

# 光デバイス入門

— pn 接合ダイオードと光デバイス —

末益 崇 著

コロナ社

## はじめに

本書は、固体物理学を習い始めた大学3, 4年生が、固体物理をベースに光デバイスの基礎を理解することを目的に書かれた本である。光デバイスは、現在および将来の情報通信、省エネルギーおよび創エネルギーを支える重要な基幹デバイスである。本書で扱う内容は、著者が筑波大学の理工系の3, 4年生向けの講義で扱っている15回分の講義の内容を中心にまとめたものである。学部生が相手の講義のため、まずは、直観的に理解できる内容および基礎に重点を置いた。光デバイスについては、すでに、それぞれの分野で、国内外を問わず、最先端の内容を含む立派なテキストが多数出版されている。本書は、そのような専門書にあたる前に、光デバイスの全体像をつかむために読むテキストと位置づけ、光デバイスの大枠を理解できるよう、基礎的な内容に絞って取り上げたつもりである。著者の浅学のため、至らない箇所が多いことを恐れている。

1章では、固体物理を取り上げ、結晶構造、逆格子、 $k$ 空間、ブリュアン域、空格子近似を経て、半導体のエネルギーバンド構造に至る過程を解説した。固体物理の基礎を理解している場合には、この章を飛ばして3章に進むことも可能である。2章では、半導体物性の基礎として半導体のキャリア（電子およびホール）密度がどのように式で表せるか、さらに、光学遷移の基本形として、自然放出、誘導放出、光吸収に伴う電子の遷移割合を2準位モデルを使って導出した。また、禁制帯に局在準位がある場合の再結合割合、ならびに、電子電流およびホール電流の表式を導出した。最後に、局在準位の原因となる半導体結晶の欠陥を取り上げた。3章では、pnホモ接合ダイオードを取り上げ、空乏近似の下、ポアソン方程式を解いてエネルギープロファイル、空乏層幅を導出した。さらに、順方向バイアス印加時のキャリア密度に関する2階線形微分

方程式を解いて少数キャリア密度の分布を求め、そこからダイオードの電流電圧特性が導出されることを示した。ショットキーダイオードの概要も示した。4章では、光検出器の基礎として、素子に印加するバイアス電圧により、太陽電池モード、フォトダイオードモード、アバランシェフォトダイオードモードの三つがあることを示し、それぞれの動作原理を記した。また、動作速度を決める要因として、CR時定数および空乏層をキャリアが走行する時間を取り上げ、それらの表式を導出した。5章では、太陽電池を取り上げた。主として、結晶Si太陽電池を念頭に置き、光照射下のpnホモ接合ダイオードのキャリア密度分布を2階線形微分方程式を解いて求め、そこから電流電圧特性を導出した。導出した光電流の表式から、太陽電池特性向上のための重要なパラメータがなんであるか、理解できるよう努めた。また、結晶Si太陽電池の変換効率向上の歴史を示し、エネルギー変換効率向上のブレイクスルーにつながった技術をいくつか取り上げた。6章では、7章および8章で主役となる化合物半導体を取り上げた。化合物半導体では、組成比を変えることで禁制帯幅を制御できること、さらに、基板上への半導体薄膜のエピタキシャル成長技術を紹介した。7章では、発光ダイオードを取り上げた。発光強度を高めるためにホモ接合ダイオードからダブルヘテロ接合ダイオードへと移行したこと、さらに、光通信用の光源として重要な直接変調の上限周波数についてもレート方程式を解いて解説した。8章では、半導体レーザダイオードを取り上げた。レート方程式を用いて、自然放出から誘導放出に切り替わるしきい値電流の表式を導出した。また、縦モード単一化のための半導体レーザとして、分布帰還型レーザダイオード、分布反射型レーザダイオードおよび面発光レーザダイオードを取り上げた。さらに、光通信用の光源として重要な直接変調周波数の上限を導出し、LEDよりも上限周波数が格段に高いことを示した。レーザダイオードの特性向上には、活性層の低次元化が不可欠である。これについて、しきい値電流密度の年次変化を紹介した。また、各章に章末問題を設定し、理解の助けになるようにした。解答例は、コロナ社のWebページから見られる（詳細はp. 106参照）。

