

光エレクトロニクス教科書シリーズ ①

# 新版 光エレクトロニクス入門

工学博士 西原 浩

工学博士 裏 升吾

共 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ている。

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

## 新版の執筆にあたって

本書が出版されて以来、15年経過し、その間多くの方々に本書をご利用いただきありがたく思っている。時代とともに光エレクトロニクス技術がどんどん進歩するので、内容を新しくする必要があり、7年目に改訂版を出して対応したが、それでは対応できなくなったので、15年目のこのたび全体を見直し不適當な部分を書き換え、また新しい項を加筆することにした。

光エレクトロニクスの応用分野の進展は、新しい波長の光源の開発によるところが大きい。青紫色や緑色半導体および発光ダイオードの出現とその実用化によって、光ディスクメモリ技術が進展した。そして三原色の小型光源がそろったので、小型レーザープロジェクタが新たに脚光を浴びるようになった。また光ファイバ通信ネットワークは、世界中に構築される一方で各家庭に接続される円熟期に入ったことに加え、コンピュータ内部の信号を光ファイバで接続する、いわゆる光インターコネクション技術が実用化されるようになった。

そのような事情に対応して、1章、6章、7章、9章、10章、12章のそれぞれ関連箇所の加筆、削除、書き換えを行った。また、今回「新版」発行にあたり、口絵を大幅に刷新した。

本書で取り扱っている内容は、学生諸君が将来どのような分野で活躍するにせよ修得しておくべき事柄であるので、ぜひ学びに努めていただきたいと思っている。

2012年12月

著者らしるす

## まえがき

電子技術と光とは密接な関係があり、その始まりは、1879年のエジソンによる白熱電球の発明にまで遡る。それ以来、光技術は電子技術（エレクトロニクス）の中での地位を確立してきた。

「光エレクトロニクス」の「光」はレーザー光を指しており、したがって、光エレクトロニクスとは、レーザー光をうまく利用したエレクトロニクスの新しい分野の学問を意味している。レーザーが開発されるにつれて、この光エレクトロニクスといわれる学問が急速に発展した。それに応じて、光エレクトロニクスに関連した講義が多くの大学でなされるようになった。

本書は工学部電気系の3年次、4年次学生、または高専の電気系学生、あるいは、この分野についてその基礎を急いで学んでみたい技術者を対象にまとめた光エレクトロニクスへの入門のための教科書である。光波の性質、光導波、レーザー、光制御、およびレーザー応用システムなどのレーザー光の基礎を、演習も含めて、ほぼ1年で学ぶことができるように内容を工夫したつもりである。執筆にあたっては、数式はできるだけ基礎的なものに限り、その代わりに物理的意味を述べることに重点をおき、記述はできるだけ平易になるように努めた。本書の講義を受ける前に、電磁気学、量子力学の基礎を学んでおくことが望ましい。

光エレクトロニクスは夢を持たせてくれる学問である。その中で中心を占めるレーザー光は実に興味深い光である。学生諸君は、なぜ、自然光ではなくてレーザー光が使われなければならないかをつねに念頭において勉強していただきたい。そうすれば、レーザー光の特徴は何か、レーザー光のどの特徴がその装置の中で生かされているかなど、自然に重要な点を的確に習得することができるであろう。将来、どんな専門分野に進むにしても、本書の内容程度は学んでおくこ

とが必要である。

本書は1～3, 5, 6, 8, 12章をおもに西原が, また4, 7, 9～11章をおもに裏がその執筆を担当した。また, 理解を深めていただけるように, 演習問題とその略解を付けた。両者で頻繁に打ち合わせをしたつもりであるが, 不十分な点が多々あるのではないかと恐れる。読者のご寛容と叱正を請う次第である。

本書では, 電気系工学分野での慣習にならって, 光の波動を  $e^{j(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})}$  で表現している。また, できるだけSI単位を使用するように心がけたが, 光の波長がマイクロ波の波長に比べて短いことによる光学分野での習わしに従って, mm,  $\mu\text{m}$ , nmなどの単位を使用しているが, 読者はこれらの単位についても慣れていただきたい。

