

固体物理と半導体物性 の基礎

牧本 俊樹【著】

コロナ社

は じ め に

われわれの身の周りには、半導体や金属などの固体材料で作られた数多くのデバイスが使われている。これらの固体材料はわれわれの生活を快適なものにしてくれており、現在のエレクトロニクス産業を支えているといっても過言ではない。もし、半導体や金属材料がこの世からなくなれば、われわれの生活は成り立たない。

このような半導体や金属材料といった固体材料の性質を理解するためには、固体物理と半導体物性に関する基本的な知識を習得することが重要である。そこで、専門課程へ進む前の大学2年生、あるいは、専門課程に進んだばかりの大学3年生の読者の皆さんを対象に、固体物理と半導体物性に関する基本的な知識を習得できることを目標として、本書を執筆することにした。本書の内容は大学における1年間の講義に対応することを想定しているので、発光ダイオードやトランジスタの動作を理解するための必要最小限の内容に留めることにした。このようなことから、高等専門学校における高学年での固体物理と半導体物性に関する1年間の講義、あるいは、社会に出てから半導体関連の業務に携わる方々に対してもよい入門書になると思う。特に、半導体物性を主に学びたい方は第8章の「半導体材料とバンド構造」から学習を始めて、固体物理に不明な点があれば、適宜、前の章を振り返るといった学習方法もある。そして、本書を活用して固体物理や半導体物性を学習した後に、さらに深く学びたい方は、C. キッテルの『キッテル固体物理学入門』やS. M. ジーの『半導体デバイス—基礎理論とプロセス技術—』などの教科書を使って学んでいただきたい。

筆者は、大学および大学院において、本書で紹介する固体物理と半導体物性を学んだ。また、大学院卒業後は、30年間以上にわたって、企業や大学にお

いて発光ダイオードやトランジスタなどの半導体に関する最先端の基礎研究を行ってきた。そして、このような研究を行った過程で、大学の専門課程における必要な知識、あるいは専門課程に進む前に学んでおくべきことを知ることもできた。この経験を活かすとともに、入門者にとってなるべくわかりやすい説明にも気を配り、本書を執筆した次第である。

本書では、各章の内容を振り返って確認するために、それぞれの章末に演習問題を用意してある。ほとんどの演習問題は本文に書いてあることの確認事項なので、本書にはあえて解答を掲載していない。演習問題の解答に対するヒントはウェブサイト[†]に掲載したので、必要に応じてダウンロードして、解答の際の参考にしてほしい。

読者の皆さんが本書を活用することにより、固体物理と半導体物性に関する基礎知識を身につけて、その後の皆さんのさらなる発展につながれば幸いである。

2017年1月

牧本 俊樹

[†] <http://www.coronasha.co.jp/np/isbn/9784339008968>

目 次

第1章 結 晶 構 造

1.1 固体の特性	1
1.2 結晶の種類	2
1.2.1 原子間の斥力と引力	2
1.2.2 共有結合	3
1.2.3 イオン結合	4
1.2.4 金属結合	4
1.2.5 水素結合	5
1.2.6 ファン・デル・ワールズ結合	5
1.2.7 結合エネルギーの大きさの比較	6
1.3 結晶の構造	6
1.3.1 結晶に関する専門用語	6
1.3.2 ブラベ格子	6
1.3.3 ミラー指数	8
1.3.4 単純立方格子における代表的なミラー指数の例	8
1.3.5 一般の結晶格子におけるミラー指数	9
1.4 2次元結晶格子	10
1.4.1 2次元格子点の表現方法	10
1.4.2 2次元の基本単位格子	10
1.5 ウィグナー・サイツ・セル	12
1.6 3次元結晶格子	13
1.6.1 3次元格子点の表現方法	13
1.6.2 単純立方格子における基本単位格子	13

