

は し が き

本書は、著者が、過去通算 18 年間、静岡大学工学部および千葉工業大学の電子工学科 1～2 年生に対して講義してきたノートを、整理要約して取りまとめたものである。専門家向けの学術書でも通俗書でもない。教科書としてばかりでなく、独習書としても、広く普通高校卒業程度の学力の方々を読者対象として期待する。しかし、講義経験によると、高校卒業程度にもかなり学力に幅がある。卒業後の年月を経て忘れかけておられる読者もあろう。比較的学力がある学生諸君にはレベルの低い講義では満足できないし、いっそうの努力が望ましい諸君には高すぎるとついていけない。そこで種々試行錯誤の結果、類書とは異なり注を大いに活用することとした。予備知識が豊富な読者は、本文の通読だけで十分であろう。理解困難な部分は注をご参照いただきたい。専門家には自明の理であっても、若干の補足説明が必要な読者も多いと思う。これによって幅広い読者層に本書が受け入れられることを念願する。近年、ハイテク技術関連の問題がしばしば話題にのぼる時代になってきた。電子工学の基礎知識は、程度の差はあるにせよ、現代社会人に不可欠であると思われる。

本書は電子工学の三大基礎分野の一つである電子デバイスについて、極力平易に解説したつもりである。複雑難解な数式を避けて物理的な意味を強調した。専門知識のたんなるら列ではなく、先人のたどった歴史や、現代の電子技術にいたる必然性を解説し、将来の発展の方向を示唆できれば幸いである。概論に引き続き、第 2 章では、固体（半導体）、気体または真空中のキャリアの挙動の基礎を説明した。第 3 章の電子管は、いまでもなお重要な電子デバイスである。第 4 章では、現在最も広く使用中のダイオード、トランジスタなど、バイポーラ半導体素子の基本を説明した。第 5 章では、他の最重要素子であるユニポーラ素子に関する基礎的事項について解説した。第 6 章では、電氣的以

外の物理量と電気的な量との間の相互変換素子に関する知識の基本を記述した。第7章では、電子素子を多数組み合わせで一体化し、1個の電子デバイスにまとめあげた集積回路（IC）に関する基礎知識と信頼性の概念を紹介した。

電子デバイスの種類はきわめて多く、取捨選択には考えさせられた。数年前には基礎研究段階にあったものが、最近広く実用化されているものも少なくない。逆に真空管のように、現在ではその後、主役の座から退いたものもある。しかし、基礎的知識としては、形を変えて現在、将来ともますます重要なものが多い。最も苦心したのは、ページ数の制限が非常にきびしかった点である。将来を展望して重要な事柄は極力含めるようにした反面、やむなく短縮割愛したものも少なくない。特に、半導体工業を理解する上できわめて重要な製造技術関係の基礎知識は、ページ数超過のため、当初独立の章として記述したものの全部を割愛し、大幅に簡略化して断片的に各所に分散記述するしか方法がなかったことをはなはだ遺憾に思う。また、演習問題を各章末に設けた。

電子デバイス工学は、最新知識でもすぐ陳腐化するほど日新月异の分野であるが、基本原理が急激に変化することはまれなので、各論よりも基本原理や理念を中心に記述した。草稿は本書の何倍もあるが、講義内容は学問技術の進歩につれて少しずつ変化しており、同じ内容の講義を繰り返したことは一度もない。

第2章の「電子とその作用」という表現は、恩師、故星合正治先生の同名の名著から、ご存命中特にお許しを得て使用させていただいた。著者がこの分野に興味を持ち、進むべき道を示してくださった先生の適切なご指導に対し感謝するとともに、誠に感慨深いものがある。発刊を待たずに幽明境を異にされたのは遺憾の極みである。謹んでご冥福を祈念し、本書をご霊前に捧げる。

執筆依頼を受けて以来、予想外の年月が経過したが、著者多忙と膨大な資料の取捨選択、さらにつとめて平易にと、推敲を重ねていたためである。長期間待っていただいたコロナ社に大変申しわけなく思う。また複雑な図面など原稿のワープロ入力にお骨折りいただいた三富美恵子、浅井和子両氏に感謝する。

昭和63年6月 東京杉並の自宅書齋にて

藤井忠邦

目 次



概

論

1.1 電子工学と電子デバイス	1
1.2 電子デバイスの種類	4



電子とその作用

2.1 原子と電子	9
2.2 原子の構造とふるまい	10
2.3 電子の波動性	16
2.4 物質の電子的性質	20
2.4.1 元素の周期律	20
2.4.2 固体の結晶	26
2.4.3 結晶原子間の結合	32
2.4.4 エネルギー帯	34
2.5 統計的エネルギー分布とフェルミ準位	40
2.5.1 分布関数と分布密度関数	40
2.5.2 電子相互間の影響を無視できる場合の分布関数(ボルツマン分布)	43
2.5.3 量子力学的分布関数	44
2.5.4 フェルミ・ディラックの分布関数	46
2.6 固体中の電気伝導	49
2.6.1 導体, 半導体および絶縁体	49
2.6.2 キャリヤの移動度	53

