

半導体デバイス工学 講義資料

第2章 半導体の諸性質

(p.6～p.40)

2.半導体の諸性質(1)

2.1 種類

2.1.1 元素半導体と化合物半導体

2.1.2 真性半導体と不純物半導体

2.2 電氣的性質

2.2.1 エネルギー帯構造

2.2.2 固体内の電子と正孔の性質

2.2.3 電子の状態濃度と分布関数

2.2.4 真性半導体と不純物半導体のキャリア濃度

2.半導体の諸性質(2)

2.3 半導体の電気伝導

2.3.1 移動度, ドリフト電流及び抵抗率

2.3.2 ホール効果

2.3.3 拡散電流

2.3.4 再結合による電流

2.3.5 キャリア寿命

2.3.6 拡散方程式

2.4 深い不純物準位と表面準位

2.1.1 元素半導体と化合物半導体(1)

導体 (conductor) : 電気をよく通すもの, 銅やアルミニウム

絶縁体 (insulator) : ほとんど電気を通さないもの, ゴムやセラミック

半導体 (semiconductor) : 導体と絶縁体の中間の性質

抵抗率 (物質固有の性質) で比較 → 「導体 ~ 半導体 ~ 絶縁体」

半導体の抵抗率は 10^{-5} から $10^6 \Omega \cdot m$ まで広い範囲に分布している

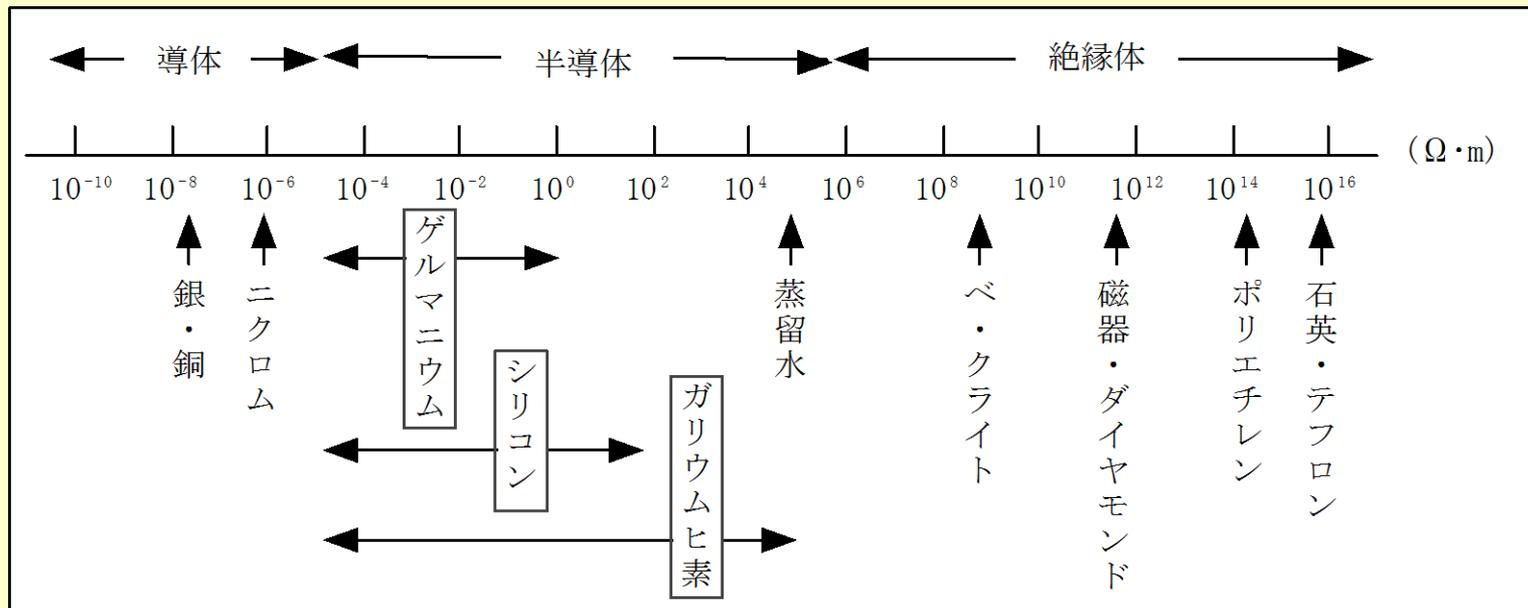


図2-1 物質の抵抗率

2.1.1 元素半導体と化合物半導体(2)

半導体の種類によって抵抗率が異なる

→元素の種類でそれらの結合形態(電子のエネルギー状態)が異なる

同じ半導体であっても、状態によって抵抗率が大きく変化する

- ・半導体の抵抗率は温度の上昇とともに減少
 - ・基板材料と異なるごく微量の不純物元素を半導体に添加することによって、その抵抗率の大きさや性質を制御
- 多種多様な半導体デバイスを作ることができる

元素半導体:元素単体(IV族)で構成された半導体

Si(シリコン), Ge(ゲルマニウム), C(ダイヤモンド)

集積回路の90%以上はSi半導体で、最も一般に使われている

化合物半導体:複数の元素で構成された半導体

III—V族; GaAs(ガリウムヒ素), GaP(ガリウムリン)やInP(インジウムリン)

II—VI族; CdS(硫化カドミウム)やZnS(硫化亜鉛)など

マイクロ波デバイス, 発光・受光デバイス(レーザ, LED, フォトダイオード)

2.1.1 元素半導体と化合物半導体(3)

種類	記号	バンドギャップ° (eV) 室温	結晶構造	エネルギー 帯構造	融点(°C)	主な用途
元素	C	5.47	ダイヤモンド	間接	なし(昇華)	耐環境デバイス(未来型)
	Si	1.11	ダイヤモンド	間接	1420	集積回路, Tr, 高周波Tr
	Ge	0.69	ダイヤモンド	間接	937	赤外線検出器, D
IV-IV	β -SiC	2.23 (3C)	せん亜鉛鋳	間接	なし(昇華)	高周波FET, Tr(近未来型)
	α -SiC	2.93 (6H)	ウルツ鋳	間接	なし(昇華)	大電力・高温用Tr(近未来型)
III-V	GaAs	1.43	せん亜鉛鋳	直接	1237	レーザD, 高周波Tr, 太陽電池
	GaP	2.26	せん亜鉛鋳	間接	1465	発光D(赤)
	GaN	3.39	ウルツ鋳*	直接	なし(昇華)	発光D, レーザD(青紫)
	InP	1.35	せん亜鉛鋳	直接	1062	高温FET
II-VI	CdS	2.42	ウルツ鋳*	直接	1365	光検出器
	ZnS	3.66	ウルツ鋳*	直接	1830	発光D

2.1.2 真性半導体と不純物半導体(1)

元素半導体 (Si, Ge, C) の結晶構造: ダイヤモンド構造

格子定数 $a=0.543\text{nm}$ (Siの場合)

1個の原子と最近接距離 ($\sqrt{3}a/4$) の位置にある4個の原子が正四面体を構成 (図中の白の原子)

4個の原子は四面体の中心にある1個の原子とそれぞれ共有結合で結ばれている。

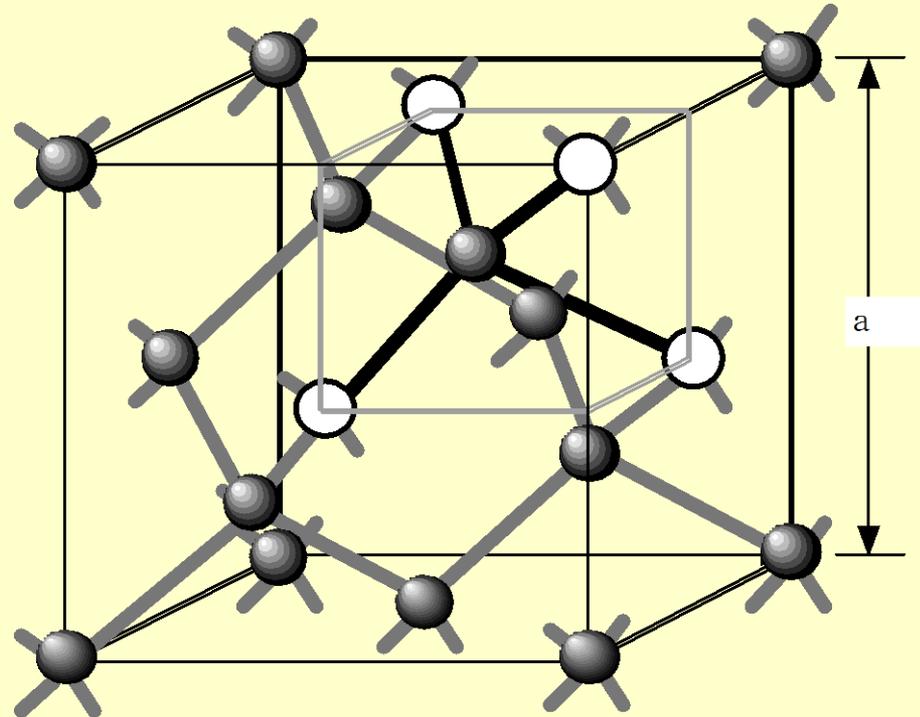


図2-2 Siの結晶構造

2.1.2 真性半導体と不純物半導体(2)

Siには14個の電子(殻電子): K殻;2個, L殻;8個, M殻;4個
最外殻(M殻)の電子は価電子(valence electron)と呼ばれる

Siは1個のSi原子が4本の結合手を持ち, 各々のSi原子が周りの4個のSi原子と電子ペアを作りながら共有結合で結び付いているために非常に安定

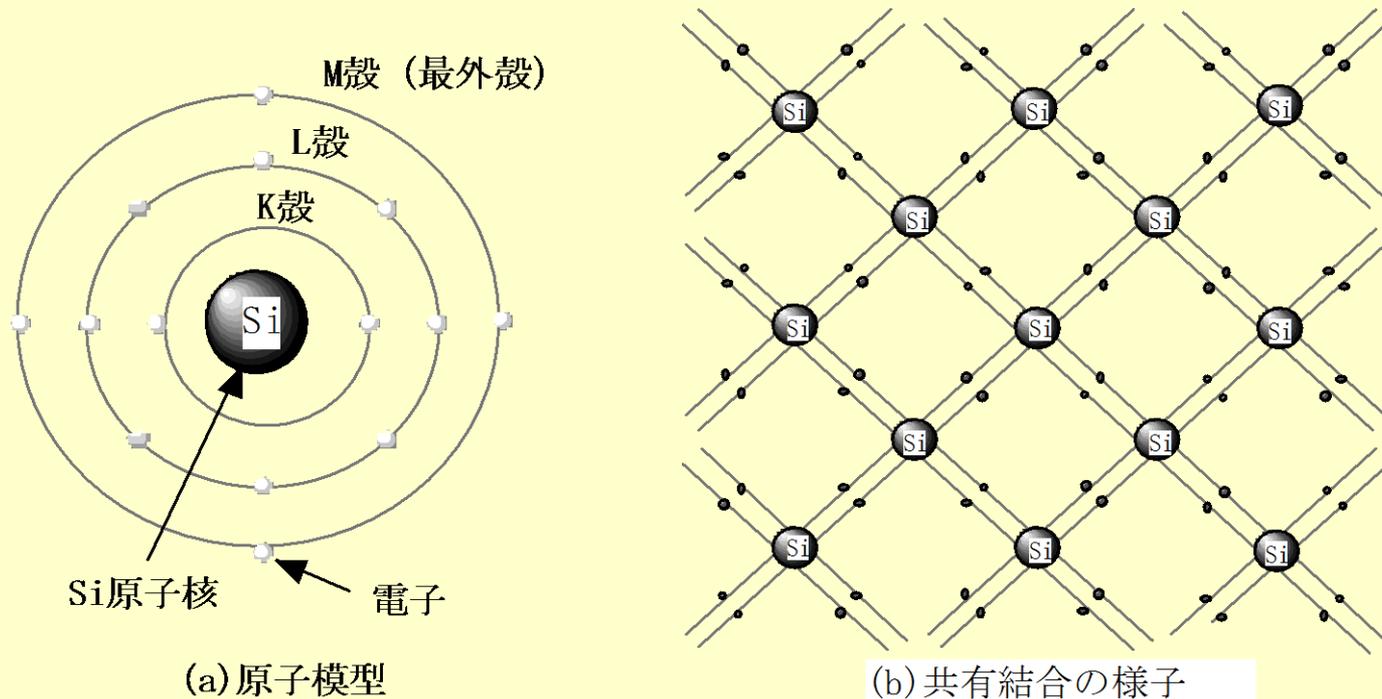


図2-3 Siの原子模型と共有結合の様子

2.1.2 真性半導体と不純物半導体(3)

真性半導体 (intrinsic semiconductor) : 不純物を含まないもの
極低温では電子は原子に拘束された状態にあり抵抗率が大きい

外部から熱や光などがエネルギーとして共有結合を形成している電子に与えられると、一部の電子は拘束されていたM殻から自由に動き回れるようになる。
→ 自由電子 (free electron)

電子が抜けた孔は正の電荷と質量を持つ粒子のように振舞い、その運動が電流に寄与する
→ 正孔 (hole)

真性半導体では電子と正孔は対になって生成(電子-正孔対)

電子と正孔→ キャリア (carrier)

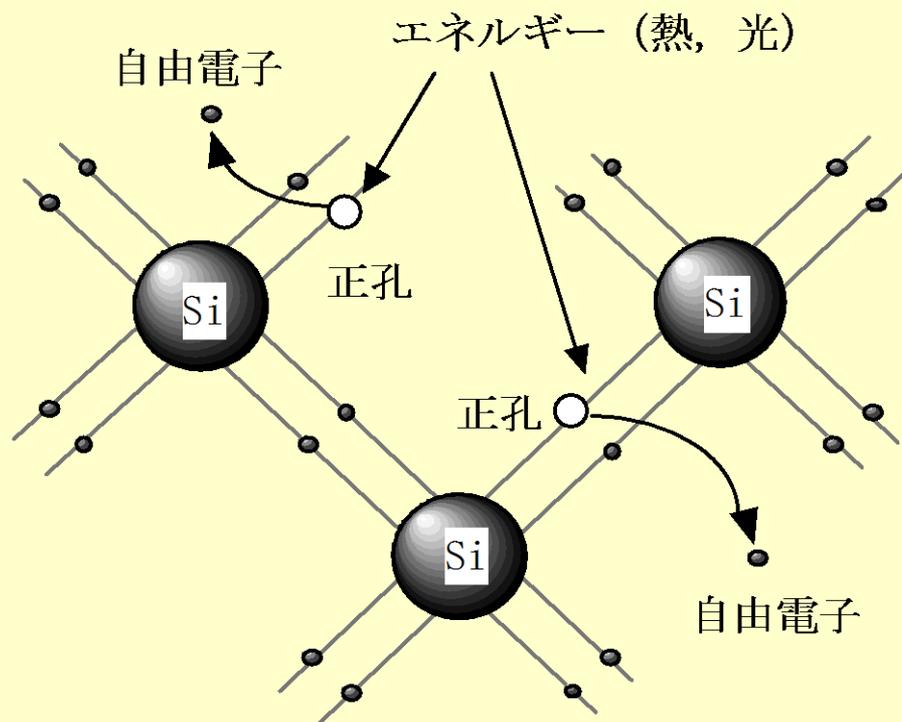


図2-4 電子-正孔対の生成

2.1.2 真性半導体と不純物半導体(4)

真性半導体のキャリア: エネルギーにより励起された電子と正孔のみ

n : 電子濃度 (単位体積当りのキャリア数)

p : 正孔濃度

$$n=p=n_i(T) \quad (2.1)$$

n_i : 真性キャリア濃度

- ・熱平衡状態ではキャリアの発生と消滅の割合が釣り合い, n_i は一定値となる
- ・電子と正孔が出会い消滅: 電子-正孔の再結合過程
- ・真性半導体ではキャリア濃度が温度に対して敏感に変化するので濃度を制御することが難しく, そのままデバイスに利用されることは少ない

真性半導体に不純物を添加 (doping: ドーピング, または単にドーブ)

→ キャリアを新しく作ることができ, 抵抗率を自由に変えることができる

n形半導体 (n-type semiconductor)

電子の濃度が正孔のそれより多くなるように不純物がドーブされた半導体

p形半導体 (p-type semiconductor)

正孔が多くなるように不純物がドーブされた半導体

(a) n形半導体

Si結晶にV族の元素不純物として少量添加； P(リン), As(砒素)など
Pを添加した場合はSiの格子点でSi原子と置換(置換形不純物)

5個の価電子:

4個が隣接するSi原子との共有結合

1個はP⁺イオンとゆるく結合

この電子の結合エネルギーは
十分小さい
→室温で結合を離れる
→自由電子

不純物をドナー(donor)原子または単にドナーと呼ぶ
→添加した原子はイオン化
→ドナーイオン(+)

n形半導体の意味
(キャリアが負電荷; negative)

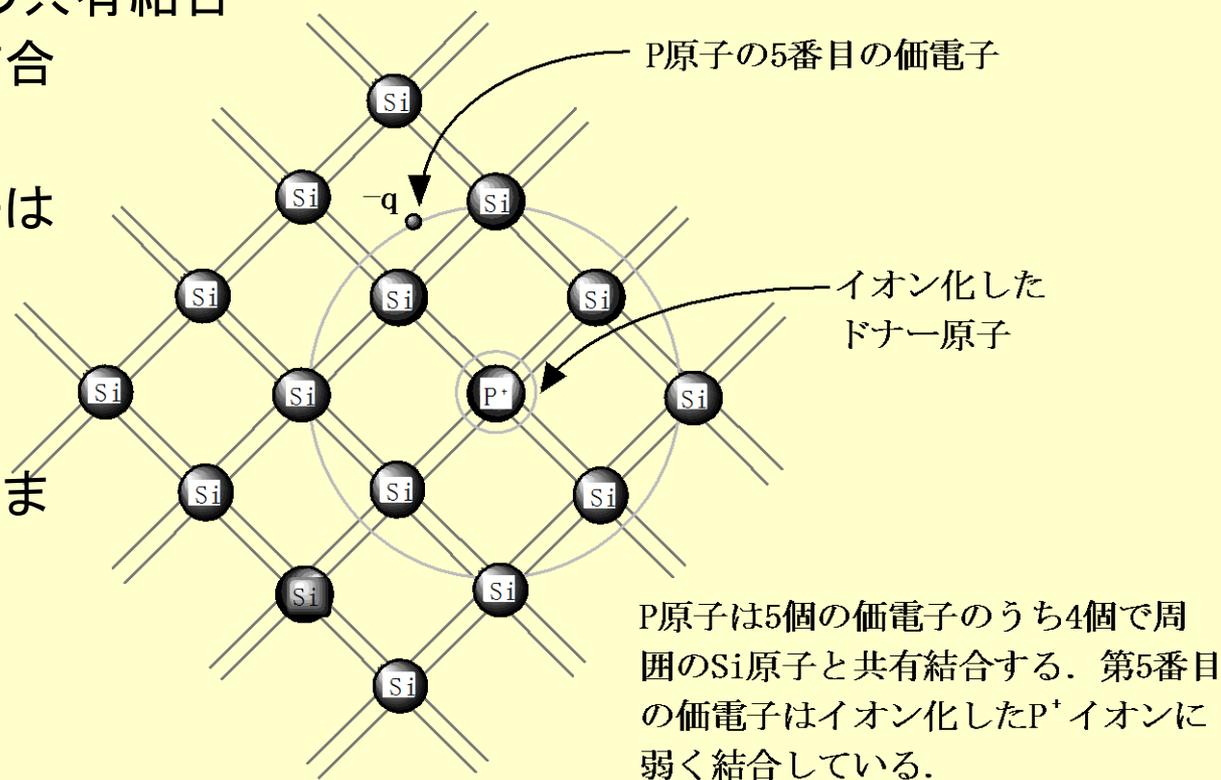
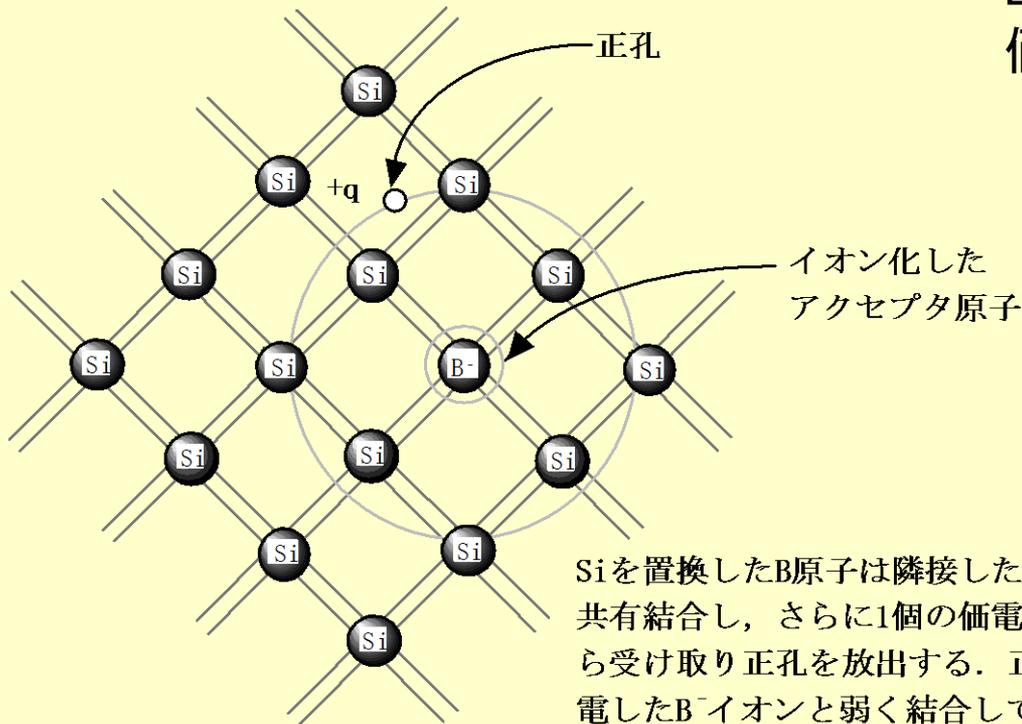


図2-5 n形半導体

(b) p形半導体

Si結晶にⅢ族の元素不純物として少量添加； B(ホウ素)など
Bを添加した場合はSiの格子点でSi原子と置換(置換形不純物)
3個の価電子：隣接するSi原子との共有結合
Siと比べて電子が1個不足



B原子は小さいエネルギーで周囲の
価電子を1個受け取る→正孔を放出

不純物はアクセプタ(acceptor)
→添加した原子はイオン化
→アクセプタイオン(-)

p形半導体の意味
(キャリアが正電荷; positive)

Siを置換したB原子は隣接した3個のSiと
共有結合し、さらに1個の価電子を周囲か
ら受け取り正孔を放出する。正孔は負に帯
電したB⁻イオンと弱く結合している。

図2-6 p形半導体

2.2.1 エネルギー帯構造(1)

半導体の電氣的性質はすべて電子の挙動によって決定される

水素原子(最も簡単な原子構造)の電子が持つエネルギー

- ・電子(負電荷)は, 原子核(正電荷)原子核に拘束されている
- ・電子は粒子性と波動性の両面性を持つ
- ・ド・ブロイの関係満たす物質波が定在波を作る

$$\lambda = h / p$$

λ : 波長, h : プランクの定数, p : 電子の運動量

ボーア(Bohr)の水素モデル【仮定】

- ①電子は原子核のまわりを円軌道運動する.
- ②電子は特定の軌道上でのみ安定な運動を続けることができ, 軌道上の電子の角運動量は常に $h/2\pi$ の整数(n)倍である.
- ③電子の全エネルギーは運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和で与えられる.