本書が光エレクトロニクスの入門書として, この分野の勉強を志す方々に少しでもお役に立てれば, 著者らの存外の喜びである。

1997年10月 大阪大学吹田キャンパスにて

著者らしるす

## 改訂版にあたって

21世紀に入り, IT社会の発展とともに, 光エレクトロニクス分野の重要性はますます高まってきている。本著書を出版したのは1997年であり, あれから7年が経過した。今回の改訂版にあたっては, この間の技術面における目覚ましい進展を取り入れるべく一部大幅に改訂することにした。青紫色半導体レーザーおよび面発光レーザーの実用化が進んだことを6章の一部に書き加えた。また, 光ファイバ通信の分野では日本情報ハイウェイの完成や波長多重化技術の実用化が進み, 光メモリの分野ではレーザー光源の短波長化に刺激され, 光ディスクの大容量化へと進展した。これらを取り入れ, 9章と10章の記述を大幅に書き換えることにした。それに応じて口絵を刷新した。

本書がこの分野に興味を持ち, 新しく学ぶ方々の入門テキストとして今後も役立つことを願っている。

2005年2月

著者らしるす

# 目 次

## 1. 光エレクトロニクスの生い立ち

1.1 光エレクトロニクスの誕生 .....	1
1.2 光エレクトロニクスの発展 .....	2

## 2. レーザ光の特徴

2.1 自然光とレーザー光 .....	6
2.2 単 色 性 .....	8
2.3 指 向 性 .....	10
演 習 問 題 .....	12

## 3. 光波動と光線

3.1 波動光学による取扱い .....	13
3.1.1 マクスウェルの方程式 .....	13
3.1.2 平 面 波 .....	15
3.1.3 偏 光 .....	17
3.1.4 光波のエネルギー .....	19
3.2 光線光学による取扱い .....	21
3.2.1 光線と波面 .....	21
3.2.2 光線方程式 .....	23
3.2.3 光線の性質 .....	24
3.3 反射と屈折 .....	25
3.3.1 ホイヘンスの原理 .....	25
3.3.2 反射・屈折の法則 .....	26
3.4 干渉とコヒーレンス .....	30
3.4.1 2光波による干渉縞 .....	30
3.4.2 可干渉性 (コヒーレンス) .....	33
3.5 回 折 .....	37

3.5.1 回折現象	37
3.5.2 回折公式	38
3.5.3 単スリットからの回折	39
3.5.4 円形開口からの回折	41
3.5.5 周期構造からの回折 (ブラッグ回折)	42
3.6 集光	45
3.6.1 レンズによる集光	45
3.6.2 空間的コヒーレンスと集光	47
3.7 光学系と力学系の対応	48
演習問題	48

## 4. 光 導 波

4.1 光波の閉じ込めと光導波	50
4.2 導波モード	52
4.2.1 全反射	52
4.2.2 固有値方程式	53
4.2.3 実効屈折率と界分布	56
4.2.4 導波モードのカットオフ	59
4.3 チャンネル光導波路	61
4.4 光ファイバ	62
4.4.1 種類と特長	62
4.4.2 導波モード	63
4.4.3 固有値方程式	64
4.4.4 単一モード光ファイバ	65
4.4.5 分布屈折率多モード光ファイバ	66
演習問題	67

## 5. レーザの発振原理

5.1 光波と電子の相互作用	68
5.2 自然放出, 誘導放出および誘導吸収	69
5.3 反転分布	71
5.4 光増幅利得	72

5.5 光共振器と光子寿命 .....	74
5.6 発振条件 .....	76
演習問題 .....	78

## 6. レーザおよび発光ダイオード

6.1 レーザの分類 .....	79
6.2 気体レーザー .....	81
6.2.1 代表的な気体レーザー .....	81
6.2.2 動作原理 .....	82
6.2.3 構造と特性 .....	83
6.3 固体レーザー .....	85
6.3.1 ランプ光励起固体レーザー .....	85
6.3.2 半導体レーザー励起固体レーザー .....	86
6.4 半導体レーザー .....	88
6.4.1 代表的な半導体レーザー .....	88
6.4.2 電子遷移と化合物半導体結晶 .....	89
6.4.3 動作原理と反転分布 .....	91
6.4.4 光子の寿命時間とレート方程式 .....	94
6.4.5 発振特性 .....	96
6.4.6 半導体レーザーの展開 .....	103
6.5 発光ダイオード .....	104
6.5.1 可視光および赤外光発光ダイオード .....	104
6.5.2 白色発光ダイオード .....	106
演習問題 .....	106

