

は し が き

電球の発明者として有名なエジソンが電球のフィラメントから電子が出ることを鋭く直観して真空管を生み出す基礎を作ってからちょうど100年になる。その後真空管、放電管さらに半導体をはじめとする固体素子・デバイスがつぎつぎと発明され、今日のエレクトロニクスの時代を迎えるに至った。これらの素子・デバイスは情報の伝達、すなわち通信はもちろん、産業および社会構造の中で情報化、自動化に広く利用され、また宇宙開発や新しいエネルギー開発にも重要な役割を果しつつある。

エレクトロニクスは、従来これらの電子素子・デバイスを通信、制御、演算など人間社会の能率化、高速化に利用するための科学技術と定義されてきたが、今日ではさらに広く社会構造の中核はもちろん末端に至るすべての機能に不可欠な重要な科学技術となった。

このような電子素子・デバイスの働きは、それらを構成する荷電粒子、すなわち、キャリアの外界との相互作用に起因し、それらの学問的基礎は古典論のみならず量子論に及び、それらの機能の理解には広範で深い知識が要求される。

エレクトロニクスを初めて学ぶ人々にとって、それらの基礎理論の理解はかなりの重荷になると思われる。

本書は、このような人々のためにできるだけ平易にキャリアと外界との相互作用を解説し、電子素子・デバイスの働きについての理解を深める意図で書かれた。

本書は基礎編と応用編に分かれ、前者では真空、気体および固体中のキャリアの基本的性質、各種の相互作用の基礎的知見を与え、後者では各種の電子管

および固体・液体の素子・デバイスの具体的特性および応用について述べる。この分野の内容は日進月歩であり、つぎつぎと新しい素子・デバイスが開発されているので、それらのうち主要なものについても記述することとした。

これらの内容は、著者が「電子工学」という課目の週1回の通年の講義のため用意したノートを基礎としている。このノートを作成するに当っては、多くの先輩諸氏の著書を参考にさせていただいた。ここに厚く御礼申し上げる。また、著者の思い違い、表現の適切でないところ、記述が不十分なところなど不備な点が多いかと思うが、忌憚のない御叱正と御教示を賜われれば幸いである。

なお、ここではMKS有理単位系を採用している。また内容的にやや高度な記述は小さい活字を用いて区別し、読者の学習の程度に応じ適宜選択できるようにしてある。

昭和58年3月

奥 田 孝 美

目 次

基 礎 編



物 質 と 電 子

1.1 電子の性質	2
1.1.1 電子の電荷と質量	2
1.1.2 電子の速度	2
1.1.3 電子の波動性	3
1.2 原子内の電子状態	4
1.2.1 量子条件	4
1.2.2 電子のエネルギー状態	5
1.3 固体内原子の結合と結晶構造	6
1.3.1 原子の結合	6
1.3.2 結晶構造	8
1.4 固体内電子の帯構造と物質の導電性	9
1.4.1 帯構造	9
1.4.2 物質の導電性	10
1.5 固体内電子のエネルギー	12
1.5.1 自由電子模型	12
1.5.2 フェルミ・ディラック分布関数	14
1.5.3 周期的ポテンシャル中のエネルギー状態	16
1.6 固体内電子の運動	17
1.6.1 電子の速度と有効質量	17
1.6.2 電界による電流	18
演習問題	19



半導体中のキャリアの運動

2.1	キャリアの統計	20
2.1.1	真性半導体	20
2.1.2	不純物半導体	21
2.2	電気伝導	23
2.2.1	電界中のキャリアの移動	23
2.2.2	キャリアの拡散	24
2.3	キャリアの発生・消滅および注入	26
2.3.1	キャリアの発生・消滅	26
2.3.2	連続式	26
2.3.3	少数キャリアの注入	27
2.4	接触面の電位障壁	28
2.4.1	異なる金属	28
2.4.2	金属と半導体	29
2.4.3	p形半導体とn形半導体	32
2.4.4	異なる半導体	33
2.5	pn接合の性質	34
2.5.1	直流特性	34
2.5.2	交流特性	35
2.5.3	空乏層	37
2.6	電氣的破壊	39
2.6.1	ツェナー破壊	39
2.6.2	なだれ破壊	39
2.7	表面現象	40
2.7.1	表面準位	40
2.7.2	表面の電界効果	42
	演習問題	43



