

半導體理工學

授業予定

1. ガイダンス
2. 半導体の歴史
3. 半導体の作製方法(1)
4. 半導体の作製方法(2)
5. 半導体の種類(1)
6. 半導体プロセスの復習(ビデオ視聴)
7. 半導体の種類(2)、バンド理論(1)
8. バンド理論(2)、キャリア密度
9. 半導体の電気伝導(1)
10. 半導体の電気伝導(2)
11. pn接合の理論(1) (pn接合)
12. pn接合の理論(2) (電流-電圧特性)
13. pn接合の理論(3) (空乏層容量、降伏)
14. 試験とまとめ

※変更の可能性有

電氣的性質

～エネルギーバンド(2)～

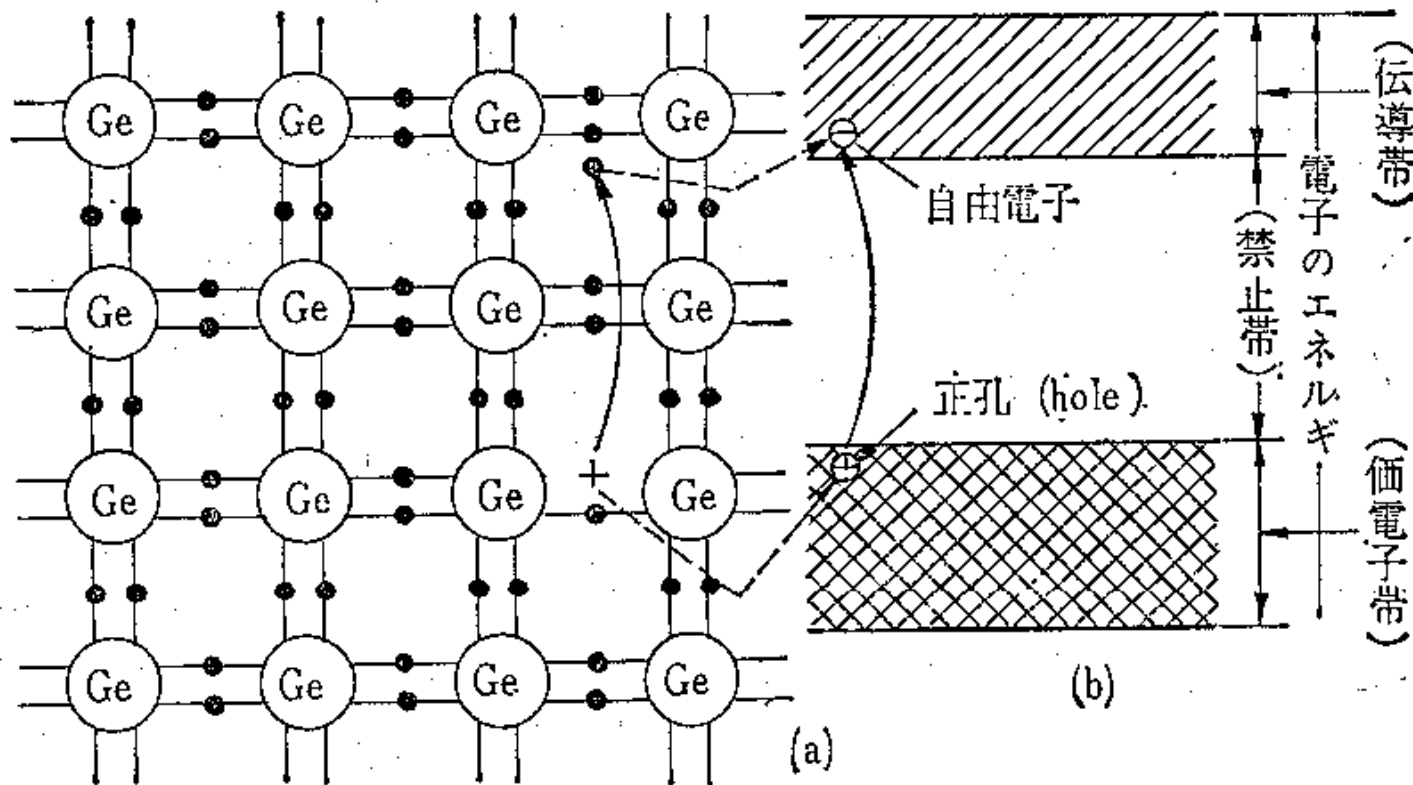
ここで疑問に思うか？

- ・価電子数の異なる不純物をドーピングすると、電子もしくはホールがキャリアとして生成することは分かった(すでに知っていた)。
- ・だが、不純物ドーピングによって真性半導体の問題は解決したか？



バンド構造を知る必要がある！

■ 真性半導体（ドーピング無し）のバンド構造と伝導



300Kでの熱エネルギー E_{th} （“平均”）は、

$$E_{th} = k_B T = (0.86 \times 10^{-4}) \times 300 = 0.026 \text{ eV}$$

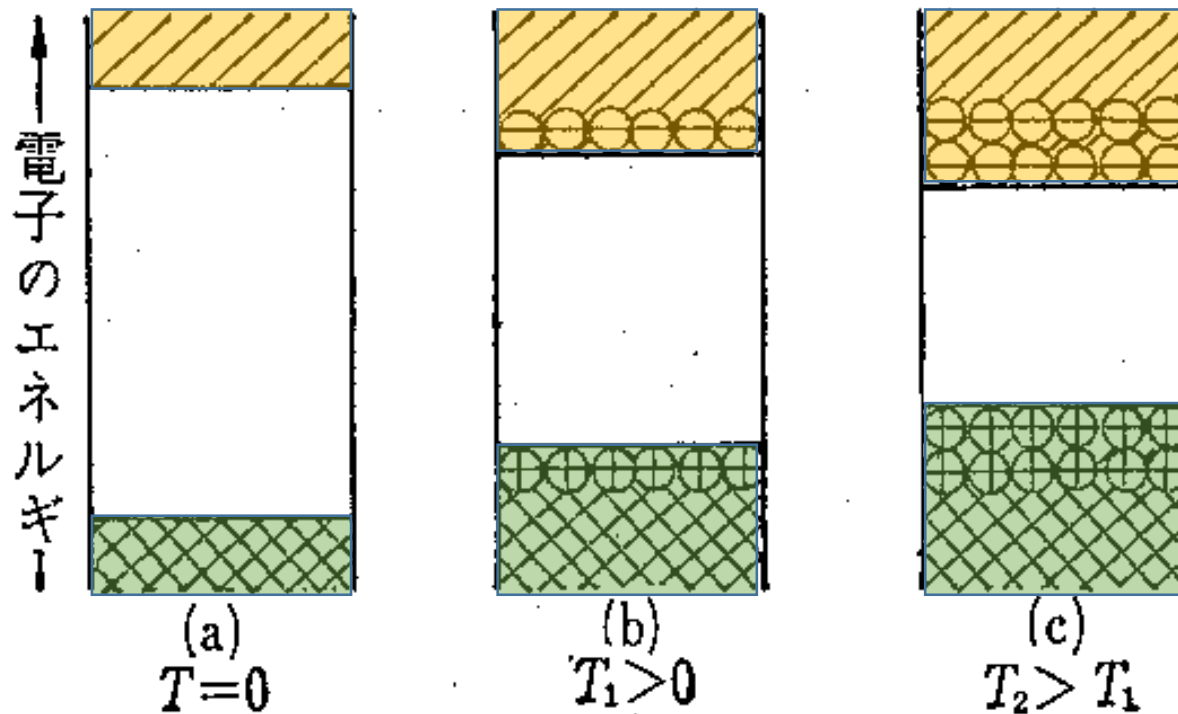
- Ge: $E_g = 0.67 \text{ eV} \rightarrow$ 半導体
- ダイヤモンド: $E_g = 7 \text{ eV} \rightarrow$ 絶縁体

伝導帯：
完全に空。



導電性無し！

価電子帯：
電子で完全に満た
されている。



低

温度

高

温度の増加とともに、バンドギャップを超える電子は増加
→電気抵抗率は減少：負の温度係数

半導体の特徴！

■ 励起エネルギー

これまでは熱エネルギーを考えてきたが、
ようは電子にバンドギャップを乗り越えるだけの何らか
のエネルギーを与えれば良い。



光、放射線、等々がある。

光エネルギーは、周波数 ν (波長 λ : μm) として以下で与えられる。

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \text{ (eV)}$$

例えば、可視光 ($0.38\mu\text{m} \sim 0.78\mu\text{m}$) \rightarrow $E=1.59 \sim 3.26\text{eV}$

Siの場合:

$E_g @ 300\text{K} = 1.1\text{eV}$ なので、可視光で電子が励起される！

■不純物半導体のバンド構造と伝導

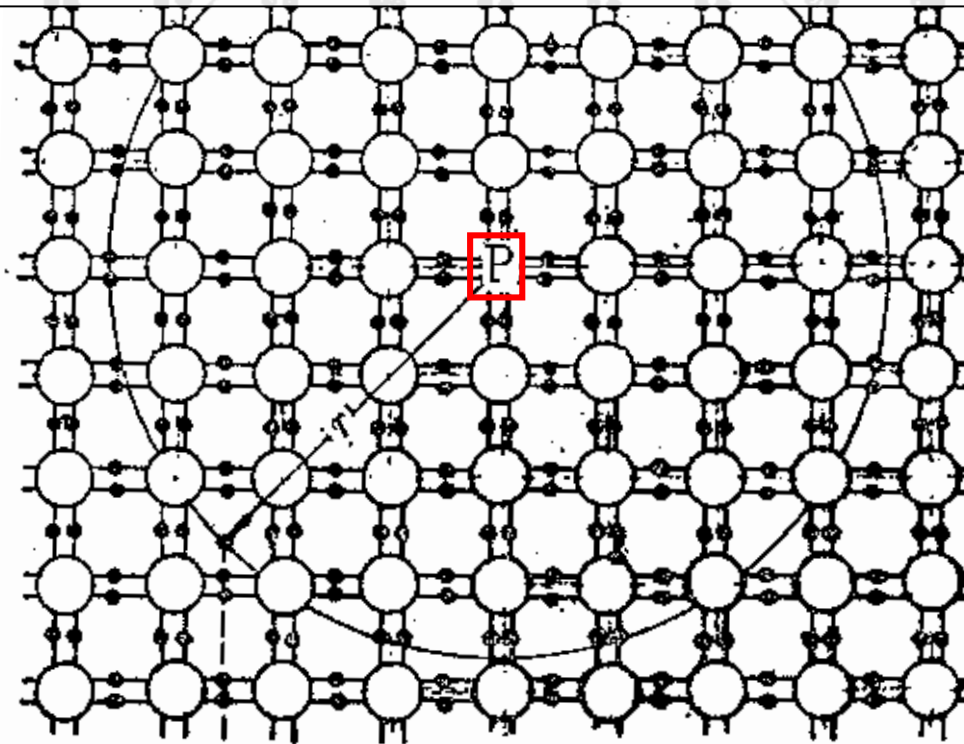
Ge(4価)結晶にP(5価)をドーピングする。



Ge1個を置換して、電子が1個余る。

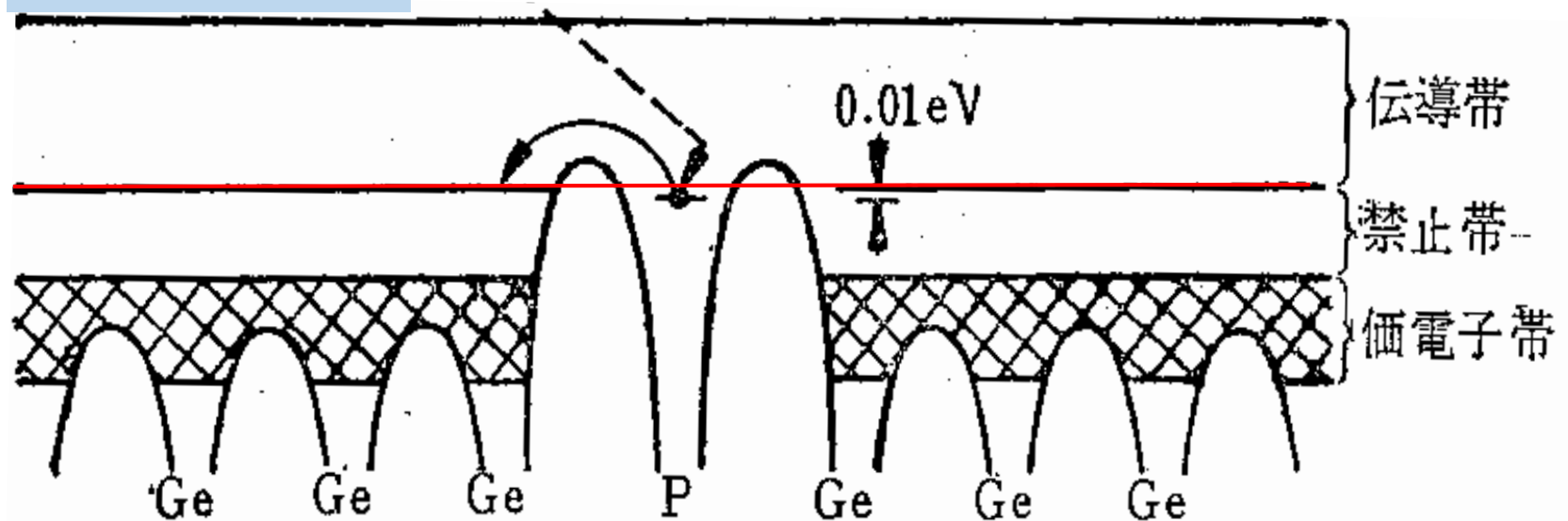


余った電子はP原子核に束縛され、特別な周回軌道を回る。



n型半導体

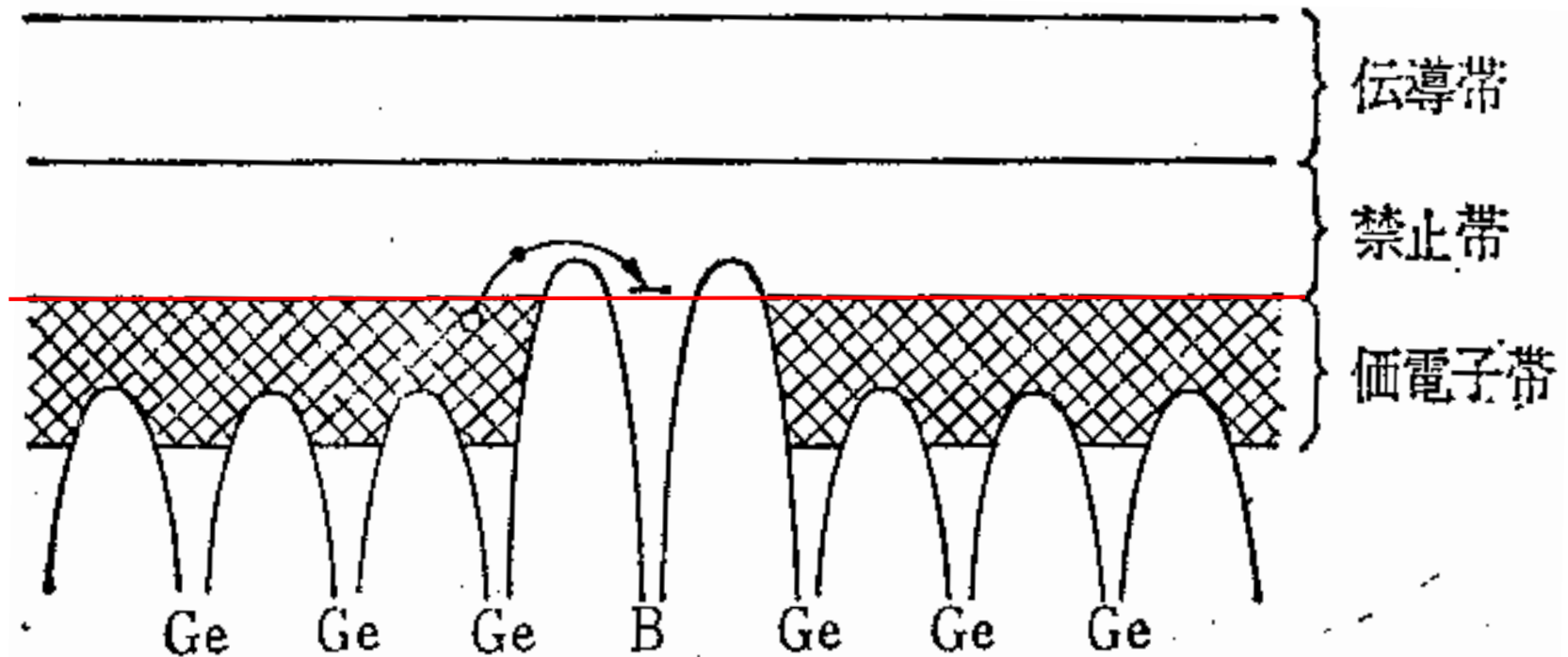
n型半導体



P原子核に束縛された電子は、

- P原子のポテンシャル井戸の中で、
- 伝導帯の底よりもわずかに下位の準位(局在エネルギー準位)に存在し、
- 励起エネルギーを受け取って、伝導帯へ移る。

p型半導体 (GeにBをドーブ)



- B原子は価電子帯よりわずかに上に局在エネルギー準位を持つ。
- 価電子帯の電子は、熱励起でこの局在準位に飛び移る。
- 出来た正孔が伝導に寄与。

■局在エネルギー(不純物)準位

束縛された電子を引き離す、イオン化エネルギーを求めれば良い。➡水素原子近似で概算する。

真空中の電子エネルギーは以下で与えられる。

$$E_n = -\frac{m_0 q^4}{8 \varepsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{13.6}{n^2} [\text{eV}] \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

今考えるのはPドーピングしたGe結晶中の電子なので、

- 真空の誘電率 ε_0 →物質の誘電率 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ (Ge: $\varepsilon_r = 16$)。
- 自由電子の静止質量 m_0 →有効質量 m^* (Ge: $0.25m_0$)となる。



$$\underline{E = -0.012 \text{ eV}}$$

室温の熱エネルギー($k_B T = 0.026 \text{ eV}$)で容易に励起されて伝導に寄与。

■ GeおよびSiにおける不純物準位(資料)

不 純 物		不純物準位 (eV)	
		Ge	Si
P	ド ナ ー	0.012	0.045
As	ド ナ ー	0.013	0.049
Sb	ド ナ ー	0.01	0.039
Au	ド ナ ー	—	0.85
Li	ド ナ ー	0.009	—
B	アクセプタ	0.01	0.045
Al	アクセプタ	0.01	0.057
Ga	アクセプタ	0.011	0.065
In	アクセプタ	0.011	0.16
Zn	アクセプタ	{ 0.03 0.10	{ 0.092 0.3
Au	アクセプタ	{ 0.05 0.15 0.55	—
Cu	アクセプタ	{ 0.045 0.32	—

電氣的性質

～キャリア密度～

一般的に、電気抵抗率は、

- キャリア密度(～電気を運ぶ電子またはホール単位体積あたりの個数)
- 移動度(～キャリアの単位時間に進む距離)

の関数である。



キャリア密度は、

- 各エネルギー準位に入るキャリアの状態密度
- 分布確率

の関数である。

ということで、キャリア密度を知るためには、

- ・状態密度
- ・分布確率

を知る必要がある。

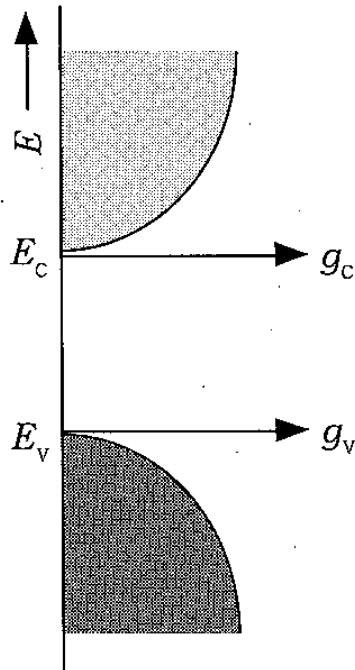
■ 電子とホールの状態密度 g

教科書では(2.6)式があっさり書かれていますが、その行間には以下のことがあります。

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、

$$g_c(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} \quad (E > E_c) : \text{電子の状態密度} \quad (2.6)$$

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



- 一様な分布ではない！
- キャリアの持つエネルギーの関数である。

これは以下の過程で求められる。

図 2.11 伝導帯と価電子帯の状態密度

■ 状態密度を求める

単位体積、単位エネルギー当りのエネルギー準位密度を $G(E)$ とする。

電子のエネルギーが dE だけ増加したとき、準位数が dG 増加したとすると、

$$dG = G(E) dE$$

ある許容帯のエネルギー準位数は、上式を許容帯のエネルギー下端 E_1 から上端 E_2 まで積分すれば求まる。

$$G_t = \int_{E_1}^{E_2} G(E) dE$$

求める！

1辺の長さがLの立方体の箱の中で、質量mの粒子が自由に運動している場合を考える。

波動方程式(シュレディンガー方程式)を解く。

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \varphi = 0$$



波動関数 φ とエネルギー E が決まる。



微小エネルギー準位間 dE の準位数を求める。

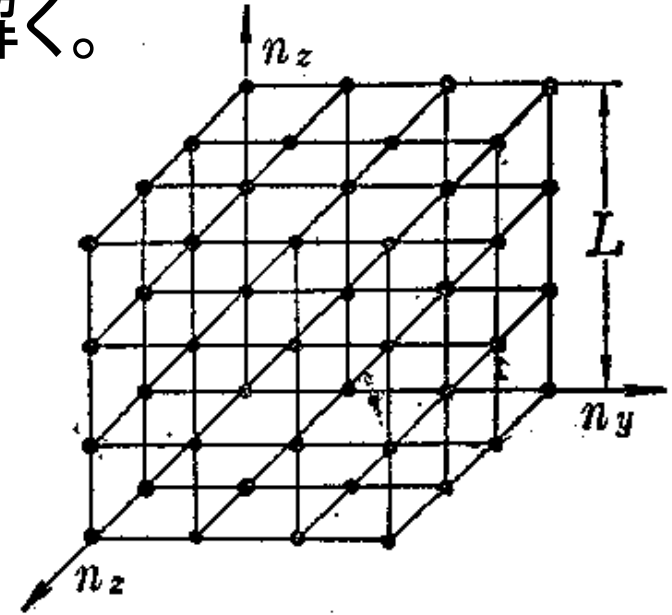
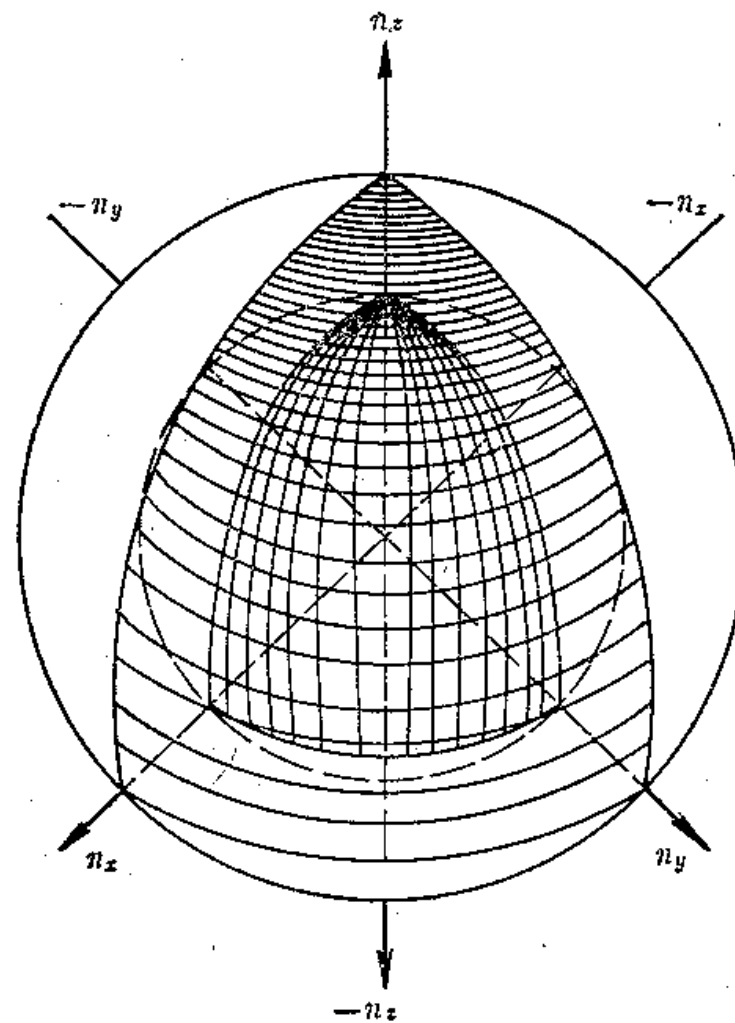
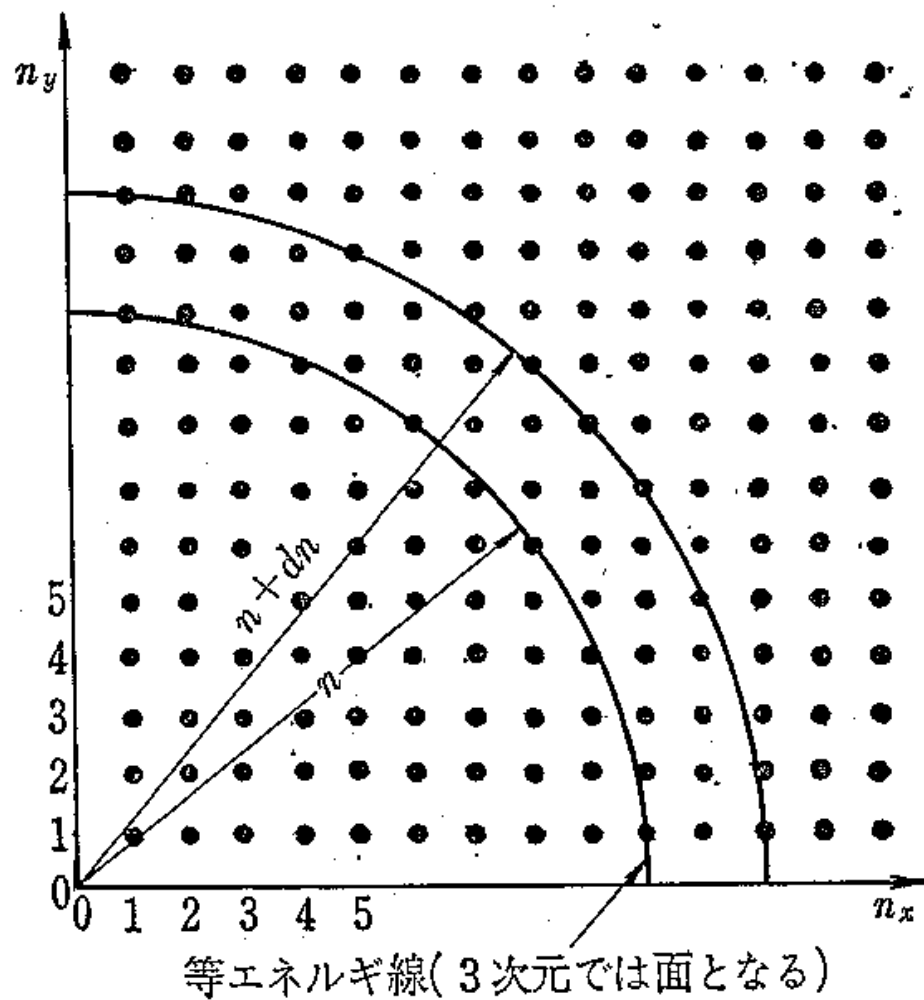


図 5.2 立方体ポテンシャル箱



等エネルギー面を考える。

“ n は正の整数”を考慮



■ 電子とホールの状態密度 g

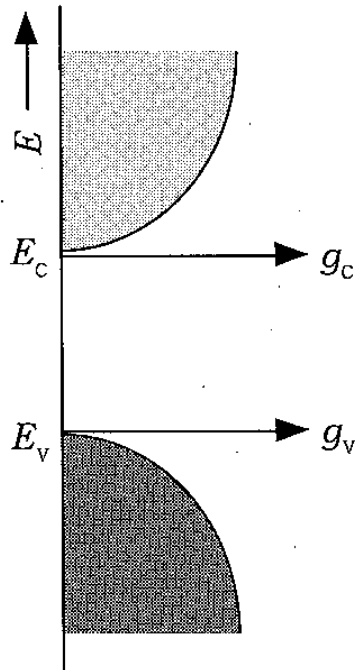
これまでの計算を経て
状態密度が求まる。

再掲

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、

$$g_c(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n^*}{h^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2} \quad (E > E_c) : \text{電子の状態密度} \quad (2.6)$$

$$g_v(E) = 4\pi \left(\frac{2m_p^*}{h^2} \right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2} \quad (E < E_v) : \text{ホールの状態密度}$$



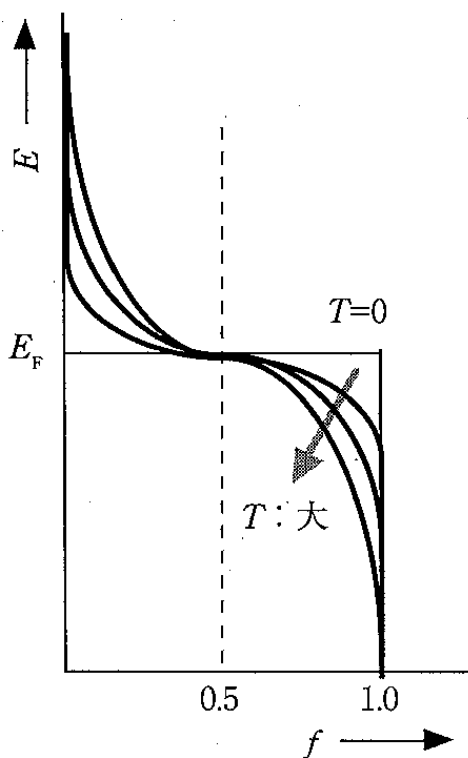
- 一様な分布ではない！
- キャリアの持つエネルギーの関数である。

図 2.11 伝導帯と価電子帯の状態密度

■ 分布確率

フェルミーディラック分布関数に従う。

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

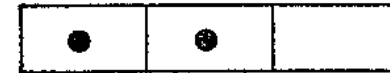


- 電子は互いを区別できない。
- パウリの排他律により、1つの量子状態に入れる電子は1個。

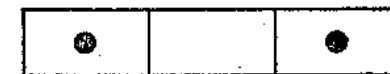
図 2.12 フェルミ・ディラックの分布関数

■分布確率(フェルミーディラック分布関数)を求める

エネルギー準位が3つ、電子が2つある場合は？



入り方(配分方法)は、 ${}_3C_2$ で3通りある。



電子が n_i 個、エネルギー準位数 N_i の場合の入り方 W_i は何通りになるか？



$$W_i = n_i C N_i$$



これを解くと、次式が得られる。

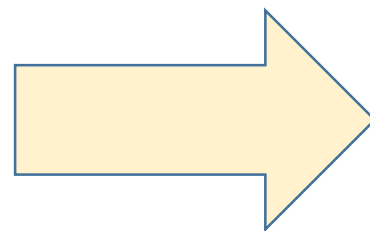
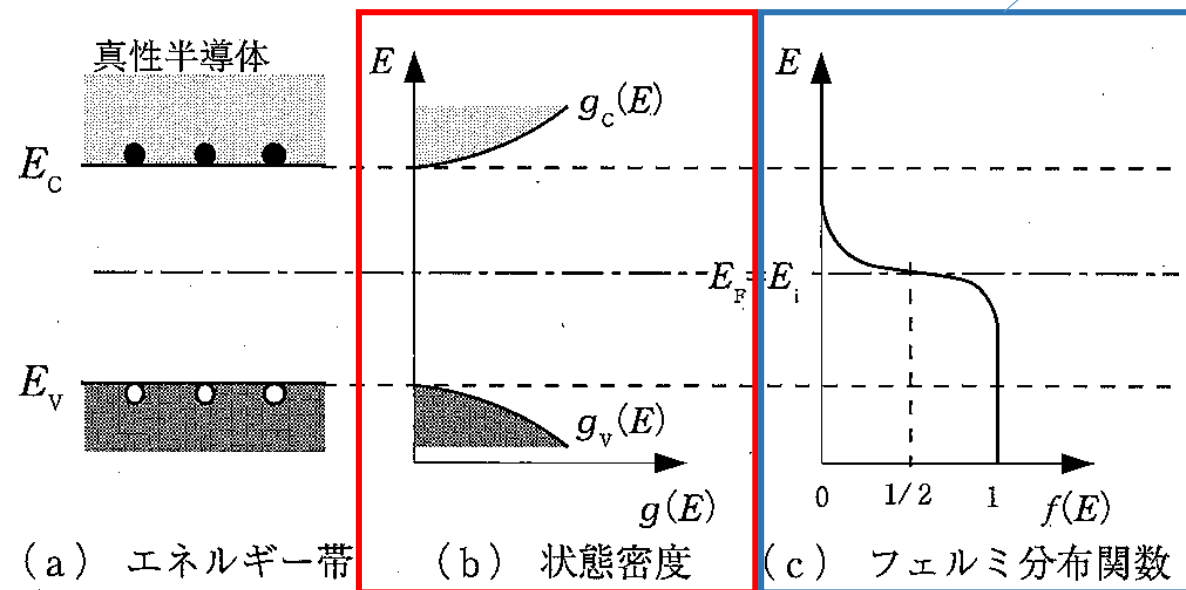
$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

固体物理学等の物理系科目で導出済みかもしれませんが、よく見るこの分布関数はこのように求められます。

■ キャリア密度を求める

状態密度とフェルミ分布が分かった
ので、キャリア密度が求められる。

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



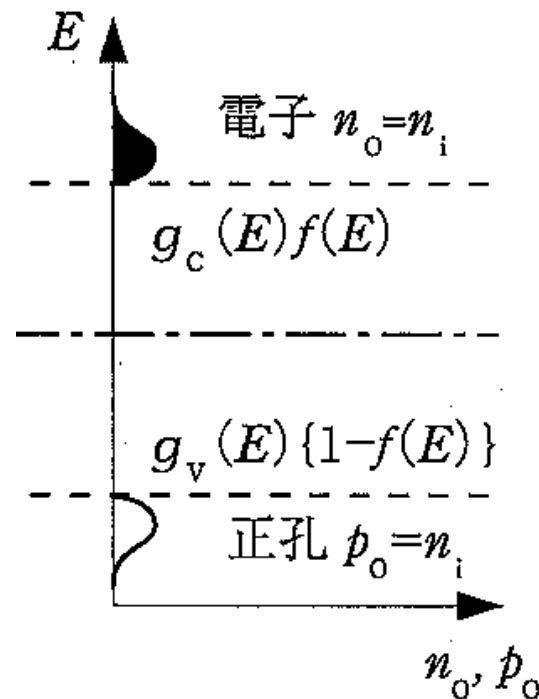
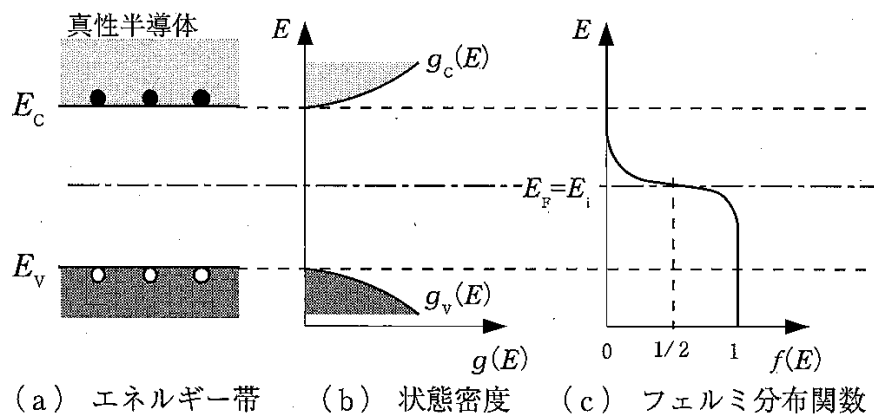
キャリア密度
を知る。

$$n_o = \int_{E_c}^{\infty} g_c(E) f(E) dE$$

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

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

状態密度とフェルミ分布の積を
バンドギャップの上端 E_c 以上のエネ
ルギーについて積分する。



電子密度:

$$n_o = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

ただし,

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} : \text{有効状態密度} \quad (2.10)$$

※ホール密度: (2.12)式@p.19