1.6.3	体心立方格子における基本単位格子	14
1.6.4	面心立方格子における基本単位格子	15
	演習問題	16

第2章 回折条件と逆格子

2.1	ブラッグの法則	17
2.2	フーリエ級数	18
2.2.1	1次元結晶中の電子濃度	18
2.2.2	3次元結晶への拡張	19
2.2.3	3次元結晶における周期性の条件	19
2.3	逆格子	20
2.3.1	逆格子の基本並進ベクトル	20
2.3.2	逆格子ベクトル	21
2.3.3	実格子と逆格子の並進ベクトルの関係	21
2.4	ラウエ方程式と回折条件のベクトル表現	22
2.4.1	結晶面による波の散乱	22
2.4.2	ラウエ方程式	23
2.4.3	回折条件のベクトル表現	24
2.5	逆格子ベクトルの性質	25
2.5.1	2次元結晶格子の逆格子ベクトル	25
2.5.2	ブラッグの法則との関係	26
	演習問題	28

第3章 ブリルアンゾーン

3.1	ブリルアンゾーン	29
3.1.1	波の回折条件	29
3.1.2	ベクトル \mathbf{k} を変数とした逆格子空間	30

3.2	1次元結晶格子の逆格子とブリルアンゾーン	30
3.3	2次元正方形格子の逆格子とブリルアンゾーン	32
3.3.1	2次元正方形格子に対する逆格子の基本並進ベクトル	32
3.3.2	2次元正方形格子の逆格子におけるブリルアンゾーン	32
3.4	単純立方格子の逆格子とブリルアンゾーン	33
3.4.1	単純立方格子に対する逆格子の基本並進ベクトル	34
3.4.2	単純立方格子の逆格子におけるブリルアンゾーン	34
3.5	体心立方格子の逆格子とブリルアンゾーン	35
3.5.1	体心立方格子に対する逆格子の基本並進ベクトル	35
3.5.2	体心立方格子の逆格子におけるブリルアンゾーン	36
3.6	面心立方格子の逆格子とブリルアンゾーン	36
3.6.1	面心立方格子に対する逆格子の基本並進ベクトル	37
3.6.2	面心立方格子の逆格子におけるブリルアンゾーン	38
	演習問題	39

第4章 フォノン

4.1	フォノンに関連する予備知識	40
4.1.1	結晶内で相互作用する主な粒子	40
4.1.2	波の種類	41
4.2	同種原子からなる1次元格子中を伝わる波	41
4.2.1	運動方程式	42
4.2.2	運動方程式の解	43
4.2.3	長波長領域における波の性質	44
4.3	二つの異種原子からなる1次元格子中を伝わる波	45
4.3.1	運動方程式	45
4.3.2	運動方程式の解	46
4.3.3	ブリルアンゾーンの原点における ω	47
4.3.4	第1ブリルアンゾーン端における ω	47
4.3.5	長波長領域における ω - k 分散関係	47

4.4	音響フォノンと光学フォノン	49
4.4.1	ブリルアンゾーンの原点におけるフォノンの振動	49
4.4.2	フォノンの種類	50
4.5	フォノン比熱	51
4.5.1	比熱のアインシュタインモデル	52
4.5.2	高温での比熱	52
4.5.3	デバイの T^3 法則	52
	演習問題	53

第5章 金属の自由電子モデル

5.1	シュレディンガーの波動方程式	55
5.2	1次元井戸型ポテンシャル中の電子	56
5.2.1	波動関数の境界条件	57
5.2.2	波動方程式と解	57
5.2.3	得られた計算結果の物理的意味	59
5.2.4	フェルミエネルギー	59
5.3	立方体に閉じ込められた電子	60
5.3.1	3次元シュレディンガーの波動方程式と解	60
5.3.2	フェルミエネルギー	61
5.3.3	状態密度	63
5.4	フェルミ-ディラックの分布関数	64
	演習問題	66

第6章 バンド理論

6.1	エネルギーバンド図	67
6.1.1	バンドギャップとエネルギーバンド	67
6.1.2	金属, 半導体, 絶縁体のエネルギーバンド図	68
6.1.3	絶縁体における電気伝導	69

