

半導体光デバイス

博士(工学) 山口 浩一 著

コロナ社

ま え が き

地球上には光ファイバが張り巡らされ、電磁波が飛び交い、世界中が大規模な情報網でつながっている。いつでも・どこでも・誰とでもコミュニケーションがとれ、大量の情報を伝送し処理する高度情報化社会が実現されてきた。この高度化する情報通信・情報処理システムは、多くの半導体デバイスに支えられている。情報通信のさらなる高度化には、今後も半導体デバイスの進展は必要不可欠である。半導体物質の性質を利用した電子（電子波）、光子（光波）の信号の増幅、検出、導波、変調、さらに光・電気のエネルギー変換の機能を実現するためには、半導体の電子物性、光物性の理解と、デバイス構造の設計指針および作製プロセス技術が重要である。

本書では、半導体工学の基礎と光デバイス応用にフォーカスし、これからこの分野を学ぼうとする高専・専攻科生、大学学部生、大学院前期課程生を想定して執筆した。各章における光電子物性やデバイス動作を理解しやすくするため、なるべく多くの図解を導入した。特に、エネルギーバンド図は基本的な理解にたいへん便利である。バンドエンジニアリングという言葉もあるように、エネルギーバンド図は半導体中の電子の位置、波数、運動量、エネルギーの状態をつかみ、光との相互作用やデバイスの動作原理の基本的な理解に役立つ。特に、半導体の各種接合構造はさまざまな光デバイスに応用されており、エネルギーバンド構造はキャリアの分布や流れなどを考える上で便利である。さらに、新しいデバイス構造のアイデアも創出しやすいことから、エネルギーバンド図を書いて考える習慣を身に付けておくのも有効である。また、本書の内容を理解していく上で、量子力学の学習も同時に進めてもらいたい。最近では、ナノメートルサイズの半導体微小構造を利用した量子デバイスの進展も著しく、量子力学的性質によりデバイス特性の高性能化、高機能化が期待されてい

る。本書でもいくつかの基本的な量子デバイスを紹介している。

本書は本文十章と付録から構成されている。1章では、金属および半導体内の電子状態を表すエネルギーバンド構造について学び、半導体中のキャリアの伝導電子と正孔の概念を解説する。2章では、真性半導体と不純物をドーブした外因性半導体のキャリア濃度の解析について説明する。3章では、キャリアの輸送現象として熱運動、ドリフト効果、拡散現象、そして散乱機構の基礎を学び、キャリアの輸送を表すキャリアの連続の式と誘電緩和現象について解説する。4章では、金属からの電子放出として、熱電子放出、電界電子放出、二次電子放出、そして光電子放出について概説する。5章では、光デバイス構造として重要な半導体の接合について解説する。はじめにpn接合のエネルギーバンド構造を学び、電流-電圧特性を理解する。金属-半導体接合としては、特にショットキー接触について説明する。つぎに半導体ヘテロ接合のエネルギーバンド構造を学び、電流-電圧特性を解説する。最後に、量子井戸構造と超格子構造の電子状態について学び、量子井戸構造の状態密度を導出し、その特徴について述べる。6章では、発光・受光デバイスの機構の理解に重要な半導体における、発光と光吸収の光学遷移について説明する。7章では、半導体の発光デバイスとして、発光ダイオード(LED)、半導体レーザ、および量子井戸レーザの基本原理、各種構造、および基本特性について解説する。8章では、半導体の受光デバイスとして、光伝導素子、ショットキー接合フォトダイオード、pn接合フォトダイオード、pinフォトダイオード、そしてアバランシェフォトダイオードについて説明する。9章では、pn接合を基本とした太陽電池の基本原理と特性について解説し、高い変換効率の多接合タンデム型太陽電池、中間バンド型太陽電池について紹介する。10章では、半導体光導波路と半導体光変調器について解説する。以上の本書にまとめた半導体光デバイスは、今日のインターネット社会を支える光通信技術や各種の光計測、光信号処理などの分野において広く活用されている。本書では関連する章・節に何度も戻れるように、各章・節間での関連事項の連携性にも注意を払った。ぜひ本書全体を体系的に学んでいただきたい。

