	導波路端面結合	123
4.7	導波モードの遠視野像	125
4.7.1	回折積分	126
4.7.2	遠視野像の例	126
演習問題		128

## 5. 光波の結合

5.1	モード結合理論の概要	129
5.2	基本的なモード結合方程式とその解	131
5.2.1	モード結合方程式	131
5.2.2	パワーフロー保存則	132
5.2.3	モード結合方程式の解	133
5.2.4	結合構造の正規モード	138
5.3	モード結合の一般論	139
5.3.1	モード展開表示	140
5.3.2	モード結合方程式と結合係数	140
5.3.3	モード結合方程式の簡単化	142
5.4	周期的媒質内での光波結合	143
5.4.1	周期的媒質の記述	143
5.4.2	結合係数と位相整合条件	145
5.4.3	ラマン-ナス回折	147
5.4.4	ブラッグ回折	149
5.5	導波モード間結合	155
5.5.1	導波路間の分布結合	155
5.5.2	グレーティング付き導波路内の導波モード間結合	157
5.6	導波モードと放射モードの結合	163
5.6.1	モード結合方程式とその解	163
5.6.2	漏洩導波路とプリズム結合器	165
5.6.3	グレーティング結合器	166
	演習問題	167

## 6. 光波ホログラフィと波面変換

6.1	ホログラフィの原理と特徴	169
6.1.1	光波の強度分布と位相分布の記録	169
6.1.2	ホログラムの記録	170

6.1.3	ホログラムの再生	171
6.1.4	ホログラム記録再生の数式表現	172
6.1.5	ホログラムとグレーティングの関係	174
6.1.6	空間周波数スペクトル	176
6.1.7	記録の冗長性	178
6.2	ホログラムの結像特性	178
6.3	ホログラムの各種形式と特性	181
6.3.1	記録媒体の形態	181
6.3.2	信号波光学系の配置	182
6.3.3	参照波と照明波の形態	183
6.4	回折型光学素子	184
6.4.1	グレーティングレンズ	185
6.4.2	マイクロフレネルレンズ	187
	演習問題	188

## 7. 光波の制御

7.1	異方性媒質中の光波伝搬	189
7.1.1	比誘電率テンソルと光学主軸	189
7.1.2	屈折率楕円体	191
7.1.3	固有偏光と複屈折	193
7.1.4	ジョーンズ行列と波長板	195
7.2	電気光学効果による制御	197
7.2.1	ポッケルス効果	197
7.2.2	バルク型電気光学効果光変調器	200
7.2.3	導波路型光変調器・光スイッチ	204
7.2.4	半導体材料における電気光学効果と光制御デバイス	205
7.2.5	液晶材料における電気光学効果と光制御デバイス	208
7.3	音響光学効果による制御	211
7.3.1	音響波	211
7.3.2	音響光学効果	213
7.3.3	バルク型音響光学制御デバイス	215

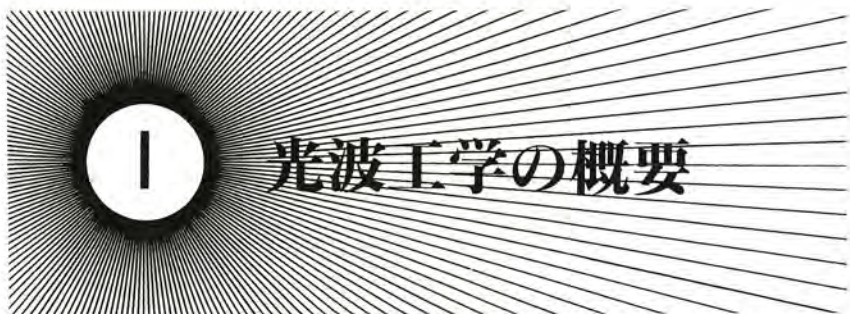


7.3.4 導波路型音響光学制御デバイス .....	217
7.4 磁気光学効果による制御 .....	219
7.4.1 磁化された媒質中の光波伝搬 .....	219
7.4.2 ファラデー効果 .....	220
7.4.3 光アイソレータ .....	222
演習問題 .....	223

