

# フォトリクスの基礎

工学博士 榎原 晃 共著  
博士(工学) 川西 哲也

コロナ社

# ま え が き

フォトニクス (photonics) は、基本的な光学から半導体レーザや光通信、光計測まで、また、見方を変えれば、材料・デバイスからシステムまで、光波を用いた幅広い技術分野を含んでいる。本書では、この1冊でフォトニクスの基本的事項から応用までを学べるように工夫している。また、専門的な解析方法や現在では使われることが少なくなった技術に関する部分を思い切って省略し、将来のエンジニアとして触れておくべき最低限必要な内容に絞り込んだつもりである。前半では、光波の性質、偏光制御や波長選択などの基礎的な受動素子について、後半では、半導体レーザを中心にその原理や特性、さらに、光通信とそのための最新の光変調技術などの応用技術について解説している。

本書は、フォトニクスを専門分野としてすでに活躍している技術者、研究者を対象とした学術書、専門書ではなく、理工系大学の学部生のレベルの知識を有する学生が授業で使う教科書を想定して、幅広い分野の学生でも理解できるような表現や構成を心がけている。なお、数学、電気回路、材料物性などすでに基礎的な知識を有していることを前提にしている。そのため、基礎知識の無い一般の人には難しく、深い専門知識を求める専門家には物足りないかもしれないが、本書を基にして、講師の専門知識を織り交ぜた講義をしていただければ、良い授業が行えるものと考えている。また、数式の展開などを使ってできるだけ論理的に説明をしている。丸暗記ではなく、数式で物理現象を理解できるよう心がけている。

光波と無線通信で利用されている電波はともに、同じ電磁波であるがその性質は大きく異なる。しかし、レーザの発明により、電波と同じように位相や周波数が均一な光波が得られるようになった。レーザ光は電波とは周波数が数桁高いので、従来の電波の代わりにレーザ光を変調して送ることで、膨大な情報

を伝送することが可能となった。インターネットを通じて、モバイル端末などからでも海外の情報や映像が瞬時に見られるようになり、このようなフォトンクス技術が現在の情報化社会をもたらしたと言っても過言ではない。フォトンクス関連の授業を受ける学生の中には、将来、応用数学、機械工学など他の分野に進む人も多いであろうが、現在の情報社会を支えている技術に触れることは、エンジニアとしての知識の幅を広げるためにもきわめて重要であると思う。

フォトンクスは、百年以上前から営々と蓄積された学問分野である光学の知識や、現在も日々刻々進歩する先端的で実用的な技術を含んでいる。本書ではこのような、古くて新しい技術分野をコンパクトにまとめることに努めた。前半は基本的な光学や受動素子について、中盤は半導体レーザを中心とした発光・受光素子、後半は光通信などの先端的な応用技術で構成している。執筆については、おもに、1～6章を榎原が、7～10章を川西が、それぞれ担当した。また、半導体レーザと受光素子に関する5章と6章では、国立研究開発法人 情報通信研究機構の赤羽浩一氏から多くの貴重な助言をいただいて執筆した。ここで、赤羽氏に深く感謝する。

本書でフォトンクスの知識に触れて、エンジニアとしての技量を深め、将来、さまざまな分野で活躍していただくことを切に望む。

2019年4月

著者ら記す

# 目 次

## 1. 光波の伝搬

1.1 波の表現	1
1.2 平面波	4
1.2.1 マクスウェルの方程式	4
1.2.2 平面波の導出	5
1.2.3 光波の伝搬に関する量	7
1.2.4 観測方向による平面波の特性	9
1.3 偏光	11
1.4 光波のエネルギーと電力	14
演習問題	16

## 2. 光波の性質

2.1 反射と屈折	17
2.1.1 屈折率境界面での反射と透過	17
2.1.2 屈折率境界面への斜め入射	19
2.2 干渉	21
2.2.1 同一周波数の二光波の干渉	21
2.2.2 斜め交差による二光波の干渉	23
2.2.3 異なる周波数の二光波間の干渉	25
2.3 回折と集光	26
2.3.1 単スリットからの回折	26
2.3.2 円形開口からの回折	29