冒頭でも述べたように、半導体デバイスの展開は、高度情報化社会を支え、今後も地球・自然環境の保全，自然災害対策，エネルギー・環境問題の改善，安心・安全な社会を持続的に発展させていく上でも重要な役割を担っており，革新的な半導体デバイスの開発が期待されている。本書が，半導体光デバイスの基礎の習得を目指す読者のお役に立てれば幸いである。

最後に，本書の執筆では，著者の大学学部および大学院での講義ノートをベースにした。本書の図表や式の作成にご協力いただいた研究室の学生，および秘書の福地真実氏に感謝申し上げます。本書の執筆の機会をくださり，出版まで辛抱強くお世話をいただいたコロナ社に厚く御礼申し上げます。

2020年6月

山口 浩一

目 次

1. 固体内の電子状態・エネルギーバンド構造

1.1 はじめに	1
1.2 真空中の電子と水素原子の電子	2
1.3 金属内の自由電子	6
1.4 金属内の電子のエネルギー分布	10
1.5 半導体結晶内の電子状態	13
1.6 半導体内の伝導電子と正孔の挙動	19
1.7 半導体のエネルギーバンド構造	24

2. 半導体のキャリア

2.1 真性半導体（キャリアの熱生成と再結合）	27
2.2 外因性半導体（n型半導体とp型半導体）	29
2.3 キャリヤ濃度とフェルミ準位	31

3. キャリヤの輸送現象

3.1 結晶内の電子波の電気伝導	38
3.2 キャリヤの熱運動	43
3.3 ドリフト運動・移動度	44
3.4 キャリヤの散乱	46
3.5 ホール効果	49

3.6	キャリアの拡散	51
3.7	キャリアの連続式 (ドリフト・拡散モデル)	53
3.8	キャリアの誘電緩和	55

4. 金属からの電子放出

4.1	熱電子放出	58
4.2	電界電子放出	60
4.3	二次電子放出	61
4.4	光電子放出	63

5. 半導体の接合

5.1	pn 接 合	65
5.1.1	pn 接合のエネルギーバンド図	65
5.1.2	空 乏 層	67
5.1.3	擬フェルミ準位	70
5.1.4	バイアス印加 pn 接合のエネルギーバンド図	71
5.1.5	直流バイアス印加 pn 接合の電流-電圧特性	73
5.1.6	交流小信号印加 pn 接合の電流-電圧特性	75
5.1.7	空 乏 層 容 量	76
5.1.8	拡 散 容 量	78
5.1.9	逆 方 向 電 流	80
5.1.10	降 伏 現 象	81
5.2	金属-半導体接合	84
5.2.1	ショットキー接触とオーム接触	84
5.2.2	ショットキー接触の電流-電圧特性	87
5.3	半導体ヘテロ接合	90

5.3.1	ヘテロ接合のエネルギーバンド構造	90
5.3.2	ヘテロ接合の電流-電圧特性	92
5.4	量子井戸構造・超格子構造	95
5.4.1	量子井戸構造	95
5.4.2	量子井戸構造内の電子のエネルギー状態	97
5.4.3	量子井戸構造の電子の状態密度	101
5.4.4	超格子構造	105

6. 半導体における発光と光吸収

6.1	光学遷移の基礎	107
6.2	バンド間における光学遷移	110
6.3	励起子の光学遷移	115
6.4	不純物準位を介した光学遷移	119
6.5	非発光性再結合	122

7. 発光デバイス

7.1	発光デバイスの半導体材料	124
7.2	発光ダイオード (LED)	126
7.3	半導体レーザー (LD)	131
7.3.1	半導体レーザーの基本原理	132
7.3.2	半導体レーザーの基本特性	136
7.3.3	半導体レーザーの構造	143
7.4	量子井戸 (QW) レーザ	147

8. 受光デバイス

8.1	受光デバイスの半導体材料と光吸収係数	151
8.2	光伝導素子	153
8.3	ショットキー接合フォトダイオード	155
8.4	pn接合フォトダイオード	156
8.4.1	pn接合フォトダイオード	156
8.4.2	pinフォトダイオード	159
8.5	アバランシェフォトダイオード (APD)	160

9. 太陽電池

9.1	太陽電池の動作原理	163
9.2	太陽電池の電流-電圧特性	165
9.3	太陽光スペクトル	167
9.4	電力変換効率と損失	169
9.5	多接合タンデム型太陽電池	173
9.6	中間バンド型太陽電池	175

10. 半導体の光導波路・光変調器

10.1	半導体光導波路	177
10.2	半導体光変調器	179

付	録	184
---	---	-----

A.1	シュレーディンガー波動方程式	184
A.2	波束と不確定性原理	185

A.3	ダイヤモンド構造と閃亜鉛鉱構造	186
A.4	物理定数表	187
A.5	各種半導体の室温における物性定数 (バンドギャップの大きい順)	188
参 考 文 献	189
索 引	190

1

固体内の電子状態・ エネルギーバンド構造

固体中の電子の状態を考える前に、1.2節でその基本となる真空中の電子および水素原子の電子状態について復習する。固体中の電子状態については、1.3節～1.4節で金属について考え、1.5節～1.7節では金属の場合と比較しながら半導体について考える。

1.1 はじめに

固体中の電子の状態を考える前に、その基本となる真空中の電子および水素原子の電子状態について復習する。電子は古典論では「粒子性」を示し、量子論では「波動性」を示す二重性がある。この電子の波（物質波）のことを**ド・ブロイ波**（de Broglie wave）という。電子の状態を知るということは、3次元結晶中の電子の位置ベクトル \mathbf{r} （座標空間 (x, y, z) ）と波数ベクトル \mathbf{k} （波数空間 (k_x, k_y, k_z) ）を知ることである。電子の波数 k ($= 2\pi/\lambda$) がわかれば、その波数に対するエネルギー E がわかり、電子の状態を表す便利な二つのエネルギーバンド図を描いて考えることができる。一つは縦軸を電子のエネルギー、横軸を電子の位置座標としたエネルギーバンド図で、もう一つは **E - \mathbf{k} 分散関係**、つまり縦軸を電子のエネルギー、横軸を電子の波数としたエネルギーバンド図である。また、電子の運動量 p と波数 k の関係は、**プランク定数**（Planck constant） h ($= 6.625 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$) を用いた**ド・ブロイの関係式**（de Broglie relation）と呼ばれる式 (1.1) で表される。横軸の波数にプランク定数 ($h = h/2\pi$) を掛けることで運動量 p と置き換えられ、 E - p のバンド図となる。ち

なみに、光は古典論では電磁波であり、量子論では光子 (photon) と呼ばれる粒子性を示し、エネルギー E と振動数 ν ($=\omega/2\pi$) の関係は、やはりプランク定数 h を用いた**アインシュタインの関係式** (Einstein relation) と呼ばれる式 (1.2) で表される。

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k \quad (1.1)$$

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad (1.2)$$

はじめに真空中の自由電子、水素原子の電子状態について述べ、つぎに固体内の電子状態について学ぶ。固体物質は電気伝導度により導体、半導体、絶縁体に分類されるが、これらの固体内の電子のエネルギー E と波数 k の関係を調べることにより、その電気伝導の理解も深まる。

1.2 真空中の電子と水素原子の電子

素電荷 $-e$ ($= -1.602 \times 10^{-19}$ C) をもつ電子の真空中における振舞いは、質量 m_0 ($= 9.1 \times 10^{-31}$ kg) をもち、誘電率 ϵ_0 ($= 8.85 \times 10^{-12}$ F/m) の媒質中での運動を考えることになる。図 1.1 の電子銃について真空中の電子の運動を考える。タングステン (W) のフィラメントに電流を流し、高温に加熱された W から熱的に放出された電子 (熱電子) が、グリッドを通して出て来たところを陽極 A に印加された加速電圧 V [V] によって加速され、陽極 A のピンホールから電子ビームが放射される。その電子の運動エネルギーは式 (1.3) で表される。よって式 (1.1) より電子の波長 λ を式 (1.4) より求めることができる。ここで、フィラメントから熱放出された直後の電子の熱エネルギーは無視した。

$$\frac{1}{2} m_0 v^2 = \left(\frac{1}{2m_0} \right) \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 = eV \quad (1.3)$$

$$\lambda = \frac{h}{(2m_0 eV)^{1/2}} \quad (1.4)$$

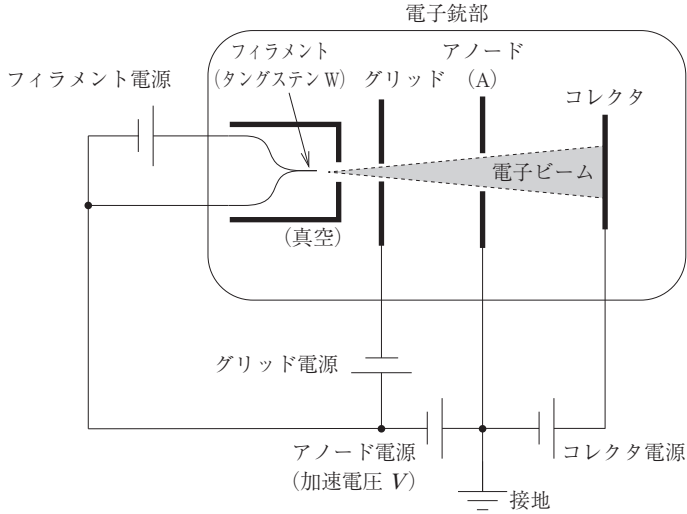


図 1.1 電子銃における電子の運動

電子波の状態を調べるには、電子波の運動方程式であるシュレーディンガー波動方程式 (Schrödinger equation) (付録 A.1) を解き、電子の波動関数 (wave function) ψ を解くことによって知ることができる。ここでは、真空中の自由空間を考えるためにポテンシャルエネルギー $V(x)$ を一定 (簡単のために零) として、式 (1.5) に示す 1 次元のシュレーディンガー波動方程式を解いてみる。

$$-\frac{\hbar^2}{2m_0} \frac{d^2\psi}{dx^2} + V(x)\psi = E\psi \quad (1.5)$$

式 (1.5) の一般解は、積分定数を A, B として

$$\psi(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx} \quad (1.6)$$

となり、エネルギー E と波数 k の関係は式 (1.7) となる。

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} \quad (1.7)$$

式 (1.6) の波動関数に時間因子 $\exp(-i\omega t)$ を入れて、また位相速度 $v = \omega/k$ より

$$\psi(x) = Ae^{i(kx - \omega t)} + Be^{-i(kx + \omega t)} = Ae^{ik(x - vt)} + Be^{-ik(x + vt)} \quad (1.8)$$

と表される。右辺第 1 項は $+x$ 方向に位相速度 v で進む進行波を表し、第 2 項

は $-x$ 方向に同じ位相速度 v で進む進行波を表している。したがって、自由空間の x 方向に伝搬する電子波の状態は、波数 k で指定された定常状態では、電子の存在確率を表す波動関数の絶対値の2乗 $|\psi|^2$ は、逆に x 方向の空間に一樣に広がった不定状態となる。このことは、電子の波数と位置座標の間の**不確定性原理** (uncertainty principle) (付録 A.2) でも説明される。

以上より、波動関数は式 (1.9) で表され、自由空間中の電子のエネルギー E と波数 k の関係は式 (1.7) となり、**図 1.2** に示すように、電子のエネルギーは波数に対し連続的な放物線関数状となる。

$$\psi(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)} \quad \text{または} \quad \psi(x) = Ae^{ikx} \quad (1.9)$$

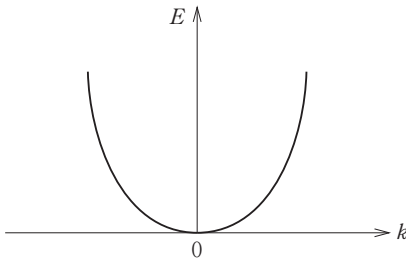


図 1.2 自由空間における電子のエネルギー (E) と波数 (k) の関係

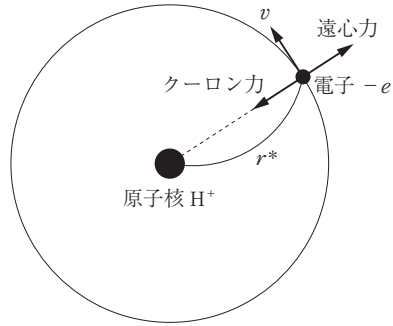


図 1.3 水素原子モデル (古典的モデル)

つぎに、水素原子の電子状態について考える。古典的には、**図 1.3** に示すように、原子核の周りの軌道を速度 v で回る電子の運動を考えることになり、式 (1.10) で示すように、電子は原子核によるクーロン力と遠心力の釣合いで決まる軌道を描くことになる。

$$(\text{遠心力}) \quad \frac{m_0 v^2}{r^*} = \left(\frac{1}{r^* m_0} \right) \left(\frac{h}{\lambda} \right)^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^{*2}} \quad (\text{クーロン力}) \quad (1.10)$$

ここで量子論を適用して、この半径 r^* の軌道上に電子波が存在するには、周回する電子波の位相がそろい、打ち消し合わずに波の状態を保つ条件 (量子化条件) を満足する必要がある。つまり、 $2\pi r^*$ の円周上に電子の波長 λ の整数

倍の波がちょうど乗る条件の式 (1.11) となり、その定在波だけが存在することになる。

$$2\pi r^* = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.11)$$

式 (1.10) と式 (1.11) より軌道半径 r^* を導くと、式 (1.12) のようになる。この半径を**ボーア半径** (Bohr radius) という。

$$r^* = \frac{\varepsilon_0 \hbar^2 n^2}{\pi m_0 e^2} \quad (1.12)$$

このボーア半径の軌道にある電子のエネルギーを求めてみる。電子の運動エネルギーは式 (1.13)、ポテンシャルエネルギーは式 (1.14) でそれぞれ表され、全エネルギー E は式 (1.15) となる。

$$(\text{運動エネルギー}) \quad \frac{1}{2} m_0 v^2 = \frac{m_0 e^4}{8\varepsilon_0^2 \hbar^2 n^2} \quad (1.13)$$

$$(\text{ポテンシャルエネルギー}) \quad -\frac{m_0 e^4}{4\varepsilon_0^2 \hbar^2 n^2} \quad (1.14)$$

$$(\text{全エネルギー}) \quad E = \frac{m_0 e^4}{8\varepsilon_0^2 \hbar^2 n^2} - \frac{m_0 e^4}{4\varepsilon_0^2 \hbar^2 n^2} = -\frac{m_0 e^4}{8\varepsilon_0^2 \hbar^2 n^2} \quad (1.15)$$

このエネルギーは原子核から電子を切り離すのに必要なイオン化エネルギーに相当する。水素原子の場合はボーア半径が小さく、原子に強く束縛されているため、イオン化エネルギーも 13.6 eV と大きな値となる。

ここで、 n は**主量子数**で、 $n = 1$ の軌道が K 殻、 $n = 2, 3, 4, \dots$ はそれぞれ L, M, O, ... 殻に対応する。ただし、電子が原子核の周りをクーロン力で運動する軌道は、実際には円軌道ではなく、楕円軌道となり、電子のエネルギーを表すには、原子核からの距離の他に、軌道角運動量の大きさを表す量子数 (**方位量子数** l) が必要になってくる。 l は一つの主量子数 n に対して、 $l = 0, 1, 2, \dots, n-1$ の n 個の量子数を取り、 $l = 0, 1, 2, 3$ に対応してそれぞれ **s, p, d, f 軌道** と呼ばれている。図 1.4 には、孤立した水素原子のポテンシャルエネルギーと各エネルギー準位を示すが、同じ主量子数 $n = 1$ (K 殻) でも方位量子数 $l = 0, 1$ の s 軌道と p 軌道のエネルギー準位もわずかに異なってくる。また、主量子数、方位量子数の他に、電荷をもつ電子の運動による磁気能率を表す**磁**

索引

【あ】		
アイ・パターン	141	
アインシュタインの関係式	2, 52	
アクセプタ不純物	30	
アバランシェ効果	160	
アバランシェ降伏	81	
アバランシェ増倍率	83	
アバランシェフォトダイオード	160	
【い】		
イオン化不純物散乱	46	
イオン化率	162	
【え】		
永年方程式	99	
エネルギーギャップ	20	
【お】		
オージェ効果	63	
オージェ再結合	122	
オージェ再結合係数	122	
オージェ再結合速度	122	
オージェ電子	62	
オーム接触	84	
重い正孔	103	
【か】		
外因性半導体	27	
外因性領域	37	
外部光電効果	63	
外部微量量子効率	129	
開放端電圧	165	
ガウスの定理	67	
拡散係数	52	
拡散障壁	86	
拡散長	72	
拡散電位	66	
拡散電流	51	
拡散容量	79	
カー係数	179	
カー効果	179	
価電子帯	20	
軽い正孔	103	
還元領域表示	19	
間接遷移型半導体	25	
緩和時間	45	
緩和振動	140	
緩和振動周波数	142	
【き】		
幾何学的因子	171	
擬フェルミ準位	70	
キャリヤ	21	
——の空乏層	65	
——の閉じ込め効果	126	
——の連続の式	55	
吸収	107	
鏡像電荷	59	
曲線因子	167	
許容帯	17	
禁制帯	17	
【く】		
空間的ホールバーニング	138	
空間電荷層	65	
空気質量	168	
空乏層容量	77	
屈折率導波路	177	
屈折率導波路型レーザ	143	
クラッド層	126	
クローニッヒ・ベニーモデル	13	
【こ】		
格子散乱	46	
光電子放出	63	
光伝導効果	153	
光伝導素子	153	
降伏	81	
黒体輻射	168	
【さ】		
再結合	28	
再結合寿命	28	
再結合中心	86	
サブバンド	105	
【し】		
しきい電流	136	
しきい利得	135	
磁気量子数	5	
仕事関数	12	
自然放出	108	
質量作用の法則	34	
自由励起子	116	
主量子数	5	
シュレーディンガー波動方程式	3, 184	
詳細平衡の状態	42	
詳細平衡モデル	171	
少数キャリヤ	36	

状態密度 11
 衝突時間 44
 障壁層 96
 ショックレー・クワイサー
 限界 172
 ショックレーの式 74
 ショットキー効果 60
 ショットキー障壁 85
 ショットキー接合フォトダ
 イオード 155
 ショットキー接触 84
 人工原子 104
 真性キャリア濃度 28
 真性半導体 27
 真性フェルミ準位 28
 真性領域 37

【す】

垂直横モード 139
 水平横モード 139
 スピン量子数 6
 スペクトルホールバーニン
 グ 138

【せ】

正孔 21
 正孔の電離係数 82
 遷移容量 77

【そ】

増倍率 161
 束縛励起子 116

【た】

多重量子井戸レーザ 147
 多数キャリア 36
 多接合タンデム型太陽電池 173
 縦モード 133
 ダブルヘテロ構造 96
 単一量子井戸レーザ 147
 単接合太陽電池 163
 端面発光型 126

短絡電流 163

【ち】

チャーピング 143
 中間バンド型太陽電池 175
 超格子 105
 直接遷移型半導体 25

【つ】

ツェナー降伏 81

【て】

出払い領域 37
 デュロン・ブティの法則 44
 電界吸収効果 179
 電界電子放出 60
 電気光学効果 179
 電気二重層 65
 電子親和力 84
 電子の電離係数 82
 伝導帯 20

【と】

透過損失 169
 等電子トラップ 120
 特性温度 137
 ドナーイオン 29
 ドナー不純物 29
 ド・プロイの関係式 1
 ド・プロイ波 1
 ドリフト速度 44
 トンネル効果 61
 トンネルダイオード 173

【な】

内部電位 66
 内部量子効率 123

【に】

二次電子放出 61

【ね】

熱緩和 169
 熱速度 44
 熱損失 169
 熱電子放出 58

【は】

パウリの排他律 6
 波束 185
 発光 107
 発光ダイオード 126
 波動関数 3
 反転分布 110
 半導体光集積回路 182
 半導体レーザ 131
 バンド間遷移 110

【ひ】

光吸収 108
 光吸収係数 152
 光共振器 132
 光集積回路 177
 光電子集積回路 182
 光導波路 177
 光の閉じ込め効果 126
 光ファイバ 177
 光利得係数 134
 ピニング現象 86
 非発光性再結合 122

【ふ】

ファウラー・ノルドハイム
 の式 61
 ファブリ・ペロー型光共振
 器 133
 フェルミ準位 12
 フェルミ・ディラック分布
 関数 11, 31
 フォノン 47
 フォノン散乱 47
 不確定性原理 4, 186
 不純物イオン化領域 36

負の温度状態	110	飽和電流密度	74	誘導放出	108
プランク定数	1	ポッケルス係数	179	横モード	139
プランクの輻射則	107	ポッケルス効果	179		
フランツ・ケルディッシュ		ホール起電力	49	【り】	
効果	180	ホール係数	50	リチャードソン・ダッシュ	
ブリルアン領域	18	ホール効果	49	マンの式	59
ブレークダウン	160	ボルツマン近似	32	リチャードソン定数	59
フレネル励起子	116	ボルツマン定数	12	利得導波路	177
ブロッホ関数	14			利得導波路型レーザ	143
ブロッホ振動	40	【ま】		量子井戸	96
ブロッホの定理	14	マッハ・ツェンダー型	180	量子井戸層	96
分布帰還型レーザ	145			量子井戸レーザ	147
分布反射型レーザ	146	【み】		量子構造	96
分離閉じ込め形 SQW レーザ	147	ミニバンド	105	量子効率	123
				量子サイズ効果	96
【へ】		【め】		量子細線	96
平均自由時間	44	面発光型	126	量子閉じ込め効果	96
ヘテロ接合	90	面発光レーザ	146	量子閉じ込めシュタルク効果	179
変形 MQW レーザ	147			量子ドット	96
		【も】			
【ほ】		モードホッピング	138	【れ】	
ポアソン方程式	55			励起子	115
ボーア半径	5	【ゆ】		レーザ	131
方位量子数	5	有効質量	14		
方向性結合器型	180	有効状態密度	33	【わ】	
飽和速度	45	誘電緩和	56	ワニア励起子	116
		誘電緩和時間	56		

【A】		EO 効果	179	LED	126
AM	168	【F】		lh	103
APD	160	FF	167	【M】	
【D】		f 軌道	5	MQW レーザ	147
DBR レーザ	146	【G】		MZ 型	180
DC 型	180	GRIN-SCH SQW レーザ	147	【N】	
DFB レーザ	145	【H】		n 型半導体	29
d 軌道	5	hh	103	【O】	
【E】		【L】		OEIC	182
EA 効果	179	LD	132		
E-k 分散関係	1				

	[P]		[Q]		
pin フォトダイオード	159	QD	96	SPIC	182
pn 接合フォトダイオード	156	QWW	96	SQW レーザ	147
p 型半導体	31	QW	96	S-Q 限界	172
p 軌道	5			s 軌道	5
				[V]	
				van der Pauw 法	50
		SCH SQW レーザ	147	VCSEL	146

— 著者略歴 —

1984年 電気通信大学電気通信学部通信工学科卒業
1986年 電気通信大学大学院修士課程修了(通信工学専攻)
1986年 電気通信大学助手
1993年 博士(工学)(東京大学)
1995年 電気通信大学助教授
1997年 電気通信大学准教授
2008年 電気通信大学教授
現在に至る

半導体光デバイス

Semiconductor Photonic Device

© Kouichi Yamaguchi 2020

2020年8月7日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者	やまぐちこういち
発行者	株式会社 コロナ社
代表者	牛来真也
印刷所	新日本印刷株式会社
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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00934-7 C3055 Printed in Japan

(金)



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。