2.2.1 エネルギー帯構造(2)

仮定①より,

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad (2.2)$$

仮定②より

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (2.3)$$

m: 電子の質量[kg]

q: 電子の電荷[C]

v: 電子の速度[m/s]

ϵ_0 : 真空の誘電率[F/m]

r: 円軌道の半径[m]

仮定③から
全エネルギー E_n は

$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \quad (2.4)$$

以上より

$$E_n = -\frac{mq^4}{8\epsilon_0^2 h^3 n^2} = -\frac{13.6}{n^2} [eV] \quad (n=1,2,3,\dots) \quad (2.5)$$

n: 量子数

基底状態 (n=1) では, $E_1 = -13.6\text{eV}$ (基底準位)

励起状態 (n=2以上), $E_2 = -3.4\text{eV}$ (n=2, 第1励起準位)

n値により電子のエネルギーは離散的な値となる

電子がとり得る離散的なエネルギー値をエネルギー準位という。

2.2.1 エネルギー帯構造(3)

水素原子が2個の場合

- ・孤立した状態の原子では基底状態(1s準位)のエネルギー準位に1個の電子が配置されている。
- ・原子が近づくと原子間の相互作用が起こり, 電子の自転(スピン)が異なる向きするときエネルギーが低く, 自転が同じ向きするときエネルギーが高くなることから, 2通りのエネルギー準位が現れる。

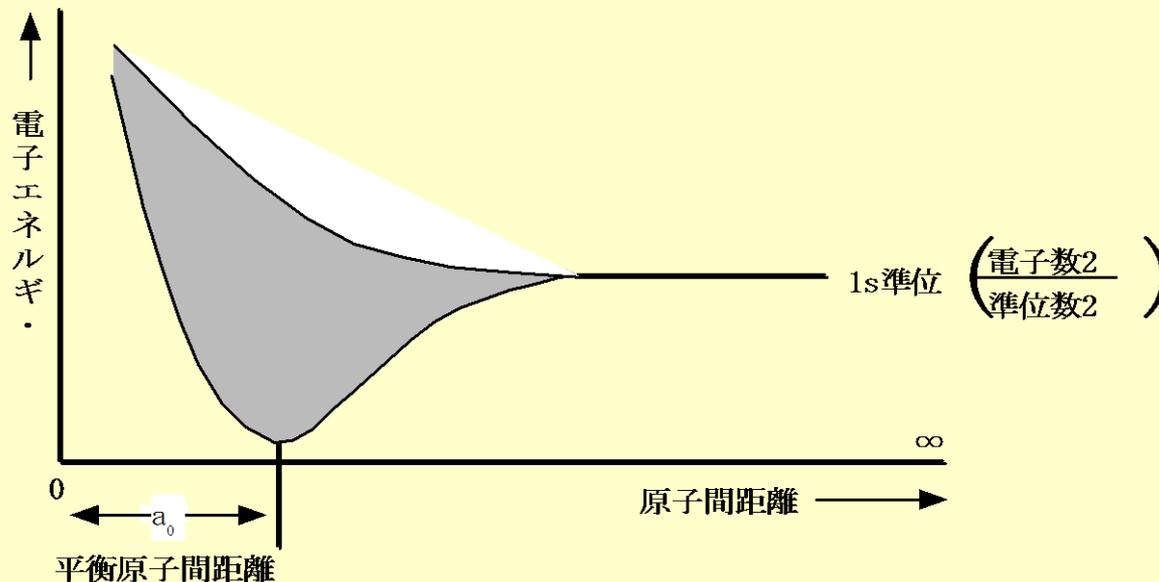


図2-7 水素原子2個のエネルギー準位

2.2.1 エネルギー帯構造(4)

Si結晶中の電子の状態

価電子4個のうち2個の電子が各々2つのエネルギー準位(3s, 3p準位)に配置
Si原子の接近につれて3s, 3p準位は分裂してエネルギー帯(energy band)を形成

上のエネルギー帯:
伝導帯(conduction band)

下のエネルギー帯:
価電子帯(valence band)
または充満帯(filled band)

伝導帯と価電子帯の間:
禁制帯(forbidden band)
このエネルギー幅を禁制帯幅,
エネルギーギャップ
(またはバンドギャップ)という。

低温において価電子は価電子帯内に配置されている。

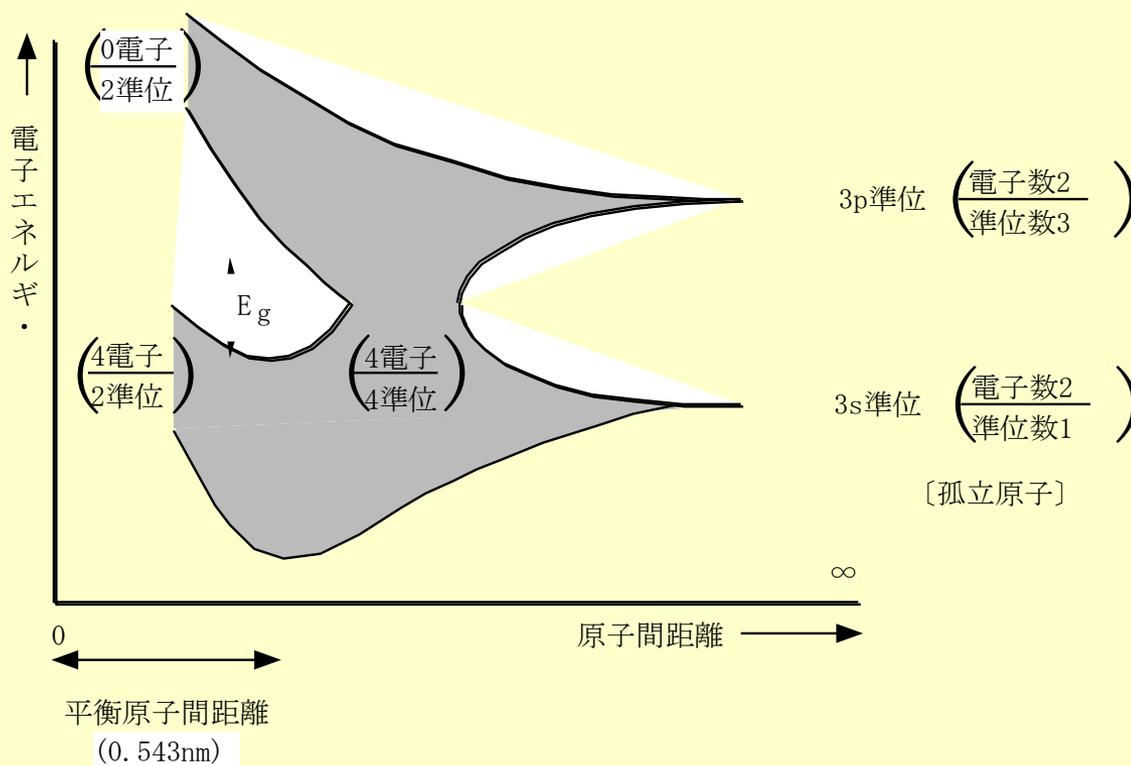


図2-8 Si結晶のエネルギー帯構造 (原子1個あたり)

2.2.1 エネルギー帯構造(5)

物質の導電性はそれぞれの持つエネルギー帯構造によって説明できる

絶縁体: 原子間の結合力が強く, そのために自由電子の数が極端に少ない

半導体: 原子間の結合力が比較的小さく, 熱エネルギーで結合が一部切断

導体: 伝導帯の一部が電子で満たされているか, または価電子帯と重なっているため自由電子が存在する

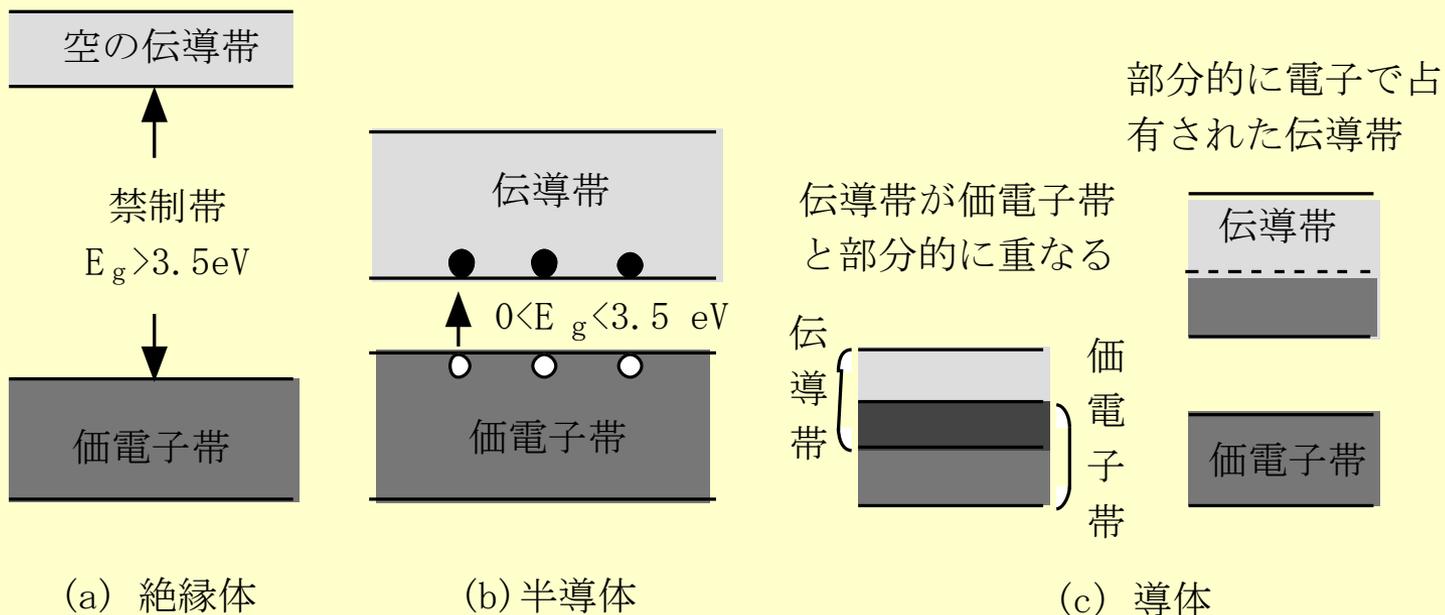


図2-9 絶縁体, 半導体, 導体のエネルギー帯

2.2.2 固体内の電子と正孔の性質

結晶中の電子は、原子による周期的ポテンシャルにより外乱を受ける

→電子は真空中とは異なる加速度運動をする

結晶中の電子は静止質量と異なる質量を持つと考える

→電子の有効質量 m^* (effective mass)と定義

→結晶中の電子も実効的に質量 m_n^* の電子として考えることができる

Si中の電子の有効質量: $m_n^* = 0.33m_0$

正孔の有効質量: $m_p^* = 0.52m_0$

→静止質量(m_0)より小さい

- ・エネルギー帯図: 電子のエネルギーは上向きに増加, 正孔のエネルギーは下向きに増加
- ・価電子帯中の電子が抜けた跡が正孔
- ・価電子帯の低いエネルギー準位に正孔が作られた場合, この準位より上の電子が移動して空の準位を占める
- ・電子と正孔はよりエネルギーの小さい状態に変化して安定となる