本書の執筆に際しては、研究室の学生諸君の意見をできるだけ取り入れた。また、貴重なご意見をくださった茨城大学鶴殿治彦教授、東京工業大学宮本智之准教授に深く感謝する。本書の執筆の機会をくださり、出版に際して大変お世話になったコロナ社に感謝する。最後に、常日頃より私を励ましてくれる家族、とりわけ妻裕香に心より感謝する。

2018年3月

末益 崇

# 目 次

## 1. 結晶構造とエネルギーバンド構造

1.1 はじめに	1
1.2 結晶系と空間格子	1
1.3 半導体の結晶構造 (Si, GaAs を例に)	3
1.4 エネルギーバンド構造	5
1.5 $k$ 空間	9
1.5.1 フーリエ級数	9
1.5.2 逆格子	11
1.5.3 ブリユアン域	13
1.6 エネルギーバンドとは	15
1.6.1 1電子のシュレディンガー方程式	15
1.6.2 ブロッホの定理	16
1.6.3 空格子のエネルギーバンド	17
1.6.4 ほとんど自由な電子のバンドにおけるエネルギーギャップ	19
章 末 問 題	23

## 2. 半導体物性の基礎

2.1 はじめに	25
2.2 真性半導体のキャリア密度・キャリア密度のエネルギー分布	25
2.2.1 状態密度	25
2.2.2 電子およびホール密度	27
2.2.3 キャリヤ密度のエネルギー分布	28
2.3 不純物ドーブ半導体のキャリア密度・キャリア密度のエネルギー分布	30

2.3.1	n 型 半 導 体	30
2.3.2	電子密度のエネルギー分布	32
2.3.3	p 型 半 導 体	34
2.3.4	ホール密度のエネルギー分布	36
2.4	光学遷移の基本形	38
2.4.1	自然放出, 誘導放出, 光吸収	38
2.4.2	誘導放出割合を高めるには	40
2.5	キャリア再結合および生成の過程	41
2.5.1	バンド間遷移による再結合	42
2.5.2	禁制帯内の局在準位を介した再結合	43
2.5.3	オージェ再結合	46
2.5.4	光吸収によるキャリア生成	47
2.6	キャリア輸送	49
2.7	欠 陥	52
2.8	ホ ー ル 効 果	53
	章 末 問 題	57

### 3. pn 接合ダイオード

3.1	は じ め に	59
3.2	空乏層幅と内蔵電位	59
3.3	空 乏 層 容 量	63
3.4	電流連続の式	66
3.5	暗状態の電流電圧特性	67
3.6	半導体ヘテロ接合	71
3.7	金属-半導体接合	74
3.7.1	ショットキー接合とオーミック接合	74
3.7.2	ショットキーダイオードの電流電圧特性	77
3.7.3	オーミック接合	80
3.8	完全空乏近似の妥当性について	81

章 末 問 題	82
---------	----

## 4. 光検出素子の基礎

4.1 はじめに	84
4.2 光吸収係数とキャリア生成割合	85
4.3 動作モードについて	87
4.3.1 太陽電池モード	88
4.3.2 フォトダイオードモード	89
4.3.3 ショットキーダイオード	90
4.3.4 APD モード	94
4.3.5 光伝導セル	96
4.4 応答速度	98
4.4.1 $CR$ 時定数	98
4.4.2 走行時間	99
4.5 雑音	101
4.5.1 ショット雑音	101
4.5.2 熱雑音	101
4.5.3 光検出器の性能を表す指標	102
章 末 問 題	105

## 5. 太陽電池

5.1 はじめに	107
5.2 太陽光のスペクトル	108
5.3 光生成キャリアの輸送メカニズム	109
5.4 光電流密度	112
5.5 光照射下のキャリア密度分布と電流電圧特性	114
5.5.1 p型中性領域について	114
5.5.2 空乏領域について	116
5.5.3 n型中性領域について	117

5.6 表面再結合	118
5.7 先端技術の導入によるエネルギー変換効率向上の歴史	120
5.7.1 タンデム型太陽電池	120
5.7.2 表面再結合の抑制	123
5.8 結晶 Si 太陽電池エネルギー変換効率向上の歴史	124
章 末 問 題	126