## 8. 微小光学と光集積回路

8.1 微小光学 .....	225
8.2 光集積回路 .....	226
演習問題 .....	229

付 録 .....	230
参 考 文 献 .....	231
演習問題略解 .....	232
索 引 .....	236



この章では、本書の内容への導入として、光波の意味や特徴、光波工学の応用分野などについて述べる。

## 1.1 光の本質と光波

光 (light) の本質が何であるかは長い間物理学の課題として論じられてきたが、19世紀に至ってマクスウェル (Maxwell) により、光は電磁波の一種であることが明らかにされた。また、このことは種々の実験で実証されてきた。

電磁波とは、一般に時間的に変化する電界と磁界が互いに他方を誘起しながら空間を伝搬する波動を意味し、ベクトル界で表される横波である。電界と磁界は空間そのものの状態であるから、光 (電磁波) は伝搬媒質として物質を必ずしも必要とせず、真空中をも伝搬する。電磁波の周波数  $f$  と波長  $\lambda$  (真空中の値) は光の伝搬速度を  $c (= 3.00 \times 10^8 \text{ m/s})$  として

$$f\lambda = c \quad (1.1)$$

によって関連付けられる。

電磁波はその周波数域により図 1.1 に示すように区分され、異なる区分の電磁波は互いに大きく異なる性格を持っている。区分の境界は明確に定義されているわけではない。人間の目で感知できる可視光は、おおむね  $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$

2 1. 光波工学の概要

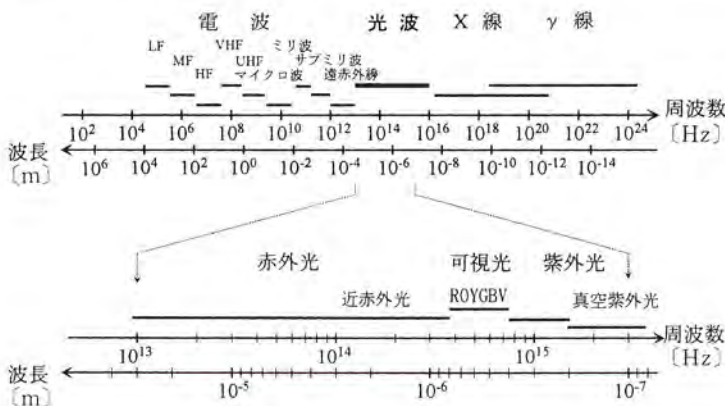


図 1.1 電磁波の区分と光波の領域

の範囲の波長を持つ電磁波である。この可視光にこれより波長の短い紫外光、および波長の長い赤外光を加えて、波長が $0.2 \mu\text{m}$ 程度から $30 \mu\text{m}$ 程度までの範囲の電磁波を、広い意味で**光波** (optical wave または light wave) と呼んでいる。したがって光波の周波数域はおよそ $10^{13} \text{ Hz} \sim 10^{15} \text{ Hz}$ であり、可視光のそれは $3.75 \times 10^{14} \text{ Hz} \sim 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$  ( $375 \sim 750 \text{ THz}$ ) である。

光の波長はミクロンオーダーで短いから、これより十分大きな空間における光の伝搬を取り扱うとき、光はその経路を表す線で表現できることが多い。この線は**光線** (ray) と呼ばれ、一様媒質中では直進する。光は古くから光線として認識されてきた。このような取扱いに基づく光学は**幾何光学** (geometrical optics) または**光線光学** (ray optics) と呼ばれ、現在も有効な近似的取扱いとして多くの知識と技術を提供している。

一方、先に述べたように光が波動であることを認識して取り扱うことにより、一般的な性格を明らかにしたり精密な解析を行う光学を**波動光学** (wave optics) と呼ぶ。波動光学により光の直進性、屈折・反射、回折、干渉など、ほとんどすべての巨視的光学現象を説明できる。

さらに近代の量子物理学により、光はエネルギーの観点からは粒子的な性質も持つことが示されている。すなわち、周波数が $f$ の光のエネルギーはプラ

プランクの定数を  $h (= 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})$  として

$$E = hf \quad (1.2)$$

で与えられる量を単位とする授受のみが可能である。このように光は波動であると同時にエネルギー量子の性質を示すという二重性を持っている。このエネルギー単位を光子 (photon) と呼ぶ。このような量子論的な取扱いは量子光学 (quantum optics) と呼ばれる。図 1.2 にそれぞれの観点の要点を図示した。光子の概念は、光波の発生・検出やきわめて微弱な光波の振舞いを取り扱う場合は重要であるが、本書では深く立ち入らない。

