



電子情報通信レクチャーシリーズ A-9

電子物性とデバイス

電子情報通信学会◎編

益 一哉 共著
天川修平

コロナ社

▶電子情報通信学会 教科書委員会 企画委員会◀

- 委員長 ————— 原 島 博 (東京大学名誉教授)
- 幹事 ————— 石 塚 満 (東京大学名誉教授)
(五十音順)
- 大石進一 (早稲田大学教授)
- 中川正雄 (慶應義塾大学名誉教授)
- 古屋一仁 (東京工業大学名誉教授)

▶電子情報通信学会 教科書委員会◀

- 委員長 ————— 辻 井 重 男 (東京工業大学名誉教授)
- 副委員長 ————— 神 谷 武 志 (東京大学名誉教授)
- 宮 原 秀 夫 (大阪大学名誉教授)
- 幹事長兼企画委員長 ——— 原 島 博 (東京大学名誉教授)
- 幹事 ————— 石 塚 満 (東京大学名誉教授)
(五十音順)
- 大石進一 (早稲田大学教授)
- 中川正雄 (慶應義塾大学名誉教授)
- 古屋一仁 (東京工業大学名誉教授)
- 委員 ————— 122 名

(2017年12月現在)

刊行のことば

新世紀の開幕を控えた 1990 年代、本学会が対象とする学問と技術の広がりや興行きは飛躍的に拡大し、電子情報通信技術とほぼ同義語としての“IT”が連日、新聞紙面を賑わすようになった。

いわゆる IT 革命に対する感度は人により様々であるとしても、IT が経済、行政、教育、文化、医療、福祉、環境など社会全般のインフラストラクチャとなり、グローバルなスケールで文明の構造と人々の心のありさまを変えつつあることは間違いない。

また、政府が IT と並ぶ科学技術政策の重点として掲げるナノテクノロジーやバイオテクノロジーも本学会が直接、あるいは間接に対象とするフロンティアである。例えば工学にとって、これまで教養的色彩の強かった量子力学は、今やナノテクノロジーや量子コンピュータの研究開発に不可欠な実学的手法となった。

こうした技術と人間・社会とのかかわりの深まりや学術の広がりを踏まえて、本学会は 1999 年、教科書委員会を発足させ、約 2 年間をかけて新しい教科書シリーズの構想を練り、高専、大学学部学生、及び大学院学生を主な対象として、共通、基礎、基盤、展開の諸段階からなる 60 余冊の教科書を刊行することとした。

分野の広がりに加えて、ビジュアルな説明に重点をおいて理解を深めるよう配慮したのも本シリーズの特長である。しかし、受身的な読み方だけでは、書かれた内容を活用することはできない。“分かる”とは、自分なりの論理で対象を再構築することである。研究開発の将来を担う学生諸君には是非そのような積極的な読み方をしていただきたい。

さて、IT 社会が目指す人類の普遍的価値は何かと改めて問われれば、それは、安定性とバランスが保たれる中での自由の拡大ではないだろうか。

哲学者ヘーゲルは、“世界史とは、人間の自由の意識の進歩のことであり、… その進歩の必然性を我々は認識しなければならない”と歴史哲学講義で述べている。“自由”には利便性の向上や自己決定・選択幅の拡大など多様な意味が込められよう。電子情報通信技術による自由の拡大は、様々な矛盾や相克あるいは摩擦を引き起こすことも事実であるが、それらのマイナス面を最小化しつつ、我々はヘーゲルの時代的、地域的制約を超えて、人々の幸福感を高めるような自由の拡大を目指したいものである。

学生諸君が、そのような夢と気概をもって勉学し、将来、各自の才能を十分に発揮して活躍していただくための知的資産として本教科書シリーズが役立つことを執筆者らと共に願っている。

なお、昭和 55 年以来発刊してきた電子情報通信学会大学シリーズも、現代的価値を持ち続けているので、本シリーズとあわせ、利用していただければ幸いです。

ii 刊 行 の こ と ば

終わりに本シリーズの発刊にご協力いただいた多くの方々に深い感謝の意を表しておきたい。

2002年3月

電子情報通信学会 教科書委員会
委員長 辻 井 重 男

まえがき

本書は、固体のうちでも特に半導体の電氣的性質（電子物性）と、半導体を利用して作られた電子部品（半導体デバイス、あるいは単にデバイスと呼ぶ）に対する易しい入門書となることを目指して執筆された。電子物性や半導体デバイスに関する図書は、立派なものがすでに多数出版されているから、よほど気をつけないと屋上屋を架すことになりかねない。また、本書は電子情報通信レクチャーシリーズのうち「A 共通」に位置づけられているため、ページ数はもとより、読者に期待できる予備知識にも厳しい制約がある。

まず、本書では、読者が大学工学部一年または高専三～四年程度までの数学と物理および電気回路の基本的な知識を修得されているものと想定した。内容に関しては、将来、電子物性やデバイスを専門にすることは限らない学生が教科書として利用する可能性も考慮し、単に話題を基礎的な事項に絞るだけでなく、分野横断的な視点も取り入れるよう努めた。より具体的にいえば、電子情報通信を担うハードウェアの中核に位置する「回路」の観点から、その構成部品であるデバイスと、その材料の物性を考察することとした。

電子情報通信技術は日進月歩であるから、新しい話題を盛り込んでも急速に陳腐化してしまう恐れがある。なるべく陳腐化しにくい普遍的な基礎を与えるべく、本書を学び終えたときの大きなゴールを以下のように設定した。

- (1) 回路の観点から半導体デバイスの機能を理解すること。
- (2) 周期構造における波動現象が、結晶の電氣的性質の根底にあることを知ること。
- (3) 半導体デバイスのエネルギーバンド図を読めるようになること。
- (4) pn ダイオードと MOS トランジスタの基本動作の物理を理解すること。

(1) は、回路中でのデバイスの機能と、その機能の具体的な実現方法（特定の材料を使ってどうやって作るか）とを切り分けて考えようということである。かつては真空管で実現されていたデバイスが、現在は半導体で実現されている。将来、半導体が駆逐されることはないにせよ、新材料や新デバイスの開拓の余地は大いにある。また、物性とデバイスを、そのユーザー（＝回路技術者）の立場から眺めるといふ意味合いもある。

(2) は、正面から量子力学を持ち出すわけにはいかない状況で、初学者に電子物性（特にバンド理論）をどう提示するかという問題に対する回答ないし試案である。易しくしようと腐心するあまり、単なるお話やたとえ話ばかり並べてもしょうがないと考え、本書では回路理論を使ってバンド理論の要諦を伝えることを試みた。これによって、本格的な固体物理を学ぶ際に感じる心理的バリアを少しでも下げることができれば、と願っている。

半導体デバイスの教科書には必ず「エネルギーバンド図」なるものが登場する。しかしなが

ら、なぜそのような図を描くのかを必ずしも理解せずに先に進んでしまう学習者も見受けられる。エネルギーバンド図は半導体デバイスに関するさまざまな情報を表示できる偉大な発明であり、それをきちんと読めることを目標として (3) に掲げた (巻末の索引の「エネルギーバンド図を読む」から関連事項を引ける)。これに関連して、デバイス物理解の鍵を握る「擬フェルミ準位」について詳しく説明した。本書で取り上げる半導体デバイスは非常に限定されているが、エネルギーバンド図を読む能力は、今後いかなるデバイスを相手にするにしても役立つはずである。

(4) は、限られた紙幅でデバイス物理にまで立ち入って説明するデバイスとして選んだ。pn ダイオード (pn 接合) は、単体デバイスとしても、より複雑な半導体デバイスの構成要素としても、重要であり続けると考えられる。トランジスタの代表として取り上げるのが MOS トランジスタなのは、MOS キャパシタというもう一つの重要な構成要素を含んでおり、また現在使われているトランジスタとしてシェアが圧倒的だからである。(4) は (3) の応用編でもある。

書き終えてみると思いのほか大部になったが、これは説明や計算過程を端折らず丁寧に書いたからであり、15 コマの授業でカバーできる程度の内容しか入れていない。ページ数の割にはどんどん読み進められるはずである。

本書は、いささか非標準的なアプローチも採り入れたため、オーソドックスな教科書の代用にはならない。この分野に進むつもり読者は、改めてより本格的な教科書で学んで欲しい。電子物性とデバイスについて一通り学んだことのある読者には、非標準的であるがゆえに楽しめる部分が見つかれば幸いである。読者が本書で「電子物性とデバイス」の基礎を理解されるとともに、本書の完全とはいえない説明に不満を覚え、「もっと勉強したい」「もっと納得のいく説明を考えたい」と思ってくれたとしたら、著者らの目標は達せられたことになる。疑問と好奇心こそが、未来を切り拓く最大の原動力となるからである。

末筆ながら、査読の労をとってくださった電子情報通信学会教科書委員会幹事の古屋一仁先生に厚く御礼申し上げます。また、草稿に貴重なご意見をお寄せくださった荒木純道、石田誠、大毛利健治、小熊博、河合孝太郎、高木信一、谷口研二、徳田崇、西敬生、松澤昭、三島友義、由井四海の各氏に深く感謝する。

2020 年 9 月

益 一 哉
天 川 修 平

目次

1. 緒論

1.1	デバイスとは	2
1.2	固体材料の分類と半導体	2
談話室	物理学者の電子物性とエンジニアの電子物性	4
1.3	半導体の性質	6
1.3.1	半導体の原子の並び方	6
1.3.2	真性半導体と不純物半導体	6
1.3.3	真性半導体のなりたち	7
1.3.4	エネルギーバンドの形成	8
1.3.5	真性半導体の性質	10
1.3.6	エネルギーバンド図	11
談話室	2種類のエネルギーバンド図	13
1.3.7	n型半導体とp型半導体	13
談話室	半導体への不純物添加	16
1.4	地球上に最も数多く存在する人工物は？	17
	本章のまとめ	19
	理解度の確認	19

2. 回路理論からみた半導体デバイス

2.1	線形回路素子	22
2.1.1	線形抵抗器	22
2.1.2	線形キャパシタ	23
2.1.3	線形インダクタ	24
2.2	非線形回路素子	25
2.2.1	非線形抵抗器	25
2.2.2	非線形キャパシタと非線形インダクタ	28

談話室 抵抗器, キャパシタ, インダクタ以外の二端子素子	29
2.3 時不変回路素子と時変回路素子	30
2.4 多端子素子と制御電源	30
2.5 トランジスタ	32
談話室 回路素子分類の切り口	34
2.6 半導体デバイスの位置付け	35
談話室 半導体製の線形回路素子	36
本章のまとめ	36
理解度の確認	36

3. 周期構造と波

3.1 物理とアナロジー	38
3.1.1 物理で現れる問題の構造の共通性	38
3.1.2 本章の見取り図	39
談話室 回路網的直観	41
3.2 周期的回路網の性質	41
3.2.1 無限はしご形回路網	42
3.2.2 無限 LC はしご	43
3.2.3 無損失伝送線路	46
談話室 伝送線路理論の前提	49
3.2.4 繰返し回数が有限の周期構造	49
談話室 桁違いの難問	51
談話室 電気工学者の虚数単位と物理学者の虚数単位	53
3.2.5 分散関係と位相速度, 群速度	54
談話室 集中定数回路と分布定数回路, 有限と無限	58
3.3 半導体の分散関係と物性	58
談話室 量子論に対する古典アナロジーの限界	60
3.4 ブラッグ反射	61
本章のまとめ	62
理解度の確認	62

4. 平衡状態の半導体の物理

4.1	エネルギー帯の状態密度と分布関数	64
4.2	キャリア密度	67
4.2.1	電子密度	67
4.2.2	ホール密度	68
4.2.3	非縮退半導体の pn 積	69
4.2.4	絶縁体との関係	70
4.2.5	真性半導体のフェルミ準位	70
4.2.6	n_i で表したキャリア密度	72
4.3	不純物半導体のフェルミ準位	72
4.3.1	非縮退不純物半導体	73
4.3.2	縮退半導体	77
談話室	キャリア密度とフェルミ準位のニワトリと卵	78
4.4	フェルミ準位と化学ポテンシャル	78
4.4.1	化学ポテンシャルの性質	78
4.4.2	粒子に外力が働いている場合の化学ポテンシャル	80
	本章のまとめ	82
	理解度の確認	82

5. 電気伝導

5.1	平衡・非平衡, 定常・非定常	84
5.2	擬フェルミ準位とキャリア密度	85
5.2.1	擬化学ポテンシャル	85
5.2.2	電子とホールの擬フェルミ準位	86
5.2.3	非平衡状態のキャリア密度	89
5.2.4	キャリア密度の変数変換とバンド図	91
談話室	エネルギーバンド図を読もう	92
5.2.5	非縮退半導体のキャリア密度の式の一般形	93
5.3	擬フェルミ準位と電流密度	94
5.3.1	流束密度と電流密度	94
5.3.2	擬フェルミ準位の勾配と電流密度	95
5.3.3	ドリフトと拡散	96