真空中のキャリアの性質

3.1	キャリアの放出	45
3.1.1	熱電子放出	45
3.1.2	光電子放出	48
3.1.3	電界放出	50
3.1.4	二次電子放出	51
3.1.5	表面電離によるイオン放出	52
3.2	直流界中のキャリアの運動	52
3.2.1	基本方程式	52
3.2.2	直流電界中の電子の運動	54
3.2.3	直流磁界中の電子の運動	55
3.2.4	直交する直流電界と直流磁界中の電子の運動	57
3.3	電磁界のレンズ作用	59
3.3.1	電子幾何光学	59
3.3.2	電界レンズ	60
3.3.3	磁界レンズ	63
3.4	空間電荷伝導	64
3.4.1	空間電荷効果	64
3.4.2	平行平面電極系における空間電荷伝導	65
3.4.3	同軸円筒電極系における空間電荷伝導	67
3.5	交流電界中のキャリアの運動	68
3.5.1	走行時間効果	68
3.5.2	誘導電流	69
	演習問題	72



気体中のキャリアの性質

4.1	キャリアの統計	73
4.1.1	電離気体	73

4.1.2	気体の性質	73
4.1.3	マクスウェル・ボルツマン分布関数	74
4.1.4	平均量	75
4.1.5	ボルツマン関係式	76
4.2	キャリアの衝突	76
4.2.1	弾性衝突	76
4.2.2	非弾性衝突	79
4.3	電気伝導	81
4.3.1	電界中のキャリアの移動	81
4.3.2	キャリアの拡散	83
4.4	キャリアの発生・消滅と連続式	84
4.4.1	電子および正イオンの発生	84
4.4.2	負イオンの発生	87
4.4.3	キャリアの消滅	88
4.4.4	連続式	89
4.5	放電の開始と自続	90
4.5.1	放電の開始	90
4.5.2	放電の自続	90
4.6	放電形式	93
4.6.1	タウンゼント放電	93
4.6.2	グロー放電	93
4.6.3	アーク放電	95
4.6.4	高周波放電	95
	演習問題	97

応 用 編



半導体素子およびデバイス

5.1	ダイオード	99
5.1.1	pn 接合ダイオード	99

5.1.2	ショットキーバリアダイオード	101
5.1.3	トンネルダイオード	102
5.2	バイポーラトランジスタ	105
5.2.1	動作原理と構造	105
5.2.2	接地方式と電圧-電流特性	107
5.2.3	等価回路	108
5.2.4	直流特性	109
5.2.5	交流特性	111
5.2.6	高周波における動作	113
5.2.7	スイッチング	114
5.2.8	雑音	115
5.3	電界効果トランジスタ	117
5.3.1	接合形電界効果トランジスタ	117
5.3.2	MOS形電界効果トランジスタ	119
5.3.3	薄膜形電界効果トランジスタ	122
5.3.4	ショットキーバリア形電界効果トランジスタ	122
5.4	サイリスタ	123
5.4.1	シリコン制御整流素子	123
5.4.2	双方向サイリスタ	127
5.5	高周波用トランジスタ	128
5.5.1	高周波トランジスタ	128
5.5.2	インパットダイオード	128
5.5.3	ガンダイオード	129
5.6	集積回路	131
5.6.1	集積回路の概念	131
5.6.2	製造技術	132
5.6.3	回路構成	133
	演習問題	133



6.1	一般真空管	135
6.1.1	二極真空管	135

6.1.2	三極真空管	137
6.1.3	四極真空管	141
6.1.4	五極真空管	142
6.1.5	高周波における動作	142
6.1.6	一般真空管における雑音	144
6.1.7	一般真空管の構造	145
6.2	マイクロ波真空管	147
6.2.1	速度変調管	147
6.2.2	進行波管	151
6.2.3	後進波管	156
6.2.4	磁電管	157
6.2.5	M形進行波管	161
6.2.6	M形後進波管	161
6.2.7	ジャイロトロン	162
6.3	整流放電管	163
6.3.1	水銀陰極整流放電管	163
6.3.2	熱陰極整流放電管	163
6.4	放射線計数放電管	164
6.4.1	電離箱	164
6.4.2	比例計数管	164
6.4.3	GM計数管	164
	演習問題	165



特殊素子およびデバイス

7.1	光電変換電子管	167
7.1.1	ブラウン管	167
7.1.2	テレビジョン受像管	172
7.1.3	光電管および光電子増倍管	173
7.1.4	テレビジョン撮像管	174
7.1.5	蓄積管および像変換管	177
7.1.6	表示管	178
7.1.7	照明放電管	179