## 6. 化合物半導体

6.1 はじめに	128
6.2 種類について	128
6.3 化合物半導体の禁制帯幅と格子定数	129
6.4 半導体積層構造の結晶成長方法	133
章 末 問 題	135

## 7. 発光ダイオード

7.1 はじめに	136
7.2 半導体で自然放出を実現するには	137
7.3 ホモ接合ダイオードからダブルヘテロ接合ダイオードへ	140
7.4 静特性と動特性	144
章 末 問 題	147

## 8. レーザダイオード (LD)

8.1 はじめに	148
8.2 LD の基本構造	149
8.3 導波モードについて	149
8.4 LD の動作原理	153
8.5 レーザ発振の条件	155
8.6 単一モードレーザ	158



8.7 活性層の低次元化 .....	161
8.8 静特性と動特性 .....	165
8.8.1 あらまし .....	165
8.8.2 静特性 .....	166
8.8.3 動特性 .....	168
章末問題 .....	170
付 録 .....	172
引用・参考文献 .....	174
索 引 .....	177

# 1.

## 結晶構造とエネルギーバンド構造

### 1.1 はじめに

光エレクトロニクスに関わる半導体の多くは、原子が三次元空間に規則正しく配列した単結晶である。また、発光素子では、異なる半導体膜を積層したヘテロ接合が多用される。そこでは、半導体膜間で格子定数が合うような工夫がなされている。このため、本章で扱う原子の規則配列による結晶と、これに起因するエネルギーバンド構造を理解することは、半導体の性質を知る上でとても重要である。

本章では、実空間の結晶構造からスタートして、そのつぎに逆格子を、そして、原子の周期性を取り入れた  $k$  空間へ、さらに、エネルギーバンド構造へと話を進める。

### 1.2 結晶系と空間格子

結晶は、周期的に配列した原子により構成されている。グラフェンなどの二次元の結晶も存在するが、多くの結晶は三次元構造を持つ。図 1.1 に示すように、最小の周期を与える三つのベクトル  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$ ,  $\mathbf{a}_3$  を基本並進ベクトルという。結晶内の任意の格子点  $\mathbf{R}_n$  は、基本並進ベクトルを用いて、つぎのように表せる。

$$\mathbf{R}_n = n_1\mathbf{a}_1 + n_2\mathbf{a}_2 + n_3\mathbf{a}_3 \quad (1.1)$$

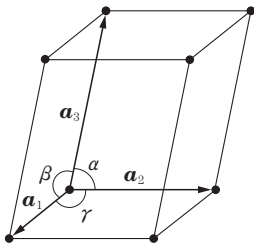
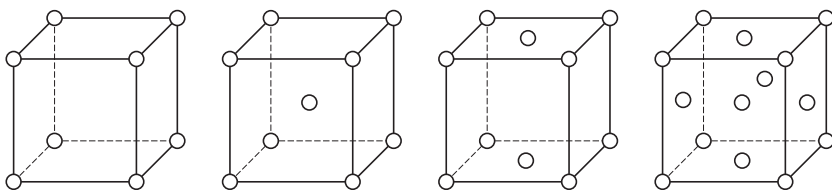


図 1.1 基本並進ベクトルと単位胞

これら三つのベクトルで構成される平行六面体，すなわち結晶の最小構成単位を基本単位胞 (primitive unit cell) と呼ぶ。基本単位胞はつねに 1 個の格子点を含む。同じ性質を持ち体積が最小でないものを，一般に単位胞という。三次元空間を単位胞の周期的な配列ですき間なく埋め尽くすことのできる格子の構造は限られており，表

表 1.1 七つの結晶系と 14 種類のブラベ格子

結晶系	軸の長さ, 角度	対応するブラベ格子
立方晶	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	単純立方 (P) 体心立方 (I) 面心立方 (F)
正方晶	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	単純立方 (P) 底心立方 (C)
直方晶	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	単純斜方 (P) 体心斜方 (I) 面心斜方 (F) 底心斜方 (C)
菱面体	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	単純のみ (P)
六方晶	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	単純のみ (P)
単斜晶	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	単純単斜 (P) 底心単斜 (C)
三斜晶	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	単純のみ (P)



