

序

当学会が“電子通信学会大学講座”を企画刊行したのは約20年前のことであった。その当時のわが国の経済状態は、現在からみるとまことに哀れなものであったといわざるを得ない。それが現在のようなかりにも経済大国といわれるようになったことは、全国民の勤勉努力の賜物であることはいうまでもないが、上記大学講座の貢献も大きかったことは、誇ってもよいと思うものである。そのことは37種、総計約100万冊を刊行した事実によって裏付けされよう。

ところで、周知のとおり、電子工学、通信工学の進歩発展はまことに目覚ましいものであるため、さしもの“大学講座”も現状のままでは時代の要請にそぐわないものが多くなり、わが学会としては全面的にこれを新しくすることとした。このような次第で新しく刊行される“大学シリーズ”は従来のとおり電子工学、通信工学の分野は勿論のこと、さらに関連の深い情報工学、電力工学の分野をも包含し、これら最新の学問・技術を特に平易に叙述した学部レベルの教科書を目指し、1冊当りは大学の講義2単位を標準として全62巻を刊行することとした。

当委員会として特に意を用いたことの一つは、これら62巻の著者の選定であって、当該科目を講義した経験があること、また特定の大学に集中しないことなどに十分意を尽したつもりである。

次に修学上の心得を参考までに二、三述べておこう。

- ① “初心のほどはかたはしより文義を解せんとはすべからず。まず、大抵にさらさらと見て、他の書にうつり、これやかれやと読みては、又さきによみたる書へ立かえりつつ、幾遍も読むうちには、始めに聞えざりし事も、そろそろと聞ゆるようになりゆくもの也。” 本居宣長——ういよまぶみ初山踏

- ② “古人の跡を求めず、古人の求めたる所を求めよ。” 芭蕉——風俗文選^{もん}
換言すれば、本に書いてある知識を学ぶのではなく、その元である考え方を自分のものとせよということであろう。
- ③ “格に入りて格を出でざる時は狭く、又格に入らざる時は邪路にはしる。格に入り格を出でてはじめて自在を得べし。” 芭蕉——祖翁口訣^{そおうくけつ}
われわれの場合、格とは学問における定石とみてよいであろう。
- ④ 教科書で勉強する場合、どこが essential で、どこが trivial かを識別することは極めて大切である。
- ⑤ “習学これを聞^{もん}といい、絶学これを鄰^{りん}といい、この二者を過ぐる、これを真過^{じょう}という。” 肇法師——宝蔵論
ここで絶学とは、格に入って格を離れたところをいう。
- ⑥ 常に (i) 疑問を多くもつこと、(ii) 質問を多くすること、(iii) なるべく多く先生をやり込めること等々を心掛けるべきである。
- ⑦ 書物の奴隷になってはいけない。

要するに、生産技術を master したわが国のこれからなすべきことは、世界の人々に貢献し喜んでもらえる大きな独創的技術革新をなすことでなければならぬ。

これからの日本を背負って立つ若い人々よ、このことを念頭において、ただ単に教科書に書いてあることを覚えるだけでなく、考え出す力を養って、独創力を発揮すべく勉強されるよう切望するものである。

昭和 55 年 7 月 1 日

電子通信学会教科書委員会

委員長 川上 正光

新版執筆にあたって

本書が多くの皆様方から愛読されて、発刊後の 1/4 世紀を経たことは、基礎の原理を中心に執筆した筆者の望外の喜びであった。本書が執筆された 1986 年は、光ディスクが漸く普及しはじめ、また、本格的な光ファイバ通信の幹線建設が始まろうとしていた頃であった。その後、光技術は目覚ましい発展を遂げ、2010 年には、商用の光通信システムの性能指数は、1979 年頃の最初の商用光通信システムと比べて、30 年間でじつに 1 億倍に増加した。

こうして、インターネットの展開は、半導体レーザーがその中核技術の一つとなっている光ファイバ通信の発展なしには、達成され得なかったであろうと言われるに至った。また、この間に液晶平面ディスプレイが発展し、さらに、CCD などの画像センサが普及し、効率の高い発光ダイオードが照明用に、そして太陽電池が電力発生用に著しく発展した。

このように、今日に至るまで光技術、そしてその基となっている光デバイスは予想をはるかに超えて発展し、社会や生活のあり方、産業や経済のあり方を大きく変えてきた。光システムそして光デバイスは、今後、いっそう大きな飛躍に向けた転換期にさしかかっている。

昨 2010 年は、レーザー誕生 50 周年で、光技術は社会の隅々にまで波及して重要性を増してきた。この際、光デバイスの発展を見据えて、この間の変化を見直して書き直し、新版として出版することになった。動的単一モードレーザーや面発光レーザーなどの基礎的な考えは、独立させて学びやすくした。さらに、光センサや光ディスプレイを充実した。他方では、新しいデバイスの基となっている現象に遭遇するごとに、その原理と数学の基礎を正確に伝えようという考え方は一貫させた。そして、光デバイスの応用分野は新しい発展に対応して書

き直し，参考文献を広く追加した。

この新版の出版までの間に，上林利生長岡技術科学大学教授は数式表現を厳密にチェックされ，また，東京工業大学の伊賀健一学長，荒井滋久，小山二三夫，浅田雅洋の諸教授，西山伸彦准教授のご助力，また，本書のご利用者や読者の方々からの貴重なご意見，そしてコロナ社のご努力と電子情報通信学会の理解がなければ，この新版発刊はあり得なかったであろう。各位に深謝する次第である。

本書の校正段階で，千年に一度と言われる東日本大震災が起こり，未曾有の巨大津波による大災害によって，多くの尊い命が奪われるとともに，原発など技術のリスクへの課題も明かにされた。ここに謹んで哀悼の意を捧げるとともに，海外から寄せられた多大な温情に感謝しつつ，この困難の中から立ち上がろうとの願いをこめて。

平成 23 年 5 月

末 松 安 晴

旧版のはしがき

光エレクトロニクスの進歩につれて、それまでは主にテレビジョンの撮像や表示用に限られた観があった光とエレクトロニクスの関連技術が急速に密度の濃いものになってきた。特に、レーザが発明されてから 1/4 世紀が経過した今日、レーザ技術がようやく信頼性のある技術に発展した結果として、光通信や光記録・再生等の基本技術が光エレクトロニクスの主要な分野に定着してきた。それに伴って、光エレクトロニクスはエレクトロニクス技術の中に重要な地位を占めるに至った。光デバイスはこの光エレクトロニクス技術の中核をなすものである。

これまでのエレクトロニクスで用いられている電子デバイスの動作原理は、電子やホールの運動現象に依存している。これに対して、光デバイスでは固体中の電子と光波の相互作用現象が主役をなし、これまでにない新しい現象として登場した。したがって、初めて光デバイスを学ぶ者が最もとまどうのが、なぜ光が出るのか、なぜ光が増幅されるのか、等の疑問についてであろう。

本書を執筆するに際して、この疑問を避けて通ることが困難であるとの結論に達するのにはかなり長い時間を必要とした。その理由は、この固体中の電子と光波の相互作用の現象が、これまでエレクトロニクスで常識として教えられてきた、固体中の電子の運動の基礎理論からはかなり距離があるからである。

幸いと言うべきか不幸と言うべきか、筆者は学生のころにトランジスタが世に出てきた時期に遭遇して、固体中の電子の運動を理解するのに、いま、学生諸君が光と電子の相互作用の現象を理解するのと同様の困惑を感じた一人であった。しかし、間もなくこのトランジスタの難解な理論を電気の学生やエンジニアは難なく克服した。同様にして、いまは難しくみえる光デバイスの基礎理論についても、若い学生諸君はやがて容易に克服するであろうと考えるに至ったのである。東京工業大学の電気の学生が講義を通してこの洗礼を受け、受難を経験した。その結論は、学部学生にもこの基礎理論を理解してもらう必要があり、かつ理解され得るものであるとの方向に傾いた。

このような観点から、本書は光デバイスの基礎となる理論および事項の展開に最初の半分を費やし、後半で各種の光デバイスについて述べた。第1章は、光デバイスへの導入であり、その背景となる光エレクトロニクス、および光デバイスの形態について述べた。

本書で扱う光デバイスの基礎事項として、まず、第2章で量子力学の基本的な事項を述べた。次いで、第3章では半導体において光がどのように放出され、吸収され、そして増幅されるかについて現象論的に解説した。これらの準備のもとに、第4章において光が増幅される現象の基礎を量子論を用いて固め、光波と電子の相互作用の現象について、なじみ深い電磁気学の分極に置き換えて説明した。さらに、第5章では光デバイスに多用される光導波路の基本的な性質について説明した。ただし、デバイス特性のみに興味がある場合には、これらの部分は簡略にすませてもよい。

光デバイス自体については第6章以降で扱った。第6章と第7章では主として半導体レーザや発光ダイオード等の光源の性質の解析とその特性、および、その変調特性について述べた。第8章では受光デバイスとその受光感度、および撮像・表示デバイスについて概説した。第9章では光回路に用いられる各種の光コンポーネントや、光エレクトロニクスの主要な光伝送手段に用いられる光ファイバの性質について述べた。第10章では光デバイスの応用について、光エレクトロニクスの観点から解説した。