2.3.3 レンズによる集光	31
演習問題	32

### 3. 光 導 波

3.1 三層スラブ導波路	34
3.1.1 導波構造と全反射	34
3.1.2 導波条件	36
3.1.3 電磁界分布と固有方程式	37
3.1.4 導波モードとカットオフ	41
3.2 チャンネル光導波路	44
3.3 光ファイバ	45
3.3.1 光ファイバの種類	45
3.3.2 光波の入力	47
3.3.3 電磁界分布	48
3.3.4 伝搬モード	49
3.3.5 単一モード伝送	50
3.3.6 LPモード	51
演習問題	52

### 4. 受 動 素 子

4.1 干渉計	53
4.1.1 マッハ・ツェンダー干渉計	53
4.1.2 マイケルソン干渉計	56
4.2 偏光制御	57
4.2.1 偏光子	57
4.2.2 波長板	58
4.2.3 ファラデー効果	63
4.2.4 光アイソレータ	65

4.3 波長フィルタ・回折素子	66
4.3.1 多層膜フィルタ	66
4.3.2 回折素子	70
4.4 光共振器	73
4.4.1 共振条件	73
4.4.2 縦モードとフィネス	74
演習問題	77

## 5. レーザ

5.1 レーザ発振の原理	79
5.1.1 レーザ発振の条件	80
5.1.2 光波と電子の相互作用	81
5.1.3 自然放出と誘導放出	82
5.1.4 反転分布と利得係数	83
5.1.5 光子寿命	85
5.2 各種レーザー	87
5.2.1 気体レーザー	88
5.2.2 固体レーザー	89
5.2.3 半導体レーザー	90
5.3 半導体レーザー	93
5.3.1 基本構造	93
5.3.2 レート方程式としきい値電流	94
5.3.3 光出力と効率	98
5.3.4 直接変調	99
5.4 モード同期	102
5.5 さまざまなレーザーおよび発光ダイオード	103
5.5.1 分布帰還形レーザー	103
5.5.2 面発光レーザー	104
5.5.3 材料と構造による発光波長の違い	105

5.5.4 発光ダイオード	106
演習問題	107

## 6. 受光素子

6.1 pin フォトダイオード	109
6.1.1 構造と感度	109
6.1.2 応答特性	111
6.1.3 応答速度	112
6.1.4 雑音	113
6.2 イメージセンサ	113
6.3 太陽電池	114
演習問題	116

## 7. 光変調

7.1 変調と帯域幅	117
7.1.1 変調動作のモデル化	117
7.1.2 振幅変調	119
7.1.3 角度変調	121
7.1.4 被変調信号の帯域幅	123
7.2 直接変調と外部変調	124
7.2.1 直接変調	124
7.2.2 外部変調	126
7.3 電気光学効果による光変調	129
7.3.1 ニオブ酸リチウムのもつ電気光学効果	129
7.3.2 電気光学効果による光変調の原理	130
7.3.3 光位相変調器の実際	134
7.3.4 マッハ・ツェンダー干渉計による振幅変調	137
7.3.5 二並列マッハ・ツェンダー (MZ) 変調器による直交振幅変調	140

演習問題	141
------	-----

## 8. 光通信

8.1 光ファイバの特性と伝送性能	143
8.1.1 光損失	144
8.1.2 波長分散	147
8.1.3 非線形性	154
8.2 高速化のための多重化と多値化	155
8.2.1 波長多重	156
8.2.2 時分割多重	159
8.2.3 空間多重	160
8.2.4 多値変調	161
8.2.5 デジタルコヒーレント	164
演習問題	167

## 9. 光記録

9.1 光ディスクの概要	168
9.2 光ピックアップ	169
9.3 各種光ディスクの規格	172
演習問題	174

## 10. 光計測

10.1 光による距離計測の原理	175
10.2 光の干渉による高精度距離計測	177
10.3 周波数変調による距離計測	178
10.4 コヒーレンス	179