2.6.3	真性半導体中の電気伝導	55
2.6.4	不純物半導体と補償半導体	57
2.6.5	キャリアの生成と再結合	62
2.6.6	キャリアの拡散	65
2.7	電子放出	67
2.7.1	電子放出とその種類	67
2.7.2	熱電子放出の原理	68
2.7.3	熱電子放出陰極	72
2.7.4	光電子放出	74
2.7.5	2次電子放出	77
2.8	自由空間中の電子の運動	79
2.8.1	電磁界中の電子のふるまい	79
2.8.2	静電界中の電子の運動	81
2.8.3	静磁界中の電子の運動	83
2.9	電子運動における相対論的効果	85
2.9.1	高速度運動時の電子の質量	85
2.9.2	相対論的電子速度の基本法則	85
	演習問題	86

3 電 子 管

3.1	電子管の歴史と現状	90
3.2	真空管	91
3.2.1	空間電荷制御真空管	91
3.2.2	超高周波真空管	97
3.2.3	光電変換および画像用真空管	104
3.3	放電管	117
3.3.1	気体中の放電	117
3.3.2	照明用放電管	120
3.3.3	表示用放電管	122

3.3.4 その他の放電管	122
演習問題	123



個別バイポーラ素子

4.1 半導体デバイスの歴史と現状	125
4.2 異種材料の接触と接合	127
4.2.1 接触と接合	127
4.2.2 金属と半導体との接触	128
4.2.3 金属とn形半導体の接触	130
4.2.4 金属とp形半導体の接触	135
4.2.5 pn接合とその特性	137
4.2.6 熱的平衡時のpn接合のエネルギー帯の構造	139
4.2.7 pn接合に対するバイアス電圧の影響	141
4.2.8 pn接合に対する温度の影響	144
4.3 ダイオードの基本的特性	145
4.3.1 ダイオード	145
4.3.2 電圧電流特性	146
4.3.3 接合容量	147
4.3.4 なだれ降伏とツェナー降伏	152
4.3.5 トンネル効果とトンネル降伏	153
4.4 代表的なダイオード	155
4.4.1 ダイオードの種類	155
4.4.2 エサキダイオード	163
4.5 非晶質半導体を用いた整流器	165
4.6 トランジスタ	166
4.6.1 概説	166
4.6.2 動作の基本原理	169
4.6.3 直線増幅器の原理(ベース接地回路)	175
4.6.4 直線増幅器の基本的回路とその特性(エミッタ接地回路)	179
4.6.5 4端子回路網と等価回路	182

4.7 多接合素子	186
4.7.1 多接合素子とその種類	186
4.7.2 サイリスタとその動作原理	187
4.8 半導体素子の製造技術	190
4.8.1 概説	190
4.8.2 半導体素子製造技術	190
演習問題	198



個別ユニポーラ素子

5.1 電界効果トランジスタ	200
5.1.1 ユニポーラ素子の歴史	200
5.1.2 逆バイアス pn 接合利用のゲート絶縁法	201
5.1.3 その他の電界効果トランジスタ	202
5.2 接合形電界効果トランジスタ	203
5.2.1 構造と動作原理	203
5.2.2 電気的特性	205
5.3 絶縁ゲート形電界効果トランジスタ	208
5.3.1 IGFET の開発とパッシベーション	208
5.3.2 電気的特性	208
5.3.3 MOSFET の特徴と欠点	209
5.3.4 MOSFET の製造技術	210
5.3.5 デプレッション形とエンハンスメント形	211
5.3.6 CMOS	212
5.4 薄膜電界効果トランジスタ	214
演習問題	215



変換素子

6.1 磁気素子	216
6.1.1 ホール効果	216
6.1.2 ホール素子	219
6.2 熱電素子	221
6.2.1 熱電効果	221
6.2.2 熱電素子の特性と応用	225
6.3 光電素子	226
6.3.1 光導電素子	227
6.3.2 光起電力効果	229
演習問題	230



集積回路

7.1 概論	232
7.1.1 電子デバイス集積化の必要性	232
7.1.2 集積回路の種類	234
7.2 半導体集積回路	236
7.2.1 概説	236
7.2.2 バイポーラ半導体集積回路の構造と製造方法	237
7.3 厚膜集積回路	240
7.4 薄膜集積回路	241
7.4.1 概説	241
7.4.2 製造技術	242
7.4.3 構造	243
7.5 混成集積回路	244