6.1.4 真性半導体における電気伝導	69
6.1.5 金属における電気伝導	70
6.2 ブロッホの定理	71
6.2.1 リング状の1次元結晶	71
6.2.2 3次元結晶でのブロッホの定理	72
6.3 クローニツヒ-ペニーのモデル	73
6.3.1 周期的ポテンシャルとシュレディンガーの波動方程式の解	73
6.3.2 周期的ポテンシャルの近似	75
6.4 バンドギャップの形成	76
6.4.1 電子のエネルギー	76
6.4.2 $E-k$ 分散関係	77
6.4.3 還元ゾーン形式	78
6.5 半導体中での光吸収	79
6.5.1 半導体における光吸収過程	79
6.5.2 直接遷移型半導体における光吸収	80
6.5.3 間接遷移型半導体における光吸収	81
演習問題	82

第7章 固体内の電気伝導

7.1 有効質量	83
7.2 オームの法則	84
7.3 ドルレーデの理論	86
7.4 磁場内のキャリアの運動	87
演習問題	89

第8章 半導体材料とバンド構造

8.1 半導体材料	90
-----------	----

8.1.1	半導体の特長	90
8.1.2	半導体の種類	91
8.1.3	半導体混晶	91
8.1.4	ベガード則	92
8.2	半導体デバイスへの応用	92
8.2.1	半導体物性と半導体デバイスの関連	93
8.2.2	発光デバイスに使われる半導体材料	94
8.2.3	受光デバイスに使われる半導体材料	94
8.2.4	トランジスタに使われる半導体材料	95
8.3	E - k 分散関係における電子の遷移	95
8.3.1	フォトンによる電子の遷移	96
8.3.2	フォノンによる電子の遷移	97
8.3.3	直接遷移型半導体と間接遷移型半導体における電子遷移過程の違い	97
8.4	実際の半導体における E - k 分散関係	99
8.4.1	3次元結晶におけるブリルアンゾーン端の名称	99
8.4.2	実際の直接遷移型半導体における E - k 分散関係とフェルミ面	99
8.4.3	実際の間接遷移型半導体における E - k 分散関係とフェルミ面	100
	演習問題	102

第9章 半導体中のキャリア濃度

9.1	ボルツマン分布での近似	103
9.2	真性半導体の伝導帯における電子濃度	104
9.2.1	伝導帯における電子のエネルギーと状態密度	104
9.2.2	伝導帯における電子濃度	105
9.3	真性半導体の価電子帯における正孔濃度	106
9.3.1	価電子帯における正孔のエネルギーと状態密度	107
9.3.2	価電子帯における正孔濃度	108
9.4	真性半導体の性質	109
9.4.1	np積	109

9.4.2	真性半導体中のキャリア濃度	110
9.4.3	真性半導体のフェルミ準位	110
9.4.4	真性半導体のフェルミ準位と n および p の関係	111
9.5	半導体への不純物ドーピング	112
9.5.1	IV族半導体へのV族元素のドーピング	112
9.5.2	IV族半導体へのIII族元素のドーピング	113
9.6	ドーピングした不純物の活性化エネルギー	114
9.6.1	ボアの水素原子モデル	114
9.6.2	不純物の活性化エネルギー	115
9.7	不純物をドーピングした半導体のフェルミ準位	116
9.7.1	n型半導体中のフェルミ準位	116
9.7.2	p型半導体中のフェルミ準位	118
9.8	n型半導体における電子濃度の温度依存性	120
9.8.1	低温領域	120
9.8.2	中程度の温度領域	121
9.8.3	高温領域	121
	演習問題	122

第10章 半導体中の少数キャリア

10.1	移動度を決定する要因	123
10.1.1	移動度を決定する主な散乱要因	123
10.1.2	マティーンセンの法則	124
10.1.3	実際の半導体中の移動度の温度特性	125
10.2	ドリフト電流	126
10.3	拡散電流	126
10.3.1	フィックの法則	127
10.3.2	正孔による拡散電流密度	127
10.3.3	電子による拡散電流密度	128
10.4	アインシュタインの関係式	128