演習問題	180
引用・参考文献	181
演習問題解答例	182
索引	186

# 1 | 光波の伝搬

本章では、これから学んでいくうえで基礎となる光波 (light wave) の表現方法を解説したのち、光波の最も基本的な形態である平面波の伝搬や偏光について、さらに、光波のエネルギーの流れについても述べていく。

すでに、電気回路などで、分布定数回路中の電圧波の伝搬については学んでいると思うが、同じ波の伝搬であり、本質的には変わらないので、それらの知識も参考にしてほしい。

## 1.1 波の表現

光波は電磁波の一種で、電界と磁界が時間的、空間的に変化しながら伝搬する波である。自然光は異なる波長や異なる位相をもつ無数の光波が足し合わされたものであるが、これに対して、レーザー光は、周波数と位相が時間的にも空間的にもそろった純粋な波に近く、単色光 (monochromatic light) とも呼ばれている。そこで、ここでは光波はこのような純粋な波であるとして考えていく。

時間  $t$  と場所  $z$  を変数として、 $+z$  方向に伝搬する波  $A(t, z)$  は、振幅 (amplitude)  $A_0$ 、角周波数 (angular frequency)  $\omega$  [rad/s]、位相定数 (phase constant)  $k$  [rad/m]、初期位相 (initial phase)  $\varphi_0$  [rad] ( $t = z = 0$  のときの位相) を用いて

$$A(t, z) = A_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0) \quad (1.1)$$

で表される。 $A(t, z)$  は光波であれば電界や磁界などに対応する。この波の位相

## 2 1. 光波の伝搬

成分  $\varphi$  は

$$\varphi = \omega t - kz + \varphi_0 \quad (1.2)$$

である。図 1.1 に、時間  $t$  を固定したときの場所  $z$  に対する変化の様子を示している。この波の波長 (wavelength)  $\lambda$  [m] は、隣り合う等位相点の間隔であるので、 $\varphi$  が  $2\pi$  変化する距離として次式で表される。

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (1.3)$$

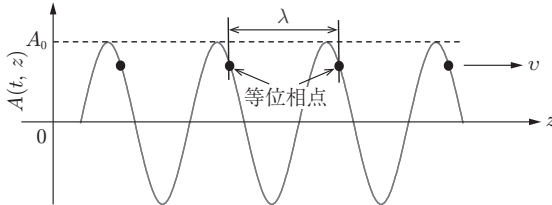


図 1.1 伝搬する波

また、波の伝搬速度 (propagation velocity)  $v$  [m/s] は等位相点の移動速度で、位相  $\varphi$  を一定としたときの場所  $z$  の時間微分  $dz/dt$  で表される。したがって、 $\varphi$  を定数として、式 (1.2) の両辺を  $t$  で微分すると

$$v = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} \quad (1.4)$$

と求まる。ここで、通常は  $k > 0$  であるので  $v > 0$  となり、 $+z$  方向への波の伝搬 (等位相点の移動) が確認できる。また、この  $v$  は位相速度 (phase velocity) とも呼ばれるもので、波の見掛け上の速度で、波のエネルギーの伝搬速度である群速度とは異なる場合があるので注意が必要である。

ところで、式 (1.1) のように波を実数で表す表現方法を、ここでは実数表現と呼ぶことにする。一方、大きさが振幅  $A_0$ 、偏角が位相  $\varphi$  となる複素数  $A$  を次式のように定義する。

$$A = A_0 e^{j\varphi} = A_0 e^{j(\omega t - kz + \varphi_0)}$$

$$= A_0 \cos(\omega t - kz + \varphi_0) + jA_0 \sin(\omega t - kz + \varphi_0) \quad (1.5)$$

ただし、 $j$  は虚数単位である。式 (1.5) より、複素数  $A$  の実部  $\text{Re}[A]$  は式 (1.1) の実数表現と等しいことがわかる。そこで、複素数  $A$  で波を表すことを複素表現と呼ぶ。また、振幅  $A_0$  に初期位相  $\varphi_0$  も含めた複素定数  $A' = A_0 e^{j\varphi_0}$  を用いて

$$A = A' e^{j(\omega t - kz)} = A' e^{-jkz} e^{j\omega t} \quad (1.6)$$

と表現する場合も多い。また、複素表現では式 (1.6) のように、 $t$  を含む項と  $z$  を含む項の積になるので、 $A$  の時間  $t$  による微分、および、場所  $z$  による微分は

$$\frac{\partial A}{\partial t} = j\omega A_0 e^{j(\omega t - kz + \varphi_0)} = j\omega A \quad (1.7a)$$