7.2 光電変換固体素子およびデバイス	180
7.2.1 光導電セル	180
7.2.2 光起電素子	181
7.2.3 固体撮像デバイス	184
7.2.4 電界発光素子	185
7.3 各種応用素子およびデバイス	187
7.3.1 メーザおよびレーザー	187
7.3.2 X線管	190
7.3.3 電子顕微鏡	191
7.3.4 粒子加速器	191
7.3.5 各種変換素子	193
演習問題	196
演習問題解答	198
文 献	202
索 引	205



物質と電子

1.1 電子の性質

1.1.1 電子の電荷と質量

電子は最小の荷電粒子，すなわち最小のキャリアで，その電荷は負の符号をもち，大きさは $e = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$ である．この値は電気量の単位で，荷電粒子の電気量は，この e の値の正または負の整数倍である．

電子が静止しているときの質量，すなわち静止質量は $m_0 = 9.10953 \times 10^{-31} \text{ kg}$ である．この値は水素原子の1836分の1である．また e/m_0 を比電荷といい， $e/m_0 = 1.75880 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ である．電子の質量 m は速度 v によって変化し，次式で与えられる：

$$m = \frac{m_0}{\left\{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right\}^{1/2}} \quad (1.1)$$

ここで c は光速であり， $c = 2.99793 \times 10^8 \text{ m/s}$ である．上式は相対論効果を示し， v が c に近づくとともに m は m_0 より大きくなる．

1.1.2 電子の速度

電子が電位差 V の2点間を移動するときには，次式で示す運動エネルギー ε を得る：

$$\varepsilon = eV \quad (1.2)$$

電子が1Vの電位差によって得るエネルギーは、上式から 1.60219×10^{-19} J となるが、これを電子の運動エネルギーの単位として用い、電子ボルトといい、eV で表す。

初速度零で電位差 V の2点間を運動した後には到達する電子の速度 v は、相対論効果が無視される場合には、次式の関係から求められる：

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

したがって

$$v = \left(\frac{2eV}{m_0} \right)^{1/2} = 5.931 \times 10^5 V^{1/2} \text{ [m/s]} \quad (1.4)$$

相対論では、エネルギー式は次式で表される：

$$mc^2 = m_0 c^2 + eV \quad (1.5)$$

(1.5) に (1.1) を代入して

$$v = c \left\{ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{eV}{m_0 c^2} \right)^2} \right\}^{1/2} \quad (1.6)$$

上式から分かるように、 V を大きくすると v は c に近づく。相対論効果は加速器で重要である。

1.1.3 電子の波動性

運動する電子は、1.1.2 で述べたような粒子性のほかに波動性をもつ。このような電子波のエネルギー ε は、振動数 ν を用いて次式で与えられる：

$$\varepsilon = h\nu \quad (1.7)$$

ここで、 h はプランク定数で、 $h = 6.62619 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ である。また波長 λ は運動量 p とつぎの関係がある：

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (1.8)$$

運動量 p は (1.1) を用い

$$p = mv = \frac{m_0 v}{\left\{ 1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right\}^{1/2}} \quad (1.9)$$

したがって (1.8) は

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h \left\{ 1 - \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right\}^{1/2}}{m_0 v} \quad (1.10)$$

さらに (1.6) を代入して

$$\lambda = \frac{h}{(2em_0)^{1/2}} \frac{1}{V^{1/2} \left(1 + \frac{eV}{2m_0 c^2} \right)^{1/2}} = \frac{12.26 \times 10^{-10}}{V^{1/2} (1 + 9.785 \times 10^{-7} V)^{1/2}} \quad [\text{m}] \quad (1.11)$$

電子波の波長は電子顕微鏡の分解能を決め、また電子ビームを結晶に当てる時に起こる回折を利用して物質構造をしらべることができる。

1.2 原子内の電子状態

1.2.1 量子条件

物質は原子からなり、原子は原子核と電子からなる。最も簡単な原子は水素原子で、 $+e$ の電荷をもつ原子核の周りを1個の電子が円軌道を描いて旋回している模型で考えられる。

電子軌道の半径を r とし、旋回速度を v とすると、電子に働く遠心力は $m_0 v^2 / r$ で表され、原子核と電子の間に作用するクーロン力による引力は $e^2 / 4\pi\epsilon_0 r^2$ で表され、両者は釣り合うから次式が成り立つ：

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_0 v^2}{r} \quad (1.12)$$

ここで ϵ_0 は真空の誘電率で、 $\epsilon_0 = 8.85419 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ である。