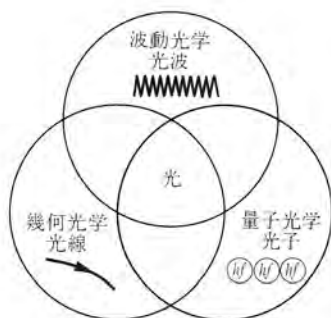


図 1.2 光学の概念と視点

## 1.2 コヒーレント光の特徴

光は波動であるにもかかわらず、波動に特徴的な干渉の現象は、比較的最近まで簡単に観察されなかった。古くから親しみの深い太陽光や電灯を含む高温物体からの放射で得られる光（これらは自然光と呼ばれる）は、単一の周波数の光波ではなく、多くの周波数成分を含んでいる。また、これらの光は空間の 1 方向でなく多くの方向に伝搬する成分からなっている。このため、各成分ごとには干渉があっても全体としては平均化されて顕著な干渉現象が現れない。

これに対して、時間的にも空間的にも純粋な光波、すなわち単一の周波数（単一波長）と規則的な伝搬方向（波面）を持つ光では、干渉の現象が容易かつ明確に観測される。このような性質をコヒーレンス (coherence) または可

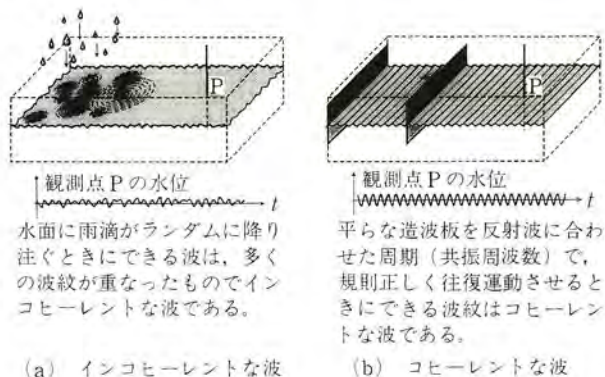


図 1.3 インコヒーレントな波とコヒーレントな波の模式図

干渉性といい、コヒーレンスを持つ光波を**コヒーレント光** (coherent light) と呼んでいる。先に述べた自然光はコヒーレンスを持たないので**インコヒーレント光** (incoherent light) と呼ばれる。図 1.3 にインコヒーレントな波動とコヒーレントな波動の概念を水面の波動を例にとって模式的に示す。

先に述べたように光波の周波数は非常に高く波長は短いから、これを利用すれば、一般に電波と呼ばれている電磁波を利用する場合に比べて、はるかに高速の信号伝達・処理や高密度の情報記録ができる可能性がある。すなわち、利用できる時間的領域ならびに空間的領域を大幅に拡大できる可能性がある。

インコヒーレント光では、顕著な干渉が観測されないことと同様の理由で、このような可能性を実現することはほとんどできなかった。しかしコヒーレント光を用いれば、光周波数に近いオーダの高速変調を行ったり光波長と同等の大きさのスポットに集光することができ、上記の可能性を実現できる。このことは理論的に容易に示すことができる。コヒーレント光は純粋な光波であるので数学的記述は簡単であり、解析の結果は実際のコヒーレント光に対して精度よく適用できるからである。また、コヒーレント光は非常に狭い周波数スペクトルを持ち極限まで集光できるから、小さな光パワーでも非常に大きなパワー密度となる場合がある。したがって物質の非線形な光学特性がしばしば顕著に現れ、これを利用して光波の波長変換や超高速制御を行うこともできる。

以上のようにコヒーレントな光波は、理論的取扱いが容易でその状態を光波の持つ本質的な限界近くまで人為的に制御することができるので、工学的な応用にきわめて好都合な性質を持っていることになる。

### 1.3 コヒーレント光の発生

コヒーレントな光は自然に存在せず、これを得るには1950年以後のレーザー (laser) の発明を待たなければならなかった。一つの周波数を持つ高周波 (電波) は増幅素子と共振回路を組み合わせた電子回路で発生することができる。これと同様に、光増幅器と光共振器を組み合わせることでコヒーレント光の発生装置を実現できる。