7.6 各種集積回路の比較	244
7.6.1 半導体集積回路と膜集積回路との比較	244
7.6.2 厚膜集積回路と薄膜集積回路との比較	245
7.6.3 集積化の利点	246
7.6.4 集積回路の欠点とその対策	247
7.7 集積回路の信頼性	249
7.7.1 信頼性と劣化率	249
7.7.2 劣化曲線	249
7.7.3 信頼性の計算方法	251
演習問題	254

演習問題解答

索引



概 論

1.1 電子工学と電子デバイス

電子デバイス (electron device) とは、主として真空 (vacuum)、気体 (gas) または半導体 (semiconductor) 中の電子 (electron) の運動によって、電気伝導 (electric conduction) が行われるデバイス (device)[†]のことである。

[†] device とは「考案されたもの」という意味であって、日本語では以前「装置」と訳されていたが、装置という言葉は equipment (設備) という意味にも使用されるので意味があいまいになりやすい。そこで、近年は「デバイス」と片仮名で書かれるようになった。

〔1〕 電子工学の3大基礎分野 電子デバイス工学 (electron device engineering) は、電磁気学 (electromagnetic theory)、電気回路理論 (electric circuit theory) とともに、電子工学 (electronic engineering, electronics) のうちで最も重要な三つの基礎分野の一つである。電子デバイス工学について述べる前に、これら他の基礎分野と電子工学との関係について説明しよう。

電磁気学とは、(1) 電気や磁気の性質、(2) それらの相互作用、および (3) これらに起因する各種の物理現象などに関する基礎理論のことである[†]。

[†] 電磁気学に含まれる事項は、(1) 電荷 (electric charge)、および電荷の存在

によって生ずる電気力 (electric force), 電界 (electric field), (2) 電荷の移動によって生ずる電流 (electric current), (3) 電流によって生ずる磁気力 (magnetic force), 磁界 (magnetic field), (4) 磁界の変化によって生ずる起電力 (electromotive force), つまり電圧 (voltage), (5) この起電力が前記の電荷の移動の原因となって電流を生ずることなどである。① 電荷の発生や消滅, ② 電気的でも磁氣的でもない物理現象, ③ 材料およびその材料固有の性質, すなわち, 電荷が宿り, あるいはその移動媒体となることなどは, 電磁気学の考慮の対象外の問題である。

電気回路理論とは, 電荷が移動する道, すなわち, 電気回路 (electric circuit) の性質に関する基礎理論である[†].

[†] 電気回路は三つの基本的構成要素, すなわち, (1) インダクタンス (inductance) L , (2) 静電容量 (electrostatic capacitance) C , および(3) 電気抵抗 (electric resistance) R を含むいく種類かの要素の組み合わせからなるものと考え, これに電源 (power source) から電力 (electric power) が加えられた場合, 各部の電位差 (electric potential difference, すなわち電圧) と電流 (すなわち電子の流れ) との関係について, 一般的に論ずる学問である。つまり, 電圧と電流との比がインピーダンス (impedance), 積が電力であるが, これら電圧, 電流, インピーダンスおよび電力の相互関係を, 複素関数論 (theory of complex functions) とか, ラプラス変換法 (Laplace transform) などの数学的な手法を用いて, 定量的に明らかにするための, 一般的な理論である。このようにすれば, これらの相互関係を求めるのに, いちいち電磁気学の基本法則に立ち返って, 物理現象そのものの性質を論ずるといった繁雑さから開放され, 純粋に数学的な手法のみによって個々の電気回路の性質を明らかにすることができるという特色がある。

[2] 電気回路素子 電気回路素子[†] (electric circuit element) とは, 電気回路を構成する要素の総称である。一般に, 電気回路素子には

[†] たんに素子 (element) と呼ぶことが多い。

(1) 直線性 (linearity)[†]があるものとなないものがある。直線性とは, 電気回路素子の特性値が, 動作条件 (すなわち, 印加電流, 電圧または電力や外部電源からのエネルギーの供給状態など) とは無関係に一定である性質のことである。性質に直線性がないことを非直線性 (nonlinearity)^{††}という。直線性をもった電気回路素子のことを直線素子 (linear element), もたない素子を非直線素子 (nonlinear element) と称する。非直線素子であっても, 限られた動作範囲内では, 近似的に直線素子とみなしてもさしつかえない場合が少な