電子の運動エネルギー $m_0 v^2 / 2$ と位置のエネルギー $\int_{\infty}^r (e^2 / 4\pi\epsilon_0 r^2) dr$ の和を全エネルギー ϵ で表すと

$$\epsilon = - \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} \quad (1.13)$$

さて、ボーアの量子条件によれば、安定な電子軌道はその軌道の角運動量 $m_0 v r$ の 2π 倍がプランク定数 h の整数倍に等しいことが要請される。すなわち

$$2\pi m_0 v r = nh \quad (1.14)$$

ここで、 $n = 1, 2, \dots$ を主量子数という。(1.14) を用いて (1.12) から電子軌道の半径 r が次式で示すように量子化されることが分かる：

$$r = \frac{\hbar^2 \epsilon_0}{\pi m_0 e^2} n^2 \quad (1.15)$$

また、全エネルギー ϵ についても (1.13) を用いて量子化され

$$\epsilon = - \left(\frac{e^4 m_0}{8 \hbar^2 \epsilon_0^2} \right) \frac{1}{n^2} \quad (1.16)$$

1.2.2 電子のエネルギー状態

(1.16) で示したように、円軌道を描く電子のエネルギーは離散的な値をもつ。とくに $n=1$ を基底状態、 $n=2, 3, \dots$ を励起状態という。

上述のような水素原子のモデルでは、電子軌道を円形と考えたが、一般的には楕円形をなす。したがって、電子のエネルギー状態は前述の主量子数 n のほかに、方位量子数 l によって決まる。 n は全エネルギーを決め、 l は電子軌道の角運動量を決めるものでエネルギーの方向性を表す。その値は $0 \leq l \leq n-1$ の範囲の値をとる。

n の異なる電子群を殻といい、 $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$ に対応して K, L, M, N, O, P, Q, ... 殻という。また $l=0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, \dots$ をそれぞれ s, p, d, f, g, h, i, ... 状態という。したがって、 $n=1, l=0$ で表される状態を $1s$ 、 $n=3, l=1$ を $3p$ で表す。

さらに同一の n および l の状態でも、原子を磁界中におくとエネルギーに差が現れるため、磁気量子数 m を用いる。これは軌道面の磁界に対する方向を決め、 $-l \leq m \leq l$ の範囲にあり、全部で $(2l+1)$ の状態に分かれる。

また、電子自身は固有の角運動量をもち、その大きさと方向を示すのにスピン量子数 s が用いられる。その値には $1/2$ と $-1/2$ がある。

以上のように、1個の電子のとり得る軌道あるいは状態は n, l および m で決まる。たとえば $n=1$ では $l=0, m=0$ となり、この $1s$ 状態が基底状態である。 $n=2$ では一つの $2s$ 状態と三つの $3p$ 状態が存在する。このように主量子数 n の場合にとり得る可能な状態の数は

$$\sum_{l=0}^{n-1} (2l+1) = 1 + 3 + \dots + (2n-1) = n^2 \quad (1.17)$$

電子のスピンを考えると、全部で $2n^2$ の状態がある。

多くの電子をもつ原子、すなわち多電子原子では電子の配列についての法則すなわちパウリの排他律がある。それは“四つの量子数 n, l, m および s によって決まる一つの量子状態には一つの電子しか存在しない”ことを意味する。したがって、ある値の n に対しては、電子の入り得る最大数は前述のように $2n^2$ 個で、この最大数まで収容する殻を閉殻という。各殻には $2(2l+1)$ 個までの電子が収容できる。たとえば、 $l=0$ の s 殻には2個、 $l=1$ の p 殻には6個、 $l=2$ の d 殻には10個、 $l=3$ の f 殻には14個の電子が入り得る。したがって、 $n=1$ の K 殻には2個、 $n=2$ の L 殻には8個、 $n=3$ の M 殻には18個、 $n=4$ の N 殻には32個の電子が入り得る。

最大数まで電子が満たされる原子，すなわち閉殻を形成する原子は化学的に安定である。He, Ne, Ar, Kr および Xe はこれに属し不活性あるいは希ガスといわれる。最外殻が満たされていない原子は化学的に活性で，最外殻の電子を価電子という。また電子の総数を Z で表し，原子番号という。電子の全電荷は $-Ze$ で，原子核の電荷は $+Ze$ で，全体として電気的中性を保つ。