10.5	過剰少数キャリア	131
10.6	少数キャリアの連続の式	132
10.6.1	過剰少数キャリア濃度の時間変化を決める要因	132
10.6.2	n型半導体中の微小領域における少数キャリアによる電流	132
10.6.3	p型半導体中の微小領域における少数キャリアによる電流	134
10.6.4	n型半導体中の少数キャリアの生成と消滅	135
10.6.5	p型半導体中の少数キャリアの生成と消滅	136
10.6.6	1次元における少数キャリアの連続の式	136
10.6.7	3次元における少数キャリアの連続の式	136
10.7	少数キャリアの連続の式の応用例	137
	演習問題	141

第11章 pn接合とショットキー接合

11.1	pn接合ダイオードの概要	142
11.2	pn接合の形成	144
11.3	階段型pn接合における電子のポテンシャルエネルギー	147
11.3.1	階段型pn接合	147
11.3.2	ポアソン方程式と電荷密度	149
11.3.3	静電ポテンシャルの計算	150
11.4	電圧印加時の空乏層幅と接合容量	152
11.4.1	電圧印加時の空乏層幅	152
11.4.2	接合容量	152
11.4.3	C-V特性を用いたpn接合ダイオードのパラメータ測定	153
11.5	pn接合における順方向バイアス時の拡散電流	153
11.5.1	順方向バイアス時における空乏層端での少数キャリア濃度	154
11.5.2	順方向バイアス時の拡散電流	155
11.6	実際のpn接合ダイオードの特性	159
11.7	ショットキー接合	160
11.7.1	順方向バイアス時の電流	160

11.7.2	ショットキー接合の形成	161
11.7.3	空乏層中の静電ポテンシャルの計算	163
11.7.4	ショットキーダイオードの接合容量	165
11.7.5	ショットキー接合の I - V 特性	166
演習問題		167

第12章 トランジスタ

12.1	バイポーラトランジスタの構造と動作原理	169
12.1.1	バイポーラトランジスタの構造	169
12.1.2	nnp 型バイポーラトランジスタのエミッタ接地回路	170
12.1.3	バイポーラトランジスタにおける増幅作用	171
12.2	バイポーラトランジスタの設計指針	172
12.2.1	電流成分を決める三つのパラメータ	172
12.2.2	nnp 型バイポーラトランジスタでの電子の流れと設計指針	173
12.3	エミッタ接地回路の I - V 特性	175
12.4	電界効果トランジスタの構造と動作原理	176
12.4.1	電界効果トランジスタの構造	176
12.4.2	n チャネル MOSFET (n 型 MOSFET) の動作原理	177
12.4.3	ゲート電極下の全電荷密度とゲート電圧の関係	179
12.4.4	n 型 MOSFET の基本特性	181
12.5	電界効果トランジスタの I - V 特性	183
12.5.1	MOSFET の I - V 特性	183
12.5.2	相互コンダクタンス	184
演習問題		184

第13章 ヘテロ接合と半導体光デバイス

13.1	ヘテロ接合と低次元構造	186
13.1.1	ホモ接合とヘテロ接合	186

13.1.2 低次元構造	187
13.2 半導体中での電子とフォトンの相互作用	189
13.3 半導体中での光の吸収	192
13.4 光吸収過程に関連する現象	193
演習問題	195

付 録

A.1 ベクトルの内積と外積	196
A.2 波に関連する関係式	197
A.3 光に関連する関係式と情報	198
A.4 フックの法則	198
A.5 $x \sim 0$ の場合のテイラー展開	199
A.6 $f(x + dx)$ と $f(x)$ の関係	199
A.7 三角関数に関連する公式	200
A.8 本書に関連する情報	200

