

## 序

---

今日の情報化社会は、ダイオードやトランジスタなどの電子デバイスを数百万～数千万個の規模で集積化した半導体集積回路によって支えられている。集積回路が“産業の米”と呼ばれる所以である。一方、この多量の情報を伝達する中心的役割を果たしている光通信システムでは、半導体レーザやホトダイオードなどの半導体光デバイスが送受信端に組み込まれている。このように半導体電子デバイスと光デバイスは現代人の生活になくってはならないものになっており、また、その生産に関してもわが国が世界のトップを占めるに至っている。しかし一方で、わが国では新しい基盤技術に結び付く基礎的な研究成果が少ないとの指摘も多いため、若い研究者や学生諸君の柔軟な思考力に期待するところがきわめて大きい。

このような背景の下に、本書では半導体電子デバイスと光デバイスに関連した基礎的物理現象から、デバイスの特性、用途までを一貫して取り上げている。具体的には、第1, 2章がおもに半導体物性の基礎、第3～5章がpn接合ダイオードとバイポーラトランジスタ、第6, 7章が電界効果トランジスタ(FET)、第8章が集積回路、第9章がサイリスタ、第10, 11章が光デバイスである。内容は、原理的なもの、基礎的なものを重視しているが、集積回路に関してはたんなるトランジスタの組合せとしてではなく、複合化された機能について記述したつもりである。また、実用化されている電子デバイスは大部分がバイポーラトランジスタとMOS FETであるが、MOS FETの動作の理解を助けるために、第6章をMOS形以外のFETの説明に充てた。読者の対象としては、大学の高学年生、および大学院生を念頭に置いているが、独学の読者にも納得いただけるように、式の導出はできるだけ本書の範囲内で行えるように心がけた。また、問題の解答も導出過程を重視して作成した。

おわりに、本書の一部の章は、本学工学部の高橋清教授にお譲りいただいた

原稿が下敷きになっている。高橋教授のご好意に心から感謝の意を表す。さらに、本書をまとめるに当たり、貴重な御助言をいただき、その著書を参考にさせていただいた本学総合理工学研究科古川静二郎教授、および工学部松村正清教授に深謝する。また、本書の刊行でいろいろお世話いただいたコロナ社の方々に御礼申し上げる。

1989年11月

著 者

参考にさせていただいた文献

- [1] 高橋 清：半導体工学，森北出版（1975）。
- [2] 柳沢 健：基礎電子回路 I，丸善（1978）。
- [3] 古川静二郎，松村正清：電子デバイス〔I〕，〔II〕，昭晃堂（1980）。
- [4] Sze, S. M. : Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed., John Wiley & Sons (1981).
- [5] 古川静二郎：半導体デバイス，コロナ社（1982）。
- [6] Muller, R. S. & Kamins, T. I. : Device Electronics for Integrated Circuits, 2nd Ed., John Wiley & Sons (1986).
- [7] 松村正清：集積回路工学，朝倉書店（1986）。

# 目 次

---



## 固体の帯理論

---

1.1 固体の導電率 .....	1
1.2 固体内の電子状態 .....	2
1.3 導体・半導体・絶縁体のエネルギー帯構造 .....	5
1.4 波動方程式からのエネルギー帯理論の説明 .....	7
1.5 許容帯中の電子の状態密度 .....	11
1.6 許容帯中の電子の運動 .....	14
1.6.1 実効質量 .....	15
1.6.2 正孔 .....	16
1.7 エネルギー分布則 .....	17
演習問題 .....	20



## 半導体の電気伝導

---

2.1 半導体の結晶構造とエネルギー帯構造 .....	21
2.2 半導体の電気伝導現象 .....	22
2.2.1 熱刺激による電気伝導現象 .....	23
2.2.2 置換形原子（不純物）を含む電導現象 .....	24
2.2.3 半導体の表面電導現象 .....	26
2.3 真性半導体中のキャリア濃度 .....	26
2.4 外因性半導体のキャリア濃度 .....	30
2.4.1 温度依存性 .....	31

2.4.2	不純物原子濃度とキャリア濃度	32
2.5	半導体中のキャリアの振舞い	33
2.5.1	電界中のキャリアの運動	34
2.5.2	キャリアの発生と再結合	35
2.5.3	電流の式とアインシュタインの関係	37
2.5.4	少数キャリアの連続の方程式	39
	演習問題	40



## 半導体接合

3.1	半導体 - 半導体接合	42
3.1.1	pn 接合のエネルギー帯図	42
3.1.2	pn 接合の電圧 - 電流特性	44
3.1.3	pn 接合の容量	48
3.1.4	pn 接合の降伏現象とトンネルダイオード	50
3.1.5	ヘテロ接合	53
3.2	金属 - 半導体接合	56
3.2.1	金属 - 半導体接合のエネルギー帯図	56
3.2.2	ショットキー障壁ダイオードの電圧 - 電流特性	57
3.2.3	金属 - 半導体接合の容量 - 電圧特性	59
3.3	金属 - 絶縁体 - 半導体接合	59
	演習問題	61