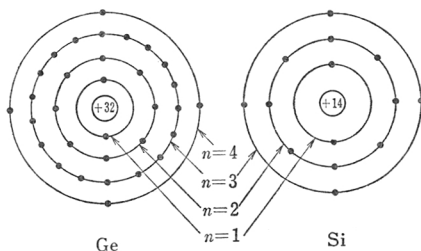


図 1.1 Ge および Si の電子配置

図 1.1 に半導体素子として広く用いられている Ge および Si の電子配置を示す。Ge は $Z = 32$ で， $n = 1 \sim 3$ までは満たされているが $n = 4$ には 4 個の電子がある。Si は $Z = 14$ で， $n = 1 \sim 2$ は満たされているが $n = 3$ には 4 個の電子がある。いずれも 4 個の価電子をもつ IV 族の元素である。

1.3 固体内原子の結合と結晶構造

1.3.1 原子の結合

大部分の固体内では，それを構成している原子は規則正しく格子状に配列している。これを結晶といい，このような固体を結晶質という。そうでないものを非晶質という。各原子は格子を形成し，その位置に束縛されながら振動する。これを格子振動という。これは温度が高いほど活発で，これが激しくなると原子間の結合が破れると液体に変わる。原子を結合する型式にはつぎに示すような 5 種類がある。

〔1〕 イオン結合 塩化ナトリウム NaCl のように Na の価電子 1 個を Cl に与えると両方の最外殻が閉殻となり， Na^+ と Cl^- が結合する型式をイオン結合という。これを図 1.2 に示す。このような結合は正イオンと負イオンの間のクーロン力による。結合力は強く絶縁体となる。

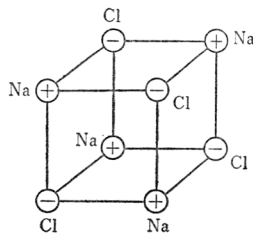


図 1.2 イオン結合

〔2〕 金属結合 金属原子の最外殻には 1

～3個の価電子があり、その一部あるいは全部が原子から離れ、金属原子から電子が離れてできた正イオンの間を自由に動いている。このように金属イオンが格子を形成し、その周りを自由電子が緩やかに結合する型式を金属結合という。これを図 1.3 に示す。電界を加えると自由電子が動いて電流となる。

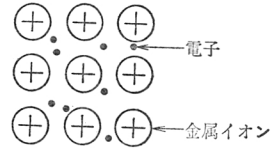


図 1.3 金属結合

〔3〕 共有結合 Ge および Si は 4 個の価電子をもつので、隣接する四つの原子とそれぞれ 1 個ずつ価電子を共有して結合する。これ

を共有結合といい、図 1.4 に示す。同じ共有結合でも、ダイヤモンドでは結合力が強く、容易に電子が離脱しないので絶縁体となるが、Ge や Si では結合力が弱く、常温でも結合が破れて電子が離脱し半導体の性質を示す。結合力はクーロン引力と核間の斥力の合成である。実際には図 1.5 に示す立体構造をもつ。GaAs は化合物半導体として用いられ、Ⅲ族の Ga にⅤ族の As から電子が移り、Si などと同じように共有結合をする。しかし原子価の違いのため共有結合とイオン結合の中間の性質を示す。

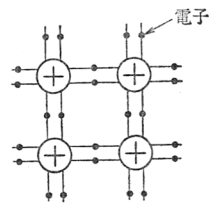


図 1.4 共有結合

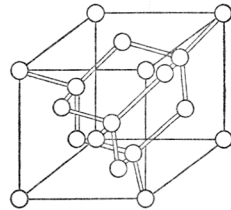


図 1.5 共有結合の立体構造

〔4〕 分子性結合 Ne や Ar のような閉殻構造をもつ原子や H_2 や O_2 など安定した化合物を低温にして固体にしたとき、これらの結晶は電氣的に中性な原子や分子から構成される。このような結合を分子性結合という。結合力はファンデルワールス力で、二つの原子の双極子モーメント間の引力である。

〔5〕 水素結合 H_2O の結晶すなわち氷の結晶では、電氣的に負性をもつ二つの O の間に H があり、H は O に電子を奪われて H^+ となる。H はどちらか一方の O に近く、他は遠い。これを水素結合といい、結合力は正・負イオン間のクーロン力である。アルコールや多くの強誘電体にもこの結合が

索 引

【 A 】

アバランシェダイオード 129
 アボガドロ数 15, 73
 アインシュタインの関係
 25, 84
 アーク放電 95
 アクセプタ準位 12
 アモルファス 195
 — 半導体 195
 暗放電 93
 アンモニヤメーザ 188
 アンプリトロン 161
 α -遮断角周波数 112
 AVF サイクロトロン 192