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -jk A_0 e^{j(\omega t - kz + \varphi_0)} = -jk A \quad (1.7b)$$

となり、それぞれ、 $j\omega$ 、および、 $-jk$  が掛かるだけで、演算が簡単に行える。

また、複素表現  $A$  から角周波数  $\omega$  で時間変化する項  $e^{j\omega t}$  だけを取り除いた  $A_0 e^{j\varphi_0} e^{-jkz} = A' e^{-jkz}$  の部分は、フェーザ (phasor) と呼ばれている。波動の解析では、振幅と位相の変化が重要な意味をもつ場合が多いので、フェーザでの演算もよく行われる。フェーザを用いるときでも、通常は、式 (1.7) のように機械的に  $j\omega$ 、あるいは、 $-jk$  を掛けておけばよい。ただし、ここでは一様な正弦波で表される波を前提にしている。6章で述べる光変調のように、振幅や周波数が時間変化する光波を扱う場合は、時間微分に関する式 (1.7a) などは成立しない。

本書においては、光波の電界や磁界などの正弦波状に変化する量を扱う場合は、おもに複素表現を用いるようにしており、時間的な変化を見る必要のある場合は実数表現で記述している。また、電界ベクトルなどの時間変化するベクトルにおいても、ベクトルの各成分が複素表現で表された複素ベクトルをおもに用いている。

## 4 1. 光波の伝搬

ただし、複素表現では、虚部は演算に使用されるものであって実在するものではない。最終的には実数表現にして初めて実際の物理量を表すことになる。特に、光波のエネルギーや電力を求めるときなど、電磁界の時間変化を考慮する必要がある場合は複素表現をそのまま用いることができないので注意が必要である。

光学の分野では、式(1.1)の  $k$  を波数、あるいは、伝搬定数とも呼ぶ場合がある。 $k$  は波の位相変化に関わる係数で、電気回路の分野では位相定数と呼ばれていることもあり、本書でもおもに位相定数と呼ぶことにしている。また、電気回路での信号の伝搬では、位相定数とともに減衰定数も考慮されている。一方、光波が空気中や誘電体中を伝搬するときは、伝搬損は無視できる程度に小さいために通常は減衰定数は考慮していない。

## 1.2 平面波

### 1.2.1 マクスウェルの方程式

平面波 (plane wave) は、電磁波を取り扱う際の基本となるものである。ここでは、まず、無限に広い空間を伝搬する平面波をマクスウェルの方程式 (Maxwell's equations) から導出する。電界 [V/m]、磁界 [A/m]、電束密度 [C/m<sup>2</sup>]、磁束密度 [Wb/m<sup>2</sup>]、および、電流密度 [A/m<sup>2</sup>] は、それぞれベクトル場で  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{J}$  で表し、空間電荷密度 [C/m<sup>3</sup>] はスカラー場で  $\rho$  とする。ただし、単位は SI 単位系を基にしている。電磁気学で学んだように、マクスウェルの方程式を微分形で表すと

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.8a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.8b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.8c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.8d)$$

となる。媒質の誘電率を  $\varepsilon$  [F/m] とし、透磁率を  $\mu$  [H/m] とすると、 $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  である。

ここで、媒質が等方で一様であるとし、空間電荷や電流が存在しない空気中や誘電体中などでの伝搬を考える。そうすると  $\varepsilon$ 、 $\mu$  はスカラー量で定数となり、 $\rho = 0$ 、 $\mathbf{J} = 0$  となる。さらに、各ベクトルは複素ベクトルであるとするとき (1.7a) より、式 (1.8) は次式のように表すことができる。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (1.9a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon\mathbf{E} \quad (1.9b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (1.9c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.9d)$$