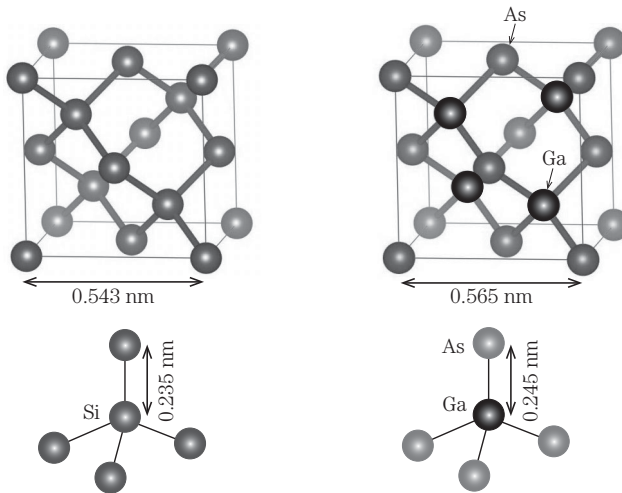
(a) 単純(P) (b) 体心(I) (c) 底心(C) (d) 面心(F)

図 1.2 単純格子 (P), 体心格子 (I), 底心格子 (C), 面心格子 (F) の模式図

1.1 および図 1.2 に示す立方，正方，直方，菱面体，六方，単斜，三斜の 7 晶系，14 種類のみ存在する。これらをブラベ格子と呼ぶ。式 (1.1) で与えられる点の集合が三次元のブラベ格子である。

## 1.3 半導体の結晶構造 (Si, GaAs を例に)

半導体には非常に多くの種類があるが，ここでは，代表的な半導体として，結晶 Si と GaAs を取り上げる。半導体の結晶は，格子が三次元に規則正しく配列し，Si や Ge はダイヤモンド構造 [図 1.3(a)] を，GaAs は閃亜鉛鉱構造 [図 1.3(b)] と呼ばれる結晶構造を持つ。Ga と As が同じ元素であれば，ダイヤモンド構造となるため，閃亜鉛鉱構造はダイヤモンド構造と似た結晶構造といえる。ダイヤモンド構造は，二つの面心立方格子を互いに体対角線に沿って 1/4 周期ズラした構造となっている。別のいい方をすると，ダイアモン



(a) ダイヤモンド構造を持つ結晶 Si (b) 閃亜鉛鉱構造を持つ GaAs

図 1.3 結晶 Si の単位胞と Si-Si 結合および GaAs の単位胞と Ga-As 結合の模式図

表 1.2 Si 原子（原子番号 14）の電子配置

主量子数	軌道	電子数	表記
$n = 3$	$3p$	2	$(3p)^2$
	$3s$	2	$(3s)^2$
$n = 2$	$2p$	6	$(2p)^6$
	$2s$	2	$(2s)^2$
$n = 1$	$1s$	2	$(1s)^2$

ド構造とは、 $(0, 0, 0)$  と  $(1/4, 1/4, 1/4)$  を基本構造とする面心立方格子といえる。Si 原子は 14 族元素であり、主量子数  $n = 1$  から  $n = 3$  の軌道まで 14 個の電子が、表 1.2 のように  $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^2$  の形で配置している。

この中で、 $n = 3$  の軌道にある四つの電子を最外殻電子と呼ぶ。結晶 Si では、各 Si 原子が隣接する四つの等価な Si 原子と電子を 1 個ずつ出し合って、各 Si 原子は 2 個の電子を共有して結合を形成する。このような結合を共有結合と呼ぶ。また、この結合を担う電子を価電子と呼ぶ。図 1.3(a) に示したとおり、Si 原子間の距離は 0.235 nm であり、結晶 Si では、どちらかの Si 原子に電子が引きつけられて偏った分布をすることはない。正四面体の中心に位置する Si 原子は、正四面体の頂点に位置する四つの Si 原子と共有結合を形成する。原子番号 32 番の Ge 原子は、最外殻電子数が  $(4s)^2(4p)^2$  の 4 個で、結晶 Si と同様な共有結合を持つ。