くない。LCR^{†††}は直線素子である。

[†] 直線性という語を厳密に定義するとつぎのようになる。「入力 x を与えたときに出力 y が得られ、入力 X を与えたときに出力 Y が得られる場合、入力 $(x + X)$ を与えたときに出力 $(y + Y)$ が得られるような性質を直線性という」。したがって、「入力 kx (k は一定) を与えたときには出力 ky が得られることになる」。

^{††} 非直線性とは、[†] で述べた性質をもっていないことをいう。

^{†††} 電気回路に関する注を参照。

(2) また、動作するのに、使用回路自身を通じて加えられる電流以外の外部エネルギーの助けを必要としない電気回路素子**受動素子** (passive element)、必要とする電気回路素子を**能動素子** (active element) という。受動素子のみによって構成された電気回路を**受動回路** (passive circuit)、能動素子が含まれる電気回路を**能動回路** (active circuit) という。

(3) 電気回路素子の多くは、主として電子の働きを利用したもので、これらを**電子回路素子** (electronic circuit element) と総称する。電子回路素子には**電子能動素子** (electronic active element) と**電子受動素子** (electronic passive element) とがある。**トランジスタ** (transistor) や**3極管** (triode vacuum tube)などは電子能動素子の例であり、**半導体ダイオード** (semiconductor diode) は電子受動素子の例である。**LCR** は電子回路素子に含まれない。電子回路素子を含む電気回路を**電子回路** (electronic circuit) と呼ぶ。厳密に言えば、電子回路素子はほとんどすべて非直線素子であるが、動作範囲を限定するなど、使用方法に各種の工夫を施して、近似的に直線素子とみなしても使用上大きな支障がない場合が多い。

[3] 電子デバイス工学 電子デバイスとは

(1) 単独の電子回路素子それ自身、または

(2) 多数の電子回路素子の集まり、あるいは

(3) 多数の電子回路素子を含む電子回路の一部分または全部を一体化した
もの

の総称である。つまり、**電子デバイス**とは、**元來電子回路素子そのもののこと**なのであるが、近年、複雑でしかも同一構成の電子回路をきわめて多数使用す

る必要性が増大し、多数の電子素子を含む電子回路の一部分または全部を一体化して、1個の電子デバイスとする技術がめざましい発達を遂げた。一般に、このような電子デバイスのことを**集積回路** (integrated circuit, 略称, IC) と称する。つまり、**集積回路とは電子回路には違いないのであるが、多数の電子回路素子を含む電子回路全体を、一体不可分な1個の部品のような形に作り上げたもので、あたかも集積回路そのものが、さらに大規模な電子回路の構成要素である電子回路素子のような役割を果たす、1個の電子デバイスのこと**なのである。本書では、種々の電子デバイスの構成、原理、特性、製造技術、試験方法、信頼性などについて論ずる。

1.2 電子デバイスの種類

電子デバイスは、**半導体デバイス** (semiconductor device)[†]と、**電子管** (electron tube) とに大別される。半導体デバイスは、半導体結晶中の電子と**正孔** (hole, 別名, **ホール**) の働きを利用した電子デバイスである。そのうち、例えば、トランジスタなど単一の電子素子からなる半導体デバイスを**個別半導体素子** (discrete semiconductor element) と呼ぶ。これに対し、単独または若干個の電子素子を組み合わせて、システムの一要素として必要な特定の機能^{††}を行わせる半導体デバイスを、一般に**電子機能デバイス** (electronic functional device) という。電子機能デバイスのうちで、特に多数(多くの場合、数十個から数十万個以上)の電子素子や電気回路素子と、それらの相互接続線とを一体化したものが、前節で述べた集積回路である。電子機能デバイスには、集積回路のほかに、半導体それ自身の性質を利用して各種の機能を独立して行うことができる電子デバイスがいろいろある。一般に、これらを**機能素子** (functional element)^{†††}と総称するが、そのうちで各種の物理量(例えば、光、磁気、力など)と、電気的な量との間の、相互変換機能をもたせた機能素子を、**変換素子** (transducer)^{††††}と呼んでいる。変換素子のうちで、電気的ではない物理量を電気的な量に変換するものを**センサ** (sensor) という。

また、電子管には、**真空管** (vacuum tube) と**放電管** (gas discharge tube) とがある。真空管は真空中の電子の働きを利用した電子管であり、放電管は気体中の電子と**イオン** (ion) の働きを利用した電子管である。表 1.1 (a) ~ (e) は電子デバイスの分類††††を示す。