5.4	電界による電気伝導	97
5.4.1	キャリアのドリフト	97
談話室	ホール（正孔）の動きを説明するたとえ話	100
5.4.2	移動度と導電率の関係	101
談話室	「移動度」による記述の限界	102
5.5	キャリアの拡散による電気伝導	102
5.5.1	拡散電流	102
5.5.2	アインシュタインの関係	103
談話室	地表の大気に対する「アインシュタインの関係」	104
5.6	生成・再結合と少数キャリアの寿命	105
5.6.1	直接生成・再結合	105
5.6.2	間接生成・再結合	106
5.6.3	キャリアの生成・再結合レート	108
5.6.4	少数キャリアの寿命	109
5.7	半導体の基本方程式	111
談話室	デバイスシミュレータを使ってみる	112
5.8	誘電緩和	113
5.9	デバイ長	115
5.10	ホール（Hall）効果	116
談話室	金属のキャリアの極性	118
	本章のまとめ	119
	理解度の確認	119

6. *pn* 接 合

6.1	<i>pn</i> 接合とは？	122
6.2	接触電位差	123
6.2.1	接触電位差とは	123
6.2.2	接触電位差と仕事関数，電子親和力	124
6.2.3	接触電位差の性質	126
6.3	<i>pn</i> 接合の形成	127
6.3.1	p型半導体とn型半導体の接触	127
6.3.2	平衡状態の <i>pn</i> 接合	128
6.3.3	バイアスされた <i>pn</i> 接合	129

6.4	整流作用の定性的説明	130
6.5	階段接合の解析	132
6.5.1	ゼロバイアスの階段接合	132
6.5.2	バイアスされた階段接合	136
6.6	pn 接合の容量	137
6.6.1	空乏容量	137
6.6.2	拡散容量	138
6.7	片側階段接合	138
6.8	pn 接合の電流・電圧特性	139
6.8.1	電流・電圧特性の式	139
6.8.2	電流・電圧特性の導出	140
談話室	天才 Shockley	145
6.8.3	pn 接合に関する補足説明	145
6.9	pn 接合のエネルギーバンド図を読む	148
6.9.1	バイアス電圧依存性	149
6.9.2	少数キャリアの寿命依存性	152
談話室	整流しない pn 接合	155
	本章のまとめ	155
	理解度の確認	155

7. MOS トランジスタ

7.1	MOSFET の構造と基本特性	158
7.1.1	MOSFET の構造	158
7.1.2	MOSFET の基本特性	160
7.1.3	MOSFET の解析の順序	162
7.2	MOS キャパシタ	162
7.2.1	MOS キャパシタの構造	162
7.2.2	MOS キャパシタの解析	163
7.2.3	MOS キャパシタの表面状態の分類	166
7.2.4	基板表面の電子密度と表面ポテンシャル	170
7.2.5	ゲート電圧と反転電荷の関係	171
7.2.6	ゲート電圧と表面ポテンシャルの関係	172
談話室	金属・半導体接合	175

7.3	三端子 MOS 構造	176
7.3.1	バックゲートを基準とした解析	176
7.3.2	チャンネル端子を基準とした解析	180
	談話室 MOS キャパシタの C - V 特性	180
7.4	四端子 MOSFET	181
7.4.1	バックゲート基準の場合	181
7.4.2	ソース基準の場合	186
7.5	スケーリングと短チャンネル MOSFET	187
7.5.1	MOSFET のスケーリング	187
7.5.2	短チャンネル MOSFET で顕在化する現象	189
	談話室 スケーリング則を考える	191
	本章のまとめ	192
	理解度の確認	192

付 録

①	2 ポートの行列表現	193
1.	ABCD 行列	193
2.	S 行列	194
②	行列式の値が 1 の行列の N 乗	195

引用・参考文献	197
理解度の確認；解説	200
あとがき	212
索引	214

■ 本書で出現する記号の一覧 ■

記号	説明	SI 単位 [†]	慣用単位	ページ
α	電流増幅率	–		31
β	伝送線路の位相定数 (=波数)	rad/m		48
β_A	伝送線路 A の位相定数	rad/m		50
β_B	伝送線路 B の位相定数	rad/m		50
$\Gamma(x)$	ガンマ関数	–		82
ϵ	誘電率	F/m		112
ϵ_0	真空の誘電率 ($\simeq 8.85 \times 10^{-12}$ F/m)	F/m		120
ϵ_s	半導体の誘電率	F/m		113
ϵ_{Si}	Si の誘電率	F/m		114
ζ	フェルミ準位, (電気) 化学ポテンシャル	J	eV	65
$\zeta_{1,final}$	系 1 のフェルミ準位の最終値	J	eV	81
$\zeta_{2,final}$	系 2 のフェルミ準位の最終値	J	eV	81
$\zeta_{1,initial}$	系 1 のフェルミ準位の初期値	J	eV	81
$\zeta_{2,initial}$	系 2 のフェルミ準位の初期値	J	eV	81
ζ_A	A のフェルミ準位	J	eV	123
ζ_B	B のフェルミ準位	J	eV	123
ζ_{b1}	黒い粒子の化学ポテンシャル (系 1)	J		79
ζ_{b2}	黒い粒子の化学ポテンシャル (系 2)	J		79
ζ_{ext}	外的化学ポテンシャル	J		80
ζ_G	ゲート金属のフェルミ準位	J	eV	166
ζ_{int}	内的化学ポテンシャル	J		80
ζ_n	電子の擬フェルミ準位	J	eV	91
ζ_N	n 型半導体のフェルミ準位	J	eV	128
$\zeta_{n,ext}$	ζ_n の外的成分	J	eV	120
$\zeta_{n,int}$	ζ_n の内的成分	J	eV	120
ζ_{nN}	n 型領域中の電子の擬フェルミ準位	J	eV	131
ζ_{nP}	p 型領域中の電子の擬フェルミ準位	J	eV	131
ζ_p	ホールの擬フェルミ準位	J	eV	92
ζ_P	p 型半導体のフェルミ準位	J	eV	128
ζ_{pN}	n 型領域中のホールの擬フェルミ準位	J	eV	131
ζ_{pP}	p 型領域中のホールの擬フェルミ準位	J	eV	131
ζ_{tot}	総化学ポテンシャル	J		80
ζ_{w1}	白い粒子の化学ポテンシャル (系 1)	J		79
ζ_{w2}	白い粒子の化学ポテンシャル (系 2)	J		79
κ	位相回転	rad		56
κ	スケーリング倍率 ($\kappa > 1$)	–		188
λ	波長	m		48
μ	電圧増幅率	–		31
μ_n	電子の移動度	$m^2/(V \cdot s)$	$cm^2/(V \cdot s)$	99
μ_p	ホールの移動度	$m^2/(V \cdot s)$	$cm^2/(V \cdot s)$	99
ν	振動数	Hz		45

[†] 「SI 単位」は、国際単位系 (Système Internationale d'Unités) による単位である。「電子物性とデバイス」の分野で慣用的によく用いられている単位がある場合は「慣用単位」の欄に記した。

記号	説明	SI 単位	慣用単位	ページ
ξ	2×2 の行列の対角成分の和の $1/2$	—		195
π	円周率 ($\approx 3.14 \dots$)	—		
ρ	抵抗率	$\Omega \cdot \text{m}$	$\Omega \cdot \text{cm}$	102
ρ_n	電子伝導に由来する抵抗率	$\Omega \cdot \text{m}$	$\Omega \cdot \text{cm}$	101
ρ_p	ホール伝導に由来する抵抗率	$\Omega \cdot \text{m}$	$\Omega \cdot \text{cm}$	101
ρ_t	トラップの電荷密度	$\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{C} \cdot \text{cm}^{-3}$	112
σ	導電率, 電気伝導度	S/m	S/cm	101
σ_n	電子伝導の導電率	S/m	S/cm	101
σ_p	ホール伝導の導電率	S/m	S/cm	101
τ	時間	s		23
τ	回路の遅延	s		188
τ_{drn}	電子の誘電緩和時間	s		113
τ_{drp}	ホールの誘電緩和時間	s		88
τ_e	電子の平均自由時間	s		98
τ_g	気体の平均自由時間	s		104
τ_h	ホールの平均自由時間	s		99
τ_n	(少数キャリアとしての) 電子の寿命	s		109
τ_p	(少数キャリアとしての) ホールの寿命	s		110
φ	インダクタの鎖交磁束	Wb		29
Φ	インダクタの鎖交磁束	Wb		24
$\varphi(x)$	波動関数	—		52
Φ_0	インダクタの鎖交磁束の初期値	Wb		25
ϕ_{AB}	B を基準とした AB 間の接触電位差	V		123
ϕ_{B}	バルクポテンシャル	V		125
ϕ_{BA}	A を基準とした AB 間の接触電位差	V		124
ϕ_{bi}	ビルトイン電圧	V		129
$\phi_{\text{B,N}}$	n 型半導体のバルクポテンシャル	V		126
$\phi_{\text{B,P}}$	p 型半導体のバルクポテンシャル	V		126
$\phi_{i,j}$	材料 i と材料 j の間の接触電位差	V		126
Φ_n	電子の流束密度	$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$		95
ϕ_o	Q_o 由来でゲート絶縁膜にかかる電圧	V		164
ϕ_{ox}	ゲート酸化膜にかかる電圧	V		171
Φ_p	ホールの流束密度	$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$		95
$\phi_s^{(1)}$	MOS キャパシタ表面付近でのバンドの曲がり (空乏)	V		210
$\phi_s^{(2)}$	MOS キャパシタ表面付近でのバンドの曲がり (弱反転)	V		210
$\phi_s^{(3)}$	MOS キャパシタ表面付近でのバンドの曲がり (強反転開始)	V		210
$\phi_s^{(4)}$	MOS キャパシタ表面付近でのバンドの曲がり (強反転)	V		210
ϕ_{SM}	Si 基板とゲートの間の接触電位差	V		163
ϕ_{th}	熱電圧	V		173
$\phi_{\text{W,A}}$	電位の次元で表した A の仕事関数	V	eV	124
$\phi_{\text{W,B}}$	電位の次元で表した B の仕事関数	V	eV	124
χ	電位の次元で表した電子親和力	V	eV	125
ψ	静電ポテンシャル	V		71
ψ_A	A の静電ポテンシャル	V		123
ψ_B	B の静電ポテンシャル	V		123
ψ_F	フェルミポテンシャル	V		71

記号	説明	SI 単位	慣用単位	ページ
ψ_n	電子の擬フェルミポテンシャル	V		89
ψ_p	ホールの擬フェルミポテンシャル	V		89
ψ_s	表面ポテンシャル	V		165
ψ_{sT}	強反転時の表面ポテンシャルの近似値	V		173
ω	角周波数	rad/s		24
$\omega(\beta)$	伝送線路の分散関係	rad/s		55
ω_c	カットオフ角周波数	rad/s		44
ω_c	搬送波の角周波数	rad/s		56
ω_s	信号波の角周波数	rad/s		56
a	結晶格子間隔	m	Å	59
a	加速度	N/kg		100
A, a	この書体はスカラー	–		
\mathbf{A}, \mathbf{a}	この書体はベクトル	–		
A, \mathbf{a}	この書体は行列	–		
$\langle A \rangle$	A の統計平均	–		
\dot{A}	A の時間微分 dA/dt または $\partial A/\partial t$	–		
A	ABCD 行列の (1, 1) 成分	–		193
Å	オングストローム. 1 Å は $1 \times 10^{-10} \text{ m}$	–		19
a_i	ポート i に入射する進行波フェーザ	$V \cdot \Omega^{-1/2}$		194
B	ABCD 行列の (1, 2) 成分	Ω		193
B	\mathbf{B} の大きさ	Wb/m^2		117
\mathbf{B}	磁束密度ベクトル	Wb/m^2		117
b_i	ポート i から出る進行波フェーザ	$V \cdot \Omega^{-1/2}$		194
C	キャパシタンス (静電容量)	F		23
C	伝送線路のキャパシタンス (単位長当り)	F/m		46
C	ABCD 行列の (2, 1) 成分	S		193
C_{ch}	弦キャパシタンス	F		28
C_d	空乏容量 (単位面積当り)	F/m^2		137
C_{gate}	ゲート酸化膜容量	F		188
C_{inc}	小信号キャパシタンス	F		28
C_{ox}	ゲート酸化膜容量 (単位面積当り)	F/m^2		161
d	微積分の記号. dx などの形で使う.	–		23
d	伝送線路の導体間距離	m		46
D	ABCD 行列の (2, 2) 成分	S		193
∂	偏微分の記号	–		33
D_A^+	波動関数の係数 (領域 A)	–		53
D_A^-	波動関数の係数 (領域 A)	–		53
d_b	MOS 構造の空乏層厚さ	m		168
D_B^+	波動関数の係数 (領域 B)	–		53
D_B^-	波動関数の係数 (領域 B)	–		53
d_{dep}	空乏層厚さ	m		136
D_g	気体の拡散係数	m^2/s		104
D_n	電子の拡散係数	m^2/s		103
D_p	ホールの拡散係数	m^2/s		103
e	$= \exp(1) \simeq 2.718 \dots$	–		48
E	電子のエネルギー	J	eV	10
\mathcal{E}	電界	V/m		12
\mathcal{E}	電界ベクトル	V/m		117

