

基礎電子工学Ⅳ

伊藤 糾次
木俣 守彦 共著
尾崎 肇

基礎電子工学Ⅲ

早大教授／工学博士 伊藤 紉次
早大教授／工学博士 木俣 守彦 共著
早大助教授／工学博士 尾崎 肇

昭晃堂
株式
會社

著者略歴

伊 藤 紉 次

昭和 20 年 早稲田大学理工学部電気通信学科卒業

昭和 35 年 工学博士号授与

現 在 早稲田大学理工学部教授

木 俣 守 彦

昭和 22 年 早稲田大学理工学部電気工学科卒業

昭和 42 年 工学博士号授与

現 在 早稲田大学理工学部教授

尾 崎 肇

昭和 37 年 早稲田大学理工学部電気工学科卒業

昭和 46 年 工学博士号授与

現 在 早稲田大学理工学部助教授

基礎電子工学〔II〕

昭和49年10月10日 初版1刷発行

検 印

伊 藤 紉 次
① 著 者 木 俣 守 彦
尾 崎 肇

発行者 阿 井 国 蔵
東京都新宿区矢来町48

印刷所 新日本印刷株式会社
東京都新宿区市ヶ谷本村町27

発行所 株式 昭 晃 堂
会社

郵便番号162 東京都新宿区矢来町48

電話 東京(03) 269 { 1374番
3449番
8495番

定価 2600 円

振替口座 東京 139320番

Printed in Japan

製本所：三和製本所

日本書籍協会会員
自然科学書協会会員
工学書協会会員

3055—220008—3080

それが良いことか、悪いことかは別として、今日の情報化時代を築いた一つの大きな柱が電子装置であることはまちがいない。このような電子装置に應用されている基礎的な諸現象ならびに“物の考え方”は、関連技術者でなくとも必要な知識の一つであろう。

[I]巻においては、真空中ならびに気体中の電子運動を取りあげ、その應用としての電子装置(デバイス)について述べたが、本書[II]巻では、固体中の電子運動とその應用について述べている。

は し が き

電子工学の分野における固体としては、単結晶体、多結晶体のほか非晶質が含まれるが、現在、實用化されているデバイスは、そのほとんどが単結晶体を基本構造とするものであり、同時に結晶体としては半導体を用いるものが大部分を占めている。したがって、本書では始めに単結晶について必要な知識を与え、次に半導体とその基本的性質、半導体を用いて構成されるデバイスについて述べている。続いて、固体の誘電的性質、磁氣的性質とそれらの應用について述べている。

始めに予定した執筆者の変更を余儀なくされたため、本書の内容には多少改訂した部分があるが、[I]巻でとった基本的な姿勢、すなわち、できるだけ自然に、しかも余り多くの参考書を用意しなくとも、内容を理解できるように記述することに配慮している。より完全なものとするために改訂の努力を続ける覚悟であり、

は し が き

読者諸兄の卒直な御意見，御叱正を得られれば
大変幸いである。

第1章～第3章は木俣，第4章～第9章は
伊藤，第10章～第11章は尾崎が担当した。

1974年6月

著者しるす

目 次

1. 結 晶

1.1 結 晶 構 造	1
1.1.1 空間格子と結晶構造	1
1.1.2 ブラベー格子	2
1.1.3 ミラーの指数	3
1.1.4 結晶構造の実例	4
1.2 結晶の弾性振動	5
1.2.1 結 合 力	6
1.2.2 1次元結晶の振動	6
1.2.3 赤外線吸収	9
1.3 格子欠陥とその拡散	11
1.3.1 格子欠陥の種類	11
1.3.2 点 欠 陥	14
1.3.3 イオン電導	16
1.4 合 金 過 程	18
1.5 エピタキシャル成長	21

2. 固体中の電子のエネルギー状態

2.1 シュレーディンガー方程式	22
2.2 ポテンシャルの場における電子	25
2.2.1 井戸形ポテンシャルの場における電子	27
2.2.2 状 態 密 度	30
2.2.3 周期場における電子	31
2.3 電 子 分 布	36

2.3.1 フェルミ・ディラックの分布則	37
2.3.2 フェルミ準位の決定	39
2.4 電界および磁界の効果	45
2.4.1 固体中の電子の速度と有効質量	45
2.4.2 電界による電流および物質の分類	47
2.4.3 電界と磁界が同時に加えられた場合	49
2.5 電気伝導現象	51
2.5.1 キャリアの流れ	51
2.5.2 高電界における電気伝導	53
2.5.3 不純物伝導	53