- † **固体デバイス** (solid-state device) のほうが多少意味が広いが、事実上ほとんど同意語と考えて大きな誤りはない。
- †† 例えば、増幅、発振など。
- ††† 例えば、**ガン効果素子** (Gunn-effect element), **電荷移送素子** (charge transfer element), **発光ダイオード** (light-emitting diode, 略称, LED) など。
- †††† 例えば、**ホール素子** (Hall element), **ピエゾ電気素子** (piezo-electric element) など。
- ††††† 原理別, 使用材料別, 構造別, 製造方法別, 用途別など, 種々の異なる観点から, これ以外にも, 多くの分類法がある。本表の分類はおおむね本書の内容に従ったもので, 普遍的な分類方法が確立されているわけではない。

表 1.1 (a) 電子デバイスの分類——その 1 (大分類)

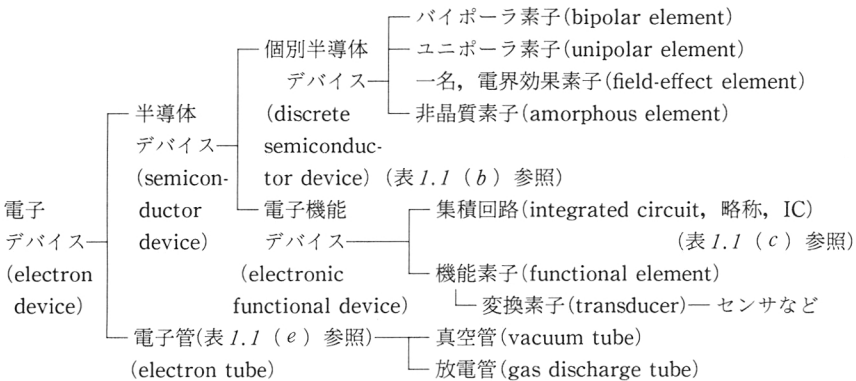


表 1.1 (b) 電子デバイスの分類——その 2 (個別半導体デバイス)

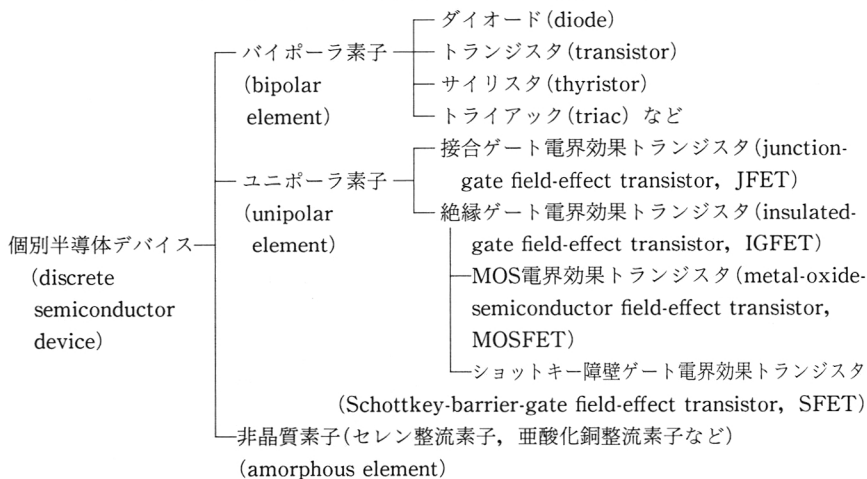
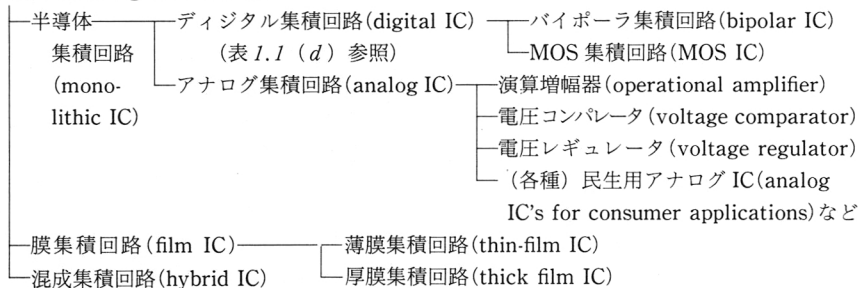


表 1.1 (c) 電子デバイスの分類——その 3 (集積回路)

集積回路 (integrated circuit)



索引

【A】

アドミタンスパラメータ
表示 183
アインシュタインの関係 66
アーク放電 120
アクセプタ 57
アナログ集積回路 234
暗電流 76
亜酸化銅整流器 165
アストン暗部 119
厚膜集積回路 240

【B】

バインダ 240
バイポーラデバイス 127
バイポーラ集積回路 237
バンチャ 101
板極管 98
バラクタ 162
バルク 201
ベース 166
ベース電流 172
ベース幅変調 182
ベース接地回路 175
ビジコン 108
ビームリード 234
微視的可逆性 45
ボーアの原子模型 13
ボンディング 196
傍熱陰極 71
ボルツマン分布関数 44
歩留り 245
分光感度特性 76