記号	説明	SI 単位	慣用単位	ページ
$E(k)$	固体の分散関係	J	eV	59
E_A	アクセプタ準位	J	eV	16
E_c	伝導帯の下端の電子のエネルギー	J	eV	10
E_D	ドナー準位	J	eV	15
E_F	フェルミエネルギー	J	eV	66
E_g	禁制帯幅 (エネルギーギャップの大きさ)	J	eV	10
E_i	真性フェルミ準位	J	eV	71
\mathcal{E}_m	階段接合の電界の最大値 (絶対値)	V/m		134
\mathcal{E}_s	基板表面の電界	V/m		174
E_v	価電子帯の上端の電子のエネルギー	J	eV	10
\mathcal{E}_x	電界の x 方向成分	V/m		182
\mathcal{E}_y	電界の y 方向成分	V/m		182
f	周波数	Hz		45
F	力	N		85
F	ABCD 行列または F 行列	成分依存		193
$f(E)$	電子の分布関数	-		65
f_c	カットオフ周波数	Hz		51
$f_c(E)$	伝導帯の状態に対する分布関数	-		91
f_{clk}	クロック周波数	Hz		188
$f_h(E)$	ホールの分布関数	-		68
\mathbf{F}_L	ローレンツ力ベクトル	N		117
$f_v(E)$	価電子帯の状態に対する分布関数	-		91
g	重力加速度	m/s^2		81
G	コンダクタンス	S		23
G_{ch}	弦コンダクタンス	S		26
g_{ds}	ドレインコンダクタンス	S		33
G_{inc}	小信号コンダクタンス	S		26
g_m	相互コンダクタンス	S		32
g_n	電子の生成レート	$\text{s}^{-1}\text{m}^{-3}$	$\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$	108
g_{n0}	電子の生成レート (平衡状態)	$\text{s}^{-1}\text{m}^{-3}$	$\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$	110
g_p	ホールの生成レート	$\text{s}^{-1}\text{m}^{-3}$	$\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$	108
g_{p0}	ホールの生成レート (平衡状態)	$\text{s}^{-1}\text{m}^{-3}$	$\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$	110
h	プランク定数 ($\approx 6.6 \times 10^{-34}$ J·s)	J·s		64
h	高さ	m		81
\hbar	$= h/2\pi$, デイラック定数. \hbar はエイチバーと読む	J·s/rad		45
i	虚数単位 (物理学). $i^2 = -1$, $i = -j$	-		53
i	電流	A		47
i	ポート番号	-		194
I	電流	A		22
$\Im(z)$	複素数 $z = x + jy$ の虚部 y	-		43
I^+	正の向きに進む電流進行波フェーザ	A		48
I^-	負の向きに進む電流進行波フェーザ	A		48
I_1	ポート 1 に流れ込む電流	A		31
I_2	ポート 2 に流れ込む電流	A		31
I_B	バックゲートに流れ込む電流	A		182
I_D	ドレインに流れ込む電流	A		182
I_{DS}	MOSFET のドレイン・ソース間電流	A		161
I_{DSSat}	MOSFET の飽和ドレイン電流	A		161
I_G	ゲートに流れ込む電流	A		182
I_S	ソースに流れ込む電流	A		182

記号	説明	SI 単位	慣用単位	ページ
j	虚数単位 (電気工学). $j^2 = -1$, $j = -i$	–		53
j	正の整数	–		xvi
J	\mathbf{J} の絶対値	A/m ²		117
\mathbf{J}	電流密度ベクトル	A/m ²		117
J_{drift}	ドリフト電流密度	A/m ²		101
J_n	電子電流密度	A/m ²		95
$J_{n,\text{drift}}$	電子によるドリフト電流密度	A/m ²		101
J_p	ホール電流密度	A/m ²		95
$J_{p,\text{drift}}$	ホールによるドリフト電流密度	A/m ²		101
J_s	逆方向飽和電流密度	A/m ²		140
k	ボルツマン定数 ($k \simeq 1.38 \times 10^{-23}$ J/K)	J/K		19
k	ばね定数	N/m		38
k	波数	rad/m		48
k_A	波数 (領域 A)	rad/m		53
k_B	波数 (領域 B)	rad/m		53
l	伝送線の長さ	m		50
L	インダクタンス	H		24
L	伝送線のインダクタンス (単位長当り)	H/m		46
L	MOSFET のチャンネル長またはゲート長	m	nm, μm	161
L'	MOSFET の実効チャンネル長	m	nm, μm	185
l_A	伝送線路 A の長さ	m		50
l_B	伝送線路 B の長さ	m		50
L_{ch}	弦インダクタンス	H		28
L_D	デバイ長	m		115
l_e	電子の平均自由行程	m		98
L_{inc}	小信号インダクタンス	H		28
L_n	(少数キャリアとしての) 電子の拡散長	m	μm	142
L_p	(少数キャリアとしての) ホールの拡散長	m	μm	142
m	質量	kg		81
m_0	電子の質量 ($\simeq 9.1 \times 10^{-31}$ kg)	kg		19
m_c	電子の状態密度有効質量	kg		64
m_e	電子の有効質量	kg		59
m_h	ホールの有効質量	kg		99
m_v	ホールの状態密度有効質量	kg		64
n	伝導電子密度	m ⁻³	cm ⁻³	7
n	正の整数	–		56
N	繰り返し回数	–		49
N	電子の個数	–		98
Δn	電子密度とホール密度の差	m ⁻³	cm ⁻³	73
Δn	過剰電子密度. $\Delta n \geq 0$	m ⁻³	cm ⁻³	109
$N(E)$	状態密度関数	J ⁻¹ m ⁻³	eV ⁻¹ cm ⁻³	64
N_A	アクセプタ密度	m ⁻³	cm ⁻³	73
N_A^-	アクセプタイオン密度	m ⁻³	cm ⁻³	73
N_A^-'	実効的なアクセプタイオン密度	m ⁻³	cm ⁻³	73
N_c	伝導帯の実効状態密度	m ⁻³	cm ⁻³	68
N_D	ドナー密度	m ⁻³	cm ⁻³	73
N_D^+	ドナーイオン密度	m ⁻³	cm ⁻³	73
N_D^+'	実効的なドナーイオン密度	m ⁻³	cm ⁻³	73
n_g	気体分子の密度	m ⁻³		104
N_g	気体分子の基準密度	m ⁻³		104

記号	説明	SI 単位	慣用単位	ページ
n_i	真性キャリア密度	m^{-3}	cm^{-3}	7
n'_i	実効的な真性キャリア密度	m^{-3}	cm^{-3}	90
n_N	n 型半導体中の電子密度	m^{-3}	cm^{-3}	110
n_{N0}	一樣な平衡 n 型半導体中の電子密度	m^{-3}	cm^{-3}	110
n_P	p 型半導体中の電子密度	m^{-3}	cm^{-3}	109
n_{P0}	一樣な平衡 p 型半導体中の電子密度	m^{-3}	cm^{-3}	109
n_s	表面電子密度	m^{-3}	cm^{-3}	167
n_v	価電子帯の電子密度	m^{-3}	cm^{-3}	206
N_v	価電子帯の実効状態密度	m^{-3}	cm^{-3}	69
p	運動量	kg·m/s		38
p	ホール密度	m^{-3}	cm^{-3}	7
Δp	過剰ホール密度. $\Delta p \geq 0$	m^{-3}	cm^{-3}	109
p_N	n 型半導体中のホール密度	m^{-3}	cm^{-3}	110
p_{N0}	一樣な平衡 n 型半導体中のホール密度	m^{-3}	cm^{-3}	110
p_P	p 型半導体中のホール密度	m^{-3}	cm^{-3}	109
p_{P0}	一樣な平衡 p 型半導体中のホール密度	m^{-3}	cm^{-3}	109
p_s	表面ホール密度	m^{-3}	cm^{-3}	167
q	電気素量 ($\approx 1.6 \times 10^{-12}$ C). 電子の電荷は $-q$	C		10
q	キャパシタに蓄えられた電荷	C		29
Q	キャパシタに蓄えられた電荷	C		23
Q_0	キャパシタの初期電荷	C		23
Q_b	MOS キャパシタの空乏電荷 (単位面積当り)	C/m ²		172
Q_d	空乏層中の固定電荷の絶対値 (単位面積当り)	C/m ²		134
Q_G	ゲート電荷 (単位面積当り)	C/m ²		165
ΔQ_G	Q_G の変化量 (単位面積当り)	C/m ²		165
Q_{gi}	MOS の基板側に誘起された電荷 (単位面積当り)	C/m ²		165
ΔQ_{gi}	Q_{gi} の変化量	C/m ²		165
Q_{inv}	MOS キャパシタの反転電荷 (単位面積当り)	C/m ²		172
Q_o	酸化膜と Si 基板界面の固定電荷 (単位面積当り)	C/m ²		164
r	半径	m		200
R	抵抗	Ω		22
$\Re(z)$	複素数 $z = x + jy$ の実部 x	-		43
r_B	ボア半径 ($\approx 5.3 \times 10^{-11}$ m)	m	Å	200
R_{ch}	弦抵抗	Ω		26
r_H	ホール (Hall) ファクター	-		118
R_H	ホール (Hall) 係数	m ³ /C		118
R_{inc}	小信号抵抗	Ω		26
r_m	相互抵抗	Ω		31
r_n	電子の再結合レート	s ⁻¹ m ⁻³	s ⁻¹ cm ⁻³	108
r_{n0}	電子の再結合レート (平衡状態)	s ⁻¹ m ⁻³	s ⁻¹ cm ⁻³	110
R_{on}	MOSFET のオン抵抗	Ω		188
r_p	ホールの再結合レート	s ⁻¹ m ⁻³	s ⁻¹ cm ⁻³	108
r_{p0}	ホールの再結合レート (平衡状態)	s ⁻¹ m ⁻³	s ⁻¹ cm ⁻³	110
R_{ref}	基準抵抗	Ω		194
S	S 行列	-		194
S_{ji}	S 行列の (j, i) 成分	-		194
t	時間または時刻	s		22
T	絶対温度	K		19
t_0	初期時刻	s		23

記号	説明	SI 単位	慣用単位	ページ
t_{ox}	ゲート酸化膜厚さ	m	nm	188
U	スケーリング倍率 ($U > 1$)	–		188
$U(x)$	ポテンシャルエネルギー関数	J	eV	52
U_A	ポテンシャルエネルギー (領域 A)	J	eV	52
U_B	ポテンシャルエネルギー (領域 B)	J	eV	52
U_n	電子の生成・再結合レート	$\text{s}^{-1}\text{m}^{-3}$	$\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$	108
$U_N(x)$	第二種チェビシェフ多項式	–		196
U_p	ホールの生成・再結合レート	$\text{s}^{-1}\text{m}^{-3}$	$\text{s}^{-1}\text{cm}^{-3}$	108
v	電圧	V		47
v	\mathbf{v} の大きさ	m/s		117
\mathbf{v}	速度ベクトル	m/s		117
V	電圧, 電位差	V		22
V'	電圧, 電位差	V		28
ΔV	電位差	V		81
V^+	正の向きに進む電圧進行波フェーザ	V		48
V^-	負の向きに進む電圧進行波フェーザ	V		48
V_0	電圧振幅	V		24
V_1	ポート 1 の端子間電圧	V		31
V_2	ポート 2 の端子間電圧	V		31
V_A^+	正の向きに進む電圧進行波フェーザ (線路 A)	V		53
V_A^-	負の向きに進む電圧進行波フェーザ (線路 A)	V		53
V_B^+	正の向きに進む電圧進行波フェーザ (線路 B)	V		53
V_B^-	負の向きに進む電圧進行波フェーザ (線路 B)	V		53
V_{BS}	バックゲート・ソース間電圧	V		187
V_{CB}	チャネルポテンシャル (バックゲート基準)	V		177
V_{DB}	ドレイン・バックゲート間電圧	V		181
V_{dd}	MOSFET の電源電圧	V		188
v_{drift}	ドリフト速度	m/s		104
V_{DS}	ドレイン・ソース間電圧	V		161
V_{fb}	フラットバンド電圧	V		164
v_g	群速度	m/s		55
V_{GB}	ゲート・バックゲート間電圧	V		165
$V_{\text{GB}}^{(1)}$	ゲート・バックゲート間電圧 (空乏)	V		210
$V_{\text{GB}}^{(2)}$	ゲート・バックゲート間電圧 (弱反転)	V		210
$V_{\text{GB}}^{(3)}$	ゲート・バックゲート間電圧 (強反転開始)	V		210
$V_{\text{GB}}^{(4)}$	ゲート・バックゲート間電圧 (強反転)	V		210
$V_{\text{GB}}^{(a)}$	ゲート・バックゲート間電圧 (蓄積)	V		209
V_{GS}	ゲート・ソース間電圧	V		161
V_{H}	ホール (Hall) 電圧	V		118
v_n	電子の速度	m/s		95
\mathbf{v}_n	電子の速度ベクトル	m/s		117
$v_{n,\text{drift}}$	電子のドリフト速度	m/s		99
v_p	ホールの速度	m/s		95
V_{P}	ピンチオフ電圧	V		179
\mathbf{v}_p	ホールの速度ベクトル	m/s		117
$v_{p,\text{drift}}$	ホールのドリフト速度	m/s		99
v_{ph}	位相速度	m/s		55
V_{SB}	ソース・バックゲート間電圧	V		181
V_{T}	MOSFET のしきい値電圧	V		161
V_{T0}	MOS キャパシタのしきい値電圧	V		173
V_{TB}	三端子 MOS キャパシタのしきい値 (バックゲート基準)	V		178