## バイポーラトランジスタの基本特性

4.1	バイポーラトランジスタの動作原理	63
4.1.1	基本構造	63
4.1.2	エネルギー帯図と動作原理	64
4.2	電流伝送率	66
4.2.1	ベース中性領域特性	66
4.2.2	エミッタ接合特性	68

4.2.3	コレクタ接合特性	69
4.2.4	電流伝送率の最適化	69
4.3	電圧 - 電流特性と等価回路	71
4.3.1	直流電圧 - 電流特性	71
4.3.2	交流特性	75
4.3.3	低周波微小信号等価回路	76
4.3.4	四端子パラメータ	79
4.4	トランジスタ動作における諸現象	81
4.4.1	電流増幅率のエミッタ電流依存性	81
4.4.2	エミッタ電流の集中現象	82
4.4.3	アーリー効果とパンチスルー	82
4.4.4	なだれ降伏	83
	演習問題	84



## ダイオードおよびトランジスタの実際

5.1	製作方法	86
5.1.1	基板結晶成長技術	86
5.1.2	リソグラフィ技術	88
5.1.3	加工技術	88
5.2	高周波動作特性	91
5.2.1	pn接合の動特性	91
5.2.2	トランジスタの動特性	93
5.2.3	高周波等価回路	95
5.2.4	高周波増幅限界	96
5.2.5	ドリフト形トランジスタ	99
5.3	スイッチング特性	101
5.3.1	ダイオードのスイッチング特性	101
5.3.2	トランジスタのスイッチング特性	103
5.3.3	トランジスタの大信号直流等価回路	105
5.3.4	スイッチングトランジスタ	106
5.4	電力特性	108

5.4.1	ダイオードの電流容量と逆耐圧	108
5.4.2	トランジスタの出力限界	109
	演習問題	110



## ユニポーラトランジスタ

6.1	分類	112
6.2	接合形およびショットキー障壁形電界効果トランジスタ	114
6.2.1	動作原理	114
6.2.2	電圧-電流特性	116
6.2.3	小信号等価回路	118
6.2.4	実際例	120
6.3	ホットエレクトロントランジスタ	121
6.3.1	金属ペーストランジスタ	121
6.3.2	半導体ホットエレクトロントランジスタ	122
6.4	静電誘導トランジスタ	123
6.4.1	動作原理	123
6.4.2	電圧-電流特性	124
6.4.3	交流増幅特性	125
6.4.4	実際例	126
	演習問題	126



## MIS形電界効果トランジスタ

7.1	MIS ダイオードの定量的検討	128
7.1.1	理想 MIS ダイオードの基本的性質	128
7.1.2	理想 MIS ダイオードの電位分布	131
7.1.3	実際の MIS ダイオード	134
7.2	MIS FET の動作原理	137
7.2.1	MIS FET の構造と分類	137
7.2.2	電圧-電流特性	138

7.2.3	チャンネル内の電界分布と電位分布	141
7.3	MIS FET の回路的考察	144
7.3.1	低周波等価回路	144
7.3.2	高周波等価回路	145
7.3.3	四端子パラメータ	147
7.3.4	高周波動作限界	147
7.4	MIS FET の諸現象と実際例	148
7.4.1	基板バイアス効果	148
7.4.2	チャンネル長変調効果とドレイン耐圧	149
7.4.3	実 際 例	150
	演 習 問 題	152



## 集積回路

8.1	集積回路の製作法	154
8.1.1	モノリシック IC の特徴	154
8.1.2	バイポーラ IC の製作法	155
8.1.3	MOS IC の製作法	158
8.2	アナログ IC	160
8.2.1	バイアス回路	160
8.2.2	差動増幅回路	162
8.2.3	演算増幅器	163
8.3	デジタル IC	164
8.3.1	デジタル論理	164
8.3.2	バイポーラ論理回路	166
8.3.3	MOS 論理回路	171
8.4	メモリ回路	177
8.4.1	SRAM	178
8.4.2	DRAM	179
	演 習 問 題	179



## サイリスタと関連デバイス

9.1 サイリスタの構造と動作原理 .....	182
9.1.1 構造 .....	182
9.1.2 二端子特性 .....	183
9.1.3 ゲート制御特性 .....	185
9.2 サイリスタおよび関連デバイスの分類 .....	186
9.2.1 SCR .....	186
9.2.2 逆導通 SCR .....	187
9.2.3 トライアック .....	188
9.2.4 GTO サイリスタ .....	188
9.2.5 光サイリスタ .....	189
9.2.6 ユニジャンクショントランジスタ .....	190
9.3 サイリスタの実際と回路応用 .....	191
9.3.1 サイリスタの定格 .....	191
9.3.2 回路応用 .....	191
演習問題 .....	194