分布関数 42
分布密度関数 42
ブラベー格子 31
ブラウン管 109
ブラウン運動 54
ブレイクオーバー電圧 188
ブリッジ形全波整流回路 156

【C】

CMOS 212
チャンネル 201
遅波回路 99
チップ 156
超階段接合 162
直線加速器 86
直線傾斜接合 149
直線性 2
直線増幅器 175
中央処理部 235
中性子 13

【D】

ダイ 191
台形ひずみ 107
ダイナトロン特性 96
ダイノード 107
ダイオード 3
ダイポル層 128
電圧帰還比 184
デンバー効果 230
伝導帯 37
電位障壁 131
電磁波の放射 97
電磁偏向 113

電磁集束 112
電荷保存の法則 67
電界放出 67
電界効果トランジスタ 200
電気二重層 131
電極導線のインダクタンス 98

電離 10
電流利得 178
電子 1
電子ビーム 111
電子ガス 34
電子配置 24
電子放出 67
——の初速度 70
電子放出方程式 69
電子銃 106
電子受動素子 3
電子回路 3
電子殻 23
電子管 4
電子軌道の半径 15
電子機能デバイス 4
電子構造 37
電子なだれ 118, 120
電子能動素子 3
電子レンズ 111
電子力学 9
電子・正孔対 56
電子親和力 68
電子走行時間 97
電子スイッチ作用 169
デプレッション形 212
ディジタル集積回路 234
ド・プロイ波長 17
土台金属 73

同位元素 13
 ドナー 57
 ドーパント 57
 ドーピング 57
 ドープ 58
 ドレイン 200
 ドリフト 54
 ドリフト電流 54, 66
 ドリフト速度 54
 動作点 175
 同種接合 127

〔E〕

映進 31
 映像増倍管 109
 エージング 250
 エミッタ 166
 エミッタ注入効率 179
 エミッタ電流 171
 エミッタ接地回路 175
 エミッタ接合 168
 エネルギ準位図 35
 エンハンソメント形 212
 演算増幅器 245
 エピタキシャル成長法 192
 エサキダイオード 164
 エッチングスハウゼン係数
 224
 エッチングスハウゼン効果
 224

〔F〕

FET 200
 ファラデー暗部 119
 フェルミ・ディラックの
 分布関数 49
 フェルミ準位 48

〔G〕

外部光電効果 74

外部仕事関数 68
 外部的対称性 29
 ガイガー・ミュラー計数管
 123
 外因の性質 61
 原子 9
 原子番号 13
 原子団 29
 原子核 10
 原子量 13
 原子質量単位 13
 ゲート 200
 5極管 96
 偶発的不良期間 249
 グロー放電 118
 グロー放電管 121
 グロー表示管 122
 逆注入 173
 逆阻止3端子サイリスタ 187
 逆転層 211

〔H〕

h パラメータ 184
 波動関数 17
 波動力学 17
 薄膜集積回路 240
 薄膜トランジスタ 203
 半導体 50
 半導体物性論 9
 半導体デバイス 4
 半導体集積回路 234
 半波整流回路 156
 反射電極 103
 反射形クライストロン 103
 反転 30
 閉殻 25
 平均自由時間 54
 平均自由行程 54
 平均寿命 62
 平衡分布関数 47
 並進対称 26
 —の条件 29
 変換効率 104
 変換素子 4, 216
 偏向 106
 偏析 191
 非オーム接触 128
 非晶質 26
 非晶質半導体素子 165
 放電管 5
 方位量子数 15
 保持電流 188
 ホール 4
 ホール移動度 218
 ホール効果 216
 ホール定数 217
 光子 75
 補償半導体 60
 放出電流密度 71
 放出効率 71
 放出定数 69
 ホトマスク 193
 ホトレジスト 193
 ホットキャリア 160
 飽和電圧 69
 飽和電流 70
 負グロー 119
 不純物 57
 不純物半導体 57
 負荷抵抗 93
 負帰還回路 235
 副殻 23
 複空胴形クライストロン 101
 負抵抗 95
 負抵抗特性 122
 浮遊式帯域溶融法 192
 評価指数 210
 表面準位 201
 表面量子状態 134
 表面障壁 134

〔I〕

移動度 54
 異常グロー 119

イメージ管 108
 イメージコンバータ 109
 イメージセンサ 105
 インゴット 190
 陰極 67
 陰極暗部 119
 陰極光 119
 陰極降下 119
 陰極線 109
 陰極線管 109
 陰極スパッタリング 241
 インピーダンスパラメータ
 表示 183
 イオン 5
 イオン注入法 195
 異種原子 60
 異種接合 127
 位相速度 100