3. バルク効果素子

3.1 エネルギー帯の性質を直接利用するもの	56
3.1.1 プロホ振動子	56
3.1.2 超格子負性抵抗素子	57
3.1.3 NEMAG	62
3.1.4 ガン・ダイオード	64
3.2 熱効果によるキャリア数の変化を利用するもの	67
3.2.1 サーミスタとポジスタ	67
3.2.2 熱電素子	68
3.3 光の吸収と副射を利用するもの	69
3.3.1 光導電素子	69
3.3.2 発光素子	70
3.3.3 光増幅素子	71

4. ダイオード

4.1 半導体の表面現象	74
4.1.1 半導体の表面単位	75
4.1.2 表面の電界効果	77

4.1.3 金属と半導体の接触	79
4.1.4 ショットキー	85
4.1.5 ペーテの整流理論	87
4.1.6 オーミック接触	90
4.2 不均一な半導体と接合	95
4.2.1 pn 接合の構造	96
4.2.2 熱平衡状態の pn 接合	99
4.3 空乏層の静電容量	101
4.3.1 階段接合	101
4.3.2 傾斜接合	104
4.4 C-V 法によるキャリア分布の測定	106
4.5 pn 接合の整流理論	107
4.5.1 熱平衡状態のキャリア密度と分布	108
4.5.2 拡散電位 V_d の値	109
4.5.3 順方向電流, 逆方向電流	111
4.5.4 キャリアの注入と擬フェルミ準位	112
4.5.5 接合領域の電流分布	115

5. 接合の降伏現象

5.1 なだれ降伏	118
5.2 ジェナー降伏	121
5.3 熱的不安定性に起因する降伏	123

6. pn 接合の動特性

6.1 小振幅動作における特性	124
6.2 大振幅動作における特性	128
6.3 高注入レベルにおける特性	131

7. (バイポーラ) トランジスタ

7.1 トランジスタの構造と原理	134
7.2 トランジスタの特性	138
7.3 拡散トランジスタ	142
7.4 ドリフト・トランジスタ	147
7.5 ドリフト電界の効果	150
7.6 高レベル注入の効果	152
7.7 接合トランジスタの過渡現象	155
7.7.1 過渡時間の定義	155
7.7.2 遮断領域と飽和領域	157
7.7.3 過渡時間の計算	160

8. (ユニポーラ) トランジスタ

8.1 J-FET の構造と動作	163
8.2 J-FET の静特性	166
8.3 J-FET の動特性と等価回	170
8.4 MOS-FET 路の構造と動作	171
8.4.1 チャネル中の電子移動度	171
8.4.2 MOS-FET の静特性	173
8.5 空乏層内の空間電荷の影響	175
8.6 基板の不純物濃度と界面準位の影響	177
8.7 飽和領域の特性と MOS-FET の種類	179

9. pn 接合を用いたその他のデバイス

9.1 トンネル・ダイオード	181
9.1.1 縮退半導体の帯構造	181
9.1.2 電流-電圧特性の定性的考察	182

9.1.3 トンネル電流の定量的考察	184
9.1.4 トンネル・ダイオードと半導体のエネルギー構造	185
9.2 ダブルベース・ダイオード	186
9.2.1 動作原理と等価回路	187
9.2.2 エミッタ電流-電圧特性	188
9.3 サイリスタ	190
9.3.1 構造	190
9.3.2 電流-電圧特性	191
9.3.3 α の電流依存性	193

10. 強誘電体とその応用

10.1 結晶の分類	195
10.2 物性テンソルと対称性	198
10.2.1 2階テンソル	199
10.2.2 3階テンソル	200
10.2.3 4階テンソル	202
10.3 分子分極と誘電率	202
10.4 強誘電相転移の現象論	203
10.5 永久双極子系の自発分極	207
10.6 各種強誘電結晶	209
10.7 セラミック強誘電体	215
10.8 強誘電体の応用	216

11. 強磁性とその応用

11.1 強磁性体	219
11.1.1 原子の磁気モーメント	220
11.1.2 強磁性体	222
11.1.3 反強磁性体	227
11.1.4 フェリ磁性体	228

11.2 高逆磁率材料	231
11.2.1 金属合金材料	232
11.2.2 フェライト材料	235
11.3 永久磁石材料	236
11.3.1 アルニコ磁石	238
11.3.2 フェライト磁石	239
11.3.3 ロードックス磁石	240
11.4 半硬質磁性材料	240
11.5 マイクロ波用フェライト	241
11.6 磁気バブル材料	244
索 引	1~6

1. 結 晶

第 1, 第 2 章は本書で問題にする固体素子を理解するに必要な物性の知識を与えることを目的にする。この章では固体を形作っている原子の幾何学的な配列, およびその振動について述べたのち, 原子が正規の位置からそれることによって現われる現象とその応用について述べる。

1.1 結 晶 構 造

全く規則性のない原子配列をしている非結晶質(amorphous)もまた最近では物理学および工学的興味からふたたび問題にされはじめているが, やはり単結晶(single crystal)が現在の固体デバイスとしては重要な位置をしめ, 固体中の電子のふるまいを考えるにはまず規則正しい原子配列から出発しなければならない。

1.1.1 空間格子と結晶構造

空間に規則正しく配置された点からなる格子を空間格子(space lattice)といい, その点を格子点(lattice point)という。そしてこの格子点に, 1 個の原子または結晶基(basis)とよばれる一定の並び方をもった原子集団を配置したものを結晶構造という。この例はあとで Si, Ge, GaAs などに関して具体的に示す。

一般に空間格子の格子点の座標 $\mathbf{r}$ は

$$\mathbf{r} = n_1 \mathbf{a} + n_2 \mathbf{b} + n_3 \mathbf{c} \quad (1.1)$$

で与えられる。ここに, n_1, n_2, n_3 は任意の整数で, $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ を基本並進ベクトル(fundamental translation vector)という。また, 図 1.1 に示すような格子点でかこまれた平行六面体を基本セル(primitive cell)といい,

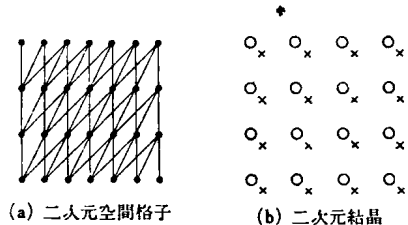


図 1.1

セルあたり1個の格子点が含まれることになる。このことは、8個の格子点がそれぞれそのまわりの八つの平行六面体に共有されていることから、容易に理解されよう。

1.1.2 ブラベー 格子

空間格子は、対称性から分類して14種類の形があり、これをブラベー (Bravais) 格子という。これを7種の結晶系に分けて表1-1に示す。表には必ずしも図1-1のような基本格子ではなく、単位格子の軸と軸角を示した

図1-2(a)は基本格子であるが(b)は基面心 (base-centered) 格子、(c)は体心 (body-centered) 格子、(d)は面心 (face-centered) 格子である。これらの平行六面体はセルあたりそれぞれ1, 2, 2, 4個の格子点をふくみ、(b),(c),(d)の平行六面体を単位セル (unit cell) といい、三つの軸 a, b, c , とその軸角 α, β, γ を格子定数 (lattice constant) という。しかし、この格子定数はたとえば図1-3に示すように面心立方格子の

表 1-1 14 のブラベー格子と7種の結晶系

結 晶 系	格 子 定 数	備 考	NO
三 斜 晶 系 (triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	基 本 格 子	1
単 斜 晶 系 (monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	基 本 格 子	2
		面 心 格 子	3
斜 方 晶 系 (orthorhombic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	基 本 格 子	4
		基 面 心 格 子	5
		体 心 格 子	6
		面 心 格 子	7
正 方 晶 系 (tetragonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	基 本 格 子	8
		体 心 格 子	9
立 方 晶 系 (cubic)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	基 本 格 子	10
		体 心 格 子	11
		面 心 格 子	12
菱 面 体 晶 系 (rhombohedral)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ$ $\neq 90^\circ$	基 本 格 子	13
六 方 晶 系 (hexagonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	基 本 格 子	14

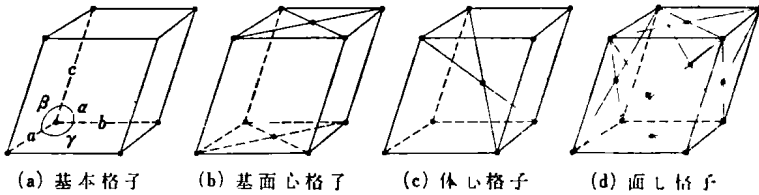


図 1.2

場合にはその基本並進ベクトルとは異なり、また単位セルの大きさは基本セルの4倍になっていることは注意しなければならない (図 1.3 参照)

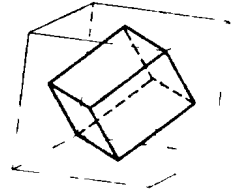


図 1.3 単位格子と超格子 (supercell) の関係

1.1.3 ミラーの指数

結晶面や結晶の方向を指定するには普通ミラー (Miller) の指数を用いる。

三次元結晶で結晶面を指定するには図 1.4 に示すように、二つの軸 (111) の一直線上、ない交点 n_1a, n_2b, n_3c を指定すればよいのであるが、これらの n_1, n_2, n_3 の逆数をと $1/n_1, 1/n_2, 1/n_3$ を通分してそれらの最大公約数で割ったものを h, k, l とすれば

$$\frac{1}{n_1} : \frac{1}{n_2} : \frac{1}{n_3} = h : k : l \quad (1.2)$$

となり、これをミラーの指数という。そして (hkl) にこの面を、また $\{hkl\}$ によってこれに等価な面を表わす。

図 1.5 に (111) 面および (110) 面を示すが、この二つの側面はそれぞれ (100) , (010) , $(\bar{1}00)$, $(0\bar{1}0)$, $(00\bar{1})$ 面である。そしてこれら等価な面をまとめて $\{100\}$ で表わすことができる。ここに $\bar{1}$ は -1 である。

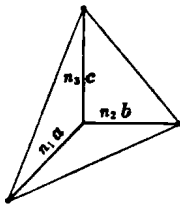
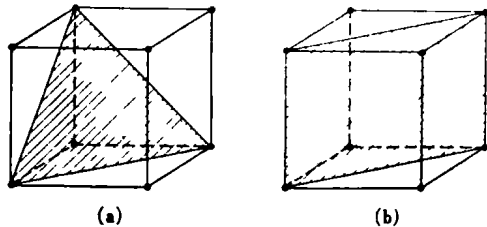


図 1.4 3 軸と面の交点

図 1.5 (a) (111) 面および (b) (110) 面

結晶中のある直線の方法は、その線分の3主軸への斜影の比と同じ比を持った最小の整数 u, v, w により $[uvw]$ で指定する。また、これと等価な方向の組全体を $\langle uvw \rangle$ で表わす。このようにすると、立方晶系では (hkl) 面に垂直な方向は $[hkl]$ 方向になる。

また、単位セル中の格子点の位置は、 a, b, c を単位として測った格子座標で示される。たとえば、体心の位置は $1/2, 1/2, 1/2$ である。

1.1.4 結晶構造の実例

われわれになじみの深い物質の結晶構造のうち、ここではダイヤモンド構造、閃亜鉛鉱 (Zincblend) 構造および最密構造を実例としてあげておこう。

ダイヤモンド構造

図1-6に実線で示したような面心立方格子を、各主軸の方向に $1/4, 1/4, 1/4$ だけずらすと、破線で示した面心立方格子が得られる。この二つの格子の格子点、たとえばAおよびBに原子を配置したものがダイヤモンド構造である。図中一点鎖線はある原子の4個の最近接原子との距離を示している。第IV族の炭素、Si、Ge、灰色錫などがこの構造を持っている。

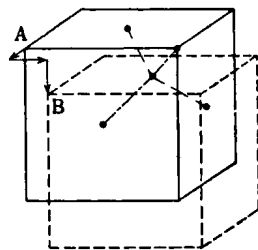


図 1-6 ダイヤモンド構造

閃亜鉛鉱構造

ダイヤモンド構造のAおよびBの属する面心立方格子にそれぞれ異種の原子を配置したものが閃亜鉛鉱構造で、たとえば ZnS では、Aの位置に Zn が、Bの位置に S が配置されている。 CuF , $CuCl$, AgI , $ZnSe$, $InSb$, SiC などがこの構造を持っている。

最密構造 (close-packed structure)

同種の球を組み合わせて体積を最小にする構造で、面心立方および六方最密構造がある。図1-7に示すように、下の方から積んでゆくと第1層の並べ方は1通りしかないがその上

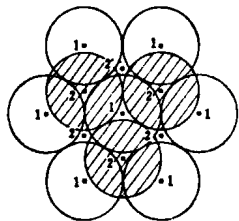


図 1-7 最密構造

に第2層をならべるやり方は2通りあるように見える。すなわち、図で2という点に2層をおくと $2'$ という点にはおけない。しかし、2をとっても $2'$ をとっても構造は同じである。それ故第2層として2の点を選ぶと第3層のならべ方は2通りある。すなわち、 $2'$ の上におくかまたは1、すなわち第1層の真上におくかである。この場合には、このうちどちらに第3層を置くかによって構造が違ってくる。

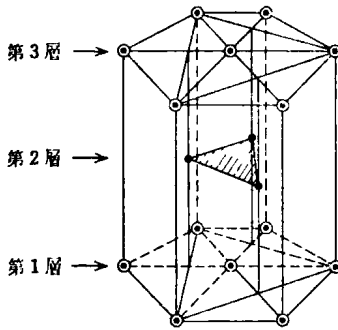


図 1-8 六方最密構造

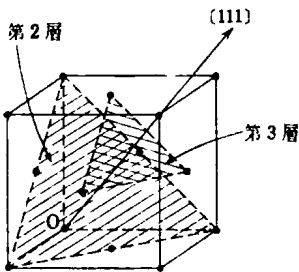


図 1-9 面心立方最密構造

表 1 2 室温における元素の結晶構造

元 素	結晶構造	元 素	結晶構造
Al	fcc	Mo	bcc
Ba	bcc	Ni	fcc
Be	hcp	Nb	bcc
Cd	hcp	Pt	fcc
C	diamond	Si	diamond
Cs	bcc	Ag	fcc
Co	hcp	Na	bcc
Cu	fcc	Sr	fcc
Cd	hcp	Ta	bcc
Ge	diamond	Sn(gray)	diamond
Au	fcc	Ti	hcp
Fe	bcc	W	bcc
Pb	fcc	V	bcc
Li	bcc	Zn	hcp
Mg	hcp		

第3層を第1層の真上においたものは六方最密構造になる。図18に示すように、3層は1層の真上にあり、2層は三つの基

本セル中、 $2/3$, $1/3$, $1/2$ の位置にある三つの球からなっている。

また、第3層が2'の上に来るものは、図19に示すように面心立方となる。[111]方向に積みあげるとして第1層は原点Oをふくむ面で、2層と3層はハッチした面である。これらの構造を持つ結晶は、6個の最近接原子を持っていて、原子間距離は小さく緻密である。多くの金属がこの構造をとる。

最後にいくつかの元素の結晶構造を表12に示しておこう。

1.2 結晶の弾性振動

結晶中の弾性波の伝搬は、波長が長ければ均質な媒質中の伝搬として取り扱うことができるが、波長が格子定数の程度になると、X線のブラッグ反射と同じような反射が起こり、結晶を構成する一つ一つの原子の振動を考えなくてはならなくなる。この現象は、後に述べる電子のエネルギーバンド構造を理解するのに役立つので、単純な一次元結晶に関

する考察によって説明し、音子 (phonon) の概念の導入や赤外線吸収などの他は、比熱など重要ではあるが熱的性質に関する記述はここでは省略する

1.2.1 結 合 力

結晶を構成している原子は、現象論的にいうならばクーロン力、交換力、重なり力、ファンデアワールス力などによって結ばれ、安定な構造を保っている。NaCl などのように、クーロン力が主として起しているものをイオン結晶といい、Si や Ge のように、各原子がたがいに電子を共有することによって現われる結合力、すなわち交換力が主として起しているものを共有結合結晶という。

しかし、ハロゲン化アルカリでさえ、隣り合った正負イオンの原子が重なり合って、最外殻にある電子は正および負のイオンにある程度共有され、また閃亜鉛鉱形の InSb や ZnS などでも、イオン結合の可能性が全くないとはいえない。

このような引力のほかに、二つの原子が接近して距離が小さくなるに従って急激に増大

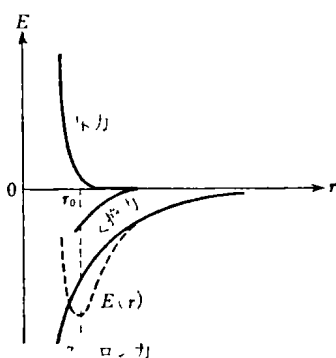


図 1-10 原子のポテンシャルエネルギー

する斥力がある。この存在は、固体を圧縮するときには外圧を必要とすることから明らかである。これは、原子間距離を r とすると e^{-r} に比例し、 r がある程度大きくなると 0 になると考えてきしつかえない。結局、原子のポテンシャルエネルギー $E(r)$ は、

$$E(r) = -\alpha/r^n + \beta e^{-r} \quad (1.3)$$

となり、第 1 項は引力、第 2 項は斥力である。これを図示すると図 1-10 のようになり、 $r=r_0$ でエネルギーが最小となり、結晶は r_0 の原子間距離で安定に存在することになる。

1.2.2 1次元結晶の振動

3次元空間中に無限に広がっている結晶の振動を考えるかわりに、原子が一線上に配列されていてその両端が結ばれてリング状になり、これらの原子がバネで結合しているものを考える。そして、その振動の有様を見るために、図 1-11 に示すように、バネで連結された 6 個の球を考える。

このような球の運動は実際には複雑であるが、この円を直線で近似し、各球に働く力が