引用・参考文献	203
---------	-----

索引	204
----	-----

第1章 結 晶 構 造

本章では、固体物理を理解するうえで必要な結晶に関連する基礎知識を紹介する。

1.1 固体の特性

われわれの身の周りには、たくさんの固体があり、これらの固体はいくつかの特性によって分類することができる。例えば、電気特性で固体を分類する際には、抵抗の高い順に、電流を通しにくい絶縁体、抵抗を変化させることのできる半導体、金属に代表されるような電流をよく通す導体、抵抗が0となる超伝導体などに分類することができる。また、固体の磁気特性に注目して分類した場合には、Fe, Co, Niに代表される磁石となるような強磁性体、磁石に反発する反磁性体、磁石に反発しないが磁石にはならない常磁性体や反強磁性体などに分類することができる。本書では、発光ダイオードやトランジスタの動作を理解するために、主として「電気特性」に注目して、光学特性を含めた固体物性を紹介する。

一方で、固体の示す特性ではなく、構造によって固体を分類することもできる。まずは、ガラスやアモルファスSiなどに代表され、原子が無秩序に配列した**アモルファス**があげられる。これに対して、原子が周期的に配列した結晶がある。この結晶は、単結晶と多結晶に分けることができる。**単結晶**は、ダイヤモンドや単結晶Siに見られるように、規則的な構造が長い距離にわたって続く結晶である。これに対して、**多結晶**は小さな結晶の集まりであり、金属やセラミックス、ポリSiなどの例がある。ミクロな視点で観察すると、この多結晶も単結晶と同じように規則的な構造を持っている。本書では、アモルファ

スではなく、「結晶」に注目して、固体物性を解説する。

1.2 結 晶 の 種 類

1.2.1 原子間の斥力と引力

まずは、結晶内に存在する二つの原子の間に働く斥力^{せきりょく}（反発する力）と引力についての一般論を紹介しよう。二つの原子を接近させると、二つの原子に属する電子の軌道が重なるので、**図 1.1**に示すように、二つの電子分布が重なる。この場合、二つの電子は同じ状態を取ることができないという**パウリの排他原理**によって、系全体の**ポテンシャルエネルギー**が増加する。自然界では、ポテンシャルエネルギーが低い方向に反応が進む。このため、ポテンシャルエネルギーを下げようとして、接近させた二つの原子間には斥力が発生する。一方で、後の1.2.2~1.2.6項で述べるように、二つの原子の間には、結晶構造に依存したさまざまな種類の引力が働いている。

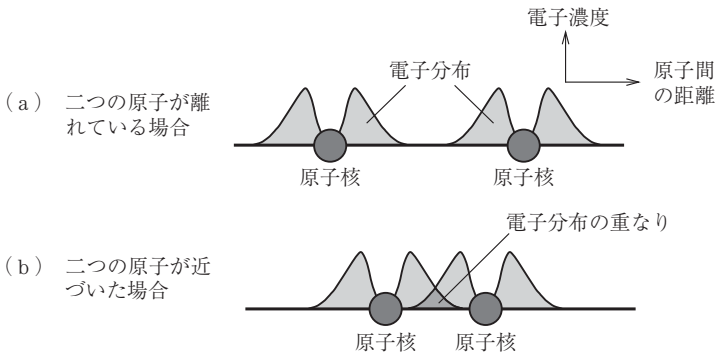


図 1.1 二つの原子の周りの電子分布

以上のような斥力と引力の合計は、**図 1.2**の太い実線で示すように、原子間距離の関数となる。そして、これらの合計には極小値が存在する。この極小値の絶対値は結合エネルギーを示しており、極小値のへこみが深ければ深いほど結合が強いことに対応している。また、この極小値を与える原子間距離が結晶