記号	説明	SI 単位	慣用単位	ページ
V_{TC}	三端子 MOS キャパシタのしきい値 (チャネル基準)	V		180
v_{th}	粒子の熱速度	m/s		97
W	半導体片の幅	m		117
W	MOSFET のチャネル幅またはゲート幅	m	μm	161
x	元素の混合比 ($0 < x < 1$)	–		4
x	x 座標	m		11
x	実数, 複素数の実部	–		57
Δx	x 方向の微小区間	m		46
x_N	n 型領域の空乏層厚さ	m		133
x_P	p 型領域の空乏層厚さ	m		133
y	実数, 複素数の虚部	–		57
y	y 座標	m		112
Y	アドミッタンス	S		42
y_C	チャネルの深さ (反転層の厚さ)	m	nm	183
z	z 座標	m		112
Z	インピーダンス	Ω		42
Z_0	伝送線路の特性インピーダンス	Ω		48
Z_{0A}	伝送線路 A の特性インピーダンス	Ω		50
Z_{0B}	伝送線路 B の特性インピーダンス	Ω		50
Z_{in}	入力インピーダンス	Ω		42
Z'_{in}	入力インピーダンス	Ω		43

界 \mathcal{E} は

$$\mathcal{E} = \frac{V}{L} \quad (\text{電圧印加された半導体片中の電界}) \quad (1.4)$$

で表されると考えられる (電子のエネルギー E と電界 \mathcal{E} を区別するため違う書体を用いている). したがって, 図 1.8 の右端と左端とで, 電子・ホールのパテンシャルエネルギーには qV の差が生じる. 右に行くほど電界 \mathcal{E} に由来する電子のパテンシャルエネルギーは小さくなるので, エネルギーバンド図は右肩下がりととなる.

電子には右向き (\rightarrow) に $q\mathcal{E}$ なるクーロン力が働くので, 伝導帯の底にいる電子は, エネルギーバンド図中の E_c の坂を転がり下りようとする と解釈できる. 同様にホールには左向き (\leftarrow) に $q\mathcal{E}$ なる力が働く. 価電子帯の上端にいるホールは (上下反転して考えると) E_v の坂を下りようとする. このように, エネルギーバンド図があれば E_c や E_v の傾きから キャリアに働く力の向きを読み取れる.

ところで, ここで「キャリアに働く力の向きを読み取れる」といい, 「キャリアの動く向きがわかる」といわなかったのには理由がある. 場合によっては, キャリアに働く力の向きとは逆向きにキャリアが動く場合があるのである. もちろん, ありふれた現象として, 上に投げたボールが慣性で一時的に重力に逆らって上に動く, というのは日常よく目にする. しかし, 半導体デバイス中では別のメカニズムによって定常的にキャリアが力と逆向きに流れ続けうる. 我々はそのような例に 6 章で出くわすが, その例は特殊でもなんでもなく, 半導体デバイスの代表の一つである **pn ダイオード**なのである. このようなキャリアの物理をエネルギーバンド図と絡めて理解することは, 本書における最重要テーマといっても過言ではない.

さて, 図 1.8 から想像できるとおり, エネルギーバンド図中の E_c と E_v は, 静電ポテンシャル (electrostatic potential) $\psi(x)$ と以下のように関係している.

$$E_c(x) = -q\psi(x) + \text{const.} \quad (E_c \text{ と } \psi \text{ の関係}) \quad (1.5)$$

$$E_v(x) = -q\psi(x) - E_g + \text{const.} \quad (E_v \text{ と } \psi \text{ の関係}) \quad (1.6)$$

ただし const. は定数項を表す. また, 11 ページの式 (1.3) が x に関係なく成り立っていると仮定した (x に依存して材料が変わると成り立たない). 式 (1.5) と (1.6) の定数項の値は両式とも同じである.

半導体デバイスの考察には, しばしばエネルギーバンド図が利用される. 式 (1.5) と (1.6) より, エネルギーバンド図中の E_c か E_v から 静電ポテンシャル ψ (の相対値) も読み取れる. エネルギーバンド図にプロットされる量は E_c と E_v だけに限らない (限っていたらキャリアの動く向きがわからない!). 現段階では, エネルギーバンド図などというものを描くべき理由がまだわからないのではないかと思うが, その重要性はしだいに明らかになる.

表 3.2 物理方程式の形

分野	式の名称	空間微分の階数	時間微分の階数
分布定数回路	電流・電圧の波動方程式	2階	2階
電磁気学	電磁波の波動方程式	2階	2階
気体・伝熱	拡散・熱伝導方程式	2階	1階
量子力学	シュレーディンガー方程式	2階	1階

うしが同じような形になる場合がある。例として、表 3.2 にいくつかの分野で現れる微分方程式の形を挙げた。

表 3.2 に掲げた微分方程式は、定常状態（時間微分が 0 の状態）では、すべてが空間微分が 2 階の微分方程式になる。結果として、例えば

- 固体物理における結晶の性質を、図 3.2 のように周期構造を持った回路の問題に直して考える。
- 量子力学の問題を粒子の拡散の問題として解く（この場合は時間微分が 0 でなくてかまわない）。

といったようなことが可能になる。

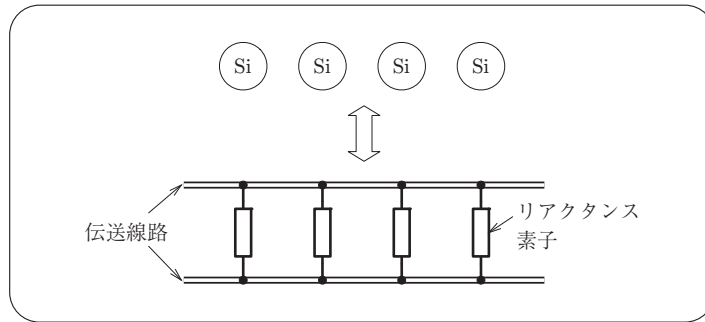


図 3.2 一次元結晶と周期的に装荷された伝送線路の類似性

3.1.2 本章の見取り図

本章では、先に述べたようなアナロジー（analogy, 類推関係）を利用して、電子物性における重要な概念である「エネルギーバンドの形成」を理解することを試みる。固体のバンド理論は量子力学を使って構築されているが、本書では読者が量子力学を習得しているとは想定していない。そこで、読者が習得済みのはずの線形回路理論（特に交流理論）を使ってバンド形成について調べる。3.2.3 項以降では伝送線路理論ないし分布定数回路理論も使うが、伝送線路に関する基本的な説明も含めてある。このアナロジーの根底には、前項でも触れた数式どうしの対応関係があるので、単なるたとえ話とは違い、数学的な裏付けがあることを強調しておく。ただし、バンド形成以外の、固体物理の多彩な側面を回路で理解できるわけではないことも断っておく。

固体の結晶は多くが三次元であるが、本章では簡単のため一次元の周期的回路網だけを考え

☕ 談 話 室 ☕

キャリア密度とフェルミ準位のニワトリと卵 電子密度 n の式 (4.8) と (4.22) は、フェルミ準位 ζ の関数 $n(\zeta)$ という形で表してある (ホール密度も同様)。これらの式の元になった 67 ページの式 (4.6) も、分布関数の中に ζ を含んでいた。だから、なんらかの (ひょっとすると微視的な) 物理的メカニズムでまず ζ が決まり、それに対して n が決まる、という流れに見える。ところが、4.3.1 項の議論では、式 (4.38) などでは ζ が n の関数 $\zeta(n)$ だという格好になっている。一体どちらが先に決まるんだ? と疑問を持たれた読者はなかなか鋭い。

結論からいうと、キャリア密度とフェルミ準位は、物理的には同時に決まる。 n と ζ は、同じ物に対する二つの表現の仕方なのである。そして電子密度の式 (4.8), (4.22) やフェルミ準位の式 (4.38), (4.40) は、 n と ζ を相互に変換するための変換式なのである。この事実は、エネルギーバンド図の重要性と深く関係している (5.2.4 項)。

実際に数値計算を行う際には、キャリア密度を未知数としてポワソン方程式と連続方程式を連立させて解き (5.7 節)、その結果をもとにフェルミ準位 (正しくは擬フェルミ準位 (5.2 節)) を求めることが多い。しかし、逆に (擬) フェルミ準位を未知数として計算してその後にキャリア密度を求めても、原理的にはかまわない。

4.4

フェルミ準位と 化学ポテンシャル

4.1 節でフェルミ準位なる量が出てきたが、詳しい意味の説明は先送りにしていた。フェルミ準位 ζ は、65 ページの式 (4.4) のフェルミ・ディラックの分布関数 $f(E)$ の値が $1/2$ になる E の値であると、しばしば説明される。66 ページの図 4.2 を見てのとおり、これは確かに正しいが、電気伝導や半導体デバイスの動作を理解するうえで、この説明はほとんど役に立たない。非縮退半導体の ζ は「状態」の存在しない禁制帯中にくるのだから (69 ページの式 (4.13)), 「状態の占有確率が $1/2$ だ」といわれても困る。では、フェルミ準位をどう理解したら電気伝導やデバイスの理解に結びつくのだろうか。その答えは、フェルミ準位が電子の (電気) 化学ポテンシャルだと認識することである。それでは、化学ポテンシャルとは一体何なのかを見ていこう。

4.4.1

化学ポテンシャルの性質

化学ポテンシャル (chemical potential) は、気体などを構成する自由に動き回れる粒子 (particles) に対して定義される量である。ここから先、この項の説明で出てくる系 (system) とい

である。電子電流密度は、左に行くに従って指数関数的に減少する。

pn 接合を流れる全電流には、ホール電流と電子電流の両方が寄与する。だから、全電流密度を

$$J(x) = J_p(x) + J_n(x) \quad (6.74)$$

と書ければよいが、式 (6.72) と (6.73) はそれぞれ x の異なる範囲しかカバーしていない。しかし、仮定 (8) により、空乏層中ではホール電流密度も電子電流密度も変化しない。それゆえ、ホール電流密度については $x = x_N$ での値を採用し、電子電流密度については $x = -x_P$ での値を採用すれば問題ない。また、本項では直流電流を考えているので、式 (6.74) の和は x の値にかかわらず一定である。結局、全電流密度は

$$J = J_p(x_N) + J_n(-x_P) \quad (\text{階段接合の電流密度}) \quad (6.75)$$

と表すことができる。これに式 (6.72) と (6.73) を代入すると

$$\begin{aligned} J &= q \left(\frac{D_n}{L_n} n_{P0} + \frac{D_p}{L_p} p_{N0} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \\ &= J_s \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (V < \phi_{bi}) \quad (\text{階段接合の電流密度}) \end{aligned} \quad (6.76)$$

となる。以上で 139 ページの電流・電圧特性の式 (6.45) と、逆方向飽和電流密度の式 (6.46) を導出できた。

☕ 談 話 室 ☕

天才 Shockley 本項で説明した pn 接合の電流電圧特性の導出の大筋は、半導体デバイス分野の創始者の一人で、バイポーラトランジスタの発明者でもある William Shockley による¹¹⁾。上の導出で、最も不可解で取って付けたような感じがするのが 140 ページの仮定 (7) であり、これを式として具体化した境界条件 (6.64) と (6.65) であろう。実際のところ、式 (6.64) と (6.65) を理論的に正当化するのはそれほど容易でなく、かなり長くて面倒な議論が必要とされる¹⁶⁾。しかも、逆バイアス電圧 $|V|$ がだいたい 0.1 V 程度以上になると、これらの式は成り立たない (!) ことが知られている¹⁶⁾。それでもとにかく、このような仮定を設けたおかげで電流密度の式 (6.76) を導出できたわけだ。天才というのは、こういう論理的に考えても出てこない芸当をやっている (問 6.7)。このような大胆な一手が、この分野の発展を助けたのは間違いなからう。

6.8.3

pn 接合に関する補足説明

[1] 長さのスケール まず、半導体デバイスに関係する長さのスケールについて補足しておく。拡散長は 142 ページの式 (6.57) と (6.58) で与えられる。拡散長の数値例はどの程度

され、自ら道を切り拓けるようになるための一助になれば、幸いである。

☎ 談 話 室 ☎

スケーリング則を考える 表 7.2 のスケーリングであるが、何となく適当にパラメータを決めたように思われるかもしれないが、Dennard と Gaensslen ら*が定電界スケーリングを導出する際により所としたのは、ポワソンの方程式である。スケーリング前後（長チャネル MOSFET と短チャネル MOSFET）でポワソン方程式が極力保存されるように、寸法やドーピング量を決めた。