【 B 】

バイポーラ集積回路 132
 — トランジスタ 105
 板極管 146
 パンチャ 148
 ベース 106
 ベータトロン 192
 ビーム結合係数 68, 148, 169
 ビジコン 175
 ボーアの量子条件 4
 ボルツマン関係式 16, 76
 ボルツマン定数 10
 ボーズ・アインシュタイ
 ン分布関数 14
 分配雑音
 半導体素子の—— 116
 真空管の—— 145
 分子性結合 7
 ブラックボード 175
 ブラウン管 167

ブリルアン帯 17

【 D 】

大規模集積回路 132
 ダイノード 173
 ダイオード 99
 第一種の衝突 79
 第二種の衝突 80
 弾性衝突 77
 脱励起 81
 デプレッションモード 121
 伝導帯 10
 電界偏向 168
 — レンズ 59
 電界放出 50
 電界効果 42
 — トランジスタ 117
 電界レンズ 60
 電荷結合デバイス 185
 電荷転移 81
 電離 73
 — 箱 164
 — 断面積 84
 — 電圧 79
 — 度 77
 — 確率 84
 — 係数 85
 — 気体 73
 — 効率 84
 — 能 86
 — 周波数 85
 電子 2
 — ビーム 59
 — ボルト 3
 — 同調 151
 — 波 3
 — 付着 87

— 顕微鏡 191
 — 幾何光学 59
 — 極 158
 — 親和エネルギー 29

導電率 18
 ドナー準位 12
 ドレーン 117
 ドリフト 58
 — pnip 形トランジスタ
 128
 — ドランジスタ 128
 導体 10
 導入線のインダクタンス 143
 動的散乱モード 195
 導通域 124

【 E 】

液晶 195
 — 表示デバイス 195
 エーコン管 146
 エミッタ 106
 エネルギー分布関数 14
 エネルギー方程式 53
 エネルギー状態密度関数 14
 エンハンスメントモード 121
 円筒レンズ 62
 エピタキシャル成長法 129
 エサキダイオード 103
 EL 186

【 F 】

ファウラーの式 49
 ファウラー・ノートハイムの式
 51
 フェルミエネルギー 14
 フェルミ・ディラック分布

関数 14
 フェルミ準位 14
 負特性 104
 付着係数 89
 不純物半導体 11
 FET 117

【G】

ガンダイオード 129
 含浸陰極 48
 ガラスレーザ 189
 画素 174
 限界波長 49
 限界周波数 49
 原子番号 6
 ゲート 117
 合金法 106
 五極真空管 142
 グロー放電 73
 逆方向 30
 逆阻止域 124
 逆衝撃 161
 GM 計数管 164

【H】

ハイブリッド集積回路 131
 発光ダイオード 185
 発光中心 171
 薄膜形電界効果トランジスタ 122
 ハム雑音 145
 半導体 7
 —レーザ 189
 反射形速度変調管 149
 閉殻 5
 平均速さ 75
 平均自由行程 78
 変位電流 69
 偏向感度 169
 ヘテロ接合 33
 非弾性衝突 79
 比電荷 2
 比例計数管 164
 非晶質 6

放電 91
 —開始電圧 92
 —自統条件 92
 ホール係数 194
 —素子 193
 方位量子数 5
 放射付着 88
 —放射再結合 89
 ホトダイオード 182
 ホトエッチング 132
 ホトカプラー 186
 ホトレジスト 132
 ホトトランジスタ 182
 表面電離 52
 表面準位 40
 飽和域 114
 フリッカ雑音
 真空管の— 145
 半導体素子の— 116
 He-Ne レーザ 189
 h パラメータ等価回路 109

【I】

移動度 18, 24
 移動速度
 半導体中の— 24
 気体中の— 82
 イグナイトロン 163
 イメージオルシコン 174
 陰極降下 93
 イオンへの解離 88
 イオン結合 6
 色格子 173
 異種結合 33, 190
 異常グロー放電 94
 インパット (IMPATT) ダイオード 129

【K】

価電子 6
 —帯 11
 可変容量 100
 解離付着 88
 解離再結合 89

化学物半導体 7, 12
 回復時間 100
 殻 5
 拡散 24, 83
 —係数 (半導体中) 25
 —係数 (気体中) 84
 —距離 28
 —ポテンシャル 29, 31, 32, 34
 —容量 37, 113
 拡散法 107
 還元された波数 17
 感温素子 194
 間接再結合 26
 カルニコン 177
 活性域 114
 蛍光 170
 —放電灯 179
 —表示管 138
 —体 170
 結晶 6
 —質 6
 均圧環 161
 禁制帯 10
 金属結合 7
 気体定数 73
 基底状態 5
 高圧水銀灯 179
 高圧ナトリウム放電灯 179
 後段加速ブラウン管 169
 光電管 173
 光電感度 49
 光電子増倍管 173
 光電子放出 48
 光電離 87
 光導電セル 180
 コヒーレント 188
 光起電素子 181
 コレクタ 106
 格子
 —定数 8
 —振動 6
 —点 8
 後進波 156
 —管 156