## 光電変換デバイス

10.1 光と物質との相互作用 .....	195
10.1.1 相互作用の種類 .....	195
10.1.2 光の吸収現象 .....	197
10.1.3 光の屈折現象 .....	204
10.2 光の吸収現象を利用した効果 .....	205
10.2.1 外部光電効果 (光電子放出効果) .....	205
10.2.2 内部光電効果 (光導電効果) .....	206
10.2.3 光起電力効果 (障壁形) .....	209
10.3 光電変換デバイス .....	211
10.3.1 太陽電池 .....	211



10.3.2 光検出器 .....	213
10.3.3 固体撮像デバイス .....	216
演習問題 .....	217



## 発光デバイス

11.1 発光現象—ルミネセンス .....	219
11.1.1 放射形遷移と発光スペクトル .....	219
11.1.2 キャリヤ励起（外部刺激）の方法 .....	221
11.2 発光ダイオード .....	224
11.2.1 pn接合の発光 .....	224
11.2.2 発光ダイオード用材料 .....	225
11.3 半導体レーザーダイオード .....	227
11.3.1 動作原理 .....	227
11.3.2 pn接合レーザーダイオード .....	230
11.3.3 ヘテロ接合レーザーダイオード .....	231
11.3.4 その他のポンピング法を用いた半導体レーザー .....	233
演習問題 .....	234

## 演習問題解答

## 索引

## 物理定数および主要関連数値

物 理 量	記 号	数 値
光速度	$c$	$2.998 \times 10^8$ m/s
電子の静止質量	$m$	$9.110 \times 10^{-31}$ kg
電子電荷	$q$	$1.602 \times 10^{-19}$ C
プランク定数	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$ J $\cdot$ s
	$\hbar (= h / (2\pi))$	$1.055 \times 10^{-34}$ J $\cdot$ s
ボルツマン定数	$k_B$	$1.381 \times 10^{-23}$ J/K
アボガドロ数	$A_0$	$6.022 \times 10^{23}$ 1/mol
真空の誘電率	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-12}$ F/m
真空の透磁率	$\mu_0 (= 4\pi/10^7)$	$1.257 \times 10^{-6}$ H/m
ボーア半径	$a_0$	$5.292 \times 10^{-11}$ m
300 K 相当の電圧	$k_B T / q$	$2.585 \times 10^{-2}$ V
1 eV 相当の波長	$hc / q$	$1.240 \times 10^{-6}$ m
1 eV 相当の温度	$q / k_B$	$1.160 \times 10^4$ K



# 固体の帯理論

半導体デバイスについて学ぶには、まず固体の電気伝導現象を理解する必要がある。その基本となるのが本章で説明する固体の帯理論で、今世紀理論物理の最大の収穫の1つといわれている。この理論によって固体の電気伝導現象が見事に説明できるようになり、次章以後で説明する半導体の諸性質もすべてこの理論が根底になっている。本章ではこの理論を理解すると同時に、学問の美しさをも学びとっていただきたい。

## 1.1 固体の導電率

固体の物理的性質を最も特徴づけているものに導電率がある。図 1.1 は数種の固体の導電率<sup>†</sup>を示したものである。導体である Cu などは導電率  $\sigma \approx 10^8 \text{ S m}^{-1}$  であるが、パラフィンでは  $\sigma \approx 10^{-16} \text{ S m}^{-1}$  で、Cu のほうがじつに  $10^{24}$  倍大きい。同じ固体でありながら、このように値が大幅に異なるのは、他の物理定数にはあまり見当たらない。

導電率が物質によってなぜ  $10^{24}$  倍も異なるかは、これから説明する固体の帯理論が発表されるまでは説明できなかった。すなわち以前は、“導体は自由電子の器であり、導体には自由電子がたくさんあるが、絶縁体には自由電子がほ

<sup>†</sup> 導電率の単位は、従来  $[\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}]$  あるいは  $[\text{Vm}^{-1}]$  であったが、国際単位系 (SI) では  $[\text{S m}^{-1}]$  である (S はジーメンズと読む)。

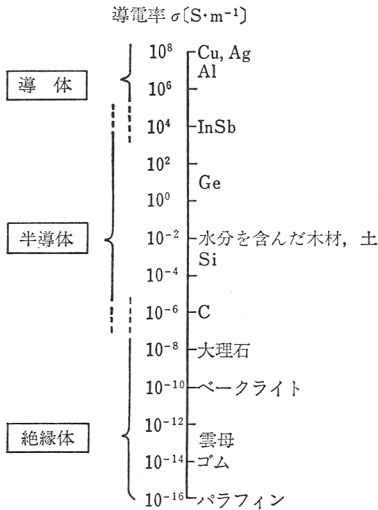


図 1.1 固体の導電率系列

とんどない”ということの説明されていた。しかし，“それならばなぜ導体には自由電子がたくさんあるのか？”ということは説明できなかった。これを見事に説明したのが固体の帯理論である。