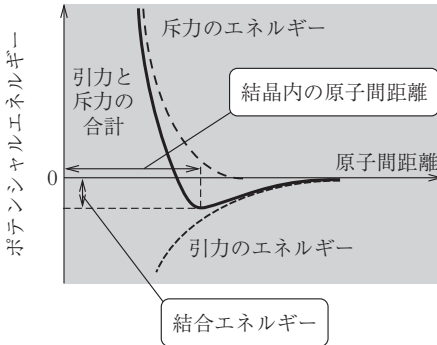


図 1.2 原子間距離とポテンシャルエネルギーの関係

内の二つの原子間の距離に対応している。次に、結晶内における主な引力によって形成される原子間の結合について紹介しよう。

1.2.2 共有結合

共有結晶を形成する二つの原子は、互いの電子を共有して**共有結合**を形成している (図 1.3)。この共有結合を形成する電子は、二つの原子の間に存在しており、二つの電子のスピンの向きは互いに逆向きになっている。このため、二つの電子の軌道が重なっても、ポテンシャルエネルギーが高くなりにくい。したがって、二つの原子が近すぎなければ引力となり、本書で紹介した結晶の中で、最も大きな結合エネルギーを持つ。例えば、共有結合を有するダイヤモンドの昇華点は 3642℃であり、Si の融点は 1410℃である。このように、非常に安定な結晶構造を形成する。

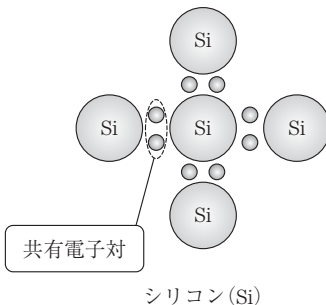


図 1.3 共有結合

1.2.3 イオン結合

イオン結晶内には正と負のイオンが存在しており (図 1.4), 正のイオンと負のイオンの間には引力が働いて**イオン結合**を形成している。一方で, イオン結晶内の正のイオンどうし, あるいは, 負のイオンどうしには, 斥力が働いている。ただし, これら全体の静電相互作用は, 全体として引力となり, **マーデルングエネルギー**と呼ばれるエネルギーで結合している。例えば, イオン結合を有する塩化ナトリウム (NaCl) の融点は 800°C である。このように, 融点が高いので, イオン結晶の結合エネルギーが比較的大きいことがわかる。

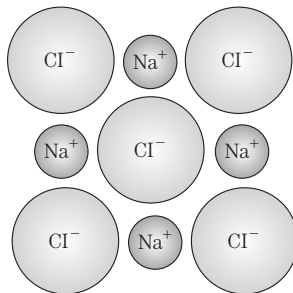
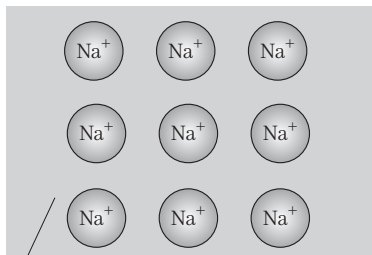


図 1.4 イオン結合

塩化ナトリウム (NaCl)

1.2.4 金属結合

金属結晶内には, 結晶内で自由に動き回る**伝導電子**が存在するため, 電気伝導率が高い。この伝導電子と正の金属イオンの間に引力が働いて**金属結合**を形成している。つまり, 図 1.5 に示すように, 伝導電子の海の中に金属イオンが



伝導電子

ナトリウム (Na)

図 1.5 金属結合

規則正しく並んでいるイメージである。ここで、遷移金属では、d殻などの内殻電子による付加的な結合があるために、結合エネルギーが増加する。例えば、典型元素である金属Naの融点は98℃であるのに対して、遷移金属であるCuの融点は1085℃まで上昇する。

1.2.5 水素結合

電気陰性度が大きな原子（N、O、Fなど）に、共有結合で結び付いた水素原子は正に弱く帯電する（**図1.6**）。これに対して、同じ分子内の電気陰性度が大きな原子は負に弱く帯電する。この結果、正に帯電した水素原子と負に帯電した隣の分子に含まれる原子との間にクーロン引力が働く。例えば、水（ H_2O ）分子においては、水素原子が正に帯電し、酸素原子が負に帯電する。この負に帯電した酸素原子が、隣の H_2O 分子に含まれる正に帯電した水素原子と結合する。このようなクーロン引力による結合を**水素結合**と呼ぶ。生体内のデオキシリボ核酸（DNA）内にも、このような水素結合が存在することが知られている。