高周波放電 95
 固体撮像デバイス 184
 光増幅器 186
 空乏層 10, 29, 37
 空間電荷
 — 効果 64
 — 制限条件 65
 — 制限電流密度 65
 — 伝導 65
 — 波 153
 空間高調波 155
 — 進行波管 156
 クライストロン 147
 クロマトロン形 173
 キャリヤ 2
 — 束 75
 キャッチャ 148
 強電離気体 73
 許容帯 10
 共有結合 7

【L】

L 陰極 48
 LED 185
 LSI 132

【M】

マグネトロン 157
 マイクロホニック雑音 145
 マクスウェル・ボルツマン分布関数 14, 74
 メモトロン 177
 面心単位格子 8
 メサ形トランジスタ 128
 メサ構造 100
 メタルバック 172
 メタルハライド放電灯 180
 メトレコン 178
 メーザ 187
 ミラー効果 143
 ミラー指数 8
 密度関数 15
 モノリシック集積回路 131
 M形後進波管 161

M形進行波管 161
 MIS 構造 119
 MOS 形電界効果トランジスタ 119
 — 構造 119
 — 集積回路 132
 MSI 132

【N】

なだれ破壊 39
 なだれホットダイオード 183
 内部抵抗
 二極管の— 136
 三極管の— 138
 ネマティックモード 196
 熱電発電デバイス 194
 熱電離 80, 86
 熱電冷却デバイス 194
 熱電子発電器 52
 熱電子放出 45
 熱陰極整流放電管 163
 熱励起 80
 熱雑音 115
 ニキシー管 178
 二空洞速度変調管 148
 二極真空管 135
 二次電子放出 51
 — 係数 (電子) 51
 — 係数 (正イオン) 52
 二乗平均速さ 75
 二乗平均平方根速さ 75
 二重電荷転移 88
 二重孔レンズ 62
 ニュービコン 177
 n 形半導体 11
 n 形反転層 42

【O】

オーム接触 30
 温度制限域 136

【P, Q】

パービアンズ 66

パッシェンの法則 93
 パウリの排他律 5
 ペニング効果 81, 93
 ペンシル管 146
 ベルチエ効果 194
 ポアソン方程式 38, 54, 65
 ポンピング 187
 プランビコン 176
 プラズマ 94
 — ディスプレー 178
 プレーナ構造 100
 — 形トランジスタ 128
 プレス陰極 48
 πモード 157
 P 形反転層 42
 P 形半導体 12
 pin ダイオード 101
 pnp 形トランジスタ 128
 pn 接合 33
 Qスイッチング 189

【R】

ラーマ半径 56
 ラムザウア効果 77
 ラングミュア・チャイルドの 3/2乗則 66
 励起転移 81
 励起状態 5
 連続式 26, 89
 レーザ 186
 リードダイオード 128
 臨界磁束密度 159
 利得パラメータ 155
 リチャードソン・ダッシュユマンの式 46
 両極性拡散 94
 — 係数 94
 量子化 4
 量子効率 49, 182
 ルビーレーザ 188
 累積電離 81
 ルーメン感度 50
 ルミネセンス 170

【S】

最確速さ 75
 再結合 26, 87, 88
 —係数 88
 —寿命 27
 —中心 26
 サイコン 177
 サイクロトロン 192
 —角周波数 56
 サイラトロン 163
 サイリスタ 123
 サーマスタ 194
 散弾雑音
 真空管における—— 144
 半導体素子における—— 115
 酸化物陰極 47
 酸化物入り多孔性金属 48
 三極交流スイッチ 127
 三極真空管 137
 三体再結合 89
 三体付着 88
 サチコン 177
 静電的増幅定数 139
 制動放射 190
 正孔 11
 整流作用 30
 静止質量 2
 正常グロー放電 94
 線形加速器 192
 占有数反転 187
 セラトロン 174
 接触電位差 28
 接合形電界効果トランジスタ 117
 接地方式 107
 仕事関数 28
 支配電圧 139
 色素レーザ 189
 進行波管 151
 進行波ブラウン管 170
 真空準位 28
 真性エレクトロルミネセンス