## 1.2 固体内の電子状態

固体中の電子の状態を考えるには、固体を形成している原子の電子状態にさかのぼって考える必要がある。そこでまず原子の状態を考えてみよう。

ボーアの水素原子モデルによると、電子は陽子（原子核）のまわりを主量子数  $n$  で決まる円運動をしていて、それに対応するエネルギーの値は次式で与えられる。

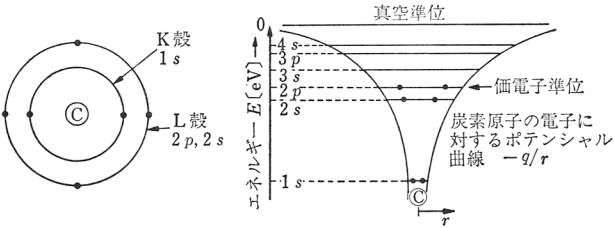
$$E_n = -\frac{mq^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2} = -13.6 \frac{1}{n^2} \text{ [eV]} \quad (n: \text{自然数}) \quad (1.1)$$

ここで、 $m$  は電子の質量、 $q$  は電子電荷、 $\epsilon_0$  は真空中の誘電率、 $h$  はプランク定数である。

式 (1.1) から電子はとびとびの不連続なエネルギー値しかとり得ないことがわかる。そして第  $n$  番目の軌道には  $2n^2$  個の電子が入れる。ところが、水素原子模型をもっと詳細に検討すると、主量子数のほかに方位量子数、磁気量子数、スピン量子数の計 4 つの量子数によって電子の状態が与えられる。したがって電子のエネルギーも主量子数  $n$  で決まるのではなくて、方位量子数  $l$  の値によっても変わる。言い換えると  $n$  は同じでも  $l$  が異なると、わずかに異なるエネルギー準位 (energy level) を作る。そこでこれらの細分化されたエネルギー準位をはっきり表すために、表 1.1 に示すように  $1s, 2s, 2p$  などの記号が用いられる。最初の数字が主量子数を表し、つぎの英文字  $s, p, d, f, \dots$

表 1.1 代表的原子の電子構造

殻		K	L			M			N
電子のエネルギー準位	量子状態の数	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p
		2	2	6	2	6	10	2	6
元 素	原子番号	電 子 の 数							
水 素	1	1							
ヘ リ ウ ム	2	2							
ベ リ リ ウ ム	4	2	2						
ほ う 素	5	2	2	1					
炭 素	6	2	2	2					
ネ オ ン	10	2	2	6					
け い 素	14	2	2	6	2	2			
ア ル ゴ ン	18	2	2	6	2	6			
銅	29	2	2	6	2	6	10	1	
ゲ ル マ ニ ウ ム	32	2	2	6	2	6	10	2	2
ク リ プ ト ン	36	2	2	6	2	6	10	2	6



(a) 孤立 C 原子の電子状態 (b) エネルギー準位図、縦軸のエネルギーは実際の目盛を表していない。(1s は等間隔目盛では、はるか下になる)。

図 1.2

はそれぞれ  $l=0, 1, 2, 3, \dots$  に対応している。

C 原子を例にとってみよう。C の原子番号は 6 で、ボーアの水素原子モデルに従うと、C 原子中の電子の状態は図 1.2 のように表すことがで

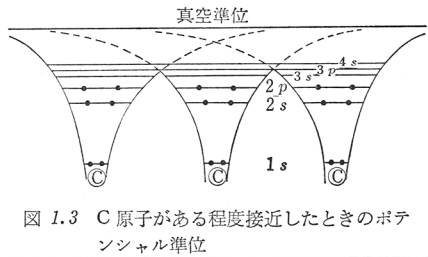


図 1.3 C 原子がある程度接近したときのポテンシャル準位

きる。同図(b)は原子核の正電荷のクーロン力の中にある電子のポテンシャル曲線を示している。いま  $N$  個の C 原子が近づきあった状態を考える。

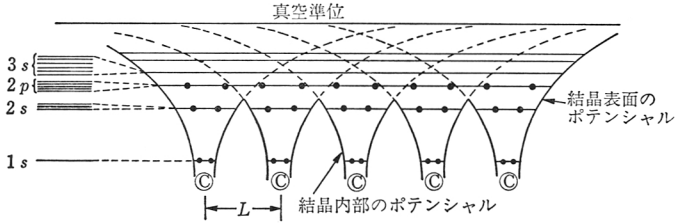


図 1.4 C 原子がかなり接近したときのポテンシャル準位

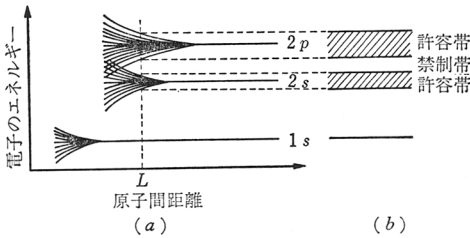


図 1.5 エネルギー準位幅発生の説明図

電子のエネルギーは実際のスケールを表していない。実際には 1s ははるかに下の準位にくる。

近づく距離がそれほど小さくなく、あまり接近していないときには、それぞれの原子は隣の原子の影響はあまり受けないので、図 1.3 のようなポテンシャル曲線になるであろう。この状態ではおのおの