ところで、スケーリング則とは何か？ 長チャネルデバイスが理想的な電流・電圧特性、いわゆる飽和特性（図 7.6）を持っていたとして、チャネル長を短くしたときに飽和特性を得るためには、チャネル長、酸化膜厚、基板の不純物濃度をどのように設計すればよいかの指針を与えている。スケーリング前後で、その電流・電圧特性の形が維持される。ということは、スケーリング前のデバイスの特性が悪ければ、スケーリング後（微細化後）のデバイスの特性は悪いままである。スケーリングにおいては、出来の悪い親からは出来の悪い子供しか生まれないという規則であり、英文ではスケーリング前のデバイスが“parent device”と呼ばれているゆえんかもしれない。しかし、親がよく出来るからといって子供も出来るとは限らないというのが短チャネル効果で、特性維持のためにさまざまな工夫が必要とされる。

ここで、スケーリング則を一般化しようとする、三つの要素を考える必要がある。

- (1) 何をスケーリングしたいのか（定電界スケーリングでは、寸法と電圧）
- (2) 何をより所にするのか（同、ポワソン方程式）
- (3) スケーリング前後で何が保存されるのか（同、電界分布）

このように考えてみると、寸法や電圧以外のパラメータ、例えばデバイスの動作温度もスケーリングできると考えることができる。動作温度を 300 K から 77 K（液体窒素温度）にするためには、フェルミ・ディラック分布関数をより所にして、可動キャリア分布を一定にするようにすれば、動作温度に対してのスケーリング則を導くことができる^{†,‡}。筆者（益）がこの「温度スケーリング」を考えたのは 1980 年代後半のことであるが、当時よりもむしろ本書執筆時点のほうが、量子コンピュータ向け周辺回路などで低温動作 MOSFET の必要性和気運が高まっているかもしれない。表 7.2 はパラメータの羅列のように思えるかもしれないが、物理現象に則っていることと、この表に示されている以外の可能性も広がっていることを感じてもらえたら幸いである。

*R. H. Dennard, F. H. Gaensslen, H.-N. Yu, V. L. Rideout, E. Bassous, and A. R. LeBlanc, “Design of ion-implanted MOSFET’s with very small physical dimensions,” *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **9**, 5, pp. 256–268 (1974)

<https://doi.org/10.1109/JSSC.1974.1050511>

†Y.-W. Yi, K. Masu, K. Tsubouchi, and N. Mikoshiba, “Temperature-scaling theory for low-temperature-operated MOSFET with deep-submicron channel,” *Japanese Journal of Applied Physics*, **27**, 10, pp. L1958–L1961 (1988)

<https://doi.org/10.1143/JJAP.27.L1958>

‡益一哉, 易幼文, 坪内和夫, 御子柴宣夫, 「ディープサブミクロンチャネル MOSFET における温度スケーリング則」, 電気学会論文誌 C, **110**, 7, pp. 413–419 (1990)

<https://doi.org/10.1541/ieejc1987.110.7.413>

あ と が き

本にはいろいろな読み方がある。「まえがき」を読んですぐにこの「あとがき」を読んだ方もおられるだろう。もちろん精読したのちにここに辿り着いた方もおられるだろう。

目的によって読み方が異なるので当然である。ある分野のことを知りたいと思ったとき、名著といわれる本を一心不乱に読んでみることもあれば、兎に角にも大量の本をめくってみて、良く出てくる図表や式を抽出し、わかりやすいと思われる本を精読することもあるだろう。教科書ということでやむなく読むこともあるだろう。どのような読み方をするにせよ、本書を手にとったあなたが何らかの感想やご意見をもったとしたら感謝したい。

本書の執筆の由来と経緯を紹介しておこう。執筆者の一人である益一哉が本書の執筆を依頼されたのは、2001年頃であった。当時、日本の半導体産業は最先端技術を開発しつつ世界と戦っていた。世界の最先端をはしる半導体を理解する基礎の教科書執筆を依頼されたとの気負いがあった。丁度、研究分野を半導体プロセスやデバイスから回路設計の分野に移した頃であったので、新たな視点からの電子物性やデバイスの教科書になればと意気込んだ。例えば等価回路モデルの意義となぜそのような回路モデルになるかを理解できるための最低限の電子物性とデバイス物理を理解できればと考えた。しかしながら、多忙を言い訳に年月が過ぎてしまい、コロナ社からの催促もあり、2010年頃に一人では書き切れないと判断し、同僚だった天川修平に協力を仰いだ。議論は進んだものの執筆ははかどらず、担当者から最後通牒をいただき、これがラストチャンスと決心し執筆方針を決め執筆に取りかかったのが2019年初春であった。天川が主に文章を起こし、議論を深めつつまとめることができた。

「まえがき」には記載していないこともある。正直に言うと、筆者らが理解し書き下せる範囲に絞っている。電子物性ではメモリデバイスや新規デバイスで重要となる強誘電体や磁性体については全く触れていない。バイポーラトランジスタは図記号を紹介する程度しか触れていない。パワー半導体を学ぶ方は不満足かもしれない。ご容赦いただきたい。筆者らの力不足であることを白状する。

おおよその原稿ができたときに、大学、高専などでこの分野の研究や教育に携わる先生方に一読していただいた。たいへん貴重なご意見をいただき深く感謝する。出来る限りの対応をしたつもりではあるが、未だ不足のところが気になっている。

2章、3章では、電気電子系の学生が取り付きやすいと思われる観点でデバイスと回路論を結びつけ、最もハードルの高いと思われるエネルギーバンドがなぜできるのかについて電気回路的に論じた。実は、参考文献のShockleyの本¹¹⁾にも伝送線路との対比が少々論じられている(なぜ、論じられているか益は学生の頃、理解できていなかった)が、本書の執筆を進める中で

上手くまとめることができたと思っている。この新しい試みに是非ともご意見をいただきたい。

前後するが、目次の後に続く「本書で出現する記号の一覧」を見られた方は面食らったかもしれない。半導体の学習をしていて結構面倒であることの一つに、いろいろな変数が現れてきて、その都度納得するかもしれないが、振り返ってみると何が何だかわかってないことがある。もし、本書を読まれたあとに「…記号の一覧」に戻っていただいて、それぞれの変数や記号の意味を思い出していただければ理解がより深まると思う。新しい試みとして、「…記号の一覧」に記号の出てくるページも記しておいたので、記号索引としても活用していただきたい。

演習問題の難易度は千差万別である。初学者や高専本科の学生が一人で取り組むには、若干高度な場合があるかもしれない。講義を離れて、是非とも教員と議論しながら取り組んでいただけることを期待したい。

教科書を執筆するという事は、基礎に戻るということである。大見忠弘先生（東北大名誉教授）は「大学の教員は毎年同じ内容を教える。それは常に基礎に帰ることであり、基礎に何度も立ち返ることが新しい発想の原点である」と何度も語られた。本書の執筆に当たっても、筆者らにとって新しい発見がいくつもあった。特に問 6.7 は、何度も何度も pn 接合の理論を学び教えてきていて、わかったようなわからなかったようなことを非常にクリアに説明できたと思っている。普段当たり前と思っていることの中にも新しいことがあると再認識した。トップアスリートが常に基礎体力や体幹を鍛えることが強さの秘密であるのと同じかもしれない。

本書は入門書であるが、半導体や電子デバイスを学んだ大学院生や研究者の方々が本書で何かを見だし、新たな発見の糸口になれば筆者らの望外の喜びである。

著者らの遅筆に耐え、原稿が完成するまで粘り強く且つ暖かく見守ってくださった電子情報通信学会、そしてコロナ社に深く感謝する。

2020 年 9 月

益 一 哉
天 川 修 平

索引

【あ】

アインシュタインの関係 ……103,
104, 119, 146, 208
大気に対する— ……104
アクセプタ ……16, 106, 108
—イオン ……16, 73, 87,
127, 128, 168, 169
—イオン密度 ……73, 126,
147, 173
実効的な— ……73
—型トラップ ……⇒ ト
ラップ
—準位 ……16
—密度 ……19, 73
中性— ……87
アドミッタンス ……194
並列— ……42
アナロジー ……39
古典— ……60
アニーリング ……17
アノード ……122
天 川 ……212
アモルファス ……6
ア リ ……17
アルミニウム ……3

【い】

イオン ……7, 97, 113
—打込み ……17
—化エネルギー ……14
—注入 ……17
アクセプタ— ……⇒ アクセ
プタイオン
陰— ……15, 16, 73
ドナー— ……⇒ ドナーイ
オン
不純物— ……200
陽— ……13, 73, 80, 97, 123
池野信一 ……198
位 相 ……61
位相回転 ……48, 54, 56
位相速度 ……55, 62
位相定数 ……48, 54
位置エネルギー ……11, 81, 85
一価関数 ……26, 28, 36
移動度 ……5, 96, 96, 99,

99, 102, 103, 104, 119, 161,
162, 208
—の測定 ……117
弦— ……102
線形応答— ……102, 190
電子の— ……96, 99
バルク— ……161
反転層の— ……182
微分— ……102
ホールの— ……96, 99
イメージセンサ ……2
インジウムリン ……4
インダクタ ……22, 43
線形— ……24
非線形— ……28, 36
インダクタンス ……24, 29
—の直列・並列合成 ……36
弦— ……28
小信号— ……28
直列— ……46, 62
微分— ……28
並列— ……46, 62
インピーダンス ……44, 58, 194
直列— ……42
特性— ……⇒ 特性インピー
ダンス
入力— ……42, 43, 48, 49, 62
反復— ……⇒ 反復インピー
ダンス
ブロッホ— ……⇒ ブロッホ
インピーダンス

【う】

宇 宙 ……17, 81
運動方程式 ……59, 98, 100
運動量 ……38, 98
平均— ……98
運動量保存則 ……105

【え】

易幼文 ……118
液体窒素温度 ……191
エネルギーギャップ ……9, 93,
197
エネルギー準位 ……8, 82, 119,
124
エネルギー帯 ……⇒ エネルギー

バンド
エネルギーバンド ……7, 9, 37,
64, 70
—の形成 ……9, 39, 52, 62
—図 ……10-14, 58,
78, 82, 91, 92, 96, 128, 155,
166, 192
—の曲がり ……125
—図
—を読む ……12,
12, 89, 90, 92, 93, 96, 97,
110, 119, 131, 132, 143,
148-152, 154, 156, 167
エネルギー保存則 ……105
エバネッセント波 ……60
エミッタ ……33

【お】

大野克郎 ……198
大見忠弘 ……213
オーミック接触 ……175
オームの法則 ……22
オフ状態 ……4, 30, 160, 161, 182
尾本義一 ……29
おもり ……38
音響回路 ……197
オン状態 ……30, 159-161, 182
オン抵抗 ……189
温 度 ……79, 80, 84, 119
—勾配 ……84
動作— ……191

【か】

解析力学 ……38
回 折 ……61
階段接合 ……132, 139, 140
片側— ……138
外 場 ……99, 104
外 力 ……80, 86
回路シミュレータ ……38, 51, 201
回路素子 ……2
可逆— ……35
三端子— ……31
時不変— ……30
時変— ……30, 32
集中定数— ……40, 58
受動— ……34, 42

線形—— 22, 29, 30, 36
 線形二端子—— 22
 多端子—— 30, 35
 二端子—— 29, 162
 能動—— 34
 非可逆—— 35
 非線形—— 35
 無損失—— 34
 有損失—— 34
 リアクタンス—— 34, 39, 44, 58, 60
 回路網的直観 41
 回路モデル 212
 回路理論 21, 22, 36, 37, 62, 194, 197
 交流—— 39, 44, 84
 集中定数—— 40, 46
 線形—— 22, 39
 分布定数—— 39, 46, 58
 ガウスの法則 111, 134, 166, 174
 化学式 4, 5
 化学反応 84, 87, 105, 119
 化学反応式 105
 化学平衡 84, 87
 化学ポテンシャル 78, 79, 85, 197
 外的—— 80, 81, 104
 擬—— ⇒ 擬化学ポテンシャル
 狭義の—— 80
 広義の—— 80
 総—— ⇒ 総化学ポテンシャル
 電気—— ⇒ 電気化学ポテンシャル
 内的—— 80, 81
 可逆回路素子 35
 可逆定理 36
 可逆 2 ポート 56
 拡散 39, 81, 102, 113, 119, 123, 130, 152, 208
 ——係数 103, 104, 140
 ——項 97, 103, 114, 115
 ——長 140, 141, 143, 145-147, 151, 152, 155, 208
 ——電位差 128
 ——電流 103, 113, 123, 131, 140, 141, 150
 ——電流密度 103
 ——平衡 84, 163
 ——方程式 39
 ——容量 138
 角周波数 24, 45
 角振動数 38

拡張領域表示 57
 重ね合わせの理 36
 可視光 62
 カソード 122
 加速度 59, 100
 片側接合 138, 155, 176, 182
 カットオフ角周波数 44, 62, 202
 無損失伝送線の—— 49
 カットオフ周波数 49, 202
 価電子 5, 7, 8, 13, 15
 ——帯 9-11, 45, 51, 58, 64, 68, 100, 105, 107, 116
 荷電粒子 3, 11, 80, 104, 113, 116
 可変抵抗器 32
 ガラス 3, 35
 ガリウムヒ素 5
 川上正光 29, 198
 還元領域表示 55, 57
 慣性 12
 間接生成・再結合 106, 119, 147
 完全空乏近似 ⇒ 空乏近似
 神林紀嘉 198
 ガンマ関数 82
 緩和時間 98
 誘電 —— ⇒ 誘電緩和時間