レーザーは light amplification by stimulated emission of radiation (輻射の誘導放射による光増幅) の略語であり、物質中電子のエネルギー準位間の光学遷移を利用し、準位間エネルギー差  $E$  に対して式(1.2)で決まる周波数  $f$  の光波を増幅するものである。この原理に基づく光増幅器を光共振器中に置くことによりレーザー発振が得られ、コヒーレント光を発生することができる。

最初に発振に成功したレーザーは活性物質としてルビーを用いた固体レーザーであったが、間もなくさらにコヒーレンスの高い光を発生する気体レーザーである He-Ne レーザーが実現された。その後、多くの各種固体レーザー、気体レーザーが開発され赤外・可視・紫外域で多くの発振線が得られるようになった。また、波長可変の色素レーザーや固体レーザー、超短光パルスを発生する各種レーザーも開発されている。さらに半導体レーザーの開発と発展により、レーザーは研究や実験のための装置として利用されるだけでなく、広く一般的な種々の応用に実用されるデバイスの地位を獲得した。

今日では、数百 THz の中心周波数に対して数 kHz の周波数幅 (相対幅  $10^{-11}$ ) のきわめてコヒーレンスの高いレーザーや、フェムト秒 ( $\text{fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) 領域のパルス幅の超短パルスレーザー、各領域の高出力レーザーなど、多くの高性能レーザーが利用できる。また半導体レーザーを中心として高性能化とともに小型・低

# 索 引

	<b>あ</b>		
アイコナル	40	遠視野像	125
アイコナル方程式	40	円筒波	19
アイソレーション比	222	円偏光	24
圧電弾性波	213	<b>お</b>	
アーム	49	オフアクシスホログラム	177
<b>い</b>		音響光学効果	211, 213
異常光線	194	音響光学性能指数	216
位相型グレーティング	85	音響光学偏向器	216
位相型ホログラム	181	音響光学変調器	216
位相整合	135	音響波	211
位相整合条件	145	<b>か</b>	
位相速度	26	開口数	127
一軸性結晶	190	回折	45, 64
異方性媒質	189	回折型光学素子	185
イメージホログラム	183	回折限界	75
インコヒーレンス	60	回折効率	85
インコヒーレント光	4	回折次数	84
インラインホログラム	178	回折積分	67
<b>う</b>		回折波	84
ウイナー-キンチンの定理	62	ガウシアンビーム	29
薄いレンズ	75	可干渉性	58
唸り	57	角度選択性	152, 155, 216
<b>え</b>		カー効果	197
エアリーディスク	74	重ね合せ積分	124
エアリーパターン	74	カットオフ	101
液晶	208	カットオフ条件	117
エタロン	53	干渉	45, 46
エネルギー密度	12	干渉計	48
エバネッセント波	38	干渉縞	46
エバネッセント波結合	157	干渉縞可視度	47
円形開口	73	干渉縞面	46
遠視野界	72	<b>き</b>	
		規格化周波数	100, 113
		幾何光学	2
		逆方向結合	135, 139
		吸収型グレーティング	85
		吸収係数	26
		球面波	18
		境界条件	11
		共役像	172
		局発波	57
		局部発振器	57
		禁止帯	162
		近視野像	125
	<b>く</b>		
		空間周波数	47
		空間周波数スペクトル	176
		空間周波数フィルタリ ン	81
		空間的コヒーレンス	63
		空間光情報処理	80
		空間微積分	81
		空間不変性	183
		矩形開口	73
		グース-ヘンヒェンシフト	39
		屈折	30
		——の法則	33
		屈折波	31
		屈折率楕円体	191
		屈折率面	195
		クラッド層	96
		クラマース-クローニ ヒ	207
		の関係式	66
		グリーン関数	82, 174
		グレーティング	166
		グレーティング結合器	166
		グレーティングベクトル	143
		グレーティングレンズ	185

グレーデッド屈折率導波路	104
群屈折率	28
群速度	27
群遅延時間	120
群遅延分散	120
<b>け</b>	
結合係数	140, 145
結像	77
結像特性	178
減衰	25
減衰係数	26
<b>こ</b>	
光学主軸	190
光学長	43
光学的異方性	189
光子	3
光線	2, 41
光線近似	42
光線光学	2
光線ベクトル	42
光線方程式	42
構造分散	122
光波	2
光波ホログラフィ	170
光路長	43
コヒーレンス	3, 58
コヒーレンス時間	61
コヒーレンス長	61
コヒーレント光	4, 58
コプレーナ結合	157
固有偏光	193
コリニア結合	159
コルニウの螺旋	70
混成モード	109
コンポリューション	81
<b>さ</b>	
再回折光学系	80
材料分散	122
3次元導波路	89

参照波	49, 170
<b>し</b>	
時間的コヒーレンス	60
時間波形	59
磁気光学効果	219
子午光線	118
自己相関関数	62
実効屈折率	92
1/4波長板	196
周期的媒質	143
集光	76
自由スペクトル範囲	55
集積光学	227
自由伝搬	15
周波数スペクトル	58
周波数分散	10
主要解	66
準単色光	60
常光線	194
冗長性	178
照明波	171
ジョーンズ行列	195, 209
ジョーンズベクトル	195
信号波	170
進行波	17
振幅型ホログラム	181
<b>す</b>	
ステップ屈折率導波路	95
ストークスパラメータ	24
スネルの法則	33
スリット	50, 72
<b>せ</b>	
正規モード	129, 138
積分主値	207
摂動	129
全反射	38
<b>そ</b>	
相反性	219

<b>た</b>	
体積ホログラム	181
楕円偏光	23
多重干渉	52
縦型変調器	202
縦モード	56
弾性波	211
端面結合	123
<b>ち</b>	
チャンネル導波路	89, 107
直接像	172
直線偏光	22
直線偏光モード	113
<b>て</b>	
定在波	50
転回点	105
電気光学効果	197
電気光学効果光変調器	200
電気光学定数	198
電磁波	1
伝送帯域	119
点像分布関数	79
伝搬定数	16, 91
伝搬ベクトル	16
<b>と</b>	
等位相面	16
透過型グレーティング	151
透過係数	34
透過波	31
透過率	35
導波モード	91
導波路型光変調器	204
導波路ホログラム	184
同方向結合	133, 138
特性方程式	99, 112
<b>に</b>	
二軸性結晶	190
2次波	64