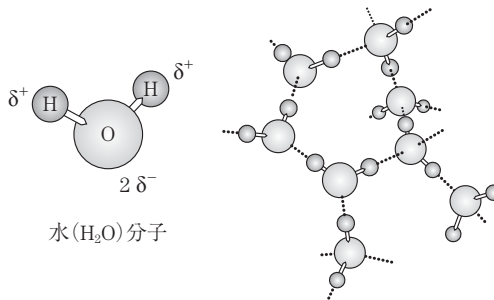


図1.6 水素結合

1.2.6 ファン・デル・ワールズ結合

希ガスの電子配置は安定な閉殻構造を作るので、二つの希ガス原子の間には引力が働きにくい。このため、これらの希ガスでは、距離の6乗に反比例する引力であるファン・デル・ワールズ結合で、結晶を構成している（**図1.7**）。

索 引

【あ】	
アインシュタインの関係式	130
アインシュタインモデル	52
アクセプタ	113
アクセプタ準位	118
アモルファス	1
【い】	
イオン化アクセプタ	118
イオン化ドナー	116
イオン化不純物散乱	124
イオン結合	4
移動度	85
井戸層	188
【う】	
ウイグナー-サイツ・セル	12
【え】	
エキシトン	41
エネルギー固有値	56
エネルギー準位	59
エネルギーバンド	67
エネルギーバンド図	68, 144
エミッタ	169
エミッタ接地回路	170
エミッタ注入効率	172
エミッタ電流	172
【お】	
オーミック接合	160
オームの法則	84, 126
音響フォノン	50
オン電圧	143

【か】	
外 積	196
回折条件のベクトル表現	25
階段型 pn 接合	147
拡散定数	175
拡散電位	145
過剰少数キャリア	131
活性化エネルギー	114
価電子帯	69
——の頂上	79
還元ゾーン形式	78
換算プランク定数	198
間接遷移型半導体	82, 98
緩和時間	86
【き】	
基本単位格子	10
基本並進ベクトル	10
逆格子	20
逆方向バイアス	143
逆方向飽和電流密度	158
キャリア	103
——の拡散長	175
吸収係数	192
共有結合	3
禁制帯	69
金属結合	4
【く】	
空乏層	145
クローニツヒ-ペニーのモデル	73
【け】	
傾斜型 pn 接合	147
結晶格子	6

ゲート	176
ゲート電圧	176
【こ】	
光学フォノン	50
光 子	40
格子散乱	123
格子点	6
コレクタ	170
コレクタ効率	172
コレクタ電流	170
【さ】	
散乱波	17
散乱要因	124
【し】	
しきい電圧	179
仕事関数	162
自然放出過程	189
実格子	20
自由電子フェルミ気体	55
自由電子モデル	55
シュレディンガーの波動方程式	55
順方向バイアス	143
少数キャリア	113
——の拡散長	140
——の連続の式	132
状態密度	63
障壁層	188
ショットキー障壁	162
ショットキー接合	160
ショットキーダイオード	160
真空準位	161
真性キャリア濃度	116

真性半導体	69, 104
真性フェルミ準位	179
【す】	
水素結合	5
【せ】	
正孔	40
正孔電流	172
静電ポテンシャル	148
絶縁体	69
線型領域	183
【そ】	
相互コンダクタンス	184
ソース	176
【た】	
体心立方格子	14, 35
タイプI	188
タイプII	188
太陽電池	95, 189
多結晶	1
多重量子井戸構造	188
多数キャリア	113
立上がり電圧	143
単位格子	6
単一量子井戸構造	188
単結晶	1
単純立方格子	13, 34
弾性波	41
【ち】	
力定数	42
チャンネル層	179
中性アクセプタ	119
中性ドナー	117
中性不純物散乱	124
中性領域	145
超格子構造	188
調和振動子	51
直接遷移型半導体	81, 98
直列抵抗	160