【J】

JFET 202
 磁気量子数 15
 自由電子 10
 自由空間 15
 冗長性 246
 受動薄膜集積回路 243
 寿命終点 250
 順方向電流比 184
 純金属陰極 72

【K】

価電子帯 36
 化学量論的不純物 61
 化学的不純物 61
 可変容量素子 146
 階段接合 150
 回映 30
 回映軸 30
 回反 30
 回転 29
 回転軸 30

殻外電子 25
 拡散 65
 拡散電位 131
 拡散電流 65
 拡散方程式 65
 拡散係数 65
 拡散距離 178
 加熱電力密度 71
 活性化 74
 カustom集積回路 248
 蛍光灯 120
 蛍光材料 114
 欠陥率 178
 検波 92
 検波用ダイオード 159
 結晶 26
 ——の対称性 29
 結晶軸 29
 結晶軸系 29
 結晶基 29
 結晶格子 26
 結晶構造 29
 結晶質 26
 基板 193
 基本並進ベクトル 27
 基本胞 28
 機能素子 4
 禁制帯 34
 禁制帯幅 37
 金属結合 34
 キラー 64
 個別半導体素子 4
 光電池 125
 光電変換管 104
 光電効果 12
 光電面 75
 光電流 74
 光電子 74
 光電子放出 67
 光電子放出撮像管 106
 光導電効果 227
 光導電率 227
 光導電撮像管 108

光導電セル 228
 降伏 147
 光起電力効果 75
 光起電力効果 104
 光起電力効果 230
 混成パラメータ表示 183
 混成集積回路 244
 コントラスト比 116
 コレクタ 166
 コレクタ電流 171
 コレクタ接地回路 175
 コレクタ接合 168
 光量子 75
 格子欠陥 60
 格子定数 31
 格子点 26
 固体物理学 9
 固体撮像デバイス 108
 空乏層 131
 ——の幅 148
 空位 60
 空間電荷 70
 空間電荷密度分布 149
 空間電荷領域 138
 空間電荷制御真空管 91
 空間群 31
 空間格子 26
 クライストロン 101
 クリーンベンチ 197
 キャリヤ 53
 ——の生成 56
 キャリヤ密度 54
 キャッチャ 101
 鏡映 30
 強制冷却 158
 許容帯 34
 共有結合 22
 球面収差 112

【L】

L陰極 74
 LSI 237

【M】

MOSFET 203
 MSI 237
 マグネトロン 100
 マイクロ波ダイオード 163
 マイクロコンピュータ 235
 マイクロプロセッサ 235
 膜集積回路 234
 マクスウェル分布則 70
 マウント 196
 メモリ集積回路 235
 面心格子 28
 メサ法 195
 メタルバック 116
 ミクサダイオード 163
 民生用集積回路 234
 ミラー指数 32
 密度変調 102
 モジュール 233
 モノリシック集積回路 236
 無塵室 197

【N】

n形半導体 57
 n形領域 138
 なだれ降伏 152
 内部光電効果 75
 内部仕事関数 129
 内部的対称性 31
 内因の性質 61
 ネルンスト係数 224
 ネルンスト効果 224
 熱電効果 221
 熱電力 223
 熱電流 223
 熱電子放出 67
 熱電素子 221
 熱電対 225
 熱起電力 222
 熱流磁気効果 224

熱的平衡状態 40
 2次電子放出 67
 2次電子放出比 79
 ニクシー管 122
 2極管 91
 能動薄膜集積回路 241
 ノイズレベル 163
 入力抵抗 184
 ニュートン力学 85

【O】

オーム接触 128
 温度飽和 70

【P】

p形半導体 57
 p形領域 138
 pinダイオード 159
 パッケージ 196
 パラメトリック増幅器 162
 パッシベーション 208
 パワリの排他律 23
 ペレット 191
 ベルチエ係数 221
 ベルチエ効果 221
 ピンチオフ 205
 ポアソン方程式 83
 ブランク定数 12
 プラズマ 119
 プレーナ法 195

【R】

ラプラス方程式 83
 ら旋形進行波管 100
 ら旋操作 31
 劣化曲線 249
 劣化率 249
 リニア集積回路 235
 利得 93
 利得係数 228