の C 原子に属する電子はすべて個々の C 原子に局在して束縛されている。つぎに各 C 原子がそれぞれさらに接近してくると、図 1.4 のように隣接原子の間に存在するポテンシャル曲線の山は低くなり、 $2p$  準位にある電子は結晶全体に広がった準位を占めることになる。結晶が  $N$  個の C 原子から成っているとすると、 $2s$ 、 $2p$  準位にはそれぞれ  $2N$  個の電子が存在する。このそれぞれ  $2N$  個の電子のエネルギーはきわめてわずかに値の異なる接近した  $N$  個の準位に分かれ、あるエネルギーの幅をもつようになる。図 1.4 の左側にそのようなエネルギーの幅を示している。

このようなエネルギー幅の発生の様子を、原子間距離に対して示したのが図 1.5 である。いま 8 個の孤立した C 原子をだんだん近づけていくと、電子に及ぼされる作用は、隣接するそれぞれの原子との相互作用によって変化し、おのおのエネルギー準位は、図 1.5 に示すように 8 個の異なった準位に分裂する。原子核に近い内側にある電子は、外側のものよりも隣接原子の影響を受けにくいので、準位は分裂しにくく、分裂の度合いは小さい。

以上の考え方を固体に応用してみよう．固体は  $1\text{m}^3$  当り  $10^{28}\sim 10^{29}$  個の非常に多数の原子の集団である．そのため個々のエネルギー準位の分裂はばく大な数になり，分裂した1個1個のエネルギー準位は非常に密集している．したがってこのような場合には，分裂したエネルギー準位をすべて含むような1つの領域を考えることができる．これがすなわち **エネルギー帯** (energy band) である．このエネルギー帯の上端と下端とは，それぞれ分裂した準位のうちの最大エネルギーと最小エネルギーの準位に対応していて，この電子の入ることができるエネルギー帯を**許容帯** (allowed band) という．また許容帯と許容帯の間には，電子が入れないエネルギー帯が存在する．このエネルギー帯を**禁制帯** (forbidden band) という．原子間距離が  $L$  のときのこれらの様子を図 1.5 (b) に示す．このようなエネルギー帯の考え方が **エネルギー帯理論** (energy band theory) である．

### 1.3 導体・半導体・絶縁体のエネルギー帯構造

パウリの排他律は，エネルギー帯にも適用できるから，エネルギーの低い許容帯は電子で完全に満たされている．このような状態の許容帯を**充満帯** (filled band) という．これに対してエネルギーの高い帯は電子がまったく存在しない．このような許容帯を**空帯** (empty band) という．しかしその中間に存在する許容帯にはつぎの2つの場合だけしかない．

- 1) 電子で完全に満たされた許容帯，すなわち充満帯があって，そのすぐ上の許容帯が空帯である (図 1.6(a), (b)).
- 2) 許容帯の半分近くが電子で満たされている．これを半満帯という (図 1.6(c)).

このように最大のエネルギーをもつ電子の入っている許容帯の近くのエネルギー帯の構造によって固体の電気的性質が決まり，これからの議論ではこれらのエネルギー帯にだけ着目すれば十分である．そして特にエネルギーの一番大きな電子が入っている充満帯を**価電子帯** (valence band)，価電子帯のすぐ上

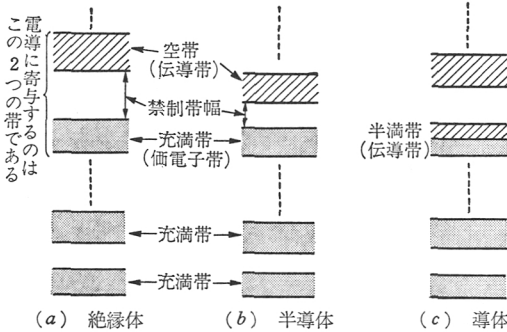


図 1.6 絶縁体・半導体・導体のエネルギー帯構造

の許容帯、および半満帯を伝導帯 (conduction band) という。また普通禁制帯幅という、価電子帯と伝導帯との間の禁制帯幅を指す場合が多く、エネルギーギャップ (energy gap) とよぶこともある。