### 1.2.2 平面波の導出

つぎに、式 (1.9) を基にして  $\mathbf{E}$  を求めてみよう。まず、式 (1.9a) と式 (1.9b) から  $\mathbf{H}$  を消去すると

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\nabla \times \mathbf{H} = \omega^2\varepsilon\mu\mathbf{E} \quad (1.10)$$

さらに、ベクトル公式  $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla\nabla \cdot \mathbf{A} - \nabla^2\mathbf{A}$  と式 (1.9c) から、 $\mathbf{E}$  に関する方程式

$$\nabla^2\mathbf{E} = -\omega^2\varepsilon\mu\mathbf{E} \quad (1.11)$$

が得られる。この式はヘルムホルツの波動方程式 (Helmholtz's wave equation) と呼ばれ、その解は波動を表す。次式はその解の一つである。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}_0 e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} e^{j\omega t} \\ k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 &= \omega^2\varepsilon\mu \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

ここで、 $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  は定数で、 $\mathbf{E}_0$  は複素数を要素に持ち、時間や場所によらない定数ベクトルである。また、ベクトル  $\mathbf{k} = (k_x, k_y, k_z)$  を定義し、位置ベクトル  $\mathbf{r} = (x, y, z)$  を用いると、式 (1.12) は式 (1.13) のようにも表される。

# 索 引

<b>【い】</b>	
異常屈折率	59
位相速度	2, 149
位相定数	1
位相変調	118, 130
一軸結晶	59
イメージセンサ	113
<b>【え】</b>	
エアリーディスク	30
エネルギー準位	82
エネルギーの流れ	15
エネルギー密度	14
エバネッセント波	41
エルビウム添加光ファイバ増幅器	146
円偏光	12
<b>【お】</b>	
オンオフキーイング	151, 155
音響光学効果	126
<b>【か】</b>	
開口数	31
回折	26
回折限界	28, 30
回折格子	70
外部変調	124, 126
角周波数	1
角度変調	119, 121
カー効果	154
下側波帯	120
活性層	93

カットオフ	42
カットオフ周波数	112
価電子帯	90
可飽和吸収体	103
干渉	21
干渉計	53
干渉じま	25
間接遷移	92
緩和振動周波数	100

## 【き】

気体レーザ	88
基底状態	84
基本モード	43
逆バイアス電圧	110
キャリヤ密度	94
吸収	82
共振条件	73
強度変調	128, 129, 132, 162
強誘電体	129
曲線因子	116
禁制帯	91

## 【く】

空間多重	156, 160
グース・ヘンシェンシフト	35
屈折	17
屈折率	8
グレーデッドインデックス形	46
群屈折率	150
群速度	148, 150
群遅延	151

## 【け】

検光子	57
原子密度	85

## 【こ】

光学異方性媒質	58
光学遷移	82
光子	81
光子寿命	86
光子密度	84
高次モード	43
構造分散	153
光路長	8
国際電気通信連合	157
固体レーザ	89
コヒーレンス	179
固有方程式	40
コンスタレーション	162

## 【さ】

最小スポット径	31
サイドバンド	120
サイドローブ	28
材料分散	153
雑音等価電力	113

## 【し】

しきい値電流	94
磁気光学効果	63, 126
自然放出	83
実効屈折率	36
実数表現	2
時分割多重	156, 159
周期多層膜	68

集光 31  
 集光スポット 31  
 収差 173  
 自由スペクトル領域 75  
 周波数変調 118, 178  
 主屈折率 59  
 受光素子 109  
 主軸 59  
 受動素子 53  
 常屈折率 59  
 少数キャリア 91  
 上側波帯 120  
 初期位相 1  
 ショット雑音 113  
 シリコン変調器 128  
 シリンドリカルレンズ 171  
 シングルモード  
   光ファイバ 153  
 進行波型変調器 137  
 真性半導体 93  
 振幅 1  
 振幅変調 118, 129