## 7. 光受動素子

7.1 偏光素子 .....	108
7.1.1 位相板 .....	108
7.1.2 波長板 .....	109
7.1.3 偏光子 .....	110
7.1.4 光アイソレータ .....	112
7.2 波長フィルタ・分波素子 .....	112
7.2.1 プリズム .....	112



7.2.2	干渉フィルタ	113
7.2.3	多層膜反射と分布ブラッグ反射	114
7.2.4	波長分波グレーティング	116
7.3	非相反素子	117
7.3.1	ファラデー効果	117
7.3.2	光アイソレータ	118
7.4	光検出器	119
7.4.1	光電効果	119
7.4.2	pin ホトダイオードの構造	119
7.4.3	応答速度と検出感度	120
7.4.4	固体イメージセンサ	121
7.4.5	太陽電池	122
	演習問題	124

## 8. 光制御素子

8.1	光変調	125
8.1.1	変調方式	125
8.1.2	機械的光変調器	126
8.1.3	音響光学光変調器	127
8.1.4	電気光学光変調器	130
8.1.5	その他の電気的光変調器	134
8.2	光ビーム走査	136
8.2.1	機械的走査	136
8.2.2	電気的走査	138
8.2.3	鏡・対象物移動による走査	141
	演習問題	141

## 9. 光ファイバ通信

9.1	光ファイバ通信システム	143
9.2	コード変調と伝送信号	145
9.3	伝送帯域と分散	147
9.4	光ファイバの伝送損失	150
9.5	光多重技術	151

9.6 光増幅技術 .....	154
9.7 光インターコネクション .....	156
9.8 その他の光通信技術 .....	157
演習問題 .....	158

## 10. 光メモリ

10.1 光ディスクの特長 .....	159
10.2 ピックアップ光学系 .....	160
10.3 光ディスクの変遷 (CDからDVD, BDへ) .....	163
10.4 多波長用光ピックアップ .....	165
10.5 光ディスクの記録方式 .....	167
演習問題 .....	169

## 11. 光計測

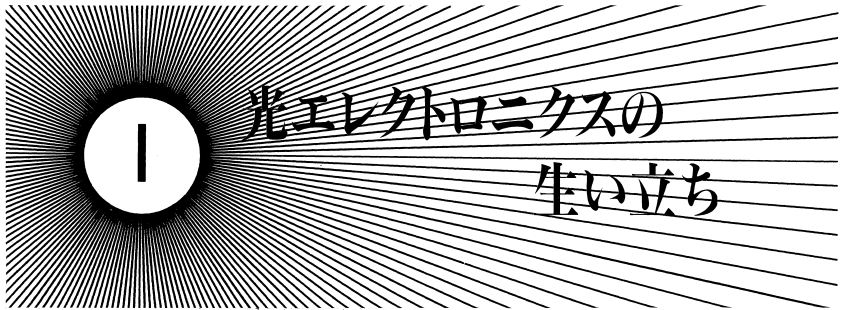
11.1 距離・長さ計測 .....	170
11.1.1 光パルス伝搬時間測定法 .....	170
11.1.2 光強度変調法 .....	171
11.2 変位計測 .....	173
11.2.1 レーザ干渉計による微小変位計測 .....	173
11.2.2 高精度干渉法 .....	175
11.2.3 エンコーダ .....	176
11.3 速度計測 .....	177
11.3.1 ドップラーシフトと速度計測 .....	177
11.3.2 サニャック効果と角速度計測 .....	179
11.4 面ひずみ計測 .....	180
11.5 電気量計測 .....	182
演習問題 .....	183

## 12. レーザ応用機器

12.1 レーザビームシステムの基本構成 .....	184
12.2 バーコード読取りシステム .....	185

x 目 次

12.3	レーザービームプリンタ	187
12.4	高品質カラー写真プリント	189
12.5	レーザーディスプレイ	190
付	録	193
参	考	
文	献	195
演	習	
問	題	
略	解	196
索	引	204



## 1.1 光エレクトロニクスの誕生

われわれは、日常の生活において、きわめて広い周波数領域にわたって存在する種々の電磁波を利用している。それらの電磁波を周波数または波長に応じて順に並べたものを電磁波の周波数スペクトルまたは波長スペクトルと呼んで

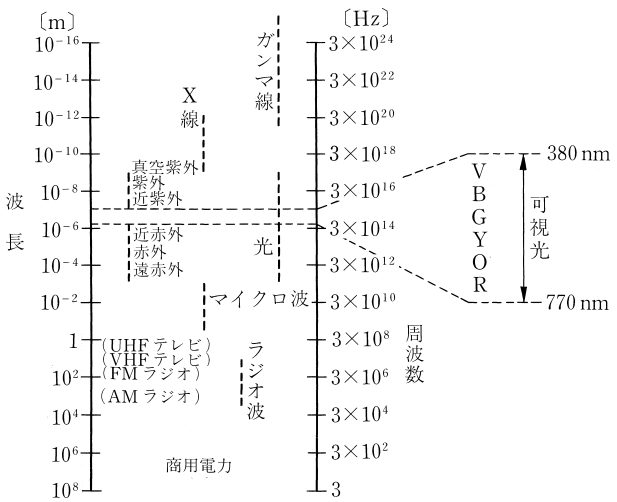


図 1.1 日常利用している電磁波の周波数スペクトルまたは波長スペクトル

## 2 1. 光エレクトロニクスの生い立ち

いる。このスペクトルの帯域には、その用途に応じて、X線、可視光、マイクロ波、ラジオ波などの名前が付けられている。図 1.1 は、そのスペクトルを図示したものである。波長の短いガンマ線から始まり、長い方の商用電力まで、波長比にすると  $10^{23}$  にもなる。

電磁波には、太陽からの光のように自然に発生するものと、人工的に発生させるものがあり、後者は人類社会の発展に寄与することがきわめて大きかった。1888年に、ドイツの物理学者ヘルツ（Hertz）が電磁波の発生にはじめて成功した。それ以来、人類はより短い波長のコヒーレント（可干渉）な電磁波をつぎつぎと発生させ、それらを電気通信による情報処理に巧みに利用しながら、電子技術を発展させてきた。いわば、電子技術の発展の歴史は、電磁波の発生波長の短縮化の歴史ともいえよう。

光が電磁波であることは、1864年にすでにマクスウェル（Maxwell）によって理論的に予見された。しかし、その後もインコヒーレント（非可干渉）な光波しか得ることができなかつたため、光技術の応用は限られ、通信をはじめとする情報処理などにあまり利用されず、コヒーレントな光源の出現が待たれていた。1960年にメイマン（Maiman）が、はじめてルビーレーザーの発振（波長  $0.6943\ \mu\text{m}$ ）に成功した。このように、われわれは、コヒーレントな電磁波発生短波長化の延長線上でレーザー光を手に入れることに成功したのである。その後、40年間、さまざまなレーザーが研究され、その波長範囲が広がり、これらの波動の性質を持ったレーザー光をエレクトロニクスとうまく融合させて、光エレクトロニクスと呼ばれる分野を誕生させ、確立させてきたのである。

## 1.2 光エレクトロニクスの発展

光には、太陽光で代表される自然光と人類が発明したレーザー光があるが、光エレクトロニクス（optoelectronics）とは、主として、レーザー光を利用する光学（laser optics）と電子工学（electronics）との融合学問領域を指す。したがって、対象とする光の波長範囲は、実用化されているレーザーの波長範囲に

なり、それは  $0.2\mu\text{m}$  ぐらいから数十  $\mu\text{m}$  ぐらいまでの範囲であろう。

光エレクトロニクスのエレクトロニクスにおける位置付けを図 1.2 に示した。レーザ光は波動の性質を持ち合わせているので、波動の特徴が発揮される光通信や光ディスクなどがこの領域のおもな応用システムになる。一方、自然光とエレクトロニクスとの融合領域は、本書の対象とはしないが、応用システムには、例えば、液晶ディスプレイなどの大産業がこれに属する。

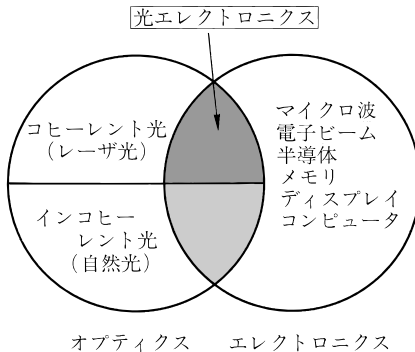


図 1.2 光エレクトロニクスの位置付け

さて、レーザ (laser) の語源は、“light amplification by stimulated emission of radiation” (誘導放出による光増幅) の頭文字をとったものであり、レーザ発振の特徴が的確に表されている。レーザ発展の歴史を振り返ってみると、レーザの理論的な準備は、1950年代に、旧ソ連 (現ロシア) の物理学者バソフ (Basov)、プロホロフ (Prokhorov)、アメリカの物理学者シャウロウ (Shawlow)、タウンズ (Townes) らによってなされていた。そして、まず、メーザ (maser : m は microwave の意) の研究がなされ、それに続いて最初のレーザの発振が1960年にアメリカのメイマン (Maiman) によってもたらされた。彼は、らせん状の励起用のランプの中心にルビー ( $\text{Cr}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ ) の棒状結晶をセットした構成で実験を行った。発振波長は  $0.6943\mu\text{m}$  の暗い赤色で、パルス動作であった。この歴史的な発明に続いて、He-Ne レーザなどの気体レーザをはじめ、種々のレーザが急速に開発され、20世紀の一大発明といわれるまでに成長した。

#### 4 1. 光エレクトロニクスの生い立ち

光エレクトロニクスを発展させる原動力になったのは、何ととっても、半導体レーザ（1970）と光ファイバであろう。半導体レーザは、1962年、アメリカのGE社、IBM社、MITの三つのグループによって、それぞれ独立に実験に成功したが、低温（77 K）パルス動作であった。1970年、当時ベル研究所にいた林、Panishらが、GaAlAs/GaAs結晶を用いたヘテロ接合型半導体レーザの室温での連続動作に成功した。

その後、結晶成長技術が格段に進歩し、数ボルトの電源で動作する、小さな体積から効率良く発光する半導体レーザの実用化は、光技術の分野を一変し、光通信の光源として、また光ディスクのピックアップの光源として、広く使われるようになった。そして、コンパクトディスク（CD）の普及に拍車をかけ、いまや、ほとんどの家庭に少なくとも1台のCD、DVD、またはBDプレーヤを見かけるまでになった。

光ファイバは、1968年にイギリスのカオ（Kao）、1970年にアメリカのコニング社の研究者らによって、石英材料を用いて、当時としては20 dB/kmという低伝送損失ファイバが発表されて以来、光ファイバ通信の可能性の気運が一挙に高まった。その後、主たる損失要因であるOH基を除く努力がなされ、1979年わが国のNTTが理論限界に近い0.2 dB/kmを達成した。

光ファイバの実用化により半導体レーザと相まって光ファイバ通信が急速に進展し、現在のような国内および国際ファイバネットワークが確立されるに至っている。半導体レーザと光ファイバの二つのデバイスの実用化は、長い間の材料研究者の努力のおかげである。そして、新しいハードウェアが技術の世界を一変させた良い例である。

以上のような歩みを経て、光エレクトロニクスは1970年代以降、着実な進展をみせてきた。そして、世の中は大容量情報を高速に伝送することのできる技術を要求するようになった。光ファイバ通信技術はまさにその要求に応えるべく、優れた特性をもつ光ファイバや、半導体レーザをはじめとする種々の光源素子や、多くの光回路部品が開発された。一方、大容量情報の記録可能な光ディスク技術が進展した。

光ファイバ通信技術や光ディスク技術の発展を見ると、光源である半導体レーザー素子の発展と密接に関連している。例えば、最初に見出された光ファイバの低損失波長領域は0.8マイクロメートル〔 $\mu\text{m}$ 〕（1 $\mu\text{m}$ =1000分の1mm）付近であったが、最初に開発された半導体レーザーの発振波長はたまたまこの波長帯域であったことが幸いした。光ファイバの低損失化が進み、1.3 $\mu\text{m}$ および1.5 $\mu\text{m}$ 低損失波長帯域が見つかり、それらに合わせた半導体レーザーが開発されることにより、光ファイバ通信技術が完成されていった。

光ディスク用に開発された半導体レーザーは0.78 $\mu\text{m}$ （赤外）であったが、記録密度を向上するために波長の短縮化が求められ、波長0.65 $\mu\text{m}$ （赤色）レーザーが開発されたためDVDが可能になり、続いて波長0.405 $\mu\text{m}$ （青紫色）の半導体レーザーが開発され、ブルーレイディスクが世に出るようになり、ディスク1枚あたりの記録容量が100GBにもなった。このように、光源である半導体レーザーの発展が光ディスク技術の新しい発展につながっていった。

また、半導体技術により青紫色LEDが発明されたために、照明光源がLED励起蛍光体に変わり、さらに、いまや世界中の道路交通標識や野外のディスプレイの光源が3色のLEDに置き換わりつつある。

今後も種々な光源が発明され、新しい応用分野を拡大していくと思われる。

光エレクトロニクスの応用システムは、このほか、測距などの光計測器、レーザーメスなどの医療機器、溶接をするレーザー加工機など、広い分野にわたっている。しかし、光エレクトロニクスの持っている多くの可能性を実現し発展させていくには、今後とも種々の新しい光材料や光デバイスのいっそうの研究開発が期待される。



# 索引

<b>あ</b>	
アイコナール	22
アイコナール方程式	22
青色半導体レーザ	103
青紫色半導体レーザ	103
赤色半導体レーザ	103
アクセス時間	137
アゾ系	167
<b>い</b>	
異常光線	130
位相速度	147
位相板	109
1次電気光学効果	130
一心双方向伝送方式	153
<b>う</b>	
ヴェルデ定数	182
ウォラストンプリズム	111
<b>え</b>	
エアリーディスク	41
液晶 TV	192
液晶パネル	191
エネルギー間隔	89
エネルギー変換効率	123
エバネッセント波	53
エピタキシャル成長	91
エルビウム添加ファイバ増幅器	155
円形開口からの回折	41
エンコーダ	176
円偏光	18
<b>お</b>	
応答速度	120
音響光学効果	128

音響光学光変調器	127
<b>か</b>	
開口数	51
カイザー	69
回折	37
回折限界	42
解像点数	139
回転速度一定	164
外部鏡型	83
外部光電効果	119
カオ	4
可干渉性	30, 33
書換え可能型	167
書換え可能型光ディスク	168
化合物半導体混晶	90
可視度	32
カットオフ周波数	120
価電子帯	89
干渉	30
干渉計型の導波路変調器	134
干渉縞	32
干渉フィルタ	113
間接遷移	90
<b>き</b>	
機械的走査	136
機械的光変調器	126
気体レーザ	80, 81
擬フェルミ準位	93
キャリヤ	145
キャリヤ周波数	145
キルヒホッフ	26
近軸光線方程式	24

<b>く</b>	
空間的コヒーレンス	34
空間伝送通信	157
空間光変調器	135
空間光変調素子	191
空間分割多重	151
空乏層	119
グース-ヘンヒェンシフト	52
クラッド	50
群屈折率	149
群速度	147
群遅延時間	147
<b>け</b>	
結晶相	168
検光子	110
<b>こ</b>	
光学軸	130
光子の寿命時間	75
光線光学	21
光線方程式	23
構造分散	149
光速度	14
光電子増倍管	119
光電流	119
誤差信号	161
固体レーザ	80, 85
古典力学	48
コヒーレンス	30, 33
コヒーレンス長	35
コヒーレント光通信	154
固有値方程式	55, 58, 64
<b>さ</b>	
再生専用型	167

材料分散	148	相変化	168	伝送帯域	147
サニャック効果	179	相変化光ディスク	168	伝導帯	89
<b>し</b>		双方向光送受信器	144, 153	伝搬定数	18, 56
シアニン	167	<b>た</b>		伝搬方向スペクトル	11
磁 界	13	太陽光	6	<b>と</b>	
時間的コヒーレンス	34	タウンズ	3	等位相面	53
磁気的エネルギー密度	19	楕円偏光	18, 109	導波コア	50
指向性	8	楕円偏光波	131	導波光	50
自然光	6	多重量子井戸構造	102	導波モード	51
自然放出	70	多層膜	114	——のカットオフ	59
実効屈折率	56	多値化	154	導波路型光変調器	134
時分割多重	151	多値信号	153	導波路分散	149
1/4 波長板	109	縦モード	78	ドップラー効果	177
シャウロウ	3	多モード発振	101	トラッキング誤差	162
周期構造からの回折	42	多モードファイバ	62	トラックピッチ	160
集 光	45	単一モード導波路	61	トランスデューサ	128
自由スペクトル間隔	114	単一モード発振	101	<b>な</b>	
周波数スペクトル	1, 9	単一モードファイバ	62	内部鏡型	83
周波数変調	125	単色光	15	内部光電効果	119
常光線	130	単色性	7, 9	<b>に</b>	
ショットキー障壁ホト ダイオード	119	単スリットからの回折	39	二重ヘテロ接合型	88
ショット雑音	121	<b>ち</b>		1/2 波長板	109
シンク関数	40	チタン・サファイアレーザ	87	<b>ね</b>	
真性層	119	直接遷移	90	熱雑音	121
振動鏡	136	直線偏光	18	<b>は</b>	
振幅変調	125	<b>つ</b>		ハイゼンベルグの不確定性 原理	48
<b>す</b>		追記型	167	白色発光ダイオード	104
スカラー波動方程式	14	追記型光ディスク	167	パケット通信	157
スネルの法則	27	ツリウム添加ファイバ 増幅器	155	バーコード	185
スペクトル	6	<b>て</b>		バソフ	3
スペクルノイズ	191	テクスチャ	123	波長スペクトル	1
スラブ光導波路	50	データトラック	159	波長分割多重	151
<b>せ</b>		電 界	13	バックライト	192
正弦波	8	電気光学光変調器	130	発光ダイオード	104
線スペクトル	9	電気的エネルギー密度	19	発振スペクトル	101
線速度一定	164	電気的走査	138	波動光学	21
<b>そ</b>		電磁波ノイズ	9	波動ベクトル	20
走査点数	137				

波動方程式	14			ポッケルス効果	130
波面	54		<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ふ</span>	ホトダイオード	119
パルスコード変調	145	ファイバラマン増幅器	156	ホログラム	179
パワー利得係数	74	ファブリーペロー型共振器		ポンピング	72
反射・屈折の法則	26		74	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ま</span>	
反射防止膜	123	ファラデー回転	117	マイケルソン干渉計	173
搬送波	145	ファラデー効果	117	マクスウェル	2
反転分布	71	フェルミ分布関数	93	——の方程式	13
半導体光増幅器	154	フォーカス誤差	162	マルチコアファイバ	151
半導体励起固体レーザ	86	複屈折性	111	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">み</span>	
半導体レーザ	81, 88	フロロシアン	162	緑色半導体レーザ	103
半波長電圧	133	フラウンホーファ回折	39	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">め</span>	
<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ひ</span>		プラズマTV	192	メイマン	2
光アイソレータ	112, 118	ブラッグ回折	42	メーザ	3
光インターコネクション	144, 156	ブラッグ角	128	面発光レーザ	103
光回線終端装置	144	ブラッグ条件	45	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">も</span>	
光時間分割多重	151	ブランク定数	48	モード屈折率	56
光ジャイロ	179	フーリエ変換	9	モード分散	149
光増幅	96	ブリズム	112	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ゆ</span>	
光第2高調波発生素子	81, 189	ブルースター角	27	有機EL	192
光チョップ	127	ブルースター窓	84	誘導吸収	70
光ディスク	159	フレネル回折	39	誘導放出	71
非点収差法	162	プロホロフ	3	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">よ</span>	
光導波路	50	分光器	116	横形光変調器	130
光配線	144, 157	分散	147	4分割ホトダイオード	162
光パラメトリック発振素子	81	分散関係式	56	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ら</span>	
光ピックアップ	160	分布帰還型構造	102	ラマン効果	156
光ファイバグレーティング	116	分布屈折率多モード	63	ランダム偏光	18
		ファイバ	63	ランド-グループ	167
		分布ブラッグ反射型構造	102	ランプ光励起固体レーザ	85
		<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">へ</span>		<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">り</span>	
光ファイバジャイロ	180	平面波	8, 15	量子力学	48
光ファイバ増幅器	155	劈開面	94	臨界角	29
光ファイバ通信	143	ヘテロ接合	88		
光ファイバ無線伝送	157	偏光子	110		
光ヘテロダイン検波	175	変調方式	125		
非晶質相	168	偏波保存ファイバ	63		
非線形光学効果	189	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">ほ</span>			
非相反な現象	117	ホイヘンスの原理	25		
ピックアップレンズ	160	ポインティングベクトル	19		
ピット	159				

れ		ろ
	レーザーディスプレイ 190	
	レーザードップラー速度計 178	
レイリー散乱 150	レーザービームプリンタ 187	ロータリーエンコーダ 177
レーザー 3, 71	レーザーロッド 86	
——の発振条件 76	レート方程式 94	わ
レーザー直接変調 136		ワイヤレス通信 157
~~~~~		
AO 変調器 127	DVD+RW 168	POS システム 186
AOC 156	DWDM 152	P 偏光 27
Ar イオンレーザー 85	EDFA 155	QPD 162
BD 159	EO 変調器 130	R 166
BD-R 167	E バンド 152	RAM 167
BD-RE 168	$f\theta$ 188	RE 167
BD-ROM 167	GI 多モードファイバ 63	ROM 167
CD 159	GS-EDFA 155	RW 167
CD-R 167	GS-TDFA 155	SDM 151
CD-ROM 167	He-Cd レーザ 85	SOA 154
CD-RW 168	He-Ne レーザ 82	S バンド 152
CMOS イメージセンサ 121	JAN マーク 185	S 偏光 27
C バンド 152	L バンド 152	TDFA 155
DVD 159, 167	O バンド 152	TDM 151
DVD-R 167	ONU 144	TE モード 51
DVD+R 167	OTDM 151	TM モード 51
DVD-RAM 168	PC 168	U バンド 152
DVD-ROM 167	PCM 145	WDM 151
DVD-RW 168	pin ホトダイオード 120	YAG レーザ 85

— 著者略歴 —

<b>西原 浩</b> (にしはら ひろし)	<b>裏 升吾</b> (うら しょうご)
1960年 大阪大学工学部通信工学科卒業	1982年 大阪大学工学部電気工学科卒業
1965年 大阪大学大学院博士課程修了 (通信工学専攻) 工学博士 (大阪大学)	1987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)
1973年 大阪大学助教授	1987年 大阪大学助手
1984年 大阪大学教授	1995年 大阪大学学内講師
2001年 福井工業大学教授 大阪大学名誉教授	2000年 京都工芸繊維大学助教授
2002年 放送大学教授	2004年 京都工芸繊維大学教授 現在に至る
2008年 放送大学退職	

## 新版 光エレクトロニクス入門

Introduction to Optoelectronics (New Edition)

© Hiroshi Nishihara, Shogo Ura 1997, 2005, 2013

1997年 11月 25日 初版第 1 刷発行  
2005年 4月 5日 初版第 9 刷発行 (改訂版)  
2012年 9月 30日 初版第 16 刷発行 (改訂版)  
2013年 4月 30日 新版第 1 刷発行  
2019年 2月 25日 新版第 6 刷発行

検印省略

著 者 西 原 浩  
裏 升 吾  
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 <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01151-7 C3355 Printed in Japan

(高橋)



**JSCOPY** <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。