図 1.6(a) で禁制帯幅が

例えば 6 eV 以上もあると、室温の熱エネルギー ( $k_B T \approx 0.026$  eV) 程度では価電子帯から伝導帯に電子が熱励起される割合は非常に小さく、伝導帯中には電子がほとんど存在しない。このようなエネルギー帯構造をもつ固体に電界をかけても、いっぱい詰まっている価電子帯中の電子は動く余地がなく、したがって電流は流れない。このような帯構造をもつ固体を一般に絶縁体 (insulator) という。一方、図 1.6(c) では、半満帯中の電子は自由に動くことができ、電界が加わると電流が流れる。すなわち導体 (conductor) である。

つぎに同図(b)のように、絶縁体でも禁制帯幅が小さく 1 eV 前後以下のときには、室温程度の熱エネルギーでも価電子帯中の電子が伝導帯中に励起されて、電流がある程度流れる。このとき価電子帯から伝導帯へ電子が熱励起した後には、価電子帯には電子の抜けた孔ができる。電界が加えられると、この電子のない孔のところへ価電子帯中の隣接電子が移動することによって、結局電子の抜けたところが見かけ上自由に価電子帯中を移動したことになる。これはちょうど電氣的に正電荷が等価的に動いたと考えてもよいので正孔 (positive hole) と呼ばれる。したがって、この場合には伝導帯中の電子と価電子帯中の正孔の両方が電気伝導に寄与する。このような固体が半導体 (semiconductor) である。すなわち絶縁体と半導体とはエネルギー帯構造は完全に同じで、ただ禁制帯幅が大きいかわ小さいかが異なるだけである。一般に禁制帯幅が数 eV 以上のときを絶縁体、それ以下のものを半導体という。



# 索引

## 【A】

アバランシェホトダイオード 215  
アインシュタインの関係 39  
アイソエレクトロニクストラップ 225  
アクセプタ 25  
アナログ IC 154, 160  
アノード 182  
アーリー効果 82  
熱い電子 35  
AI ゲート 159  
AND 回路 165  
APD 215  
 $\alpha$  遮断周波数 94

## 【B】

バイポーラ IC 155  
バイポーラ作用 183, 187  
バイポーラトランジスタ 63, 93  
バリキャップ 50  
バリスタ 74  
ベベル構造 109  
ベース 63  
ベース接地回路 72, 76  
ベース抵抗 72, 77  
ビット 178  
ボーズ・アインシュタイン分布 18  
分布反転 229  
分布関数 18, 27  
分離領域 156  
ブレイクオーバー電圧 185  
ブリルアン領域 10

ブロッホの定理 8  
Bi-C MOS 回路 175  
 $\beta$  遮断周波数 97

## 【C】

CCD 176, 216  
C MOS 回路 174  
CPU 170  
CVD 法 90  
CZ 法 87

## 【D】

大規模集積回路 155  
ダイヤモンド構造 21  
ダーリントン接続 85  
デコーダ 178  
伝導吸収 203  
伝導帯 6  
電界効果トランジスタ 112  
電荷結合デバイス 176  
電荷中性条件 33  
電気伝導 23  
電流伝送率 65, 69  
電流ミラー回路 161  
電流増幅率 73, 78, 81  
電子電流 37, 46  
電子なだれ励起 222  
電子親和力 53, 56  
ディプレッション形 137, 173  
デジタル IC 154, 164  
導電率 1, 37  
ドナー 25  
ドレーン 112, 137  
ドレーン接地回路 119

ドレーン抵抗 118  
ドリフト電流 37  
ドリフト形トランジスタ 99  
ドリフト速度 34  
動作点 74  
導体 6  
デュアルゲート FET 127, 151  
DFB レーザ 235  
DRAM 177, 179  
DTL 回路 166

## 【E】

エバース・モルの関係 106  
エキシトン 202  
エミッタ 63  
エミッタ接地回路 72, 77, 96  
エミッタ抵抗 76  
エネルギーギャップ 6  
エネルギー帯 5  
エネルギー準位 2  
エンハンスメント形 137, 171  
演算増幅器 163  
エサキダイオード 52  
エピタキシャル成長 87  
エレクトロルミネセンス 219  
エッチング 90  
ECL 回路 170  
ED 形回路 173  
EE 形回路 171  
EPROM 177  
ER 形回路 171

## 【F】

ファブリー・ペロー 230

フェルミ・ディラック分布  
18, 27  
フェルミエネルギー 14, 19  
フェルミ準位 14, 129  
フィールド酸化膜 159  
フォノン散乱 34

## 【G】

外部光電効果 205  
外因性半導体 25, 30  
元素半導体 21  
ゲート 112, 137, 182, 185  
ゲート接地回路 119  
逆ダイオード 52  
逆導通 SCR 187  
逆方向バイアス 45, 64  
逆方向飽和電流 47  
逆方向阻止耐圧 185  
逆接続活性 105  
GTO サイリスタ 188