**【す】**

ステップインデックス形 46  
 スネルの法則 19  
 スラブ導波路 34  
 スロープ効率 98

**【せ】**

接合容量 112  
 旋光性 63  
 線幅 164  
 全反射 35  
 鮮明度 22

**【そ】**

側帯波 120  
 速度整合 137  
 側波帯 123  
 損失係数 80

**【た】**

太陽電池 114  
 楕円偏光 13  
 多重量子井戸 106  
 多層膜フィルタ 66  
 多値変調 162  
 縦モード 74  
 ダブルヘテロ構造 94  
 多モード光導波路 43  
 多モード光ファイバ 46  
 単一モード伝送 44  
 単一モード光導波路 43  
 単一モード光ファイバ 46  
 単色光 1  
 単スリット 26  
 単側波帯変調 141  
 タンタル酸リチウム 127

**【ち】**

チャープ 125, 129  
 チャネル光導波路 44  
 直交振幅変調 140, 163  
 直接遷移 92  
 直接変調 99, 124  
 直線偏光 11  
 直線偏光モード 51

**【つ】**

ツリウム添加光ファイバ  
   増幅器 147

**【て】**

定在波 24  
 デジタル  
   コヒーレント 128, 164  
 電界吸収効果 126  
 電界吸収光変調器 127  
 電気光学効果 126  
 電気光学材料 45  
 電気光学光変調器 127  
 電子衝突励起 88  
 伝送容量 150

伝導帯 90  
 伝搬角 35  
 伝搬速度 2  
 電力変換効率 98

**【と】**

透過形回折格子 71  
 導波光 36  
 導波モード 41  
 透明化キャリア密度 95  
 特性温度 98  
 トラッキング 171

**【な】**

斜め交差 23

**【に】**

ニオブ酸リチウム 45, 127  
 二並列マッハ・  
   ツェンダー変調器 140  
 二並列 MZ 変調器 128  
 入射面 19

**【ね】**

熱光学効果 126  
 熱雑音 113  
 熱平衡状態 83

**【は】**

ハイブリッドモード 50  
 波数ベクトル 6  
 波長 2  
 波長多重 156  
 波長板 58  
 波長分散 144, 150  
 発光ダイオード 106  
 波動インピーダンス 7  
 波面 6  
 反射 17  
 反射形回折格子 71  
 搬送波 120  
 反転分布 83  
 半導体光増幅器 147



半導体レーザ	90	フォトニック結晶	
バンドギャップ	91	光導波路	45
バンドギャップ		負荷抵抗	112
エネルギー	91	複屈折	59
バンドギャップ電圧	91	複素表現	3
半波長電圧	133, 136	複調	117
		プッシュプル動作	132
<b>【ひ】</b>		ブラッグ回折	72
光アイソレータ	66	ブラッグ角	72
光位相変調器	134	ブランク定数	82
光干渉計	128	フランツ・ケルディッシュ	
光共振器	73	効果	126
光強度	15	フランホーファー回折	26
光損失	144	ブルースター角	21
光通信	118	フレネル回折	26
光ディスク	168	分解能	32
光電力	15	分散	144
光導波路	34	分散補償ファイバ	154
光導波路アレー回折格子	156	分布帰還形レーザ	103
光ピックアップ	168		
光ファイバ	34, 45	<b>【へ】</b>	
光ファイバ増幅器	146	平面波	4
光変調	117	ベッセル関数	29
光変調器	118	ヘルムホルツの	
光励起	89	波動方程式	5
非線形性	144	偏光	11
非相反効果	64	偏光子	57
ピックアップレンズ	168	偏光制御	57
ビート信号	25	偏光方向	11
微量量子効率	98	変調	117
被変調信号	119	変調効率	135
		変調周波数	119
<b>【ふ】</b>		変調度	119
ファイバヒューズ	155	偏波保持光ファイバ	47
ファブリ・ペロー干渉計	128		
ファブリ・ペロー共振器	73	<b>【ほ】</b>	
ファラデー効果	63	ポー	151
フィネス	75	ホイヘンスの原理	26
フェーズ	3	包絡線	148
フォーカシング	171	ポッケルス効果	127
フォトニック結晶	45	ボンピング	83
		<b>【ま】</b>	
		マイケルソン干渉計	56, 128
		マクスウェルの方程式	4
		マッハ・ツェンダー	
		干渉計	53, 128, 137
		マッハ・ツェンダー	
		変調器	128
		マルチコアファイバ	156
		<b>【め】</b>	
		メインローブ	27
		面発光レーザ	104
		<b>【も】</b>	
		モード	42
		モード同期	102
		モード分散	44, 153
		<b>【ゆ】</b>	
		誘導遷移確率	85
		誘導ブリルアン散乱	154
		誘導放出	83
		誘導放出による光増幅	79
		<b>【ら】</b>	
		ラマン散乱	154
		<b>【り】</b>	
		リッジ型光導波路	45
		利得係数	80
		量子効率	110
		量子ドット	106
		<b>【れ】</b>	
		励起状態	84
		レイリーの分解能	32
		レーザ	79
		レート方程式	94
		連続波	178