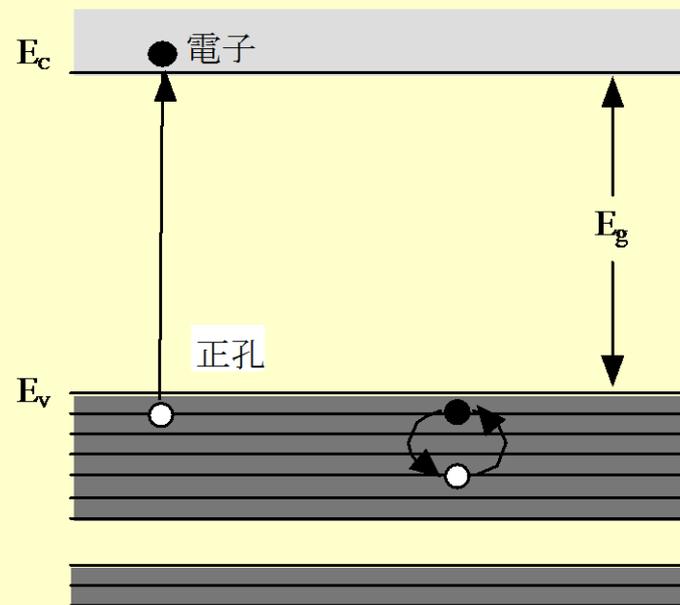


図2-10 正孔発生の様子

2.2.3 電子の状態密度と分布関数 (1)

半導体デバイスの動作解析のためには、キャリア濃度を知る必要がある

伝導帯下端のエネルギーを E_C 、価電子帯上端のエネルギーを E_V とすると
伝導帯と価電子帯の状態密度はそれぞれ次式で表されることが知られている。

$$g_c(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} \quad (E > E_C)$$
$$g_v(E) = 4\pi \left(\frac{2m_p^*}{h^2} \right)^{3/2} (E_V - E)^{1/2} \quad (E < E_V)$$

(2.6)

電子や正孔の状態密度は伝導帯と価電子帯中に一様に分布しているのではなく、電子や正孔の持つエネルギーの関数として変化することがわかる。

状態密度に電子や正孔の存在確率をかけたものが実際の電子、正孔濃度である。

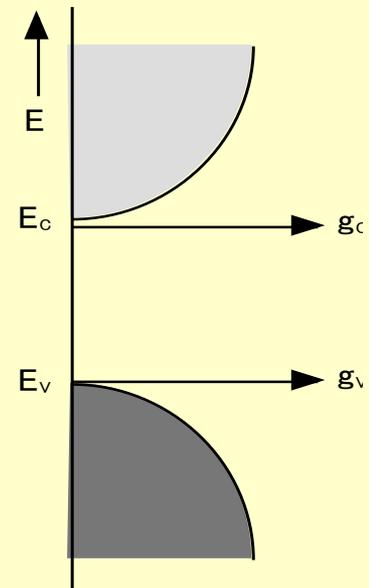


図2-11 伝導帯と価電子帯の状態密度

2.2.3 電子の状態密度と分布関数(2)

固体中の電子はお互いが区別できず、

1つの量子状態には1個しか入れない(パウリ(Pauli)の排他律)

この場合、電子の持つエネルギーはフェルミ・ディラックの分布関数

(Fermi-Dirac distribution function)(または、簡単にフェルミ分布関数)に従う

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (2.7)$$

k: ボルツマン(Boltzmann)定数 T: 絶対温度[K]

E_F : フェルミ準位(フェルミエネルギー)

$$E = E_F \rightarrow f(E) = 1/2$$

$$T = 0K \rightarrow E < E_F \text{の領域で } f(E) = 1$$

$$E > E_F \text{の領域で } f(E) = 0$$

$T > 0K \rightarrow E_F$ より大きいエネルギー準位

でも電子が占有する確率

E_F より小さいエネルギー準位に電子が存在

しない確率(1-f(E))がある

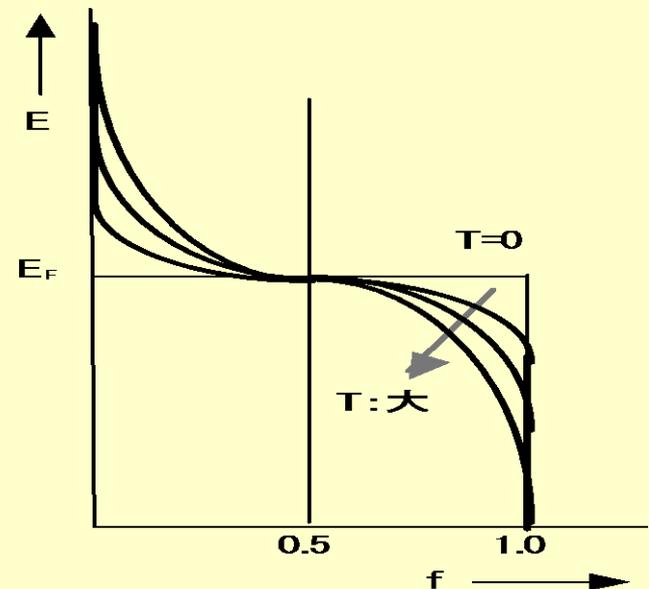


図2-12 フェルミ・ディラックの分布関数

2.2.4 真性半導体と不純物半導体のキャリア濃度(1)

伝導帯のエネルギー E と $(E + dE)$ の間に存在する電子の濃度 n_0 は、伝導帯の状態濃度 $g_c(E) dE$ と分布関数 $f(E)$ との積で表される。

$$n_0 = \int_{E_C}^{\infty} g_c(E) f(E) dE \quad (2.8) \quad \text{計算すると,}$$

$$n_0 = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad \text{ただし} \quad N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \quad (2.10)$$

N_C は伝導帯の有効状態密度と呼ばれる。より詳しい解析によれば、室温(300K)における N_C は $2.8 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ となる

同様に、価電子帯の正孔濃度 p_0 は

$$p_0 = \int_{-\infty}^{E_V} g_v(E) \{1 - f(E)\} dE \quad (2.11) \quad \text{より}$$

$$p_0 = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad \text{ただし} \quad N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2}\right)^{3/2} \quad (2.12)$$

N_V は価電子帯の有効状態密度、室温で N_V の計算値は $1.15 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ である

2.2.4 真性半導体と不純物半導体のキャリア濃度(2)

いま, n_0 と p_0 の積をとると,

$$\begin{aligned}n_0 p_0 &= N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{\kappa T}\right) \cdot N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{\kappa T}\right) \\&= N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{\kappa T}\right) \\&= 4 \left(\frac{2\pi\kappa T}{h^2}\right)^3 (m_n^* m_p^*)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{\kappa T}\right) \quad (2.13)\end{aligned}$$

ここで $E_g = E_C - E_V$, すなわちバンドギャップである.

キャリア濃度の積は半導体が決まれば温度 T のみの関数となることがわかる.

この式は真性, n形, p形半導体によらず成り立つ.

(a) 真性半導体 (1)

真性半導体では $n=p=n_i$ であるから、電子濃度と正孔濃度の積は、

$$n p = n_i^2 \quad (2.14)$$

この関係式は熱平衡状態における電子と正孔の再結合 (np に比例) と電子-正孔対の熱生成 (n_i^2 に比例) が等しいことを意味している

真性半導体のキャリア濃度 n_i は式(2.13)から、

$$n_i(T) = 2 \left(\frac{2 \pi \kappa T}{h^2} \right)^{3/2} (m_n^* m_p^*)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2 \kappa T}\right) \quad (2.15)$$

すなわち、 n_i は温度 T の関数であり、 $E_g/2$ の活性化エネルギーをもつ。
Siの室温(300K)における真性キャリア濃度は約 $2 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ と計算でき、金属($\sim 10^{28} \text{ m}^{-3}$)に比べて極めて少なく、電流はほとんど流れない。

(a) 真性半導体 (2)

真性半導体の E_F は式(2.10)と式(2.12)が等しいとおいて求められる

$$E_F = E_i = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{\kappa T}{2} \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3\kappa T}{4} \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right) \quad (2.16)$$

特別な高温でない限り真性半導体の E_F は禁制帯のほぼ中央にある
 また $m_p^* > m_n^*$ なので、 E_F は温度の上昇と共に伝導帯側にシフトする

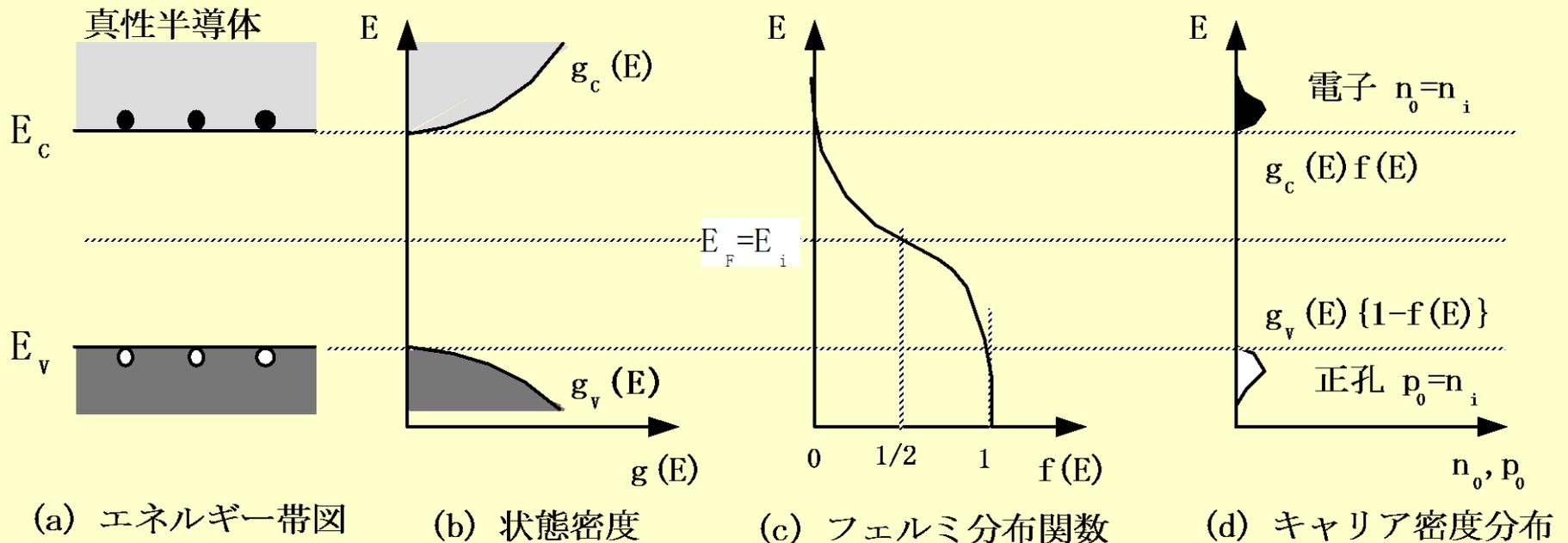


図2-13 真性半導体のエネルギー帯図，状態密度，フェルミ分布関数及びキャリア密度分布

(b) n形半導体

- ・ドナー不純物は伝導帯の下にドナー準位 (donor level) E_D をつくり, イオン化エネルギー ($E_C - E_D$) が与えられると電子を1個放出して正イオンとなる
- ・ $E_C - E_D$: 約0.032 eV, 300Kにおける熱エネルギーは約0.026 eV
- ・熱エネルギーによってドナー準位の電子はほとんど伝導帯に移る
- ・熱的な電子-正孔対発生は通常無視できるほど少ない