論理集積回路 235
 ロット管理 250
 量子 12
 量子力学 17
 量子論 9

【S】

SSI 237
 再結合 56
 再結合中心 64
 再結合時間 167
 再結合距離 168
 サイクロトロン周波数 217
 サイリスタ 186
 サーミスタ 125, 226
 産業用集積回路 234
 酸化物含浸陰極 74
 酸化物被覆陰極 73
 3極管 92
 撮像管 105
 静電偏向 113
 静電集束 112
 制御格子 92
 制御整流器 186
 正常グロー 119
 正孔 4
 整流 92
 整流方程式 146
 整流器 155
 整流性接触 133
 製造工数 246
 遷移確率 45
 遷移領域 138
 せん光放電管 122
 センサ 4
 せん頭逆電圧 147
 セレン整流器 165
 接触 127
 接合 127
 接合ゲート形電界効果
 トランジスタ 202
 シャドーマスク 117

遮へい格子 94
 写真蝕刻法 194
 シェーディング 107
 仕事関数 129
 進行波管 100
 真空度 118
 真空放電 118
 真空蒸着 241
 真空管 5
 信頼性 246
 真性半導体 55
 真性キャリア密度 58
 真性密度 57
 真性領域 138
 質量作用の法則 59
 障壁層 131
 初期不良 250
 初期不良期間 249
 詳細釣合いの原理 45
 小信号用ダイオード 159
 小信号増幅器 175
 初速度成分 78
 少数キャリア 58
 —の注入 64, 141
 衝突直径 78
 ショットキーバリア
 ダイオード 160
 ショットキー効果 72
 ショットキー障壁電位 131
 周波数混合器 163
 周波数通倍器 162
 周期律 20
 縮退 154
 シュレディンガーの
 波動方程式 17
 主量子数 15
 集積回路 4, 234
 集束 105
 出力アドミタンス 184
 出力インピーダンス 212
 真空準位 129
 質量数 13

相互コンダクタンス 94
 速度変調 102
 ソース 200
 総体平均 42
 相対論的速度 85
 垂下特性 122
 スイッチングダイオード 160
 スクライバ 195
 スピン量子数 15
 スポット 114
 スタッド 158
 ステム 158
 ステンシルスクリーン 240
 ストロボ放電管 122

〔T〕

体心格子 28
 多空胴形クライストロン 102
 多極管 91
 単原子層陰極 72
 単位胞 26
 単結晶 26
 単結晶引上法 190
 多数キャリア 58
 多数キャリア電流 174
 定電圧 146
 定電圧ダイオード 146
 低下規格 250
 抵抗パラメータ表示 183
 底心格子 28
 低速度走査 107
 点群 31
 転位 60
 点接触形 126
 点灯管 121
 等価回路 182
 トムソン係数 222
 トムソン効果 222
 トンネル降伏 152
 トランジスタ 3
 トラップ 64

トリガ素子 187
 トリミング 245
 トリタン陰極 72
 ツェナー降伏 152
 使い切り不良期間 249
 超高周波電界 97

〔U, V, W〕

ULSI 237
 ウェーハ 191
 VLSI 237
 割込み電子 60

〔Y〕

呼出時間 236
 陽光柱 119
 抑制格子 96
 陽極光 119
 陽極抵抗 93
 読出時間 236
 読込時間 236
 4極管 94
 陽子 13
 有効寿命期間 250
 ユニポーラデバイス 127
 ユニポーラ集積回路 237
 揺らぎ雑音 40

〔Z〕

残光時間 116
 残光性 116
 雑音余裕度 213
 ゼーベック効果 222
 全波整流回路 156
 絶縁ゲート形電界効果
 トランジスタ 202
 絶対温度 40
 増倍形光電管 104
 増幅定数 93

— 著者略歴 —

- 1944年 東京大学工学部電気工学科卒業
1945 日本電信電話公社電気通信研究所勤務，マイクロ波電子管の研究に従事
～54年
1951 ガリオア奨学資金を得て，スタンフォード大学留学。
～52年 マイクロ波電子デバイスの研究に従事
1954 日本電気株式会社勤務，研究所電子管研究室長，半導体事業部超高周波素子部長，同社技師長（電子デバイス担当）などを歴任
～70年
1962年 工学博士（東京大学）
1967年 日本電気ニューヨーク株式会社 取締役社長
1970年 静岡大学大学院博士課程電子科学研究科教授，工学部電子工学科教授 兼務
1982年 千葉工業大学工学部電子工学科教授
1993年 逝去

電子デバイス工学

Electron-Device Engineering

© Tadakuni Fujii 1988

1988年 8月15日 初版第1刷発行

2002年 7月10日 初版第10刷発行

検印省略

著 者 藤 井 忠 邦
発 行 者 株式会社 コロナ社
代 表 者 牛来辰巳
印 刷 所 新日本印刷株式会社

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>

ISBN 4-339-00135-X

(製本：愛千製本所)

Printed in Japan



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