## 【H】

波動方程式 7  
ハイブリッド $\pi$ 形等価回路 96  
配線 90  
発光ダイオード 224  
半導体 6  
発生 36  
発生再結合電流 47, 54  
発振開始電流 230  
反転 60, 129  
ヘテロ接合 53, 231  
非放射形遷移 220  
非飽和論理 166  
光電流 207  
光電子 205  
光電池 214  
光導電効果 206  
光導電セル 214  
光検出器 213  
光起電力効果 209

光サイリスタ 189  
光閉込め効果 55, 232  
非晶質シリコン 212  
表面電位 131  
表面効果 26  
表面濃度 131  
表面準位 136  
捕獲中心 36  
放射形遷移 220  
ホットダイオード 214  
ホトトランジスタ 215  
ホットエレクトロン効果 150  
ホットエレクトロントランジスタ 113, 121  
飽和 104  
飽和電流 115, 140  
飽和論理 166  
飽和領域 31  
飽和速度 35  
保持電流 185  
負荷直線 73  
負荷 FET 172  
複屈折 204  
負の電子親和力 206  
負の質量 16  
負温度 229  
フラットバンド 134  
フリップフロップ 178, 193  
不純物 24, 88  
不純物吸収 198, 202  
不純物領域 31  
不純物散乱 34  
 $h$ パラメータ 80

## 【I, J】

移動度 23, 34  
イメージセンサ 216  
インバータ 103, 166, 171, 193  
イオン結合 22  
イオン注入法 88  
異常光線 204  
 $i$ 形半導体 25  
 $I^2L$  回路 163

JFET 112

## 【K, L】

価電子帯 5  
化合物半導体 22  
可変容量 50  
開放端光電圧 210  
界面準位 136  
カーク効果 82  
拡散電位 43, 56  
拡散電流 37  
拡散理論 47  
拡散定数 37  
拡散長 46  
拡散容量 92  
間接遷移形半導体 23, 36, 224  
カソード 182  
蛍光 219  
基板バイアス効果 148  
基板トランジスタ 158  
禁制帯 5  
禁制帯幅 6  
金属ベーストランジスタ 121  
金属-半導体接触 42, 56  
金属-絶縁物-半導体接触 42, 59  
寄生容量 146  
基礎吸収 198  
吸収係数 197, 199  
光電変換デバイス 211  
光電効果 205  
高電子移動度トランジスタ 55  
高周波等価回路 95, 120, 145  
コヒーレント光 227  
降伏電圧 50, 83, 110, 150  
枯渇領域 31  
混晶 225  
コレクタ 63  
コレクタ効率 69  
コレクタ接地回路 75, 78  
コレクタ抵抗 76  
コレクタ容量 95  
固体撮像デバイス 177, 216

固定表面電荷密度 135  
 固有電界励起 221  
 固有吸収 198  
 空乏 60, 129  
 空乏層 43, 48, 59, 66, 114, 132  
 駆動用 FET 172  
 空間電荷 43, 132  
 空間電荷層 43  
 クロニッヒ・ベニーモデル 7  
 屈折率 204  
 空帯 5  
 キャリヤ 23  
 —の運動 34  
 キャリヤ濃度 26, 30  
 キャリヤ閉込め効果 55, 232  
 強反転 132  
 共鳴トンネル 127  
 共通ベース回路 72  
 共通エミッタ回路 72  
 共通コレクタ回路 75  
 許容帯 5  
 共有結合 21  
 吸収端 198  
 $k$  空間 10  
 LED 224

## 【 M 】

窓効果 55, 216  
 マイクロプラズマ 223  
 マックスウェル・ボルツマン分布 18  
 マスク ROM 177  
 メモリ回路 177  
 モノリシック IC 154  
 MES FET 113, 121  
 MIS ダイオード 128  
 MIS 構造 59  
 MIS FET 113, 128  
 MOS 構造 59  
 MOS FET 113, 150  
 MOS IC 158

## 【 N 】

なだれ降伏 50, 83, 109, 150, 223  
 内部光電効果 206  
 内蔵電位 44  
 内蔵電界 100  
 熱電子放出 57, 124  
 熱暴走 74  
 熱拡散法 88  
 熱酸化法 90  
 熱抵抗 108  
 2次元電子ガス 55  
 ノーマリーオフ形 113, 137  
 ノーマリーオン形 113, 137  
 n 形半導体 25  
 NAND 回路 165, 166  
 NOR 回路 165, 170  
 NOT 回路 164

## 【 O 】

オーム接触 57  
 オプトエレクトロニクス 195  
 OR 回路 165, 170

## 【 P 】

パンチスルー 70, 82, 150  
 ピンチオフ 115, 140  
 ポアソンの方程式 48, 59, 132  
 ポンピング 229, 233  
 プレーナ形 64  
 プレーナ技術 86, 155  
 p ウェル 175  
 p 形半導体 25  
 pin 形ホットダイオード 215  
 pn 積 30  
 pn 接合 42

## 【 R 】

レベルシフト回路 162, 166

励起子 202  
 連続の方程式 39, 46, 66, 91  
 レーザ 227  
 リアクティブイオンエッチング 91  
 リフレッシュ 177  
 臨界オフ電圧上昇率 186  
 臨界オン電流上昇率 186  
 りん光 219  
 理想 MIS ダイオード 128  
 リソグラフィ 88  
 利得 79  
 利得係数 208  
 利得帯域幅積 97  
 リチャードソン定数 58  
 論理回路 166, 171  
 論理ゲート IC 165  
 論理振幅 173  
 ルミネセンス 219  
 RAM 177  
 ROM 177

## 【 S 】

差動増幅回路 162  
 最大発振周波数 97  
 最大コレクタ損 109  
 再結合 36  
 再結合中心 36  
 サイリスタ 182  
 サーマスタ 74  
 酸化膜 90  
 静電誘導トランジスタ 113, 123  
 正孔 6, 16  
 正孔電流 37, 46, 64  
 正常活性 104  
 正常光線 204  
 遷移時間 102  
 接合形 FET 112, 114  
 接合容量 48  
 仕事関数 54, 56, 134  
 しきい値電圧 133  
 しきい値電流 230  
 真性電導 24

真性ゲート 123  
 真性半導体 25, 26  
 真性フェルミ準位 29, 129  
 真性吸収 198  
 真性領域 32  
 真性トランジスタ 93  
 質量作用の法則 30  
 自然放出 228  
 相互コンダクタンス  
     96, 116, 117, 144  
 相補形 MOS 174  
 走行時間 98, 99, 143  
 ソース 112, 137  
 ソース接地回路 119, 144  
 スイッチング特性 101  
 スネルの法則 217  
 スタンドオフ比 190  
 遮断 104  
 遮断周波数 97, 148  
 障壁高さ 56  
 少数キャリア 33  
     —の蓄積効果 93  
     —の寿命時間 36  
 ショットキー効果 58  
 ショットキークランプ回路  
     107, 169  
 ショットキー障壁 56, 215  
 ショットキー障壁形 FET  
     112, 114  
 縮退半導体 52  
 シュレディンガー方程式 7  
 集積回路 154  
 出力端短絡電流利得 147  
 SB FET 113  
 SCR 182, 186  
 Si ゲート 159  
 SRAM 177, 178  
 STTL 回路 169

## 【 T 】

耐圧 84, 108, 191  
 帯間遷移 198, 220  
 帯内遷移 203  
 ターンオフ 115  
 ターンオフ利得 189  
 太陽電池 211  
 短絡エミッタ 187  
 短絡光電流 209  
 多数キャリア 33  
 定電圧回路 161  
 定電流回路 160  
 抵抗率 37  
 点弧 184  
 転流回路 191  
 蓄積 60, 129  
 蓄積層 54  
 蓄積時間 103, 105  
 透過率 196  
 凍結領域 31  
 トンネルダイオード 52  
 トンネル効果励起 223  
 トライアック 188  
 ツェナーダイオード 51, 161  
 ツェナー降伏 50  
 チャネル 113  
 チャネル長変調効果 150  
 チョクラルスキー法 87  
 直接遷移形半導体 23, 36, 224  
 注入形レーザ 229  
 注入効率 68, 94  
 注入ルミネセンス 222  
 TTL 回路 167

## 【 U 】

埋込コレクタ 156  
 運動量空間 10  
 UJT 190

## 【 Y 】

横形トランジスタ 157  
 四端子パラメータ 79, 147  
 容量 48, 59, 60, 133, 158  
 誘導放出 228  
 有効状態密度 28  
 ユニポーラトランジスタ 112  
 ユニジャンクショントランジスタ 190  
 輸送効率 67, 94  
 $y$  パラメータ 127, 147

## 【 Z 】

残留抵抗 145  
 雑音余裕 165  
 絶縁膜容量 133, 146  
 絶縁体 6  
 自己整合技術 159  
 実効質量 15  
 増倍率 51  
 増幅率 119, 125, 144  
 弱反転 132  
 状態密度 11, 27  
 充電時間 98, 173  
 充滿帯 5  
 順方向バイアス 45, 64  
 循環条件 11

—著者略歴—

1968年 東京工業大学理工学部電子工学科卒業  
1973年 東京工業大学大学院博士課程修了（電子工学専攻）  
工学博士  
1976年 東京工業大学助教授  
1989年 東京工業大学教授  
現在に至る

半導体デバイス工学  
Semiconductor Device Engineering

© Hiroshi Ishihara 1990

1990年2月15日 初版第1刷発行  
2007年9月15日 初版第11刷発行

検印省略

著者 いし ほん ひろし  
原 宏  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来辰巳  
印刷所 壮光舎印刷株式会社

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>

ISBN978-4-339-00137-2  
Printed in Japan

(愛千製本所)



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替えいたします