【き】

記憶素子 29
 機械回路 197
 擬化学ポテンシャル 85, 86
 擬似中性領域 128, 133, 136, 140, 141, 143, 150
 基準エネルギー 93
 基準抵抗 51, 195
 基準密度 72, 93
 寄生容量 3
 軌跡 23, 24
 気体 78, 79, 81, 85, 97, 99, 102, 104
 理想 —— ⇒ 理想気体
 軌道 8, 9, 14, 64, 82
 基板 18, 125, 159, 162, 166, 168, 169, 171, 182, 191
 ——バイアス効果 211
 擬フェルミ準位 78, 85, 86, 90, 92, 95, 114, 119, 120, 127, 129, 136, 142, 152, 155, 183
 ——の勾配 95, 96, 131, 150
 ——の開き具合 90, 143, 150-152, 154

価電子帯の—— 206
 電子の—— 88
 伝導帯の—— 206
 トラップの—— 206
 ホールの—— 88
 擬フェルミポテンシャル 89, 96, 152, 183
 基本関係式 22
 基本行列 ⇒ ABCD 行列
 逆関数 26, 50
 逆方向電流 132, 138, 155, 182
 逆方向飽和電流密度 140, 145
 喜安善市 198
 キャパシタ 22, 43, 94, 137, 180
 線形—— 23
 非線形—— 28, 138
 平行平板—— 138
 MOS —— ⇒ MOS キャパシタ
 キャパシタンス 23, 180
 ——の直列・並列合成 36
 弦—— 28
 小信号—— 28, 137, 180
 微分—— 28
 キャリア (キャリア) 7, 70, 94, 95, 113, 116, 118
 ——の再結合 ⇒ 再結合
 ——の生成 ⇒ 生成
 ——トラップ ⇒ トラップ
 ——密度 ⇒ キャリア密度
 少数—— ⇒ 少数キャリア
 多数—— ⇒ 多数キャリア
 キャリア密度 7, 72, 77, 78
 ——の一般形 93, 119, 143, 170
 ——の変数変換 91
 真性 —— ⇒ 真性キャリア密度
 境界条件 141, 143, 149, 150, 155
 強反転 169, 171, 177, 178, 182, 185, 192
 強反転開始条件 171, 173
 共有結合 13, 15
 ——結晶 8
 ——枝 15, 87, 105
 強誘電体 212
 行列 xiii
 ——式 50, 195
 局在 8, 119
 極性
 イオンの—— 113
 キャリアの—— 3, 97, 117,

118
 多数キャリアの—— 118
 ドーパントの—— 73
 半導体の—— 73, 159
 虚数 → 純虚数
 ——単位 44, 52, 53
 虚部 43
 許容帯 9, 10, 40, 45, 51, 64, 66, 70
 キルヒホッフの電圧則 36, 46, 126
 キルヒホッフの電流則 36, 47
 キルヒホッフの法則 46, 49
 金 3, 18, 126
 銀 126
 禁制帯 9, 40, 66, 70, 71, 106, 108
 ——幅 5, 10, 11, 58, 69, 70, 82, 105, 148
 実効的な—— 77
 金属 3, 4, 35, 66, 70, 80, 97, 115, 118, 124, 159, 162
 ——半導体接合 175
 ——価 209

【く】

空間電荷 128
 ——領域 128
 空乏 167, 169, 171, 175, 192
 ——近似 133, 136, 140, 172
 ——層 128, 130-133, 137, 140, 146, 148, 155, 178, 182
 ——層厚さ 116, 128, 135-139, 146, 147, 155, 168, 169, 172, 178, 189
 ——層幅 → 空乏層厚さ
 ——電荷 134, 165, 172, 178
 ——容量 137, 155
 クーロン散乱 108, 200
 クーロン相互作用 97, 108, 120
 クーロンポテンシャル 8, 11
 クーロン力 12, 80, 96, 100, 104
 グラジュアルチャネル近似 182, 185, 189, 190
 クロック周波数 188
 黒丸 (●) 7, 14, 106
 群速度 55, 59, 62

【け】

系 78, 164, 165

ケイ素 4, 19
 ケイリー・ハミルトンの定理 195
 ゲート 6, 33, 158, 161-163
 ——酸化膜 162, 182
 ——酸化膜容量 161
 ——絶縁膜 3, 159, 162
 ——長 161
 ——電圧 166, 171, 178, 179, 182, 185, 186, 192
 ——幅 161
 ——容量 189
 結晶 2, 6, 8, 9, 14, 37, 39, 41, 61, 106
 ——欠陥 6, 106, 110
 ——格子間隔 9
 ——格子点 13-15, 17
 ——構造 8
 ——成長 6, 17
 ——方位 59
 単—— 6
 多—— → 多結晶
 一次元—— 39, 61
 共有結合 → 共有結合
 結晶
 三次元—— 39, 64
 ゲルマニウム 4
 弦 26
 ——移動度 102
 ——インダクタンス 28
 ——キャパシタンス 28
 ——コンダクタンス 26
 ——抵抗 26, 55, 102
 原子 41, 97
 ——核 41
 ——密度 5, 10
 減衰 48
 元素 4, 5, 7, 13

【こ】

高域通過特性 → ハイパス特性
 光子 45
 格子定数 200
 高周波回路 175
 降伏 148
 交流 34, 112
 五極管領域 160
 固体 2, 19, 194
 ——材料 2, 13, 58
 ——物理 2, 37, 39, 51, 52, 62, 101, 197
 固定電荷 14, 16, 106, 128, 164
 ゴム 3

コレクタ 33
 コンダクタンス 23, 193
 弦—— 26, 27
 小信号—— 26, 27
 相互—— 32
 コンピュータ 18, 52
 量子—— → 量子コンピュータ

【さ】

サイクロトロン運動 117
 再結合 83, 87, 90, 105, 110, 131, 142, 148, 151, 154
 ——電流 131
 ——レート 108-110
 直接—— 105
 座標 38
 サブスレッショルド電流 161
 サブスレッショルド特性 169, 182
 三角関数 24, 57
 酸化膜 159, 161-163, 166
 酸化膜厚 182, 191
 三極管領域 160
 三端子回路素子 31
 散乱 98, 161, 190
 ——行列 194
 キャリアの—— 120
 クーロン—— 108, 200

【し】

磁界 112, 116
 時間スケール 115, 119
 時間微分 xiii, 38, 39, 47, 59, 98, 109, 112, 115
 時間平均 107
 時間領域 47
 しきい値電圧 160, 178, 182, 185
 三端子 MOS キャパシタの—— 178
 三端子 MOS キャパシタのソース基準—— 180
 MOS キャパシタの—— 173
 MOSFET の—— 187, 189
 示強的 79
 示強変数 79
 次元 193
 ——解析 104
 仕事関数 124, 163, 175, 189
 ——差 124, 161, 166
 金属の—— 124
 半導体の—— 124
 指数関数 67, 69, 98, 110, 140, 142, 144

指数部171
 磁性4
 —体212
 自然対数71, 204
 磁束24
 —密度ベクトル117
 鎖交—28, 36
 実効状態密度5, 71, 72, 82, 204
 価電子帯の—69
 伝導帯の—68, 119
 実数44, 48
 実部42, 43
 質量38
 時定数87, 88, 98, 110, 114
 RC—189
 磁場⇒ 磁界
 時不変回路素子30
 時変回路素子30, 32
 弱反転168, 170, 171, 173, 185, 192
 —開始条件171
 周期構造37, 39, 40, 42, 44, 45, 62, 77
 無限—43
 周期的回路網39–41, 49, 59, 197
 周期表5
 集積回路4, 18, 19, 33, 35, 192
 化合物半導体—3
 シリコン—3
 集積度18, 189
 縦続行列⇒ ABCD 行列
 縦続接続49, 50, 56, 60, 193
 従属電源⇒ 制御電源
 集中定数回路46, 53, 58
 —素子40, 58
 —理論40, 46
 自由電子準位124
 周波数45, 61
 —依存負性線形抵抗器30
 —分散54
 —領域47, 84
 負の—44
 重力12, 80, 81, 104
 —加速度81, 104
 ジュール200
 縮退67, 77, 104, 112, 138, 176
 —ドープする138, 159, 162
 受光105
 —デバイス2
 出力小信号抵抗31, 32

受動43
 —回路素子34, 42
 寿命106, 109, 114, 119, 142, 143, 146, 152, 156, 180, 205
 電子の—87, 88, 109, 141, 152
 ホールの—110, 141, 152
 シュレーディンガー方程式39, 52, 60, 115
 時間に依存しない—62, 85
 純虚数44
 純度2
 順方向電流122, 131, 160
 順方向電流密度131
 小信号インダクタンス28
 小信号キャパシタンス28, 180
 小信号コンダクタンス26
 小信号抵抗26, 55
 少数キャリア14, 16, 87, 109, 111, 120, 131, 138, 141
 —の寿命⇒ 寿命
 —密度90
 過剰—142, 146
 過剰—111
 状態64, 116
 —の占有率68, 90, 119
 —密度64
 —密度関数64, 68, 112
 衝突98, 104
 —頻度98
 消費電力18, 35, 188
 情報処理19
 消滅87, 88, 105
 —レート108
 電子・ホール対の—107
 初期条件98, 120
 ショットキー障壁ダイオード175
 ショットキー接触175
 ショットキーダイオード175
 シリコーン4, 16, 19
 シリコン4, 5, 7, 18, 19, 97, 106, 146, 159
 —ゲルマニウム4, 5
 真性—11, 13, 15, 126
 多結晶—⇒ 多結晶シリコン
 非縮退—77, 90, 129
 ポリ—⇒ 多結晶シリ

コン
 n型—90
 p型—90
 示量変数79
 白丸 (○)7, 14, 106
 真空19, 41, 81, 124
 —管2, 4, 122
 —準位124
 人口17
 信号処理工学44
 進行波48, 194
 電圧—48, 194
 電流—48
 人工物1, 17
 真性キャリア密度5, 7, 10, 69, 72, 82
 実効的な—90, 110, 132, 148, 150
 真性半導体6, 7, 10, 13, 69, 70, 77, 105, 109, 125
 真性フェルミ準位70, 71, 82, 125
 振動数45
 振幅変調55

【す】

水素原子200
 水素様原子モデル8, 14, 19
 スイッチ2–4, 30
 数 学53
 スカラーxiii
 スケーリング187
 —則18, 188–192
 一般—188, 189
 温度—191
 定電圧—188, 189
 定電界—188, 189, 191
 ステップ関数66
 ストップバンド40, 51, 55, 62
 砂川重信199

【せ】

制御端子31–33, 158, 192
 制御抵抗器32
 制御電源31, 32, 35, 36
 正弦波44–47, 53, 55, 61
 正 孔⇒ ホール (正孔)
 生成83, 87, 90, 105, 110, 150
 直接—105
 電子・ホール対の—107
 生成・再結合110, 114, 115, 140, 146, 152, 154, 182
 —中心106

—レート ……108, 109, 111, 206
 間接— ……106, 119, 147
 キャリアの— ……109, 111
 直接— ……105, 119
 生成・消滅
 電子・ホール対の— ……109
 生成電流 ……150
 生成レート ……108–110
 静電場 ……80
 静電ポテンシャル ……71, 92, 97, 111, 112, 123, 128, 134
 —どうしの差 ……124
 静電容量 ……23
 整流器
 理想— ……26, 36
 整流作用 ……2, 27, 36, 122, 130, 132, 155, 175
 絶縁体 ……3, 19, 70, 159, 166
 接触電位差 ……123, 124–128, 155, 163, 166
 絶対温度 ……65
 絶対零度 ……66
 接 地 ……158
 節 点 ……46
 漸化式 ……42, 196
 線形インダクタ ……24
 線形応答 ……102, 104, 112, 190
 線形回路 ……22, 197
 —素子 ……22, 29, 30, 36
 —半導体製の— ……36
 —理論 ……22, 39
 線形キャパシタ ……23
 線形時不変抵抗器 ……30
 線形時変抵抗器 ……30
 線形代数 ……50
 線形抵抗器 ……22, 55, 102
 線形二端子素子 ……22
 線形領域 ……160
 占有確率 ……78, 90, 91
 占有率 ……68, 90, 119

【そ】

総化学ポテンシャル ……80, 86, 91, 104, 120
 双曲線関数 ……57
 相互コンダクタンス ……32, 33
 相互抵抗 ……31
 相対エネルギー ……93, 143
 双 対 ……24, 62
 相 反 ……35
 増 幅 ……34
 —回路 ……185, 190
 —作用 ……2
 ソース ……33, 158–160

—基準 ……186
 —電圧 ……181
 族 ……5
 速 度 ……59, 95
 —ベクトル ……117
 —飽和 ……190
 位相— ……⇒ 位相速度
 群— ……⇒ 群速度
 電子の集団の— ……96
 ドリフト— ……⇒ ドリフト
 速度
 熱— ……97
 平均— ……98
 ホールの集団の— ……96
 束縛エネルギー ……14
 素 子 ……⇒ 回路素子
 阻止域 ……⇒ ストップバンド

【た】

ダイオード ……2, 27, 36
 ゲート付き— ……162, 176, 183, 192
 理想— ……26
 MOS— ……⇒ MOS キャパシタ
 pn— ……⇒ pn ダイオード
 対角化 ……50
 大 気 ……81, 104
 対称性 ……9
 対 数
 —関数 ……92, 131
 自然— ……204
 第二種チェビシェフ多項式 ……50, 196
 ダイヤモンド ……3
 —構造 ……8, 19
 太陽電池 ……2, 4
 多価関数 ……55
 高橋清 ……198, 199
 多結晶 ……6
 —シリコン ……6, 36, 159, 162
 多数キャリア ……14, 16, 19, 67, 74, 88, 113, 117, 118, 120, 130, 167, 175
 —の応答時間 ……113
 —電流 ……113
 —密度 ……90, 169
 多端子回路素子 ……30, 35
 単位行列 ……195
 単位ステップ関数 ……66
 炭化ケイ素 ……4, 82, 148
 端 子 ……30
 正の— ……27
 単振動 ……38

短チャネル効果 ……189, 191
 単調減少関数 ……90

【ち】

遅 延 ……189
 蓄 積 ……167, 171, 175, 192
 窒化ガリウム ……4, 82, 148
 チャネル ……159, 170, 176, 192
 —の厚さ ……160
 —長 ……161, 182, 191
 実効— ……185, 189
 —長変調 ……185, 190
 —長変調効果 ……190
 —幅 ……161, 183
 —の深さ ……183
 —ポテンシャル ……177–179, 182, 183, 190, 192
 中性領域 ……⇒ 擬似中性領域
 超関数 ……202
 超伝導体 ……3
 直接生成・再結合 ……105, 119
 直 流 ……34, 60, 141, 202
 —電圧源 ……27
 —電流源 ……27

【つ】

通過域 ……⇒ バスバンド
 通信工学 ……44, 55

【て】

低域通過特性 ……⇒ ローパス特性
 抵 抗 ……22, 26, 29, 36, 102, 136, 175, 193
 —の直列・並列合成 ……36
 基準— ……⇒ 基準抵抗
 弦— ……26, 27, 55, 102
 出力小信号— ……31, 32
 小信号— ……26, 27, 55
 相互— ……31
 内部— ……27, 80
 入力— ……31, 32
 微分— ……26, 102
 抵抗器 ……22, 45, 55
 —の図記号 ……22
 可変— ……32
 周波数依存負性線形— ……30
 制御— ……32
 線形— ……22, 29, 102
 線形時不変— ……30
 線形時変— ……30
 非線形— ……25, 29, 36, 102, 122, 123, 132, 138
 非線形可変— ……31, 33, 158

非線形制御—— ……36
 負荷—— ……34
 抵抗変化型メモリー ……29
 抵抗率 ……2, 3, 70, 101, 102, 113, 136
 デジタル回路 ……85, 161, 189
 定常 ……12, 84, 109
 定常状態 ……39, 52, 84, 112, 115, 117, 119, 141, 144
 周期的—— ……52, 60, 84, 85, 119, 180
 非—— ……⇒ 非定常状態
 定数項 ……12, 71, 89, 166
 ディスプレイ ……4
 低注入 ……131, 140
 デイラック定数 ……45
 デシベル ……51
 デバイス ……2, 6, 19, 78
 ——シミュレーション ……147, 149
 ——シミュレータ ……112, 113, 148
 ——物理 ……113, 161, 192
 高耐圧—— ……4, 148
 三端子—— ……158
 受光—— ……2
 電子—— ……⇒ 電子デバイス
 発光—— ……2
 半導体—— ……⇒ 半導体デバイス
 光—— ……4, 5, 35
 メモリ—— ……212
 四端子—— ……158
 デバイ長 ……115, 119, 139, 146, 155, 207
 テブナンの定理 ……36
 電圧 ……22-24, 26
 ——計 ……117, 126, 127, 129
 ——制御電圧源 ……31
 ——制御電流源 ……32, 33
 ——増幅率 ……31
 ——降下 ……26, 136
 電圧源 ……24, 36, 80
 ——に流れる電流の定義 ……27
 直流—— ……27
 電圧制御—— ……31
 電流制御—— ……31
 電位勾配 ……96, 97, 113, 128, 131, 132
 電荷 ……23, 28
 電界 ……11, 12, 96, 97, 102, 104, 113, 128, 134, 190
 静—— ……112
 電界効果トランジスタ ……33, 161

電荷中性条件 ……70, 72, 88, 106, 114, 134, 164, 165, 167, 173, 206
 電荷の保存則 ……88, 105, 107, 111
 電荷密度 ……112, 113
 電気回路 ……38, 45
 電気化学ポテンシャル ……80, 82, 87, 88, 198
 擬—— ……86
 電子の—— ……65, 78, 80
 電気系 ……38
 電気工学 ……53
 電気素量 ……19, 20
 電気伝導 ……3, 6, 45, 64, 78, 83, 97
 電気伝導度 ……⇒ 導電率, 101
 電気力線 ……3, 128, 167-169
 電源 ……22, 34, 36
 ——電圧 ……35, 158, 187
 従属—— ……⇒ 従属電源
 制御—— ……⇒ 制御電源
 電子 ……6, 33, 41, 64, 67, 79, 87, 97, 105, 107, 108, 117, 118, 127, 159
 ——のエネルギー ……11, 12, 58, 64
 ——の加速度 ……59
 ——の質量 ……19, 59
 ——の寿命 ……⇒ 寿命
 ——の速度 ……59
 ——の平均自由行程 ……⇒ 平均自由行程
 ——の平均自由時間 ……⇒ 平均自由時間
 ——の平均速度 ……98, 120
 ——の捕獲・放出 ……⇒ 捕獲・放出
 ——の有効質量 ……59, ⇒ 有効質量
 電磁界 ……112
 電子回路 ……2
 電磁気学 ……37, 39, 60, 197
 電磁気力 ……80
 電磁石 ……4
 電子親和力 ……5, 125
 電子デバイス ……2
 電子伝導 ……95, 113, 118
 電子波 ……45, 52
 電磁波 ……45, 60
 電子物性 ……2, 4, 19, 58
 電子・ホール対 ……105, 107, 109
 電子ボルト ……11, 200
 電子密度 ……7, 10, 67, 72-74, 77, 78, 89, 91, 93, 103, 105,

111, 112, 123, 166
 ——の空間的変化 ……89
 過剰—— ……87, 109, 114, 141, 142
 電信方程式 ……47, 62
 周波数領域の—— ……47
 伝送線路 ……39, 46, 52, 58, 60, 62, 195, 212
 無損失—— ……40, 46, 50, 85
 伝送線路理論
 ——の前提 ……49
 伝導帯 ……9-11, 45, 51, 59, 64, 67, 105, 107, 125
 伝導電子 ……⇒ 電子
 伝導電流 ……94, 105, 111
 伝導電流密度 ……94
 伝搬速度 ……55
 電流 ……3, 22-24, 26, 80, 85
 ——制御電圧源 ……31, 32
 ——制御電流源 ……31
 ——増幅率 ……31
 ——電圧特性 ……161
 ——密度 ……95, 96
 電子—— ……96, 154
 ホール—— ……97, 154
 ——密度ベクトル ……117
 電流源 ……36
 ——の電圧の定義 ……27
 直流—— ……27
 電圧制御—— ……32
 電流制御—— ……31

【と】

銅 ……3
 透過係数 ……51, 62, 194
 等価電源の定理 ……36
 透過特性 ……50
 統計平均 ……xiii, 98
 統計力学 ……79, 84, 104
 同軸ケーブル ……49
 透磁率 ……41
 実効的な—— ……203
 導線 ……46, 80, 129, 163
 導体 ……3, 19
 導電率 ……2, 3, 7, 19, 101, 102, 114, 185
 複素—— ……54
 ドーバント ……16, 17, 19, 73, 77, 110, 133
 ——のイオン化率 ……73, 77, 200
 ドーピング ……16, 65, 76, 116, 118, 124, 148, 149, 188, 200
 ドープする ……16, 138
 特殊関数 ……51, 82, 196

特性インピーダンス ……48, 49, 195
 ドナー ……14, 16, 19, 106, 108
 —イオン ……14, 73, 87, 127, 128
 —イオン密度 ……73, 126, 139, 147
 実効的な— ……73
 —型トラップ ……⇒ トラップ
 —準位 ……14, 19
 —密度 ……73, 108
 中性— ……14, 87
 トラップ ……106, 110, 112, 164, 175
 アクセプタ型— ……106, 107
 ドナー型— ……14, 106, 107
 トラップ準位 ……108
 トランジスタ ……2, 31, 32, 34-36
 高周波— ……4
 高出力— ……4
 低雑音— ……4, 5
 電界効果— ……33, 161
 バイポーラ— ……⇒ バイポーラトランジスタ
 MOS— ……⇒ MOS トランジスタ
 npn— ……33
 pnp— ……33
 ドリフト ……99, 119, 130, 132, 152, 208
 —項 ……96, 97, 101, 113
 —速度 ……99, 102, 190
 —電流 ……101, 113, 123, 132, 140, 141, 150
 —電流密度 ……101
 ドレイン (ドレイン) ……33, 158-160
 —コンダクタンス ……33
 —電圧 ……181, 184, 192
 —電流 ……33
 トンネル効果 ……60
 トンネル電流 ……127, 175

【な】

内蔵電位差 ……128
 内部抵抗 ……27, 80
 長さのスケール ……115, 116, 119, 145
 波 ……37, 44-46

【に】

二次方程式 ……73, 161
 二端子回路素子 ……29, 162

二分法 ……175
 ニュートン法 ……175
 入力抵抗 ……31, 32

【ね】

熱運動 ……79, 81, 85, 97, 99
 熱エネルギー ……14, 19, 80, 105, 140
 熱速度 ……97
 熱電圧 ……173, 207
 熱伝導方程式 ……39
 熱平衡 ……84, 163
 熱力学 ……84

【の】

濃度 ……⇒ 密度
 能動回路素子 ……34
 能動負荷 ……34
 ノーソンの定理 ……36
 ノーマリーオフ型 ……161
 ノーマリーオン型 ……161

【は】

バイアス ……160, 164
 —電圧 ……129, 136
 逆— ……122, 130, 132, 137, 138, 140, 149, 150, 156, 177, 182
 順— ……122, 129, 130, 137, 138, 140, 146, 151
 ゼロ— ……130, 133, 149, 163
 媒質 ……40, 48, 54, 55
 一様— ……41
 配線 ……3, 46
 アルミニウム— ……3
 ハイパス特性 ……60, 202
 バイポーラトランジスタ ……18, 33, 35, 146, 155, 192, 212
 波形 ……23, 46
 はしご形回路網 ……42
 無限— ……42
 波数 ……13, 48, 54
 バスバンド ……40, 51, 61
 波長 ……46, 48, 49, 58, 61
 バックゲート ……158, 176, 181, 182, 192
 バックゲート基準 ……176, 181, 186
 発光 ……105
 —デバイス ……2
 波動関数 ……52, 59
 波動方程式 ……39, 47, 48, 52, 60, 62, 115, 141
 周波数領域の— ……48, 62,

85
 ばね ……38
 —定数 ……38
 バラクタ ……138
 —ダイオード ……138
 バルク ……125
 —移動度 ……161
 —ポテンシャル ……125, 166, 170
 バルス ……46
 パワーエレクトロニクス ……4, 35
 パワー半導体 ……212
 反射 ……61
 ブラッグ— ……61
 反射係数 ……62, 194
 反射波 ……61
 搬送波 ……55
 反転 ……170, 175
 強— ……⇒ 強反転
 弱— ……⇒ 弱反転
 —の度合い ……177, 182, 192
 反転層 ……155, 169, 170, 176, 192
 —の厚さ ……183
 反転電荷 ……169, 171, 172, 175, 178, 179, 182, 185, 186
 半導体 ……2-5, 19, 64, 70, 124, 159
 —の基本方程式 ……112, 113, 119
 —の極性 ……⇒ 極性
 アモルファス— ……6
 外因性— ……6
 化合物— ……5
 結晶— ……6
 元素— ……4
 混晶— ……5
 縮退— ……⇒ 縮退
 真性— ……⇒ 真性半導体
 多結晶— ……6
 非縮退— ……⇒ 非縮退
 非品質— ……6
 不純物— ……⇒ 不純物半導体
 n型— ……⇒ n型半導体
 p型— ……⇒ p型半導体
 III-V族— ……5, 198
 IV族— ……5, 7
 半導体デバイス ……2, 3, 19, 21, 35, 36, 116, 155
 二端子— ……27
 バンドギャップ ……9, 197
 バンド図 ……⇒ エネルギーバン