素子 186
 真性半導体 11
 真性密度 21
 シリコン 11
 —ビジコン 177
 —制御整流素子 123
 —対称スイッチ 127
 シンクロサイクロトロン 192
 シンクロトロン 193
 自然放出 187
 相互コンダクタンス
 MOSFET—— 121
 三極管の—— 138
 双方向サイリスタ 127
 走行角 68
 走行時間 66
 —効果 144
 損失係数 83
 ソース 117
 相対論効果 3
 速度変調管 147
 水銀陰極整流放電管 163
 水素結合 7
 スイッチング
 —ダイオード 104
 —トランジスタ 114
 —SCR 125
 スネルの法則 60
 ステッキング 171
 小規模集積回路 132
 少数キャリア 22
 —の注入 27
 ショットキーバリア 30
 —ダイオード 101, 184
 —形電界効果トランジスタ 122
 衝突 76
 —断面積 77
 —電離 80
 —励起 80
 —周波数 78
 遮断域 114
 遮断角周波数 114
 シャドーマスク 172
 —形 172

遮蔽格子 141
 集積作用 148
 縮退 103
 シュレーディンガー方程式 12
 主量子数 4
 集積回路 131
 Saha の式 87
 SB-FET 122
 SCR 123
 SEC ビジコン 177
 SSI 132
 SSS 127

【T】

帯構造 10
 対流電流 69
 単結晶 8
 単孔レンズ 60
 体心単位格子 8
 太陽電池 181
 多結晶 8
 多空胴速度変調管 148
 ターンオフ時間 126
 ターンオン時間 126
 多光子電離 87
 単原子層 47
 単位格子 8
 単純単位格子 8
 多数キャリア 22
 タウンセント放電 93
 定電圧電源等価回路 140
 定電流電源等価回路 141
 底心単位格子 8
 テレビジョン受像管 172
 遅波回路 151
 蓄積管 177
 蓄積層 43
 蓄積時間 100
 灯台管 146
 透過形二次電子放出面 52
 等価二極真空管 139
 統計力学 14
 特性X線 190
 トンネル効果 39

トンネルダイオード 102
 トリニトロン形 173
 トロコイド 59
 ツェナーダイオード 100
 ツェナー破壊 39
 チャンネル 43, 117
 チャンネルトロン 174
 超大規模集積回路 132
 超伝導 194
 超高压水銀灯 179
 直進形速度変調管 148
 直接付着 88
 直接再結合 26
 超 LSI 132
 中間規模集積回路 132
 T形等価回路 108
 TRIAC 127

 【U】

ウェーハ 132

運動方程式 52
 薄いレンズ 61

 【X, Y】

X線管 190
 抑制格子 192
 陽光柱 94
 陽極損 137
 四極真空管 141
 容量電流 69
 誘導電流 69
 誘導放出 187
 誘導吸収 187
 有機半導体 12
 有効質量 17
 YAG レーザ 189

 【Z】

雑音指数 116

ゼーベック効果 194
 —係数 194
 絶縁体 6, 11
 磁電管 157
 磁界偏向 170
 磁界レンズ 63
 磁気量子数 5
 自由時間 23
 自由電子模型 13
 増幅定数 138
 像変換管 178
 ジャイロトロン 162
 弱電離気体 73
 充満帯 10
 準安定状態 81
 順阻止域 123
 順方向 30
 ジョセフソン素子 195

——著者略歴——

1949 年 名古屋大学工学部電気学科卒業
1962 年 工学博士
1966 年 名古屋大学教授
1988 年 名古屋大学名誉教授
同 年 大同工業大学教授
1995 年 退職
著 書 「電磁力学」(1972) コロナ社
「プラズマ工学」(1975) コロナ社

電子工学概論

Introduction to Electronics

© Takayoshi Okuda 1983

1983 年 4 月 30 日 初版第 1 刷発行

1997 年 9 月 10 日 初版第 8 刷発行

検印省略

著 者 おく だ たか よし
奥 田 孝 美
愛知県愛知郡東郷町御岳 2-15-13
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛来辰巳
印 刷 所 富士美術印刷株式会社

112 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)



ISBN 4-339-00125-2

(清文社, 愛千製本所)

Printed in Japan

Ⓜ <日本複写センター委託出版物・特別扱い>

本書の無断複写は、著作権法上での例外を除き、禁じられています。本書は、日本複写権センターへの特別委託出版物です。本書を複写される場合は、そのつど日本複写権センター(03-3269-5784)を通して当社の許諾を得てください。