【て】

テイラー展開	199
デバイの T^3 法則	52
デューロン-ブティの法則	52
電界効果トランジスタ	95, 176
電荷中性条件	151, 174
電子	40
電子親和力	161, 186
電子電流	172
伝導帯	69
——の底	79
伝導電子	4
電流増幅率	171
電流利得	171

【と】

ドナー	113
ドナー準位	116
ドリフト電流	84
ドルーデの理論	86
ドレイン	176
ドレイン電流	176
トンネル電流	160

【な】

内蔵電位	147
内積	196

【に】

入射波	17
-----	----

【は】

パーシュタインモスシフト	194
バイポーラトランジスタ	95, 169
パウリの排他原理	2, 59
発光再結合	188
発光ダイオード	94
発光デバイス	94

波動関数	55
バネ定数	42
パワーエレクトロニクス	95
反射波	17
反転分布	191
半導体混晶	92
バンドギャップ	67
バンドギャップエネルギー	68
バンド図	68
バンド不連続	187

【ひ】

光吸収過程	189
表面反転層	179
表面漏れ電流	160
ピンチオフ点	182
ピンチオフ電圧	182

【ふ】

ファン・デル・ワールス結合	5
フィックの法則	127
フーリエ級数	19
フェルミ-ディラックの分布関数	64
フェルミエネルギー	60
フェルミ準位	111, 145
フェルミ分布関数	64, 103
フォトン	40, 96
フォノン	40, 97
フォノン散乱	123
フックの法則	42, 198
ブラッグの法則	17
フラットバンドポテンシャル	146
ブラベ格子	6
ブリルアンゾーン	30, 99
ブロッホ関数	72
ブロッホの定理	72
分散関係	43

	【へ】	ホール電圧	88	有効状態密度	106
		ポテンシャルエネルギー	2	誘導放出過程	190
ベガード則	92	ホモ接合	186		
ベース	170	ボルツマン分布関数	103	【ら】	
ベース電流	170			ラウエ方程式	24
ベース輸送効率	172	【ま】			
ヘテロ接合	186	マーデルングエネルギー	4	【り】	
	【ほ】	マティーセンの法則	125	理想因子	159
飽和電流	143			理想係数	159
飽和ドレイン電流	183	【み】		リチャードソン定数	167
飽和領域	183	ミラー指数	8	量子井戸構造	187
ボアの水素原子モデル				【れ】	
	114	【め】		励起子	41, 193
ボア半径	115	面心立方格子	15, 37	レーザーダイオード	94
ホール係数	88			レーザー発振	191
ホール効果測定	89	【ゆ】			
		有効質量	83		
◇					
	【F】	MOSFET	176	【P】	
FET	176	【N】		pn 接合	144
	【K】	np 積	109	pn 接合ダイオード	142
k 空間	30	n 型 MOSFET	177	p 型層	90, 112, 144
	【M】	n 型層	90, 112, 144	p 型半導体	113
MESFET	177	n 型半導体	113		
		n 値	159		
		n チャネル MOSFET	177		

— 著者略歴 —

1983年 東京大学工学部電気電子工学科卒業
1985年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了（電子工学専攻）
1985年 日本電信電話株式会社勤務
1993年 博士（工学）（東京大学）
1993年 カリフォルニア大学客員研究員
2000年 日本電信電話株式会社・NTT 物性科学基礎研究所特別研究員
2011年 日本電信電話株式会社・NTT 物性科学基礎研究所長
2013年 早稲田大学教授
現在に至る

主な受賞歴

2014年 応用物理学会フェロー表彰
2015年 平成27年度科学技術分野の文部科学大臣表彰

固体物理と半導体物性の基礎

Introduction to Solid State and Semiconductor Physics

© Toshiki Makimoto 2017

2017年3月16日 初版第1刷発行



検印省略

著者 まきもと としき 牧本俊樹
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

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00896-8 (新宅) (製本: 愛千製本所)

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おります。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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします