

NO.1

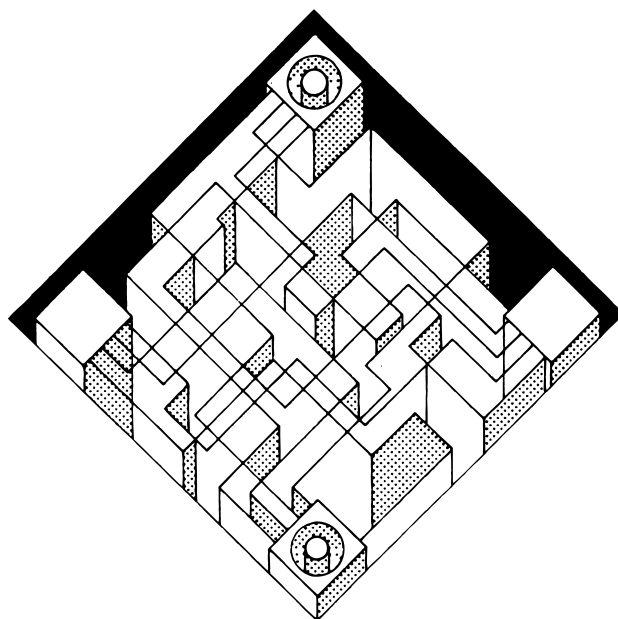
# 半導体及び半導体デバイスの基礎

監修／東京理科大学 理工学部 教授

生駒 英明

執筆／龍谷大学 理工学部 電子情報学科 教授

行本 善則



コガク

# 目次

学習のねらい .....	1
<b>第1週 半導体の基礎</b> .....	3
第1週学習のポイント .....	3
1.1 半導体の歴史 .....	4
1.2 半導体とは .....	6
1.2.1 原子内の電子 .....	6
1.2.2 電子配置と周期律表 .....	9
1.2.3 結晶内の電子状態 .....	10
1.2.4 半導体の結晶構造 .....	12
1.2.5 真性半導体 .....	15
1.2.6 不純物半導体 .....	17
1.3 半導体の電気伝導 .....	20
1.3.1 半導体中のキャリア濃度 .....	20
1.3.2 導電率と移動度 .....	21
1.3.3 キャリヤ濃度と移動度の温度変化 .....	23
1.3.4 キャリヤの発生と再結合 .....	24
1.3.5 電流の流れ方 .....	26
第1週のまとめと練習問題 .....	29
<b>第2週 半導体デバイスの基礎</b> .....	31
第2週学習のポイント .....	31
2.1 半導体デバイスの歴史 .....	32
2.2 pn接合 .....	35
2.2.1 熱平衡状態のキャリア分布と電位分布 .....	35
2.2.2 電流－電圧特性 .....	38
2.2.3 スイッチング特性 .....	42
2.3 ショットキー障壁 .....	44
2.3.1 ショットキー接合の電流の流れ方 .....	44
2.3.2 オーミック・コンタクトの条件 .....	46
2.4 バイポーラ・トランジスタ .....	48

2.4.1	バイポーラ・トランジスタの構造	48
2.4.2	バイポーラ・トランジスタの増幅回路	51
2.5	MOS電界効果トランジスタ	53
2.5.1	MOS構造のエネルギーバンド	53
2.5.2	MOS電界効果トランジスタの動作	56
2.5.3	MOS電界効果トランジスタのスケーリング則	60
	第2週のまとめと練習問題	61

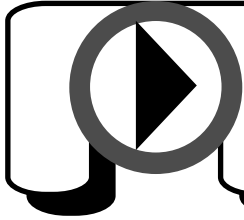
### **第3週 集積回路 (IC)** ..... 63

	第3週学習のポイント	63
3.1	IC(Integrated Circuits)化の特徴	64
3.1.1	ICとは	64
3.1.2	ICの発展の歴史	65
3.2	ICの種類	67
3.2.1	ICの分類	67
3.2.2	バイポーラIC	67
3.2.3	MOSIC	70
3.2.4	BiCMOS型IC	74
3.3	製造プロセスフロー	76
3.3.1	基板工程の製造フロー	76
3.3.2	配線工程の製造フロー	80
3.4	集積回路設計の基礎	82
3.4.1	IC設計手法の変遷	82
3.4.2	論理関数の表現法と簡単化	84
3.4.3	FPGA(Field Programmable Gate Array)	85
3.5	基本的な汎用IC回路	87
3.5.1	基本ゲート回路の例	87
3.5.2	マイクロプロセッサ	88
3.5.3	デジタル信号処理プロセッサ	89
	第3週のまとめと練習問題	91

### **第4週 半導体デバイスにおける新技術** ..... 93

	第4週学習のポイント	93
4.1	SOI基板を用いたMOSFETデバイス	94
4.1.1	SOI基板の特徴	94

4.1.2 SOI型MOSFET .....	97
4.2 DRAMとSRAMにおける新技術の導入 .....	98
4.2.1 DRAMセル構造と動作機構 .....	98
4.2.2 SRAMセル構造と動作原理 .....	101
4.3 不揮発性メモリ .....	103
4.3.1 EPROM .....	103
4.3.2 EEPROM .....	106
4.3.3 フラッシュメモリ .....	110
4.4 3次元構造 .....	114
4.5 バイポーラ・トランジスタにおける新技術 .....	115
4.5.1 自己整合型トランジスタ .....	115
4.5.2 ヘテロバイポーラ・トランジスタ .....	116
4.6 System On a Chip(SOC) .....	117
第4週のまとめと練習問題 .....	118
STEP UP .....	119
参考文献 .....	123
練習問題の解答 .....	126
索引 .....	132



# 半導体の基礎

## 第1週のポイント

ここでは、まず半導体の歴史を学び、どのようにして現在まで半導体技術が発展してきたかの概観を得る。原子内の電子の動きに対する考察から、固体中ではエネルギーバンドを形成していること、半導体の位置づけ、半導体中での電子や正孔の挙動などが学習のポイントである。

## 1.1 半導体の歴史

19世紀や20世紀の前半までの、半導体材料およびその利用に関する研究・開発について簡単に紹介する。また第1週で学ぶ原子の量子論に関する発展の過程についても一部を年代ごとに紹介する。

半導体に関する研究としては、1839年にファラデーが電極ではさんだ硫化銀 $\text{Ag}_2\text{S}$ にランプを当て温度を上げると伝導性が急速に増加し、冷却するとその効果は逆になることを見付けたのが最初である。1869年、メンデレーエフは周期律表を発見し、 $\text{Ge}$ の存在を予言した。1873年にスマスは $\text{Se}$ に光を当てると電気抵抗が減少する内部光電効果を発見した。この性質は金属にはなく、絶縁体・半導体でこの効果が著しいことや、単色光ではある波長より短い光によって起こることなども確認している。1876年に、アダムスとデイは $\text{Se}$ と金属間に光電池現象と整流現象があることを発見した。これを受けて、1883年フリッツは $\text{Se}$ を用いた面接触型の整流器を作製した。

1885年、バルマーが水素原子スペクトルの規則的な系列を発見した。1897年にトムソンは陰極線の粒子性と電子の発見をした。1900年にプランクは、物体から出る輻射エネルギーは微小単位素量の整数倍であることを提唱した量子仮説を発表した。1903～1904年にレナードと長岡半太郎は、中心に質量の大きい核とその周りを電子が回る原子模型を提案した。

1905年、ブラウンは硫化金属表面での局所的な整流性を確認した。ピッカーードは1906年シリコン結晶（鉱石）を用いた鉱石検波器を発明した。1907年にはピアースが半導体として $\text{PbS}$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{Te}$ 、 $\text{Si}$ により整流比100:1の検波器を作製し、その整流特性を調べた。

1913年ボーアは水素原子模型でプランクの量子仮説を導入して、はじめて水素原子からの発光スペクトルを説明することができた。

ベネディクスは1915年に、 $\text{Ge}$  鉱石に $\text{Cu}$ 、 $\text{Pt}$ などの金属針を当てて整

流性を得たが、1925年メリットはGeの整流性を詳しく調べ、光照射の影響を調べたりした。1928年ブレッセルはセレンあるいはセレン化合物による交流整流器を開発した。1929年にはショットキーが整流作用を接触表面層にあることを突き止めた。1931年にはウィルソンが半導体の量子力学による理論を発表した。

それ以後は、1945年にベル研究所でのトランジスタ効果の発見まで、整流器を中心とした研究・開発が行われてきた。

## 1.2 半導体とは

### 1.2.1 原子内の電子



あらゆる物質は原子から構成されており，原子内には負の電荷をもつ電子と正の電荷をもつ原子核があって，それらの電子は電気的なクーロン力で原子核に引きつけられつつ運動をしていることが，今世紀の初めに種々の実験の結果わかってきている。

この運動をニュートンの力学の法則やマクスウェルの電磁気学の法則で表そうとすると，矛盾が起こってしまつて原子内の電子は瞬く間に原子核と衝突してしまうという結果が得られた。この矛盾を解決するために，ボーアは次の仮定を立てて実験結果と一致する結果を得た。水素原子のモデルとして，円の中心に $+q$ の電荷をもつ十分に質量の大きい原子核があり，その周りを負の電荷をもつ電子が円軌道をしているとした(図1.1)。そして円軌道をして運動する電子は，古典力学の粒子のように一定の軌道を描いて

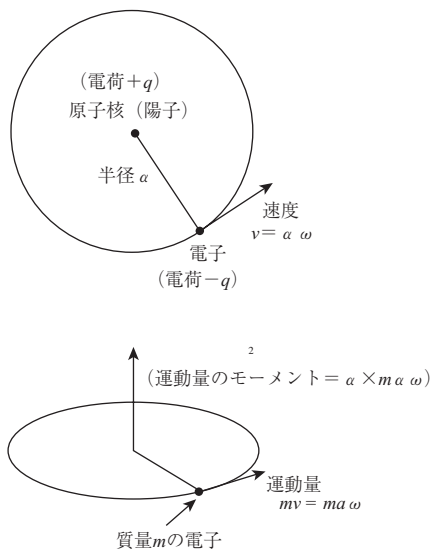


図 1.1 水素原子中の電子の運動のボーア模型



運動するが、以下の仮定に従って運動をするとした。すなわち、

i) 電子は一定の半径を持つ円軌道を描いて運動をする。

ii) 電子がエネルギーを得たり失ったりするのは、軌道半径が異なる軌道に移るときだけであり、それ以外は安定した軌道を運行する。

iii) 電子は、ある特定の円軌道上のみで運動し、その軌道は円周長が電子のもつ波長 $\lambda$ の整数倍のとき安定である。すなわち、

$$2\pi a = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.1)$$

ここで、電子の波長 $\lambda$ は、次の式で与えられる。 $\lambda = h/mv$ 、ここで $m$ と $v$ は、電子のもつ質量と速度であり、 $h$ はプランク定数である。

iv) 電子は、軌道を変えるときのみ光を発生したり吸収したりする。その光の振動数 $\nu$ は、軌道間のエネルギー差 $(E_1 - E_2)/h$ で与えられる。

このような運動に対して、ニュートンの力学で代表される古典力学と異なる新しい法則に支配された力学が必要と考えられ、これを量子力学という。量子力学の特徴は、原子やそれよりも小さい粒子の世界で顕著に現れる。電子の他にも陽子や中性子などの素粒子も粒子の性質と同時に波の性質をもつということが実験の結果わかってきている。また、これらの粒子のもつエネルギーが連続的な値ではなくて、不連続なとびとびの値をとることも特徴の一つである。他に不確定性原理などの特徴もあるが、ここではそのことを考慮しない。

水素原子の原子核は正の電荷 $q$ [C]と質量 $M$ [kg]を持っている。電子は負の電荷 $-q$ [C]と質量 $m$ [kg]を持ち、原子核を中心とする半径 $a$ [m]の円周上を速さ $v$ [m/s]で円軌道をしているとき、電子に働く原子核からのクーロン力と遠心力がつり合うことから、

$$k_0 \frac{q^2}{a^2} = \frac{mv^2}{a} \quad (1.2)$$

が成り立つ。 $k_0$ はクーロン力の係数である。定常状態では(1.1)式が満たされるから、(1.1)、(1.2)式から $v$ を消去すると

$$a = \frac{h^2}{4\pi^2 k_0 m q^2} n^2 \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (1.3)$$

が得られる。(1.3)式は水素原子内の電子の可能な軌道半径 $a$ を示す。これに $h$ 、 $k_0$ 、 $m$ 、 $q$ の値を代入すると、 $n = 1$ のとき