本書は上に述べたように、やや新しい趣向で執筆したが、浅学非才のため至らない箇所が多いことを恐れている。今後大方の叱正を得て改良を加えたい。

本書の執筆に際しては、伊賀健一教授や古屋一仁助教授、特に荒井滋久講師や浅田雅洋博士らの傾聴に値する意見を受け入れ、また難易度については研究室の学生諸君の意見を取り入れた。ここに熱心な御協力を感謝する次第である。また、自身最初の試みとして、時の流れに従ってすべてワードプロセッサを用いて執筆した。最後に、電子通信学会教科書委員会の先生方、およびコロナ社の編集の方々には出版に際して大変お世話になった。ここに、深く感謝申し上げます。次第である。

昭和61年2月

雪の中でCDを聞きながら

末 松 安 晴

目 次

1. 光デバイスの光エレクトロニクスの背景

1.1 はじめに	1
1.2 光エレクトロニクス分野の背景	3
1.3 光デバイスと波長帯	6
1.4 光デバイスの基礎	7

2. 量子力学の基礎

2.1 量子力学発達の背景と物質の粒子・波動の2面性	8
2.2 シュレディンガーの波動方程式	11
2.3 波動関数	13
2.4 括弧ベクトル：ブラベクトルとケットベクトル	15
2.5 期待値と跡	17
演習問題	18

3. 半導体による発光と吸収

3.1 電子遷移	19
3.2 自然放出と吸収および誘導放出	22
3.3 電子の寿命	24
3.4 半導体の電気的性質	27
3.5 ヘテロ構造とキャリアの注入ならびに共鳴トンネル注入	32
3.5.1 ヘテロ接合	32
3.5.2 ヘテロ接合の電圧電流特性	34

3.5.3 共鳴トンネル注入	37
3.6 化合物半導体とエネルギー間隔	37
3.6.1 化合物半導体のエネルギー間隔	37
3.6.2 半導体の屈折率と吸収係数	40
3.6.3 混晶のエピタキシー	44
演習問題	45
4. 光波と電子の相互作用	
4.1 はじめに	46
4.2 波動方程式による光増幅の表現	48
4.3 密度行列による分極の表し方	51
4.4 密度行列の運動方程式	53
4.5 2準位系近似の物質的分極と光の増幅	56
4.6 誘導放出と電子遷移：レート方程式	61
4.7 電子遷移と誘導放出のまとめ	63
4.8 多準位系の分極	63
4.9 量子構造とひずみ量子構造	65
演習問題	68
5. 光誘電体導波路	
5.1 光導波路と集光	69
5.2 導波モード	72
5.3 等価屈折率と閉じ込め係数	77
5.4 二次元導波路—矩形導波路—	79
5.5 光伝搬の電力整合と曲り損失	81
5.6 周期構造	84
5.7 集光と出射	89
演習問題	91

6. 半導体レーザーと発光デバイス

6.1 はじめに	92
6.2 発光ダイオード (LED)	93
6.3 半導体レーザー (レーザーダイオード, LD)	98
6.3.1 はじめに	98
6.3.2 半導体レーザーの基本的構造	100
6.3.3 半導体レーザーの発振しきい値と光出力	102
6.4 半導体レーザーの波長	107
6.5 半導体レーザーの方程式	112
6.6 ファブリ・ペロ (FP) 型半導体レーザー (多モードレーザー)	114
6.7 動的単一モードレーザー (単一モードレーザー)	118
6.8 垂直共振器面発光レーザー (VCSEL)	129
6.9 量子カスケードレーザー	131
6.10 光増幅器	132
6.11 発光ダイオードと半導体レーザーの光波の特質の比較	133
6.12 各種のレーザー	135
演習問題	138

7. 発光デバイスの直接変調

7.1 光変調	139
7.2 半導体レーザーの直接変調	141
7.3 発光ダイオードの直接変調	150
演習問題	152

8. 受光・撮像・表示デバイス

8.1 はじめに	153
8.2 光検出器	154
8.3 pin フォトダイオード	155

8.4	アバランシェ・フォトダイオード (APD)	158
8.5	実際の光検出器.....	162
8.6	撮像デバイス.....	164
8.7	太陽電池.....	169
8.8	表示デバイス.....	170
	演習問題.....	175

9. 光線路と光コンポーネント

9.1	光ファイバ.....	176
9.2	光ファイバと光デバイスの結合.....	184
9.3	光回路素子.....	186
9.4	光変調器, 光スイッチ, 光偏向器.....	191
9.5	光集積回路.....	196
	演習問題.....	200