ド図
バンド理論 ……39, 62, 194
反復インピーダンス ……43, 44,
48

【ひ】

ヒ化ガリウム ……4
非可逆 ……36
——回路素子 ……35
光 ……2, 111
非局在化 ……9
微細化 ……18, 116, 189-191
微細 MOSFET ……190
非縮退 ……67-69, 73, 75-77, 91,
93, 94, 104, 112
非晶質 ……3
——半導体 ……6
非線形インダクタ ……28, 36
非線形回路 ……36, 197
——素子 ……21, 35
——半導体制の—— ……36
非線形可変抵抗器 ……31, 33, 158
非線形キャパシタ ……28
非線形制御抵抗器 ……36
非線形抵抗器 ……25, 36, 102,
122, 123, 132
ヒ素 ……14
非相反 ……35
非定常 ……84, 109
非定常状態 ……84
微分 ……47
——移動度 ……102
——インダクタンス ……28
——キャパシタンス ……28
——抵抗 ……26, 102
——方程式 ……39, 46, 85, 98,
110, 111, 114, 115, 120
非平衡 ……84, 90
——状態 ……63, 82-85, 110,
177
——弱い—— ……88
非飽和領域 ……160, 161, 182,
184, 186, 192
表面キャリア密度 ……167
表面電子密度 ……166-168, 170,
171, 177
表面ホール(正孔)密度 ……166-
168, 170, 171
表面ポテンシャル ……166-168,
170, 171, 175, 178, 182
ビルトイン電圧 ……128, 129,
135, 136, 140, 147, 155
ピンチオフ ……184, 185
——電圧 ……178, 192

【ふ】

フィックの法則 ……102, 103
フェーザ ……48, 194
フェルミエネルギー ……66, 82,
97
フェルミ準位 ……65, 70, 72, 73,
78, 80, 82, 85, 86, 90, 119,
123-125, 127, 166, 170
——の値の範囲 ……65, 69, 75,
76
擬—— ……⇒ 擬フェルミ準位
真性—— ……⇒ 真性フェルミ
準位
非縮退半導体の—— ……69
n型半導体の—— ……75
p型半導体の—— ……76
フェルミ推定 ……201
フェルミ速度 ……97
フェルミ・ディラック積分 ……67
フェルミポテンシャル ……71,
126
フォトリック結晶 ……62
負荷抵抗器 ……34
複素数 ……43, 48
不純物 ……2, 6, 110, 116
——イオン ……172, 200
——添加 ……13, 16, 19, 73
——バンド ……77
——半導体 ……6, 13, 72
——密度 ……67, 77, 116, 189
——イオン化—— ……73, 77,
132, 138
物性 ……2, 124
物理学 ……2, 38, 48, 52, 53
ブラッグ回折 ……40
ブラッグ周波数 ……61
ブラッグ条件 ……61
ブラッグ波長 ……61
ブラッグ反射 ……61
フラットバンド ……166, 171,
192
——状態 ……164, 166, 173,
176, 209
——電圧 ……164, 172, 192
プランク定数 ……20, 45
プリント基板 ……18
ブレイクダウン ……148
フレミングの左手の法則 ……116
プロッホインピーダンス ……43
分散 ……54
——がある ……55
——がない ……55
——関係 ……54, 56-58, 60
半導体っぽい—— ……60

——曲線 ……13, 53, 54, 57-59
分布関数 ……65, 72, 78, 90, 119
フェルミ・ディラックの——
……65, 78, 90, 191
ホルルの—— ……68
ボルツマンの—— ……67, 68
分布定数回路 ……39, 46, 58
——理論 ……39, 46, 58

【へ】

平均自由行程 ……98
平均自由時間 ……98, 99, 104,
114, 120
気体分子の—— ……104
平衡 ……84, 109, 110
局所的—— ……88
平衡状態 ……63,
73, 79, 80, 83-85, 109, 119,
125, 128, 129, 176
並進対称性 ……41
平方根関数 ……69
ベース ……33, 146, 155
ベクトル ……xiii
変位電流 ……94
変数変換 ……91
偏微分 ……33

【ほ】

ホウ素 ……15, 19
放電 ……4
放物線 ……64, 161, 208
包絡線 ……55, 59
飽和特性 ……191
飽和ドレイン電流 ……162, 186,
188
飽和領域 ……160, 161, 182, 184,
186, 188, 192
バイポーラトランジスタの——
……192
ボア半径 ……19, 200
ポート ……193
ホール(正孔) ……7, 10, 33,
64, 67, 79, 87, 99, 105, 107,
108, 116, 117, 127, 160, 197
——のエネルギー ……11
——の寿命 ……⇒ 寿命
——(正孔)伝導 ……95, 101,
118, 200
——のあぶくモデル ……100
——の障子の穴モデル
……100
——の平均自由時間 ……⇒ 平均自由時間
——の捕獲・放出 ……⇒ 捕獲・放出

— (正孔) 密度 …7, 10, 19, 68, 72, 74, 77, 87, 89, 92, 94, 103, 105, 111, 112, 166
過剰—— …88, 109, 141, 142
—の勾配 ……………89
—の有効質量 ……⇒ 有効質量
ホール (Hall)
— (Hall) 係数 ……………118
— (Hall) 効果 ……………116
— (Hall) 測定 ……………118
— (Hall) 電圧 ……………117
— (Hall) ファクター ……118
捕獲・放出 ……………107, 108
補償 ……………73, 76
保存力 ……………80, 85
ボデイ ……………168, 171, 172
—基準 ……………181
—効果 ……………172, 211
—効果係数 ……………172, 185
—バイアス効果 ……………211
ポテンシャルエネルギー …11, 12, 80
ポテンシャルバランス条件 …165
ポリシリコン ……⇒ 多結晶シリコン
ボルツマン定数 ……………19, 65
ポワソン方程式 …78, 106, 111, 114, 119, 133, 173, 175, 190, 191
【ま】
マイクロ波 ……………62
—工学 ……………60, 197
マクスウェル方程式 …62, 112, 198
摩擦 ……………98, 102
益 …3, 113, 118, 191, 198, 212
【み】
御子柴宣夫 ……………198, 199
密度勾配 ……………81, 86, 97, 102, 113, 127

【A, B】

Å (オングストローム) ……19
ABCD 行列 ……50, 193, 195
無損失伝送線路の— ……50
Ag ……………⇒ 銀
Ashcroft, N. W. ……197, 198
associated reference direction
……………27

【む】

ムーアの法則 ……………18
無限 ……………42, 45, 58
無損失 ……………44, 56
—回路素子 ……………34
—伝送線路 ……46, 50, 85
無損失 2 ポート ……56, 57
無分散 ……………55

【め】

メタマテリアル ……………62
メモインダクタ ……………30
メモキャパシタ ……………30
メモリスタ ……………29
メモリデバイス ……212

【も】

模倣 ……………60
モリブデン ……………118

【や】

山田陽一 ……………199

【ゆ】

有限 ……………45, 58
—温度 ……………82
有効桁数 ……………52, 112, 113
有効質量 …19, 59, 98, 99, 100
状態密度—— ……64, 65
負の—— ……59, 100
有損失回路素子 ……34
誘電緩和 ……………88, 113, 197
—時間 ……88, 98, 113–115, 119, 120, 205
誘電体 ……………3
誘電率 ……3, 41, 113, 120, 159
実効的な—— ……203
相対—— ……5, 159
複素—— ……54
輸送係数 ……………104
【よ】
要請 ……………142

揺動散逸定理 ……………104
容量 ……………137
拡散—— ……⇒ 拡散容量
寄生—— ……………3
空乏—— ……⇒ 空乏容量
静電—— ……………23

【ら】

ラプラス変換 ……………36

【り】

リアクタンス素子 …34, 39, 44, 58, 60
力学系 ……………38
理想気体 ……………67, 97
理想整流器 ……26, 36
理想ダイオード ……26
利得 ……………190
リニアスケール ……147
粒子 ……………78
流束密度 ……94, 96, 102
両極性 ……………33
量子化学 ……………8
量子コンピュータ ……60, 191
量子力学 …13, 37, 39, 45, 52, 62, 194
リレー ……………4
リン ……13, 14
—化インジウム ……4

【る】

ループ構造 ……126, 163, 165

【れ】

零行列 ……………195
連続方程式 ……78, 111, 114, 115, 119, 141

【ろ】

ローパス特性 ……………45
ローレンツ力 ……………117
ログスケール ……147, 161

Au ……………⇒ 金
Bohr, N. ……………8, 19
—の量子化条件 ……200

【C】

CCCS ……………31
CCVS ……31, 32
Chua, L. O. ……29, 198
CL はしご ……………40

無限—— ……61, 62
CMOS ……33, 160
Collin, R. E. ……198
const. ……12
C-V 測定 ……180
split —— ……181
C-V 特性 ……180

【D, E】

Dennard, R. H. ……191
 det ……50
 EBG ……62
 E-k 線図 ……13, 58, 61
 eV ……⇒ 電子ボルト
 E-x 線図 ……13, 92
 extended zone scheme ……57

【F, G】

F 行列 ……⇒ ABCD 行列
 FDNR ……30
 Fermi, E. ……89
 FET ……33
 GaAs ……4, ⇒ ガリウムヒ素, 5, 69, 82
 Gaensslen, F. H. ……191
 GaN ……4, ⇒ 窒化ガリウム, 5
 Ge ……4, ⇒ ゲルマニウム
 Grove, A. S. ……197, 199

【H, I】

Hall, E. ……116
 ℑ ……43
 imref ……89
 InP ……4, ⇒ リン化インジウム, 5
 Intel ……18, 197

【K, L】

Kittel, C. ……197, 198
 Kroemer, H. ……92, 197, 198
 Kronig-Penney モデル ……52, 57, 59, 62
 Landsberg, P. T. ……199
 LC 共振器 ……38
 LC はしご ……40, 62
 無限— ……43, 45, 46, 48, 58, 61
 ln ……71
 LTI ……30
 LTV ……30

【M】

McAndrew, C. ……199
 Mermin, N. D. ……197, 198
 meV ……⇒ 電子ボルト
 MIS 構造 ……159
 Moore, G. ……18
 MOS キャパシタ ……162,

166-168, 170, 176, 180, 192
 —の表面状態 ……166
 MOS 構造 ……157, 159, 175
 三端子— ……162, 176, 187, 192
 二端子— ……162
 MOS ダイオード ……⇒ MOS
 キャパシタ
 MOS トランジスタ ……3, 6, 17, 33, 35, 158
 —の図記号 ……33, 158, 160
 MOSFET ……33, 155, 158, 179, 187, 189, 192, 197
 短チャネル— ……189, 191
 長チャネル— ……182, 185, 191, 197
 平面形— ……159
 四端子— ……162, 181, 192
 立体形— ……159

【N】

n ウェル ……160
 n 型半導体 ……6, 14, 19, 20, 27, 74, 75, 77, 91, 92, 110, 113, 122, 125
 Ng, K. K. ……199
 Ning, T. H. ……199
 nMOS ……33
 —トランジスタ ……155, 158-160
 —FET ……160, 162
 np 積 ……⇒ pn 積
 npn トランジスタ ……33

【O, P】

OK チャート ……29
 p 型半導体 ……7, 16, 19, 27, 74, 75, 77, 87, 91, 92, 109, 122, 125
 parent device ……191
 pMOS ……33
 —トランジスタ ……158, 159, 162
 —FET ……162
 pn 積 ……52
 非平衡状態の— ……90
 平衡状態の— ……69
 pn 接合 ……122, 128, 136, 155, 177, 183
 pn ダイオード ……12, 27, 35, 122, 148, 155, 175

pnp トランジスタ ……33

【R, S】

RC 時定数 ……189
 ℔ ……43
 reduced zone scheme ……55
 S 行列 ……194, 195
 S パラメータ ……194
 Sah, C.-T. ……199
 Schroder, D. K. ……199
 Schubert, E. F. ……199
 Shockley 方程式 ……112
 Shockley, W. ……89, 145, 197, 198, 212
 Shockley-Read-Hal
 生成・再結合 ……106
 Si ……4, ⇒ シリコン, 65, 69
 SiC ……4, ⇒ 炭化ケイ素, 5
 SiGe ……5
 sinusoidal steady state ……84, 85, 119, 180
 SiO₂ ……70, 159
 Stratton, J. A. ……54, 198
 switching steady state ……85
 Sze, S. M. ……199

【T】

Taur, Y. ……199
 transconductance ……32
 transistor ……32
 transresistance ……31, 32
 Tsvividis, Y. ……199

【V, W, X】

VCCS ……32
 VCVS ……31
 Wei, D. ……198
 X 線 ……61
 —回折 ……61

【その他】

ω - β 線図 ……54, 60
 ω - κ 線図 ……57
 2 ポート ……60, 193
 可逆— ……56
 対称 T 形— ……43
 単位— ……49, 56
 無損失— ……56, 57
 L 形— ……43

— 著者略歴 —

益 一哉 (ます かずや)

1982年 東京工業大学大学院理工学研究科博士後期課程修了 (電子工学専攻)
工学博士 (東京工業大学)

現在, 東京工業大学学長

天川 修平 (あまかわ しゅうへい)

2001年 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了 (電子情報工学専攻)
博士 (工学) (東京大学)

現在, 広島大学准教授

電子物性とデバイス

Elementary Solid-State Device Physics

© 一般社団法人 電子情報通信学会 2020

2020年11月20日 初版第1刷発行

検印省略

編者 一般社団法人
電子情報通信学会
<https://www.ieice.org/>

著者 益 一哉
天川 修平

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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01809-7 C3355 Printed in Japan



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。