一方、GaAs の場合には、図 1.3(b) に示したように、Ga と As が 1:1 の割合で交互に位置していて、Ga 原子とは必ず As 原子が結合するように、互い違いに配置している。Ga は原子番号 31 の 13 族元素であり、最外殻電子数は  $(4s)^2(4p)^1$  の 3 個である。As は原子番号 33 の 15 族元素であり、最外殻電子数は  $(4s)^2(4p)^3$  の 5 個である。このため、Ga 原子と As 原子間の結合を担う電子数は平均で 2 個となり、結晶 Si と同じであるが、As 原子にやや偏った電子分布となっている。電子分布に偏りがある結合をイオン結合と呼ぶ。GaAs は、共有結合にイオン結合の性質が加わったものとして理解される。結晶 Si の格子定数は 0.543 nm であり、GaAs のそれは 0.565 nm である。価電子は原子間の結合を担っているため、低温では電気伝導に寄与できないが、後述するように、高温になると、または、禁制帯幅よりもエネルギーの大きなフォトン（光子）の入射により一部の共有結合が切れ、電気伝導を担うキャリア

(電子とホール)が発生する。

## 1.4 エネルギーバンド構造

半導体の性質を理解するには、エネルギーバンド構造の理解が欠かせない。エネルギーバンド構造がどのようにして成り立つのかを考えるのに、二つの立場がある。一つは孤立原子のエネルギー準位から出発して、結晶構造に配置した近接原子との相互作用を取り入れる立場である。もう一つは、自由電子から出発して、原子が作る結晶ポテンシャルの効果を取り入れる立場である。ここでは、まず、前者を説明し、後者については、 $k$ 空間を導入して1.5節以降で説明する。

原子が近接するとエネルギー準位が分離する様子を、水素分子を例にとって説明する。その後、結晶 Si を例に取り、エネルギーバンド構造が形成される様子を見る。

孤立した水素原子では、電子は離散的なエネルギーを持ち、そのようなエネルギーをエネルギー準位と呼ぶ。水素原子のエネルギー準位  $E_n$  は、 $n$  を主量子数として、次式で与えられる。

$$E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ [eV]} \quad (1.2)$$

つぎに、水素原子 2 個からなる水素分子を考える。2 個の水素原子が十分離れていれば、ある量子数に対応するエネルギー準位は同じエネルギーを持つ、つまり、二重に縮退した状態である。お互いの軌道が重なるまで接近してくると、電子は同じ量子状態を占めることはないとのパウリの排他原理に基づき、縮退した準位は二つに分裂する。各水素原子の電子は、お互いに電子の軌道が重なるため、このような分裂の影響を受ける。結晶では、原子数が格段に増える。もし、 $N$  個の原子から結晶を作れば、最外殻電子については、 $N$  重に縮退した準位が  $N$  個の準位に分離することになる。これらのエネルギー準位は非常に近接しているため、連続したバンド（帯）と見なせる。

# 索 引

## 【あ】

アクセプタイオン 60  
 アクセプタ準位 35  
 アクセプタ不純物 35  
 アバランシェ降伏 94  
 アバランシェ増倍 94  
 アバランシェフォト  
 ダイオード 84  
 暗電流 67, 115

## 【い】

イオン化率 95  
 イオン結合 4  
 移動度 50, 129

## 【う】

ウイグナー・サイツセル  
 13, 14

## 【え】

液相成長法 133  
 エネルギーギャップ 6  
 エネルギー準位 5  
 エネルギーバンド構造 5  
 エネルギー変換効率 121  
 エピタキシャル成長 149  
 エントロピー 32

## 【お】

応答速度 98  
 オージェ再結合 46  
 オーミック接合 74

## 【か】

回折 23

階段屈折率分布 149  
 拡散電流 51  
 拡散容量 64  
 核融合反応 108  
 化合物半導体 128  
 過剰雑音指数 104  
 化石燃料 108  
 片側階段接合 64  
 活性層 141  
 価電子 4  
 価電子帯実効状態密度 29  
 価電子帯バンド不連続 72  
 間接遷移型半導体 9, 43  
 完全空乏近似 60