- |                |               |                |         |               |              |
|----------------|---------------|----------------|---------|---------------|--------------|
| 1/2 波長板        | 197           | 光導波路           | 88      | フレネル          |              |
| 入射角            | 30            | 光ビーム           | 28      | —の鏡           | 47           |
| 入射面            | 30            | 光ファイバ          | 89, 109 | —の公式          | 34           |
| <b>ね</b>       |               |                |         |               |              |
| ねじれネマティック効果    | 209           | 微小光学           | 225     | フレネル積分        | 70           |
| <b>は</b>       |               |                |         |               |              |
| 媒質の方程式         | 9             | 歪みテンソル         | 211     | フレネルの双プリズム    | 47           |
| ハイブリッド型光集積回路   | 227           | 非相対特性          | 219     | フレネルホログラム     | 182          |
| 波数             | 14            | 左回り楕円偏光        | 23      | フレネル領域        | 69           |
| 波束             | 26            | ビート信号          | 57      | フレネル回折        | 69           |
| 波長選択性          | 152, 155, 216 | 瞳関数            | 73      | 分光器           | 84           |
| 波長板            | 195           | ビームウエスト        | 29      | 分散関係式         | 99           |
| 波長分散           | 10            | 比誘電率テンソル       | 190     | 分布帰還型レーザ      | 161          |
| 波動インピーダンス      | 20            | 表面弾性波          | 212     | 分布屈折率導波路      | 104          |
| 波動光学           | 2             | <b>ふ</b>       |         |               |              |
| 波動ベクトル         | 16            | ファブリーペロー干渉計    | 53      | 分布結合          | 130, 155     |
| 波動方程式          | 12            | ファラデー回転        | 220     | 分布ブラッグ反射器     | 161          |
| 波面             | 16            | ファラデー回転係数      | 221     | <b>へ</b>      |              |
| バルク型音響光学制御デバイス | 215           | ファラデー効果        | 220     | 平面波           | 16           |
| バルク型デバイス       | 200           | フィネス           | 55      | 平面波展開         | 68           |
| パワースベクトル       | 58            | フェルマーの原理       | 43      | 平面ホログラム       | 181          |
| パワー密度          | 12            | 複屈折            | 193     | ベクトル界         | 8            |
| 反射             | 30            | 複素表示           | 13      | ヘテロダイン検出      | 57           |
| 反射型グレーティング     | 153           | 複素ポインティングベクトル  | 15      | ベルデ定数         | 221          |
| 反射係数           | 34            | 物体波            | 170     | 偏光            | 21           |
| 反射波            | 31            | 物点             | 178     | 偏光子           | 22           |
| 反射率            | 35            | <b>ほ</b>       |         |               |              |
| バンドフィリング       | 206           | ブラウンホーファ回折     | 72      | ポアンカレ球        | 25           |
| 半波長電圧          | 202, 203      | ブラウンホーファホログラム  |         | ホイヘンス-フレネルの原理 | 65           |
| <b>ひ</b>       |               |                |         |               |              |
| 光              | 1             | ラム             | 183     | ポインティングベクトル   | 13           |
| 光 IC           | 227           | ブラッグ回折         | 149     | 方向性結合器        | 155          |
| 光アイソレータ        | 222           | ブラッグ条件         | 146     | 放射損失係数        | 165, 167     |
| 光集積回路          | 227           | フランツ-ケルディッシュ効果 | 206     | 放射モード         | 92, 102, 163 |
| 光周波数シフタ        | 217           | フーリエ変換         | 79      | ポッケルス効果       | 197          |
| 光弾性効果          | 211           | フーリエ変換ホログラム    |         | ホログラフィ        | 169          |
| 光弾性定数          | 213           |                | 183     | ホログラフィック光学素子  | 185          |
|                |               | プリズム結合器        | 166     | ホログラム         | 170          |
|                |               | プリルアンダイアグラム    | 161     | <b>ま</b>      |              |
|                |               | ブルースター角        | 36      | マイクロプロティクス    | 225          |
|                |               | ブルースターの法則      | 36      | マイクロフレネルレンズ   | 187          |
|                |               | ブレース化          | 87      |               |              |
|                |               | ブレーナ導波路        | 89, 94  |               |              |

マイケルソン干渉計	49	モード展開表示	94, 140	ランダム偏光	25
マクスウェルの方程式	8	モード同期	60		
マッハツェンダー干渉計	49	モード分散	121	り	
み		モノリシック	205	リーキー波	165
右回り楕円偏光	23	モノリシック型光集積回路	227	リップマン型ホログラム	184
む		や		量子光学	3
無偏光	25	ヤングの干渉縞	50	量子閉じ込めシュタルク効果	206
も		よ		臨界角	37
モード	91, 129	横型変調器	200	れ	
モード間直交性	93	横波	20	レーザ	5
モード結合	130	横モード	56	レーザ発振器	55
モード結合方程式	132, 140	ら		レリーフホログラム	182
モード結合理論	130	螺旋光線	118	レンズ	75
モード次数	100	ラマン-ナス回折	149		
~~~~~					
DBR	161	NA	127	TEM波	20
DBR レーザ	161	P 偏光	30	TE モード	95
DFB レーザ	161	S 偏光	30	TM モード	95

— 著者略歴 —

- 1973年 大阪大学工学部電子工学科卒業  
1978年 大阪大学大学院博士課程修了（電子工学専攻）  
工学博士（大阪大学）  
1978年 大阪大学助手  
1991年 大阪大学助教授  
2002年 大阪大学大学院教授  
2016年 大阪大学名誉教授  
2016年 大阪大学特任教授  
2020年 大和大学教授  
現在に至る

## 光波工学

Optical-Wave Engineering

© Toshiaki Suhara 1998

1998年 6月25日 初版第1刷発行

2021年 1月5日 初版第9刷発行

検印省略

著者 栖原敏明  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来真也  
印刷所 壮光舎印刷株式会社  
製本所 牧製本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)

ホームページ <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01141-8 C3355 Printed in Japan

(横尾)



**JCOPY** <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話 03-5244-5088, FAX 03-5244-5089, e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。