以上より, ドナー濃度 (N_d) と電子濃度 (n_0) は,

$$n_0 \cong N_d \quad (2.17)$$

E_F は, 式 (2.10) を N_d に等しいとおいて求められ,

$$E_F = E_C - \kappa T \ln \left(\frac{N_C}{N_d} \right) \quad (2.18)$$

温度の上昇により E_F はほぼ直線的に減少する
n形半導体においても $np = n_i^2$ が成り立つので

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} \cong \frac{n_i^2}{N_d} \quad (2.19)$$

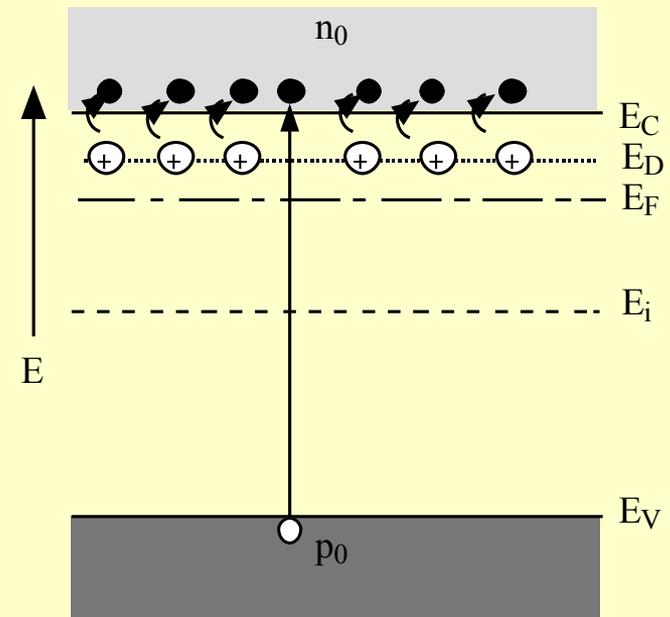


図2-14 n形半導体のエネルギー帯

(c) p形半導体

E_A はアクセプタ準位 (acceptor level)を示している. 室温付近ではアクセプタはほとんどイオン化して正孔を作っているので, 熱的に発生した電子-正孔対はアクセプタ濃度(N_a)に比べて無視できる.

以下, 正孔濃度と電子濃度はn形半導体の場合と同様に,

$$p_o \cong N_a \quad (2.20)$$

$$n_o \cong \frac{n_i^2}{N_a} \quad (2.21)$$

E_F は, 式(2.12)を N_a に等しいとおいて求められ,

$$E_F = E_v + \kappa T \ln\left(\frac{N_v}{N_a}\right) \quad (2.22)$$

温度の上昇により E_F はほぼ直線的に増加する.

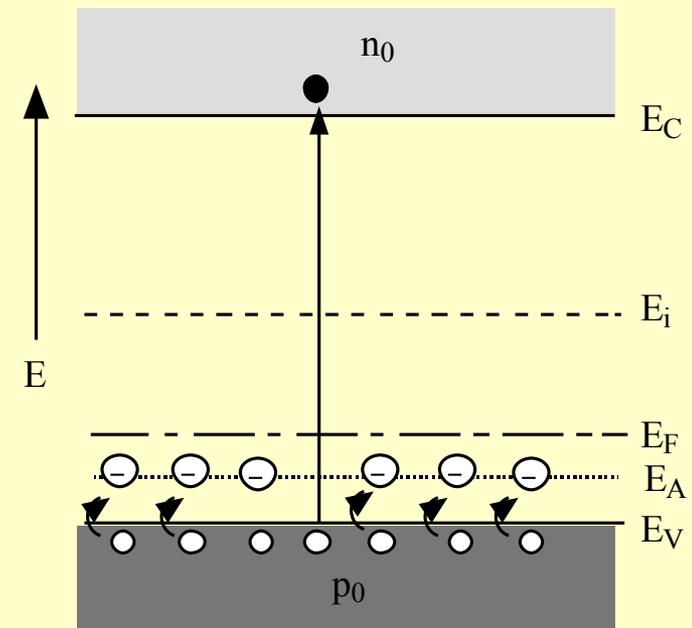
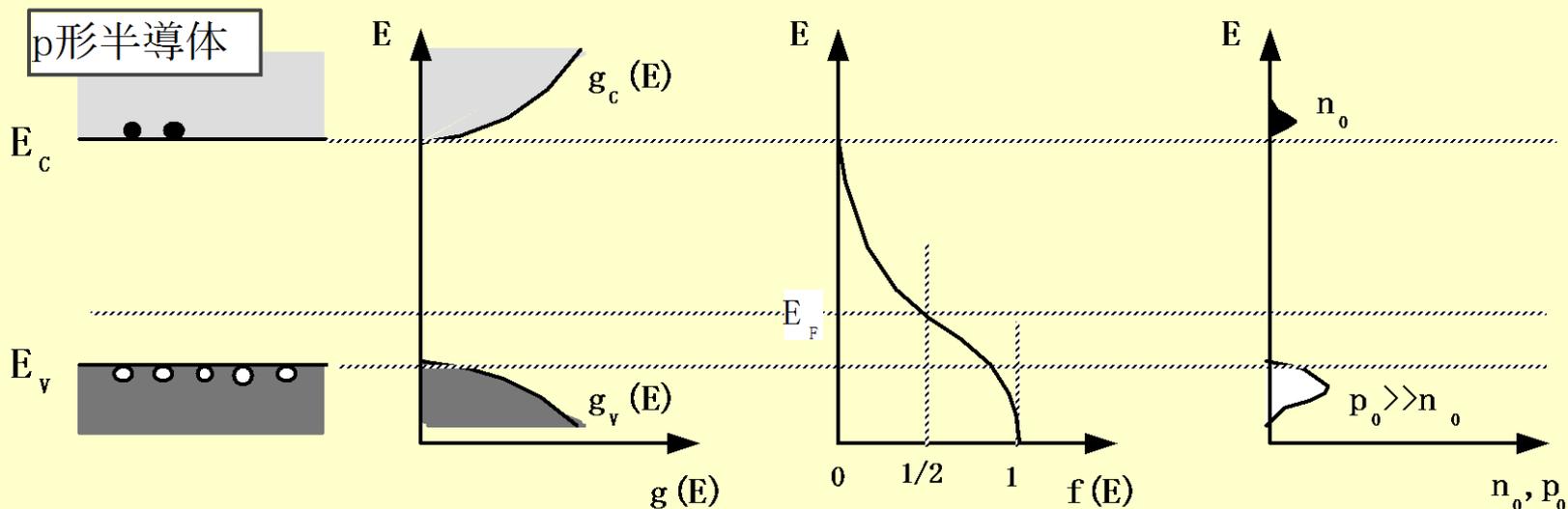
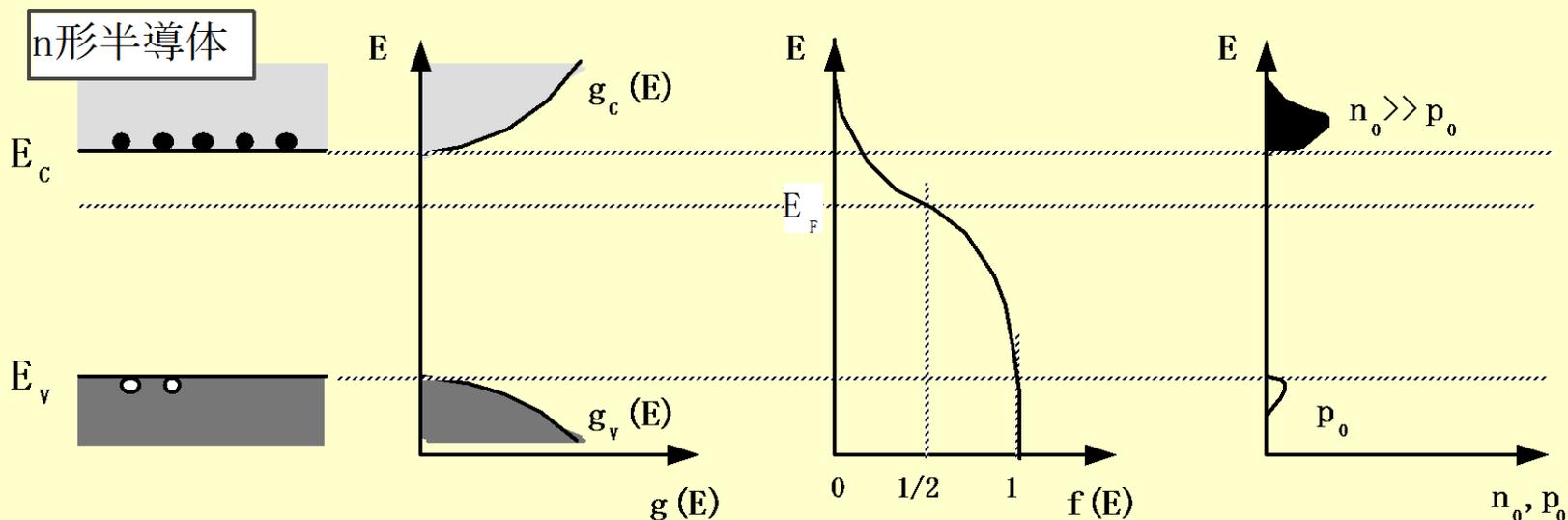


図2-15 p形半導体のエネルギー帯

n形, p形半導体のエネルギー帯図, 状態密度, フェルミ分布関数およびキャリア密度



(a) エネルギー帯図

(b) 状態密度

(c) フェルミ分布関数

(d) キャリア密度分布

(d) キャリアの補償と温度依存性

ドナーとアクセプタの2種類の準位が存在する場合

$N_d > N_a$ のときn形半導体となる

→ ドナーの一部がアクセプタにより補償される

→ 正味のドナー濃度が $N_d - N_a$ となりn形半導体の性質を示す

N_d と N_a が逆の場合も同様に考えられる

$N_d = N_a$ では真性半導体と区別して完全に補償された半導体と呼ばれる

n形半導体の温度特性例

低温: 不純物はイオン化されず
キャリアが少ない

室温付近(通常): 電子は励起され自由電子の濃度が飽和する

高温: 大量の電子-正孔対が生成

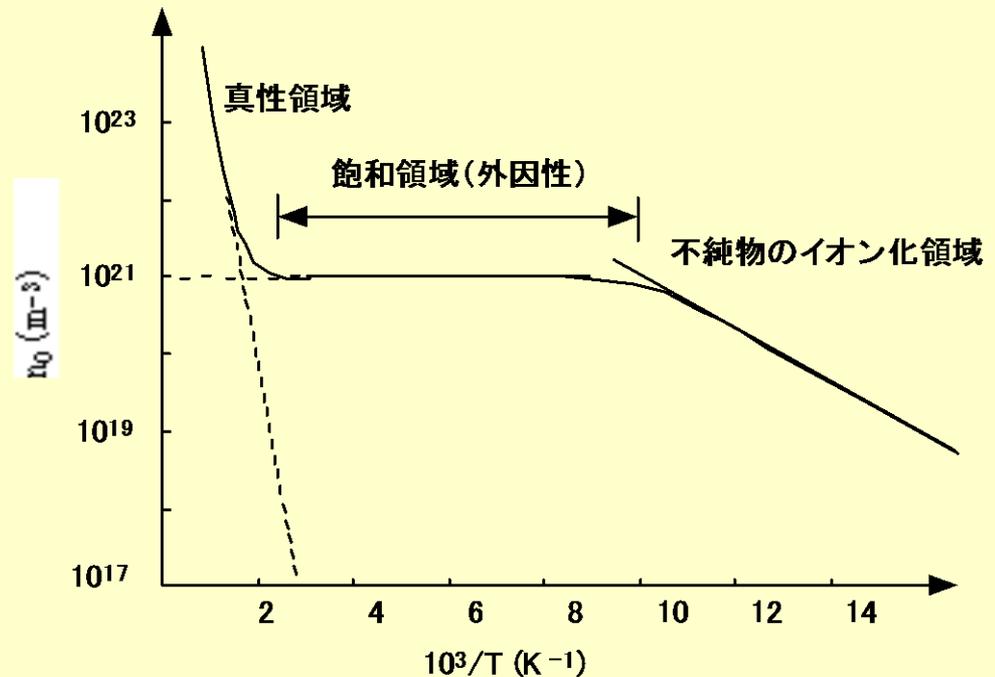


図2-17 キャリア密度の温度依存性

2.3.1 移動度, ドリフト電流及び抵抗率 (1)

電界がない場合:

半導体中の自由電子は全方向に高速で運動しているが, 平均すると電子の巨視的な移動は起らない

電界がある場合:

電子は $-qE$ の力を受けて, 衝突から衝突までの間, 電界方向と反対方向に加速される. この衝突により電子は無限には加速されない. 加速と衝突を繰り返すことで, 電子は電界強度に依存した平均速度で移動する

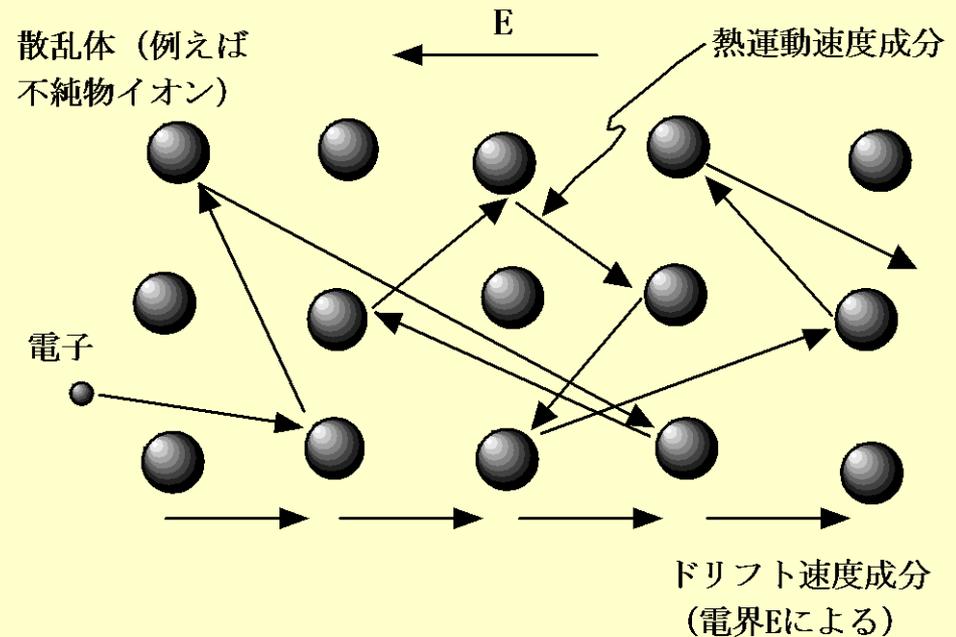


図2-18 電界による電子の移動のモデル図

2.3.1 移動度, ドリフト電流及び抵抗率 (2)

平均自由行程: 結晶格子や不純物原子との衝突までに移動する平均距離

平均緩和(衝突)時間 τ : この距離を移動する時間

ドリフト速度 v_n (drift velocity): 電界の印加により生じた速度成分

平均緩和時間 (τ_n) の間に電子に与えられる力積と運動量の関係は,

$$-qE\tau_n = m_n^* v_n \quad (2.23)$$

これより v_n は,

$$v_n = -\left(\frac{q\tau_n}{m_n^*}\right)E = -\mu_n E \quad (2.24)$$

ここで μ_n を電子の移動度である

電界が大きくなるとドリフト速度が飽和する。また, 半導体材料が異なると移動度も異なり, ドリフト速度の電界強度依存性が変化する

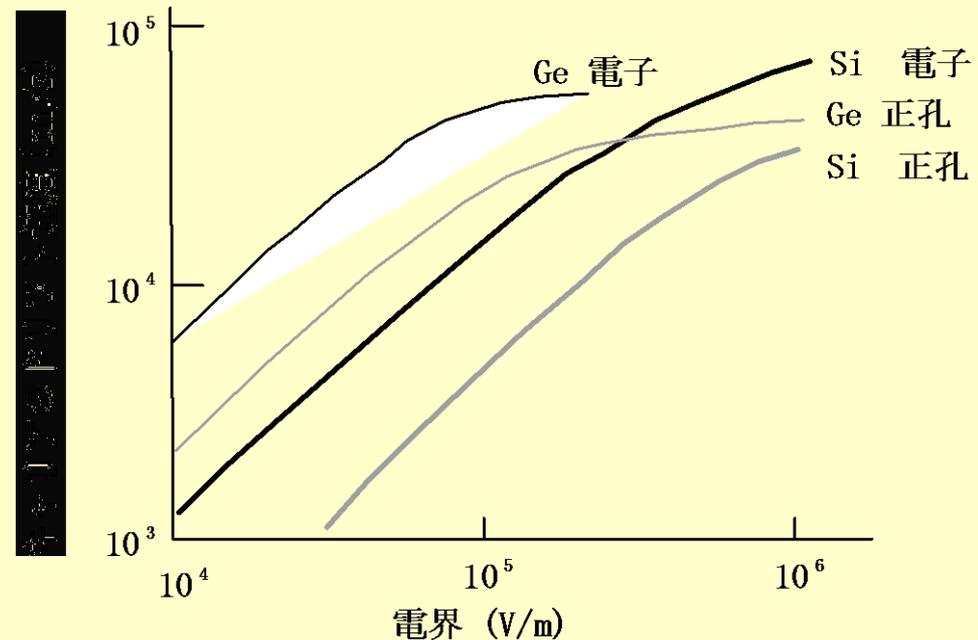


図2-19 ドリフト速度と電界の関係

2.3.1 移動度, ドリフト電流及び抵抗率 (3)

ここで電子の移動度が正孔よりも大きいのは電子の有効質量が正孔のそれに比べて小さいことに起因している。

散乱機構: 格子散乱, 不純物散乱

移動度は平均緩和時間は2種類の散乱機構による衝突頻度で表され,

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{lattice}} + \frac{1}{\tau_{impurity}} \quad \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{lattice}} + \frac{1}{\mu_{impurity}}$$

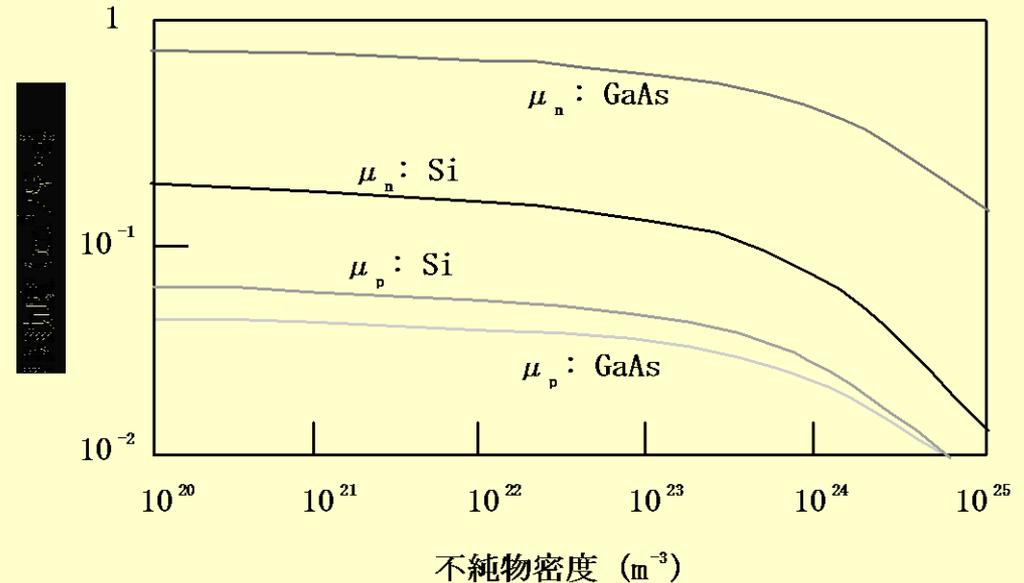


図2-20 移動度と不純物密度との関係

- ・格子振動は温度の伴って増大するため, 高温では格子散乱が支配的になる
- ・ドナーやアクセプタイオンとのクーロン力により, 不純物散乱が生じる
移動度は不純物濃度に反比例して低下, 低温では不純物散乱が支配的

2.3.1 移動度, ドリフト電流及び抵抗率 (4)

真性半導体に電圧を加えた場合, 電子と正孔は電界によりそれぞれ逆向きに加速され, ドリフト電流が流れる.

電子と正孔の濃度をそれぞれ n と p , 電子と正孔のドリフト速度をそれぞれ v_n , v_p とすれば, 電子電流濃度 J_n と正孔電流濃度 J_p はそれぞれ,

$$J_n = -qn v_n \quad J_n = qn \mu_n E$$

$$J_p = qp v_p \quad J_p = qp \mu_p E$$

全電流濃度 J は, J_p と J_n の和であるから,

$$J = J_n + J_p = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E$$

ここで, σ は導電率であり, 電流密度は導電率と電界に比例する.

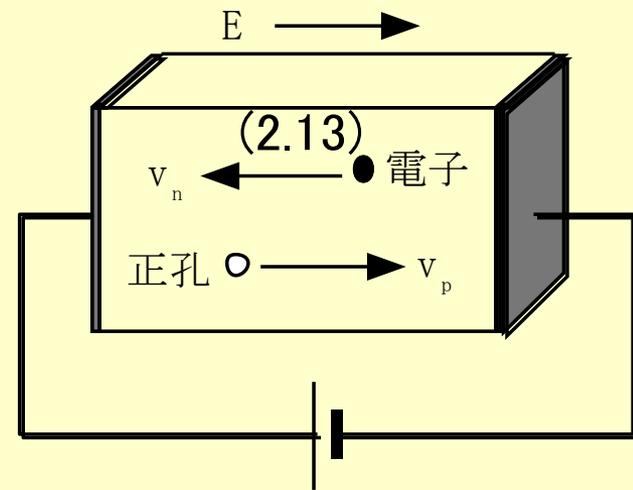


図2-21 真性半導体中の電子と正孔の運動

2.3.1 移動度, ドリフト電流及び抵抗率 (5)

$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$ 不純物半導体ではキャリアの一方が支配的になり,

$$\sigma_n = qn\mu_n$$

$$\sigma_p = qp\mu_p$$

抵抗率は導電率の逆数であるから

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (2.33)$$

- ・半導体の抵抗率はキャリア濃度(不純物濃度)や移動度が大きいほど小さい
- ・不純物濃度によって移動度が変化するため, 図の抵抗率は不純物濃度に正確に反比例しない

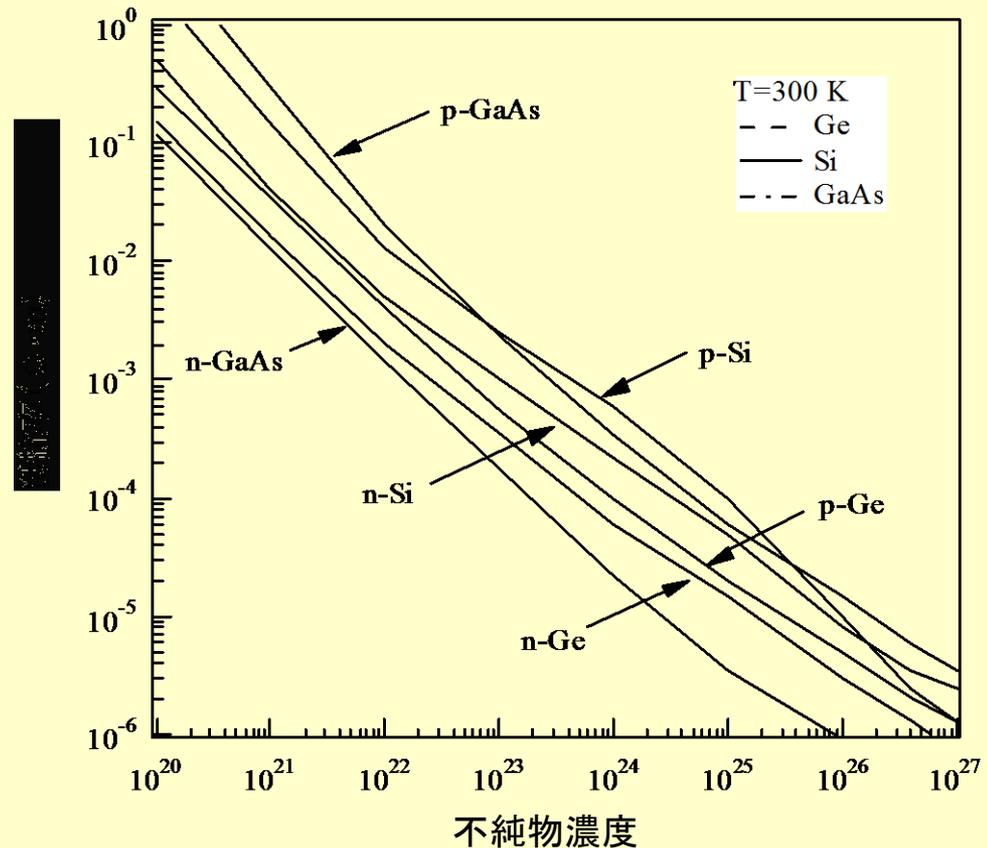


図2-22 抵抗率の不純物濃度依存性

2.3.2 ホール効果

- ・半導体に電流と磁界を垂直に加えたとき、両者と垂直方向に電圧を生じる現象
- ・材料の移動度とキャリア濃度を測定するために利用される

$$F = qv_x B_z \sin \theta = qv_x B_z (\theta = 90^\circ)$$

$$qv_x B_z = q(V_H / w)$$

$$\therefore V_H = v_x B_z w$$

磁束濃度; B_z , 速度; v_x , 力; F ,

v_x と B_z の確度; θ , V_H ; ホール電圧

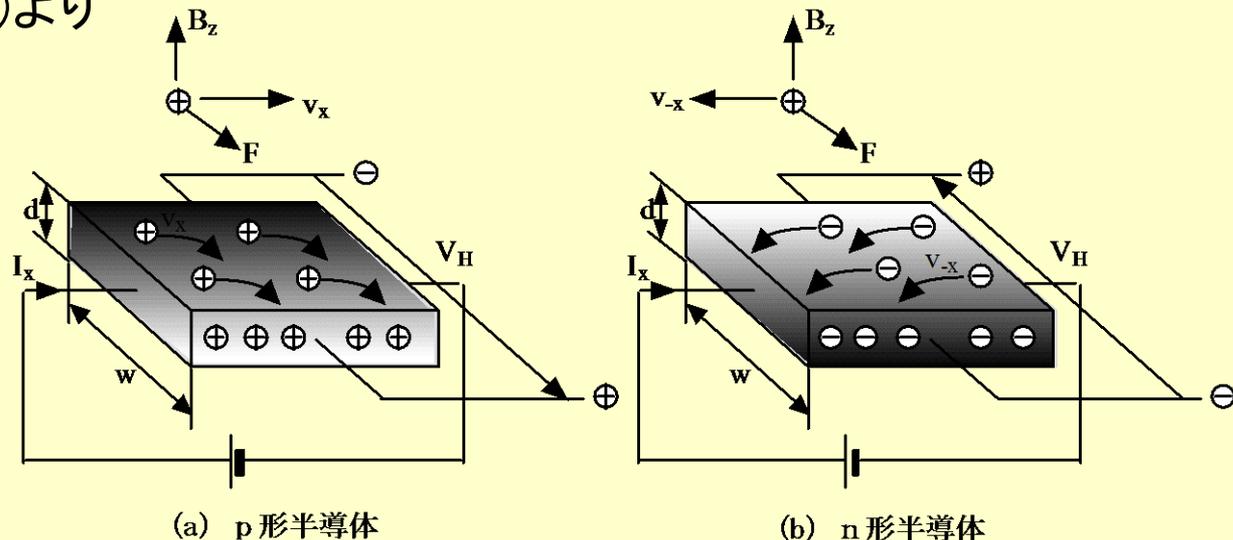
電流濃度 J_e は $qn v_x = I_x / (d \cdot w)$ より

$$V_H = v_x B_z w$$

$$= \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} = R_H \frac{I_x B_z}{d}$$

R_H : ホール係数

$$\text{また, } \mu_n = R_H \sigma_n$$



(2.34)

図2-23 ホール効果

2.3.3 拡散電流

気体・液体・固溶体の濃度が場所によって異なるとき、分子は熱運動しながら全体として濃度の高いほうから低いほうへ移動し、最後に濃度は一様になる。この現象を拡散(diffusion)という。

図中、 x に垂直な面を電子が濃度の低いほうに移動し、拡散によって単位時間に単位面積を通過する正味では電子数はその濃度勾配 dn/dx に比例する。電子の電荷を $-q$ とすれば拡散電流(diffusion current)の濃度 J_n は、

$$J_n = -(-q) \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} = +q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} \quad (2.39) \quad D_n: \text{電子の拡散定数}$$

正孔電流密度 J_p について考えると、

$$J_p = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} \quad (2.40)$$

電子と正孔が同時に拡散する場合は、

$$J = J_n + J_p = q \left(D_n \cdot \frac{dn}{dx} - D_p \cdot \frac{dp}{dx} \right) \quad (2.41)$$

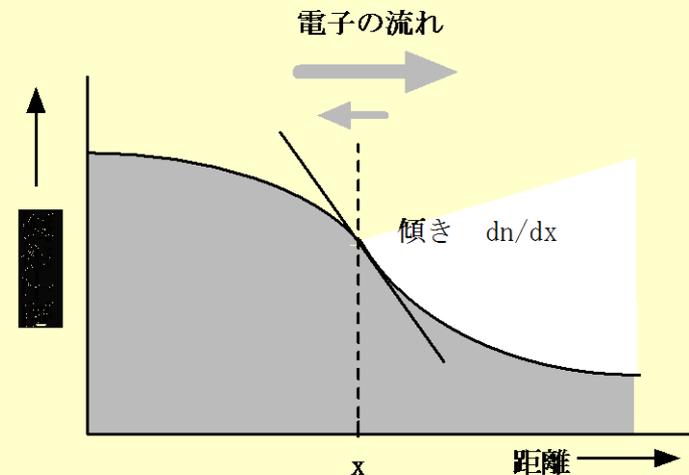


図2-24 拡散による伝導の様子

2.3.4 再結合による電流

半導体内では、電子や正孔の発生と再結合が常に起こっている。

発生割合(G)が再結合割合(R)より大きければ、キャリア濃度は時間的に増加し、逆に小さければ減少する。キャリアの再結合に起因する電流を再結合電流という。

次式のように、Gは温度の関数となり、Rは、電子と正孔濃度に比例する。

$$G = g \exp\left(-\frac{E_a}{\kappa T}\right)$$

$$R = \gamma \cdot p \cdot n$$

E_a : 活性化エネルギー,
 g : 比例定数, γ : 比例定数

キャリア濃度の時間変化は発生と再結合の差で決まり、

$$\frac{dn}{dt} = G - R = g \exp\left(-\frac{E_a}{\kappa T}\right) - \gamma \cdot p \cdot n$$

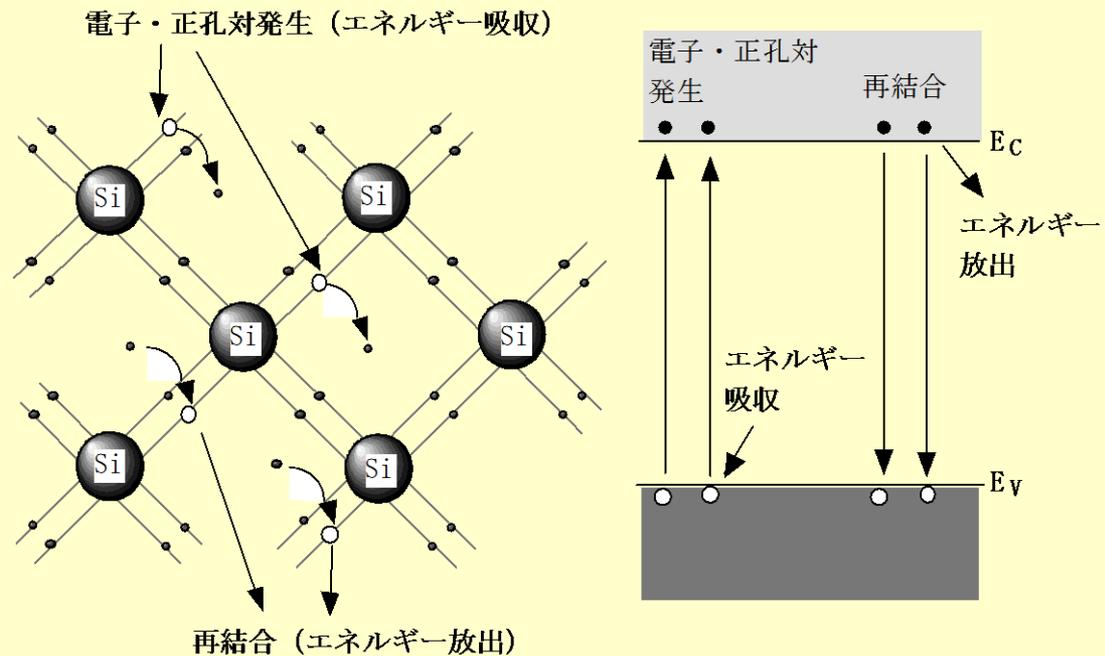


図2-25 電子・正孔対発生と再結合の模式図

2.3.5 キャリア寿命

p形半導体に熱平衡状態より過剰な電子注入し, $t=0$ で電子注入を止めた場合過剰電子濃度 Δn の時間的变化の割合は,

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = G - R = -K_n \cdot \Delta n \quad (K_n \text{は比例定数}) \quad (2.45)$$

いま $t=0$ における過剰電子濃度を Δn_0 とし, 時定数を $\tau_n = 1/K_n$ とおくと,

$$\Delta n(t) = \Delta n_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \quad (2.46)$$

過剰なキャリアは時間の指数関数的に減少する.

τ は特にキャリア寿命 (life time) と呼ばれ, 過剰キャリアの減少する速さの指標となる.

τ だけ経過した後には, 過剰キャリア濃度は初期値の36.8% ($1/e$) に減少する.

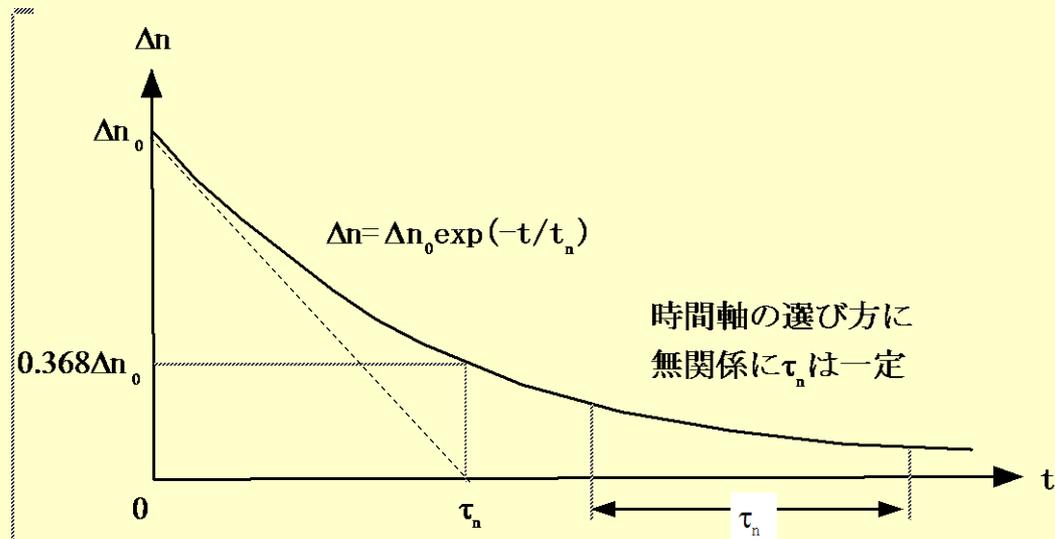


図2-26 過剰電子密度 Δn の減衰の様子

2.3.6 拡散方程式

n形半導体中の正孔の移動とその連続性について考える.

ABCD, A'B'C'D'の微小体積中の正孔密度の時間的変化の割合は,

$$\frac{\partial p}{\partial t} \cdot S \cdot dx = (g_p - r_p) \cdot S \cdot dx + \frac{1}{q} \left\{ J_p - \left(J_p + \frac{\partial J_p}{\partial x} dx \right) \right\} S \quad (2.47)$$

いま正孔の寿命を τ_p とすれば,

$$g_p - r_p = -\frac{p - p_{n0}}{\tau_p}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_n}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} \quad (2.47)$$

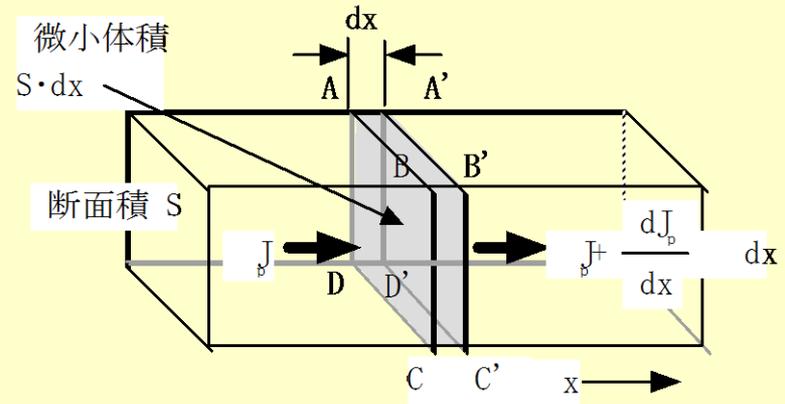


図2-27 微小領域における電流の流入, 流出及び発生・再結合

もし正孔の移動が拡散のみによるなら, 式(2-40)を用いて,

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p - p_n}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (2.49)$$

これは正孔の拡散方程式と呼ばれ, n形半導体中に注入された正孔の移動を解析するための基本式となる.

2.4 深い不純物準位と表面準位 (1)

・Au, Fe, Cu, Crなどは禁制帯の中央付近にエネルギー準位を作り, これらを深い準位と呼ぶ. 対してエネルギー帯端に近い準位を浅い準位と呼ぶ.

・キャリアの再結合は, 電子と正孔の直接再結合よりも, 深い準位を仲介した間接再結合の方が多し.

再結合中心:
間接再結合の仲介をする準位

捕獲中心:
再結合を仲介せず, キャリアの捕獲・放出をする準位

発生中心:
電子や正孔の発生に寄与する準位

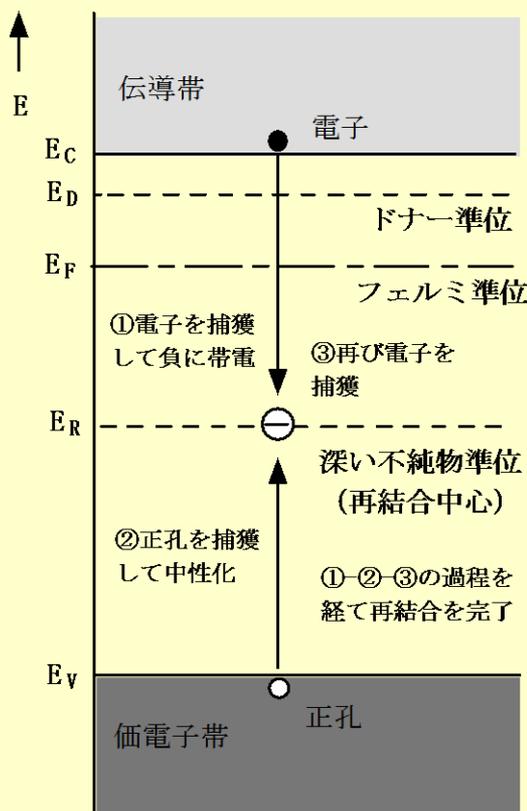


図2-28 深い準位による再結合

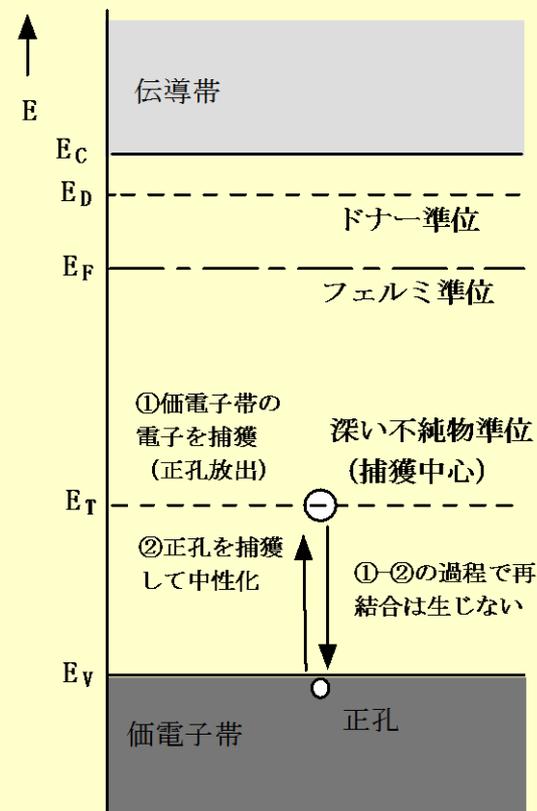


図2-29 深い準位による捕獲中心機構

2.4 深い不純物準位と表面準位 (2)

・半導体結晶の表面は結晶格子の終端部なので、不飽和結合が存在する。このため表面付近の禁制帯中に表面準位と呼ばれる許容準位ができる。

・その密度は表面状態(酸化膜, 汚染物質, 清浄度)によって左右される。

・n形半導体では、表面準位に電子が捕獲されると負に帯電するので、半導体中の正孔が引き寄せられ、表面付近の正孔濃度が高くなる。

→表面に反転層, 空乏層ができる。

・表面準位を仲介してキャリア発生や再結合が起こるため、半導体デバイスの電気的特性に悪影響を及ぼすことがある。

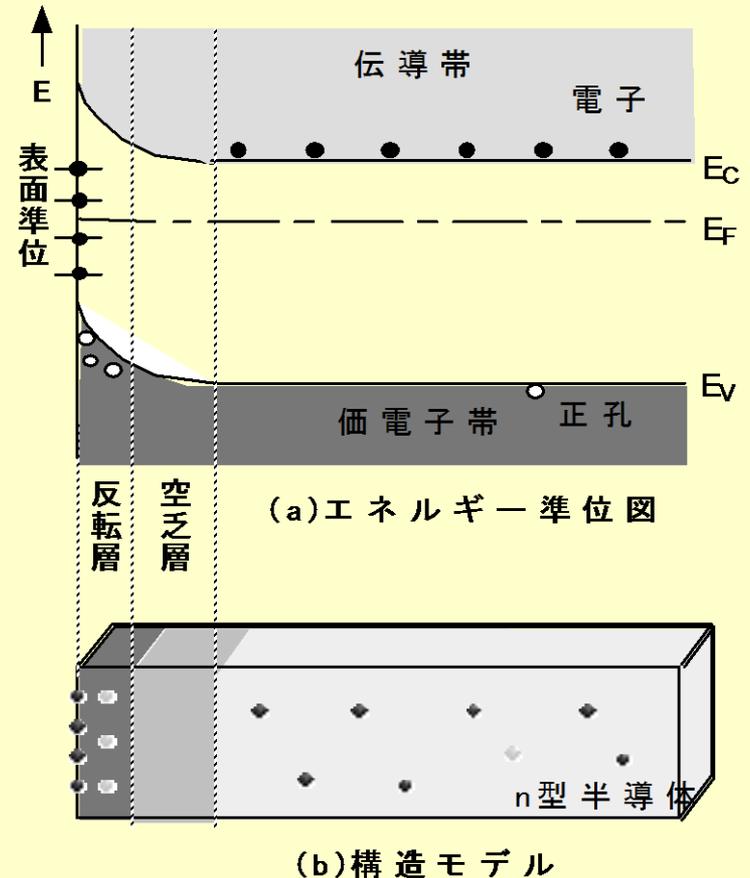


図 2-30 n形半導体の表面準位とエネルギー

演習問題

- 問1 導体, 絶縁体, 半導体の抵抗率の違いを自由電子の観点から述べよ.
- 問2 300KにおけるSiの伝導帯と価電子帯の有効状態密度をそれぞれ求めよ. ただし, 電子の有効質量は $0.33m_0$, 正孔の有効質量は $0.52m_0$ とする. (m_0 は電子の静止質量)
- 問3 真性Siの300Kにおけるフェルミ準位を求めよ.
- 問4 300Kにおける真性Siのキャリア濃度を求めてみよ. ただし, Siのバンドギャップは 1.1eV とする.
- 問5 ドナー濃度 10^{22}m^{-3} のn形Siの正孔濃度を求めよ. ただし, Siは300Kの熱平衡状態にあり, 真性半導体のキャリア濃度は $1.6 \times 10^{-16}\text{m}^{-3}$ として計算せよ.
- 問6 前問のn形Siのフェルミ準位を求めよ. ただし伝導体の有効状態密度は $2.8 \times 10^{25}\text{m}^{-3}$ として計算せよ.
- 問7 n形Si中の電子が結晶格子と衝突する平均時間を求めよ. ただし, 電子の有効質量は 0.33 , 移動度は $0.15\text{m}^2/\text{Vs}$ とする.
- 問8 n形Siの抵抗率を求めよ. ドナー濃度と移動度は問5と問7で与えた値を用いよ.
- 問9 電子と正孔が同程度存在する半導体のホール効果について述べよ.
- 問10 p形半導体に電子を過剰に注入し, $t=0$ で注入を止めた後の電子の減衰過程において, キャリア寿命の2倍の時間経過後の電子濃度は $t=0$ の電子濃度の何%になるか.
- 問11 p形半導体にドナー形の深い準位があるとき, これを仲介とする再結合過程を説明せよ.