## 【き】

奇数次モード 152  
 擬フェルミ準位 49  
 基本単位胞 2  
 基本並進ベクトル 1  
 逆格子点 10  
 逆格子ベクトル 11  
 逆方向バイアス 70  
 逆方向飽和電流密度 70  
 キャリヤ走行時間 97  
 共振状周波数 169  
 共有 6  
 共有結合 4  
 局在準位 43  
 局在準位密度 44  
 禁制帯 6

## 【く】

空間電荷 60  
 空気質量 109  
 空格子 17

空格子点 53  
 偶数次モード 152  
 空乏層 60  
 空乏層幅 59  
 空乏層容量 63  
 屈折率 151  
 クラッド層 143  
 クーロン力 30

## 【け】

欠陥 52  
 結晶運動量 7  
 結晶ポテンシャル 16  
 原子形状因子 13  
 元素半導体 128

## 【こ】

コア 150  
 格子間原子 53  
 格子欠陥 52  
 光子寿命時間 144  
 格子整合 133  
 格子定数 4  
 格子点 144  
 光子密度 144  
 構造因子 12  
 光速 151  
 黒体輻射 108  
 コヒーレンス 40  
 コヒーレント光 148  
 混晶半導体 130

## 【さ】

最外殻電子 4, 6  
 再結合割合 42  
 雑音帯域幅 101

<b>【し】</b>		<b>【た】</b>		<b>【と】</b>	
しきい値電流密度	164	体心立方格子	12	等価雑音電力	104
仕事関数	74	ダイヤモンド構造	3	動特性	168
自然放出	38	太陽	108	特性 X 線	24
自然放出係数	165	太陽光のスペクトル	108	特性温度	155
実効状態密度	51	太陽電池	107	ドナーイオン	60
実効リチャードソン定数	79	多数キャリア	32	ドナー準位	31
遮断周波数	99	縦モード	152	ドナー不純物	31
周期関数	16	ダブルヘテロ構造	140	ドーピング濃度	81
周期的境界条件	26	ダブルヘテロ接合		ドリフト電流	51
自由電子近似	18	ダイオード	136	トンネル電流	80
受光感度	97	多モード化	158		
主量子数	4	単一モードレーザ	158	<b>【な】</b>	
シュレディンガー方程式	16	単位胞	2	内蔵電位	59, 60
順方向バイアス	67	単位胞内	6	内蔵電場	83
小信号解析	145	ダングリング・ボンド	53	内部エネルギー	32
少数キャリア	32	タンデム型	120		
少数キャリア拡散長	67	タンデム型太陽電池	121	<b>【ね】</b>	
少数キャリア寿命	43			熱雑音	102
状態密度	25	<b>【ち】</b>		熱電子放出	78, 80
ショットキー接合	74	中性領域	60		
ショット雑音	101	注入比	70	<b>【は】</b>	
真空準位	50, 59	直接遷移型半導体	9, 43	パワリの排他原理	5
信号対雑音比	101	直接変調	144	バックコンタクト構造	126
刃状転位	52	直列抵抗	109	発光ダイオード	39, 136
真性キャリア密度	29			波動関数	16
真性半導体	27	<b>【て】</b>		反射高速電子線回折	135
真性フェルミ準位	30	定在波	156	反射率	149
真性領域	33	デバイ長	82	反転分布	41
		出払い領域	33	バンドギャップ・エンジ	
<b>【せ】</b>		転位	52	ニアリング	130
静特性	166	転位線	52	バンド不連続	161
整流性	70	電荷中性条件	81		
積層欠陥	53	点欠陥	53	<b>【ひ】</b>	
閃亜鉛鉱構造	3	電子親和力	50	光起電力効果	84
遷移	39	電子・ホール対の生成割合		光吸収	38
全反射	150		42	光吸収係数	47
		電子密度分布	12	光吸収層	86
<b>【そ】</b>		伝導帯実効状態密度	29	光通信	170
束縛エネルギー	31	伝導帯バンド不連続	72	光伝導効果	84
		電流電圧特性	67	光伝導セル	96
		電力条件	156	光電流	115



光電流利得	97	並列抵抗	109	モード・ホッピング	158
光の吸収長	100	ベガード則	131		
光の伝搬定数	155	へき開	149	<b>【ゆ】</b>	
光ファイバ	148	ヘテロ接合	71	有機金属気相成長法	133
比検出能力	104	ヘルムホルツの自由		有効質量	7
比接触抵抗	80	エネルギー	32	誘導放出	38
非発光再結合	52	変換効率	107	ユニポーラデバイス	80
比誘電率	30	変調周波数の上限	144		
表面再結合	118, 119	変調度	146	<b>【よ】</b>	
表面再結合速度	119			横モード	152
表面準位	77	<b>【ほ】</b>			
表面テクスチャ構造	125	ポアソン方程式	61	<b>【ら】</b>	
表面パッシベーション	125	ボーイングパラメータ	131	らせん転位	52
		飽和ドリフト速度	99		
<b>【ふ】</b>		捕獲断面積	44	<b>【り】</b>	
ファブリーペロー型LD	149	ホール効果	53	利得係数	155
フェルミ・ディラック		ホール測定	53	量子井戸	161
分布関数	28	ボルツマンの輸送方程式	49	量子化準位	161
フォノン	47	ボルツマン分布	140	量子効率	89
不活性化	123	<b>【ま】</b>		量子細線構造	164
負荷抵抗	98	マクスウェル方程式	150	量子ドット	164
ブラッグの法則	23	<b>【み】</b>		両性不純物	38
ブラッグ面	14	未結合手	123		
ブラベ格子	3	ミシビリティギャップ	133	<b>【れ】</b>	
フーリエ級数	9	ミスフィット転位	129	レーザダイオード	40
ブリュアン域	8	<b>【め】</b>		レーザ発振	154
ブロッホ関数	17	面心立方格子	3	——の位相条件	156
ブロッホの定理	16	面発光レーザ	160	レート方程式	136
分子線エピタキシー法	133	<b>【も】</b>		連続発振	154
分布帰還型レーザ	158	モード	149		
				<b>【ろ】</b>	
<b>【へ】</b>				ローレンツ力	54
並進対称性	16				
平板導波路	149				

<b>【A】</b>		<b>【B】</b>		<b>【C】</b>	
air mass	109	bowing parameter	131	CR 時定数	90
AM	109	Bragg の法則	23	<b>【D】</b>	
APD	84	BSF	124	DFB レーザ	158
Auger 再結合	46			DH	140

	<b>[F]</b>		<b>[N]</b>		Shockley-Reed-Hall 再結合	43
Fabry-Perot 型 LD	149	NEP	104	$sp^3$ 混成軌道	6	
Fermi-Dirac 分布関数	28	$np$ 積	30	SRH 再結合	43	
fill factor	111			<b>[T]</b>		
	<b>[K]</b>		<b>[P]</b>		TE モード	150
$k$ 空間	5	pin フォトダイオード	84	TM モード	150	
	<b>[L]</b>	pn 接合ダイオード	59	<b>[V]</b>		
LD	40			van der Pauw 法	55	
LED	39, 136	QD	164	VCSEL	160	
LPE	133	QW	161	<b>[X]</b>		
	<b>[M]</b>	<b>[R]</b>		X 線回折	12	
MBE	133, 134	RHEED	135	<b>[数字]</b>		
miscibility gap	133	<b>[S]</b>		1 電子近似	15	
MOPVE	133	Schrödinger 方程式	16			

— 著者略歴 —

1991年 東京工業大学工学部電気電子工学科卒業  
1993年 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了（電気電子工学専攻）  
1996年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了（電気電子工学専攻），博士（工学）  
1996年 筑波大学助手  
1998年 筑波大学講師  
2003年 筑波大学助教授  
2007年 筑波大学准教授  
2010年 筑波大学教授  
現在に至る

光デバイス入門 — pn 接合ダイオードと光デバイス —

Introduction to Optoelectronic Semiconductor Devices — pn junction diodes and optical devices —

© Takashi Suemasu 2018

2018年 5月10日 初版第1刷発行



検印省略

著者 <sup>すえ</sup>末 <sup>ます</sup>益 <sup>たかし</sup>崇  
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 978-4-339-00910-1 C3055 Printed in Japan

(新井)



<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 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, 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。