	<b>[A]</b>	ITU	157	QPSK	164
AM	118			<b>[S]</b>	
AO	126	<b>[L]</b>		S 波	20
AWG	156	LED	106	SDM	156
	<b>[C]</b>	LO	164	SOA	147
CCD イメージセンサ	114	LO 光	164	SSB	141
CMOS イメージセンサ	114	LP モード	51		
CW	178	LSB	120	<b>[T]</b>	
	<b>[E]</b>			T DFA	147
EA	126	<b>[M]</b>		TDM	156
EA 効果	129	MO	126	TE 波	38
EDFA	146	MZ 変調器	137	TM 波	38
EO	126			TO	126
EO 効果	129	<b>[N]</b>			
EO 変調器	129	NEP	113	<b>[U]</b>	
	<b>[F]</b>			USB	120
FM	118, 178	<b>[O]</b>			
FMCW 方式	179	OOK	151, 155, 162	<b>[W]</b>	
	<b>[I]</b>	<b>[P]</b>		WDM	156
I 成分	123	P 波	20	~~~~~	
III-V 族化合物半導体	105	pin フォトダイオード	109	<b>[数 字]</b>	
IQ 変調	140	PM	118	1/2 波長板	62
IQ 変調器	128	<b>[Q]</b>		1/4 波長板	60
		Q	76	4 値位相変調	164
		Q 成分	123	4 値パルス振幅変調	163
		QAM	140	4PAM	163

— 著者略歴 —

- |  |  |
|--|--|
| 榎原 晃 (えのきはら あきら)                                 | 川西 哲也 (かわにし てつや)   |
| 1982年 大阪大学基礎工学部電気工学科卒業                           | 1992年 京都大学工学部電子工学科卒業                                     |
| 1984年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了 (物理系専攻電気工学分野)       | 1994年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了 (電子工学専攻)                        |
| 1987年 大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了 (物理系専攻電気工学分野), 工学博士 | 1994年～1995年 松下電器産業株式会社 (現, パナソニック株式会社) 勤務                |
| 1987年 松下電器産業株式会社 (現, パナソニック株式会社) 入社              | 1997年 京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了 (電子通信工学専攻), 博士 (工学)           |
| 2008年 兵庫県立大学大学院工学研究科教授<br>現在に至る                  | 1997年 京都大学ベンチャービジネスラボラトリー特別研究員                           |
|  | 1998年 郵政省通信総合研究所 (現, 国立研究開発法人情報通信研究機構) 入所                |
|  | 2003年～2004年 カリフォルニア大学サンディエゴ校客員研究員 (兼務)                   |
|  | 2015年 早稲田大学理工学術院教授<br>国立研究開発法人情報通信研究機構研究統括 (兼務)<br>現在に至る |

## フォトニクスの基礎

Basics of Photonics

© Akira Enokihara, Tetsuya Kawanishi 2019

2019年6月10日 初版第1刷発行



検印省略

著者 榎原 晃  
川西 哲也  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来 真也  
印刷所 三美印刷株式会社  
製本所 有限会社 愛千製本所

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 978-4-339-00922-4 C3055 Printed in Japan

(大井)



JCCOPY < 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、そのつと事前に、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。