10. 光デバイスの応用

10.1	はじめに.....	201
10.2	光通信.....	201
10.3	光情報記録・再生.....	203
10.4	像情報の入出力.....	204
10.5	光情報処理.....	204
10.6	光計測と医療への応用.....	204
10.7	光電力応用.....	206

付	録 (分布反射器とこれを用いたレーザ共振回路の一般解析)	207
文	献.....	208
	演習問題解答.....	211
索	引.....	224



● 光デバイスの光エレクトロニクスの背景

「物は栄えればやがて衰え、時は窮まればやがて転じ、あるときは質に、あるときは文に傾くのは、自然の法則に従った変化なのである。」

(史記：野口訳)

1.1 はじめに

光エレクトロニクスは、次に述べるような、3面的な特徴をもつ技術である。まず、表 1.1 に示すように、

1) 光が宇宙で最高速で伝わる電磁波として、情報の伝送および処理にかかわる電子通信工学的な技術的側面をもち、

表 1.1 光エレクトロニクス技術の特徴

-
- | |
|--------------------------|
| 1) 電 磁 波 |
| 光 通 信 |
| 周波数大：大容量情報伝送（時間領域） |
| 集 光 性：高密度伝送（空間領域） |
| 光コンピューティング |
| 2) 視 覚 |
| 像情報：可視光：視感度 |
| 照明、パネルディスプレイ |
| 3) 高エネルギー |
| 化学反応：光子のエネルギー (hf) 大 |
| 写真フィルム |
| 殺 菌 |
| 4) エネルギー密度大 |
| 情報記録、読出し |
| 加 工 |
| 医 療 |
| 5) 非接触計測 |
| セ ン サ |
| 6) 太陽エネルギーの利用 |
| 太陽電池 |
-

2) 光のスペクトルが目に感じる視覚の波長帯にあるために、人間の情報捕獲に直接にかかわる像情報の検出や処理および表示などに用いられて、画像工学的な技術的側面をもち、さらに、

3) 光は小さな空間に集光できるので光記録や高密度のエネルギー利用に応用されて、光エネルギー技術的側面をも合わせてもっている。

他方では、印刷や写真技術、照明や太陽エネルギー利用技術もその基礎になっており、このように光エレクトロニクスは人間の社会生活に直結した諸技術と深いかわりがある。光エレクトロニクスはオプトエレクトロニクス、あるいは光・量子エレクトロニクス、さらにフォトンクスなどともいわれ、光を手段に用いる電子技術を包括した技術である。

最初、テレビジョン技術に基づいて出現した光電管や撮像管、ブラウン管(CRT)などは、光と電子の変換作用を行うための装置であり、画像工学の分野や計測に用いられている。その後、発光ダイオードや受光デバイスのような半導体光デバイスが出現した。さらに光デバイスや電子デバイスなどを組み合わせた、フォトカプラのような光学的手段を応用した光・電子デバイス技術が出現し、当初はこのような分野がオプトエレクトロニクスと呼ばれた。現在は、この言葉がもっと広い意味に用いられている。

光エレクトロニクスや光・量子エレクトロニクスなどという言葉が一般的になり始めたのは、レーザが出現してからのことである。レーザの原理に繋がった誘導放出の考えは、1917年にA.アインシュタインによって認識された。1953年にはJ.von ノイマンが講義の中で、半導体を含めて電子の熱平衡を崩せば光増幅できることを述べ、1956年にはA.L.SharlowとC.H.Townesが「光メーザ」(今日のレーザ)を提案した。1960年にMaimanによってルビーレーザが発明され、1961年にはJavan, Bennett, HerriotによってHe-Neガスレーザが、さらに1962年にはHallら[†], Nathanら^{†2}およびQuistら^{†3}の各グループ

[†] Hall, Fenner, Kingsley, Soltys, Carlson

^{†2} Nathan, Dumke, Burns, Dill, Lasher

^{†3} Quist, Rediker, Keyes, Krag, Lax, McWhoter, Zeiger

によって、それぞれ独立に GaAs 半導体レーザ、そして *Holonyak* らにより GaAsP 半導体レーザ[†] のパルス動作の実験が成功した。引き続いて、その他の各種のレーザが開発されるとともに、その応用分野が開拓されていった。

レーザ出現後の 10 年間は、このようなレーザの開発とコヒーレント光を用いたさまざまな可能性追求の検討がなされ、レーザなどに関する量子電子工学の基礎が確立された。そして、各種レーザの開発、光材料の開発、計測への応用、光通信への応用、光記録への応用、医療への応用、レーザ加工、核融合や化学反応への応用などの、さまざまな開発や試みが行われて、次第にその長所と短所や限界が明らかにされていった。この間に、テレビジョンと電子計算機の普及によって画像表示・伝送・処理の技術が急速な進歩を遂げた。また、コピー機の発達は事務処理の方法を一新した。

1980 年以降においては、これらの研究開発の成果が結実し始め、現在では、光ファイバ通信は急速に普及が進んで情報通信の社会基盤となり、インターネットなどの通信技術の革新に貢献している。一方では、大容量光メモリなどの光ディスク技術の開発・普及が進んだ。また、他方では、レーザ光による切断・溶接・焼入れなどの加工技術の開発・普及、計測、光レジスト露光源、材料製造、医療など、さらにレーザ照明や芸術などの各種の形でレーザ技術の開発・普及が進んでいる。また、液晶や有機 EL によるパネルディスプレイ、発光ダイオードによる照明、太陽光による電力発生など、光エレクトロニクスは極めて広範な分野にまたがって発達しているのが現状である。

1.2 光エレクトロニクス分野の背景

光エレクトロニクスの基盤技術は、**図 1.1** に示すように、主として、

1) 時系列的な電気信号(情報)の伝送・処理機能を果たす電子工学的および高周波工学的技術と、

[†] N.Holonyak Jr., S.F.Bevacqua (1962)

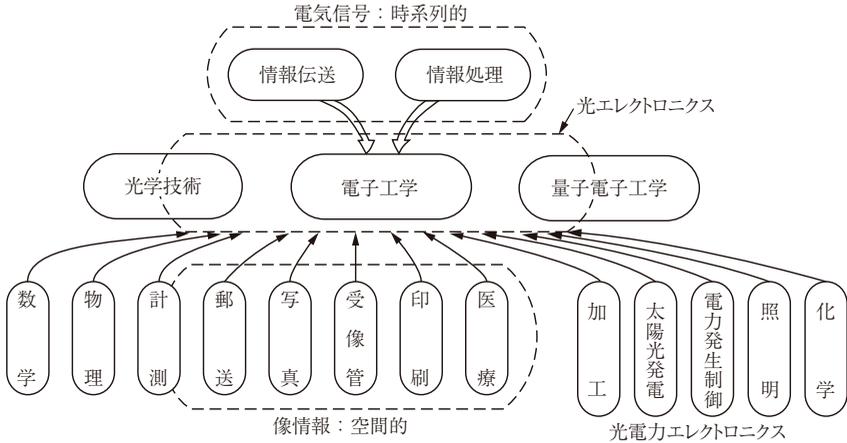


図 1.1 光エレクトロニクスの背景

2) 空間的な画像（像情報）の処理・記録機能を果たす光学的技術，光情報処理技術，ディスプレイ，および照明，

3) エネルギーの発生，加工，検出・変換機能，センサなどから成る。

このように，光エレクトロニクスは光学的技術，量子電子工学と電子工学や電力工学の融合技術であり，電子工学の機能を多様化，高性能化させるのに役立っている。

図 1.2 は，通信と情報伝送・処理および像情報技術のみに着目した光エレクトロニクス装置と応用分野を表している。電気通信は耳を介する音声情報の伝送に加えて，情報収集能力が格段に大きな視覚を仲介にした，より自然な映像通信の比重が増加している。レーザーディスクを通して光記録・メモリ・再生技術が，電子計算機や家電製品への光の応用を広げている。また，平面表示装置（ディスプレイ）の発展は著しい。いずれにしろ，これらの技術の主要な応用は，人体機能を中心にして進展しているようである。

これらの，光エレクトロニクス関連の技術分野をまとめると次のようになる。

- 1) 情報伝送：光通信
- 2) 情報記録・再生：光ディスク，電子印刷
- 3) 像情報の入出力：TV，平面表示，プリンタ，スキャナ

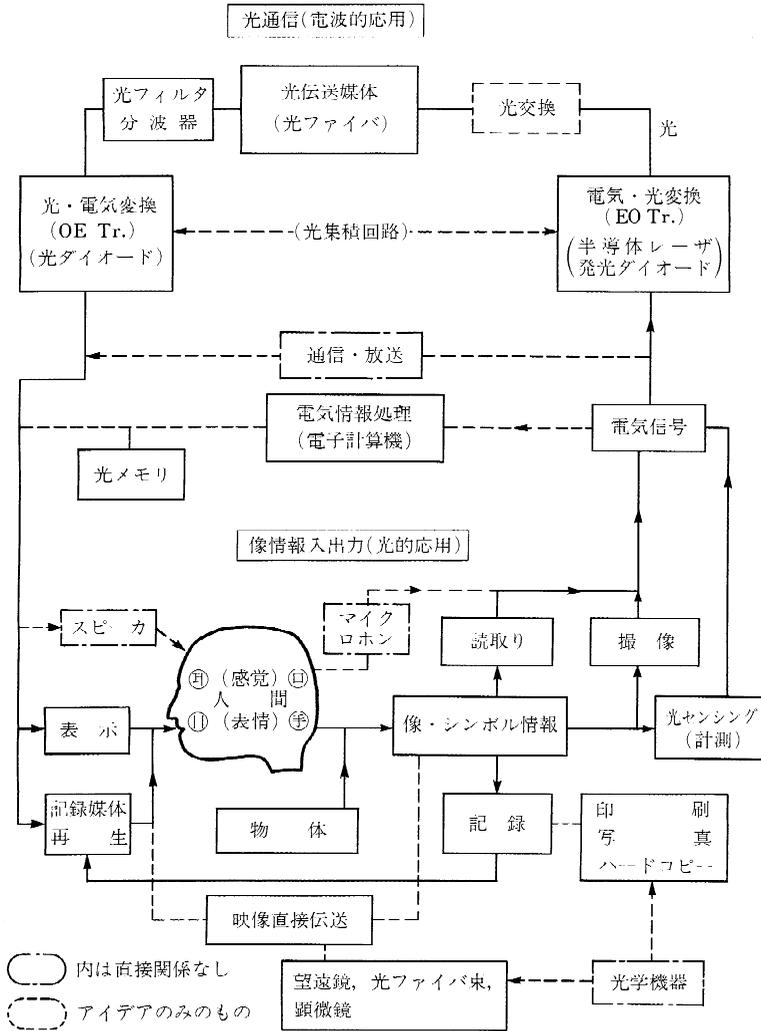


図 1.2 光エレクトロニクスと情報伝送・処理

- 4) 光情報処理：画像処理，光コンピューティング
- 5) 光計測：各種センサ，ファイバセンサ（ファイバ・ジャイロスコープ）
- 6) 医療応用：マイクロ医療，レーザ支援医療
- 7) 光電力エレクトロニクス：太陽光発電，照明，加工，発生

8) 材料プロセスへの応用：光援用材料プロセス，光レジスト露光技術，同位体分離

9) レーザ照明・芸術

1.3 光デバイスと波長帯

光デバイスは主に半導体を用いて作られ，次のような種類がある．

- 1) 光源：発光ダイオード，半導体レーザー
- 2) 検出：フォトダイオード
- 3) 撮像・表示デバイス

このような光デバイスは，電子デバイスの助けなしには動作できない．そして，光コンポーネントと光線路は光デバイスと密接に関連して用いられる光特有の部品である．

本書では，主に光情報伝送と光記録および映像情報技術用などの光エレクトロニクスで主要な役割を果たしている各種の光デバイスについて述べる．光デバイスは，個々の用途によって異なる波長で用いられる．

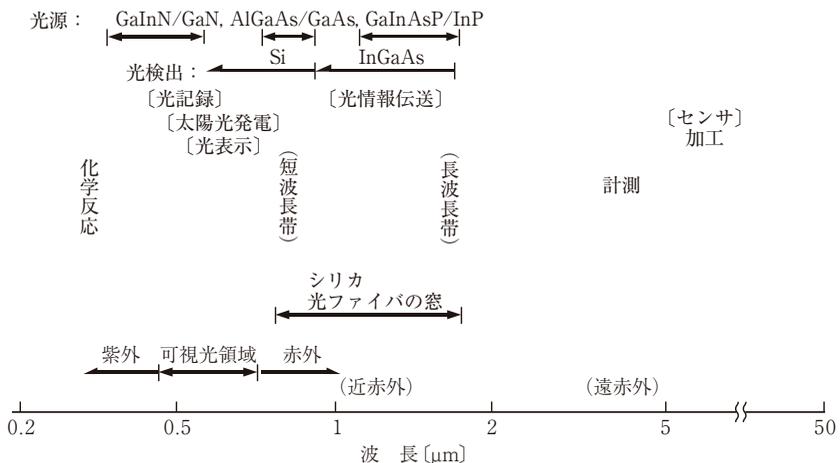


図 1.3 波長範囲と応用

索 引

[A]	物質の分極	57	導波モード	75
アバランシェ・フォトダイオード	物理変数	18	導波路型光変調器	195
154, 158	[C]		導光板	172
アイデンティティオペレータ	CCD 撮像デバイス	153, 166	動的波長シフト	112, 128, 149
17	CD	203	動的単一モードレーザ	100, 118, 181, 201
アインシュタインの関係	CVD	176	同調機能	119
アナライザ	[D]		DR レーザ	121
172	大容量記憶装置	203	DSM	100
暗電流	DBR	84, 121	—レーザ	99, 118
162	デバイス効率	107	DVD	203
APD	伝導帯	19	D-WDM	202
154, 158	電 界	48	[E]	
アレー導波路	電荷結合デバイス	166	エキシマレーザ	137
186	電荷中性の原理	25	液相エピタキシャル成長技術	45
α パラメータ	電気光学結晶	191	液 晶	172
111	電気双極子	22, 23	—ディスプレイ	171
Ar イオンレーザ	電気双極子モーメント	53, 56	—表示	171
137	伝搬定数	74	EL 表示	173
AWG	電力変換効率	134	EML	128, 197
186	電流密度	48	エネルギー閉じ込め係数	77
[B]	電流増倍率	160	エネルギー準位	20
バックライト	電 子	24	遠赤外領域	132
172	—放射表示	174	演算子	17
バルク型光変調器	—コピー	203	エピタキシャル成長技術	43, 45
193	—の質量	57	エレクトロルミネセンス	173
バルク状材料	—の有効質量	57	[F]	
49	—の寿命	26	ファブリ・ペロ型半導体	
微量量子効率	—遷移	20	レーザ	114
106	—親和力	32	ファブリ・ペロ共振器	100
微分抵抗	電束密度	48	ファイバオプティクス	205
37, 117	伝送帯域幅	181	ファラデー効果	188
ボルツマン定数, 分布	デジタル・ビデオディスク	203	フェルミ分布関数	30
23	装置	203	フォノン	21
分 極	ド・ブロイの物質波	11	フォトリソグラフィ	88
46, 48	ドップラー効果	204	フォトリソグラフィ	134
—率	ドリフト	159		
48, 60	導電率	27, 48		
分布ブラッグ反射器				
84				
分布反射器				
84				
分布反射器レーザ				
121				
分布屈折率型 (GI) ファイバ				
180				
分布屈折率レンズ				
77, 183				
分散補償				
182				
分子ビームエピタキシャル				
45				
成長技術				
15				
ブラベクトル				
15				
ブラッグ波長				
84				
ブラウン管				
170				
ブルーレイ・ディスク装置				
203				
プリュスター角				
82				
物質波				
9				

規格化導波路幅	75	LCD	171	PDP	173
規格化周波数	75	LD	92, 98	PICs	196
気相エピタキシャル成長技術		LED	93	pin フォトダイオード	154
	45	LiNbO ₃	193	PMMA	183
期待値	17, 52	LPE	45	pn ヘテロ接合	33
コ ア	69			{P}	
コヒーレンス	133			Pockels 定数	192
コムジェネレータ	205	{M}		ボンピング	23
混 晶	37	マッハツェンダー型光変調器		ポーラライザ	172
固体撮像デバイス	165		196	POS 端末	204
高密度波長多重	202	マイクロディスクレーザ	134	ブランクの定数	8
光量子仮説	9	マイクロ加工技術	206	プラスチック光ファイバ	183
光線近似	69	マイクロ治療法	205	プラズマ	43
光 子	63	マクスウェルの方程式	8, 48	—表示	173
格子間隔	38	マトリックス要素	18, 55	{Q}	
格子欠陥	26	MBE	45	Q スイッチ	137
格子整合	38, 43	密度行列	52, 55		
光子寿命時間	51, 103	—の運動方程式	53	{R}	
構造分散	179	モード番号	74	ラマン光増幅器	133
固有エネルギー	14	モード分散	179	励起用半導体レーザ	133
固有熱抵抗	31	モード整合	81	冷陰極電界放射	174
固有状態ベクトル	16	モード跳躍	116	レンズ状媒質	77
k 選択則	63	モード次数	74	レート方程式	63
矩形導波路	79	MOS 撮像デバイス	168	レーザ	2, 136
クラッド	74	MOVPE	45	—ダイオード	92, 98
クラマス・クロニヒの関係	61	MQW	126	—表示	174
クロネッカーの δ	15			—メス	205
屈折率	48	{N}		—作用	48
—分散	179	内視鏡技術	205	—走査	204
—型導波路	117	ネマチック液晶	171	RGB	173
空乏層	32	熱抵抗	31	臨界角	71
空間光通信	203	II~VI族	37	利得導波路型	117
キャリア密度	31	二軸性結晶	191	利得係数	49
キャリアの拡散効果	145	入射角	71	リッジ導波路	80
キャリアの寿命時間	20			ルビーレーザ	135
キャリア漏洩	36	{O}		ループ共振器	119
共振状現象	145	OFDM	182	量子カスケードレーザ	131, 205
共振状周波数	144	音響光学効果	191	量子ドット(箱)構造	66
許容される導波路曲がり	83	音 子	21	量子演算	203
吸 収	23, 40	オペレータ	17	量子薄膜	66, 68
—型光変調器	198	オプトエレクトロニクス	2	量子井戸構造	65
—係数	43	オージェ効果	25	量子仮説	8, 9
				量子力学	8
{L}		{P}		量子細線	66
LAN	202	パルス変調	147, 158	量子通信	203
		PCM	158		

[S]

サファイア	135
最大変調周波数	144
再結合時間	20, 24
Ⅲ～Ⅴ族の化合物半導体	37
酸化ガラス	182
撮像管	165
静電容量	33
整合条件	81
正規直交関数	15
跡	18
セル効率	169
SI型光ファイバ	180
仕事関数	32
色素レーザ	138
芯	69
信号対雑音比	158
振幅変調	139
シリカ	180
——光導波路	197
自然放出	20, 65
——係数	110
——寿命時間	24
SMSR	126
SN比	158
SOA	133
測 距	205
損失係数	49
存在確率	14
走行時間	157
垂直共振器面発光レーザ	99, 129
スキヤナ	203
スネルの法則	70
スペクトル幅	110
スポットサイズ	81
ステップインデックス(SI)ファイバ	180
ショット雑音電力	158
照 明	97
——用発光ダイオード	175
シュレディンガーの波動方程式	13, 16
出射角	89

出力導波路	197
周波数変調	139
集 光	90
[T]	
大気汚染監視システム	205
太陽電池	154, 169, 206
太陽光発電	169, 206
多モードファイバ	179
単一偏波ファイバ	182
単一光子レーザ	129
単一モード動作	124
単一モードファイバ	179
単一モードレーザ	99
単一モード条件	76
短共振器	119
短パルス光	205
炭酸ガスレーザ	135
単色性分散	179
多層量子薄膜	126
多重共振器	119
TEモード	76
テラヘルツ帯	205
地域ネットワーク	202
TMモード	76
投影装置	174
等位相面	82
透過フィルタ	85
透過器	85
等価屈折率	78, 79
透明電極	172
透明な「窓」	7
透磁率	48
直交関係	14
直接遷移	21
長波長レーザ	135
長波長帯	176
超高速長距離光通信	201
注入電流密度	35
注入型レーザ	98
注入キャリア	43
中和条件	31
[U]	
運動量	10

[V]

VAD法	176
VCSEL	100, 119, 129, 199
ヴェルデ定数	188
VPE	45
[X]	
X遷移	39
X線レーザ	138
[Y]	
YAGレーザ	137
YIG	188
λ/4板	190
λ/4位相シフト分布反射器型レーザ	120, 126
誘電率テンソル	191
誘電体導波路	69
誘電体多層膜コーティング	187
誘導放出	23
——の係数	60
有機EL表示	174
有機金属蒸気成長技術	45
有効質量	27
[Z]	
材料分散	179
雑 音	148, 157, 160
全反射	71
磁 界	48
実効屈折率	109
磁束密度	48
増倍率	160
増幅係数	62
ジョンソン雑音	158
状態ベクトル	16
状態密度	63
受動導波路	197
受光ダイオード	154
受光角	71
重フリントガラス	188

—執筆者略歴—

昭和 30 年 東京工業大学工学部電気工学コース卒業
昭和 35 年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了, 工学博士
昭和 36 年 東京工業大学助教授(理工学部)
昭和 48 年 東京工業大学教授(工学部電子物理工学科), (量子電子工学講座担当)
平成 元年 東京工業大学長
平成 5 年 東京工業大学名誉教授
平成 6 年 日本学術振興会監事
平成 7 年 産業技術融合領域研究所長
平成 9 年 高知工科大学学長
平成 13 年 国立情報学研究所長
平成 17 年 国立情報学研究所顧問
平成 21 年 高知工科大学顧問
平成 22 年 高柳記念電子科学技術振興財団理事長
現在に至る

新版 光デバイス

Optical Devices (New Edition)

© 社団法人 電子情報通信学会 2011

昭和 61 年 4 月 25 日 初版第 1 刷発行
平成 19 年 6 月 20 日 初版第 13 刷発行
平成 23 年 7 月 20 日 新版第 1 刷発行

検 印 省 略

編 者 (社)電子情報通信学会

執筆者 すえ まつ やす はる
末 松 安 晴

発行者 牛 来 真 也

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 Printed in Japan

振替 00140-8-14844 電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00159-4 印刷: 三美印刷(株)/ 製本: 牧製本印刷



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おります。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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします