

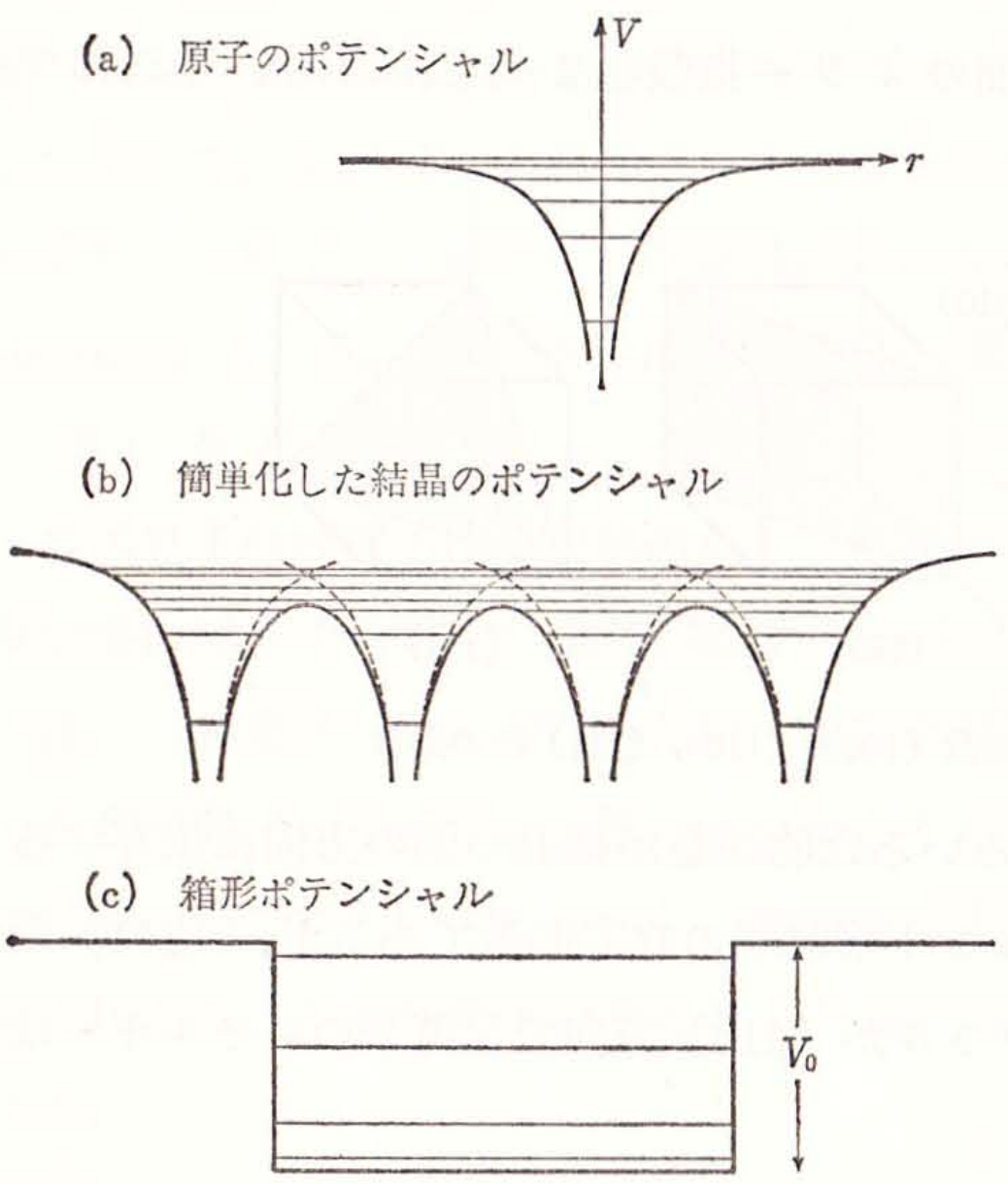
エレクトロニクス 講義資料

第8章：半導体の基礎と半導体デバイス

ver. 3

鶴 剛 (tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp)

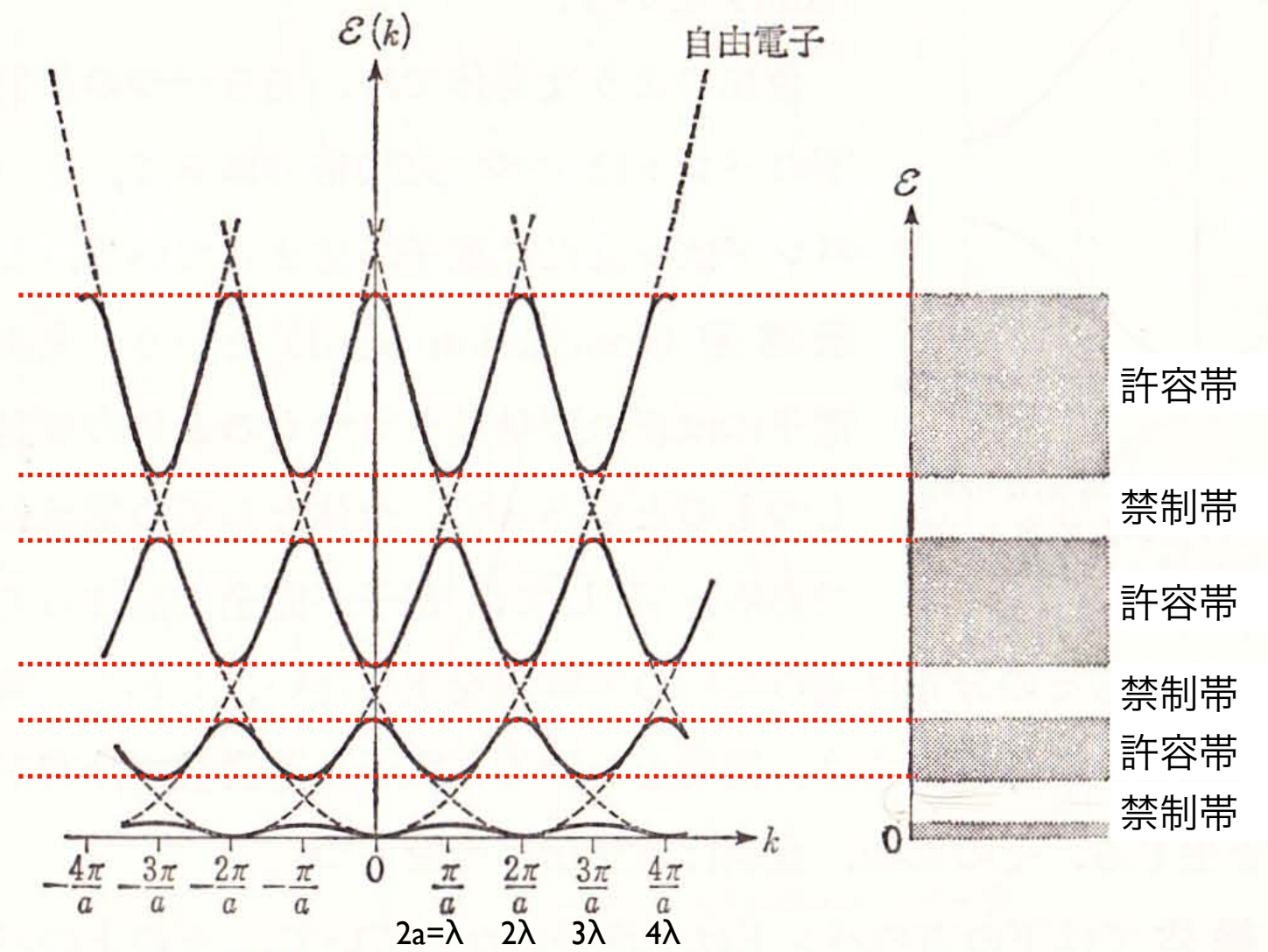
結晶内電子のエネルギーのバンド構造(I)



2-2 図 (a) 原子, (b) 単純化した結晶, (c) 箱形ポテンシャルの中の電子のエネルギー準位

- 箱型ポテンシャルの長さLに対して, エネルギーEは連続的になる.
- 自由電子のエネルギーEと波数kとの関係は下記の放物線になる.

$$E_x = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m}$$



2-4 図 周期 a の周期的ポテンシャルの中の電子の波動ベクトル k とエネルギー E の関係. 右側はこのときのエネルギーバンド (帯).

- 周期的ポテンシャル中の電子の波動関数は周期的になる(ブロッホの定理).
- ポテンシャルの周期がaの場合,
 - 波動関数はkについて $2\pi/a$ の周期を持つ.
- 自由電子は, $2a = n \cdot \lambda$ 付近で強く散乱される(X線の場合はブラッグ条件)
 - $2a = n \cdot \lambda$, $\lambda = 2\pi/k \Rightarrow k = n \cdot \pi/a$ の実線のようになる.
- 自由電子のエネルギーEと波数kとの関係は放物線になる(点線).
- 固有エネルギーが許される範囲と, 許されない範囲が生ずる.
 - 「許容帯」 「禁制帯」

結晶内電子のエネルギーのバンド構造(2)

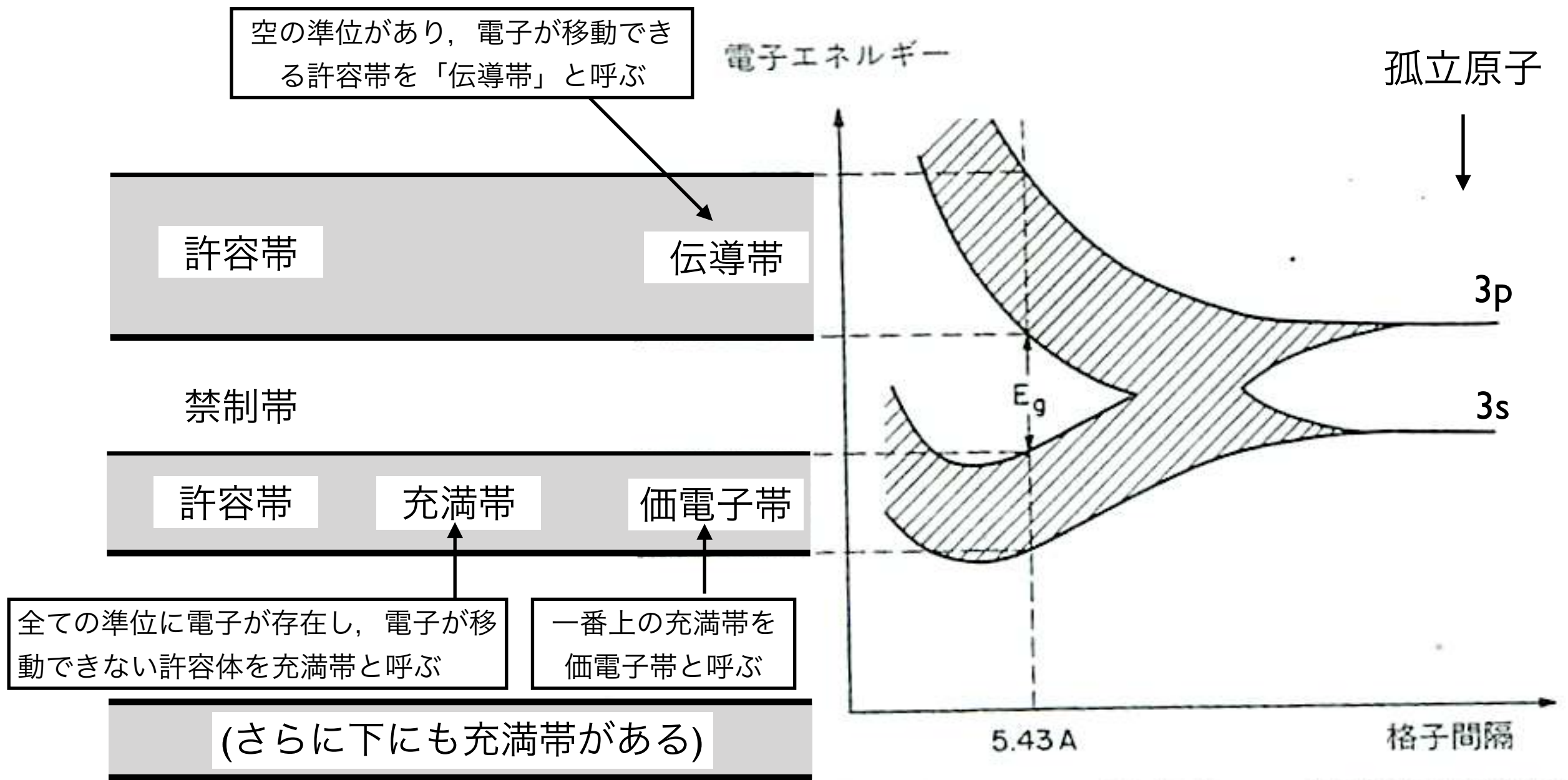
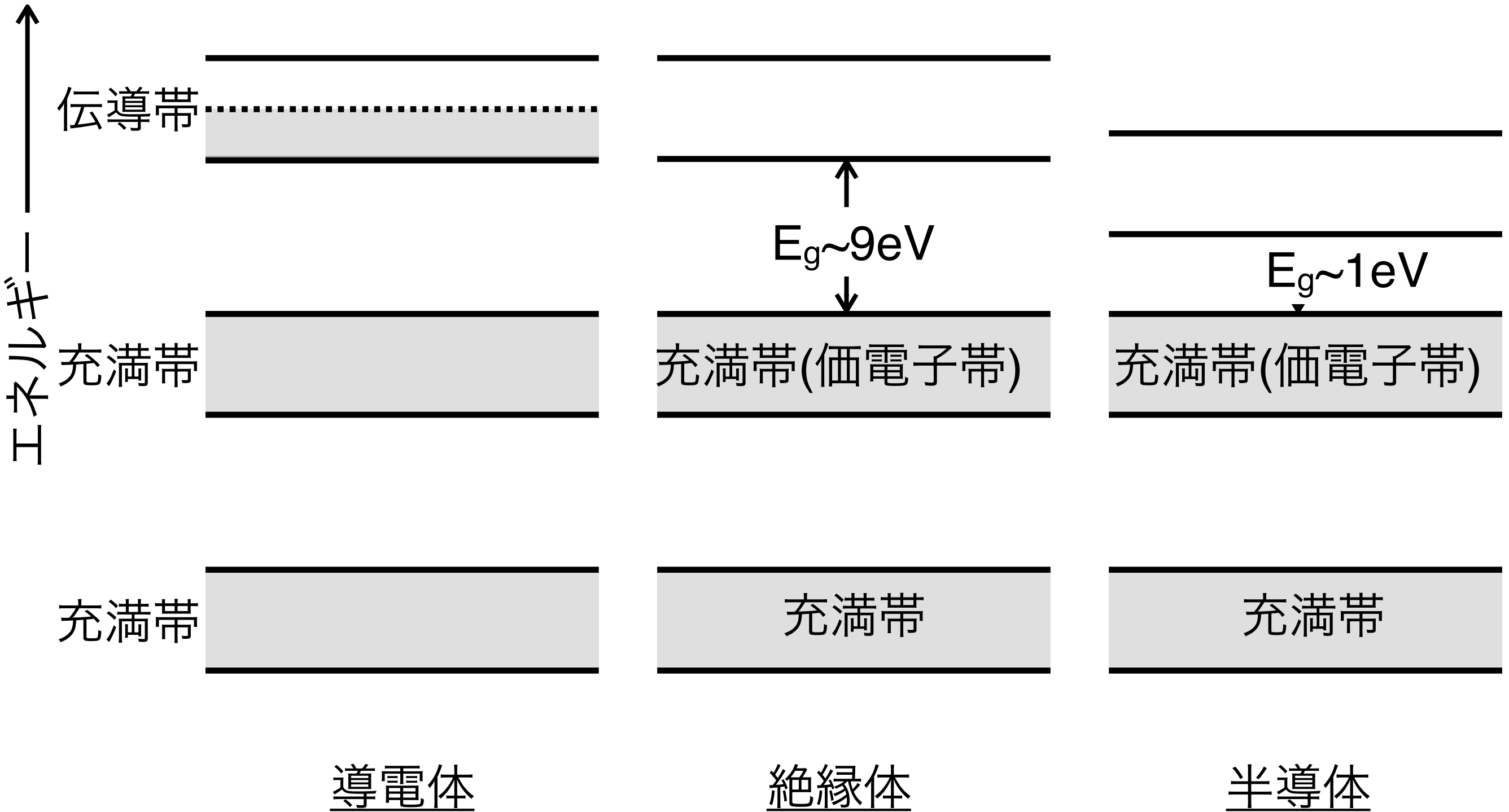


図 8 Si 原子を接近させ、ダイヤモンド格子を形成したときのエネルギーバンド。



真性半導体のバンド構造・キャリア

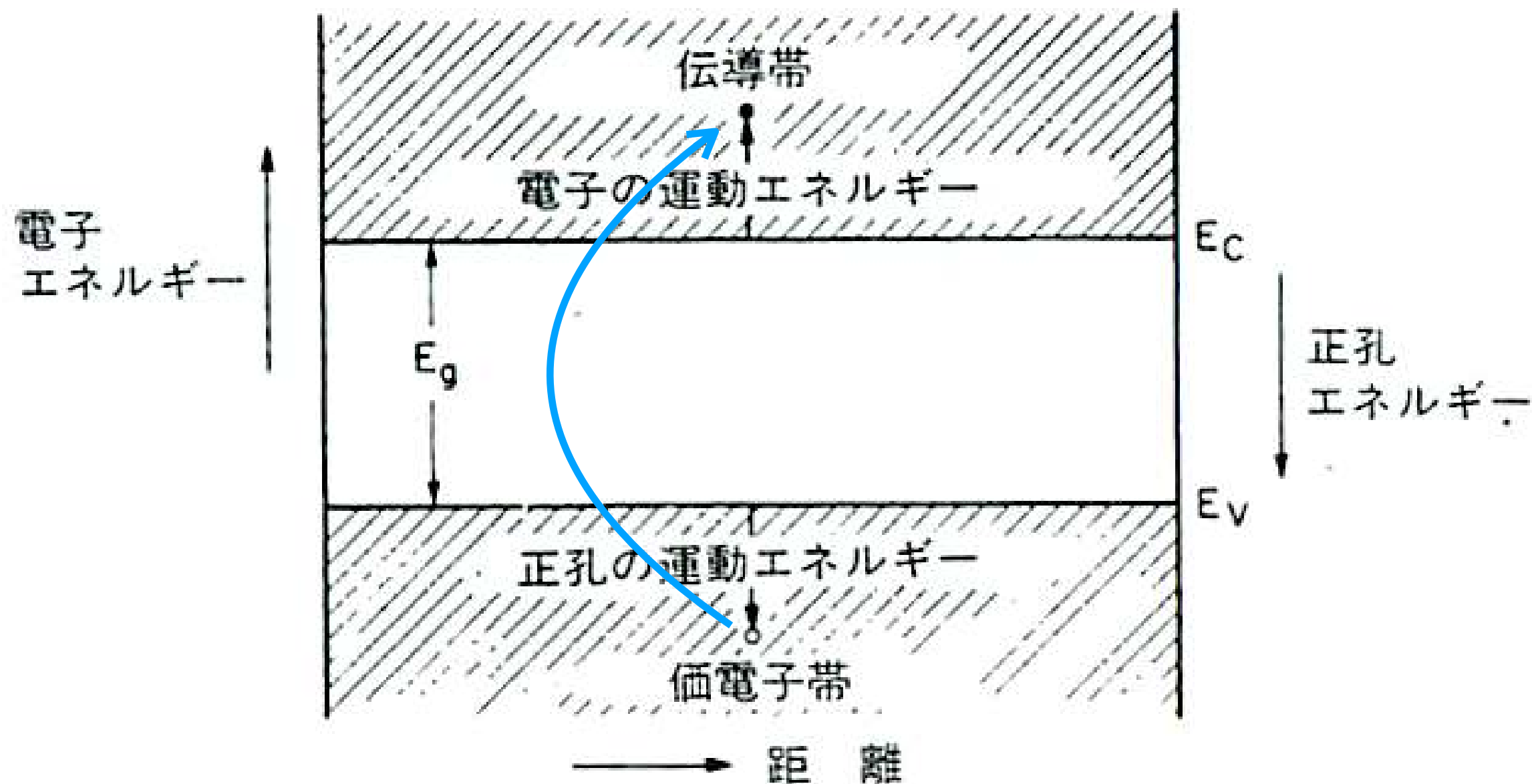


図 10 エネルギーバンド表示でのポテンシャルエネルギーと運動エネルギー。

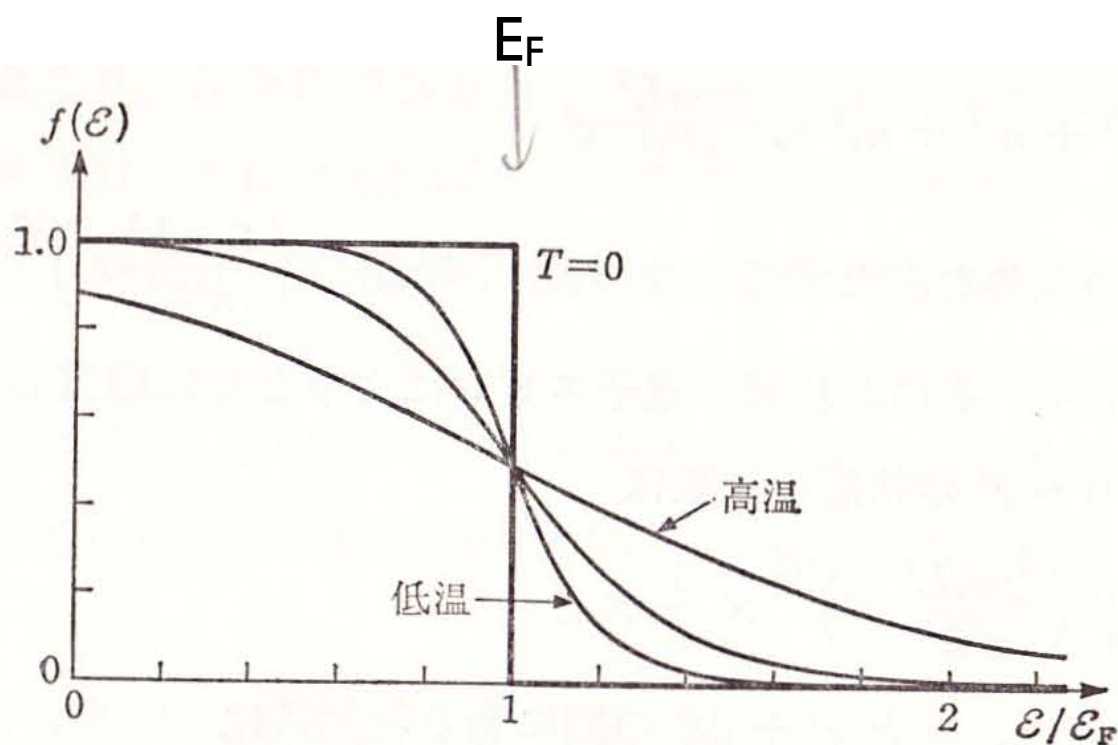
フェルミ分布と状態密度

f(E) : フェルミ分布関数

状態密度 ρ(E) : エネルギー準位の分布

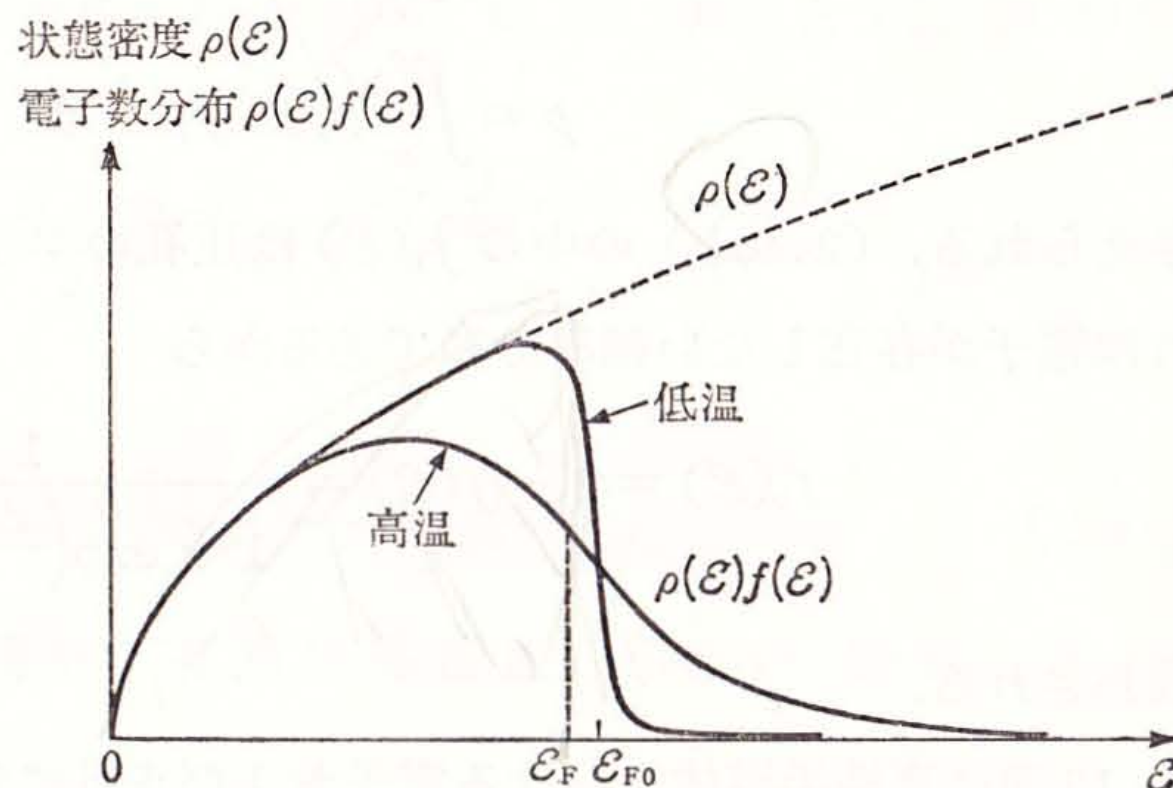
$$f(\mathcal{E}) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_F}{kT}\right)}$$

E_F : フェルミ準位 (Fermi level)



2-11 図 フェルミ分布

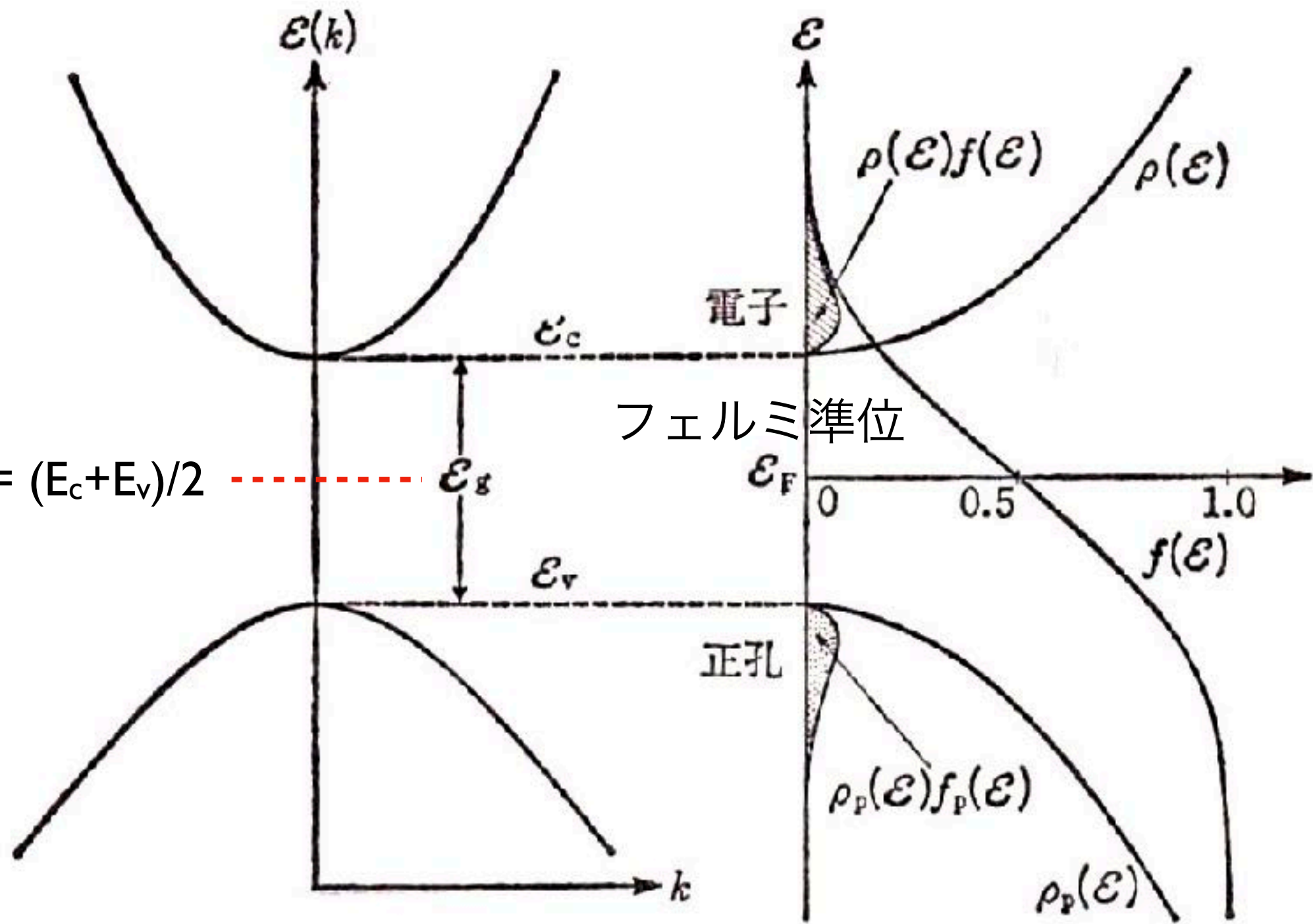
E_F : フェルミエネルギー
 $T=0$ のフェルミ準位



2-12 図 自由電子の状態密度と分布

実際にそれぞれの準位に電子が存在する確率は、分布関数f(E)と状態密度ρ(E)の掛け算

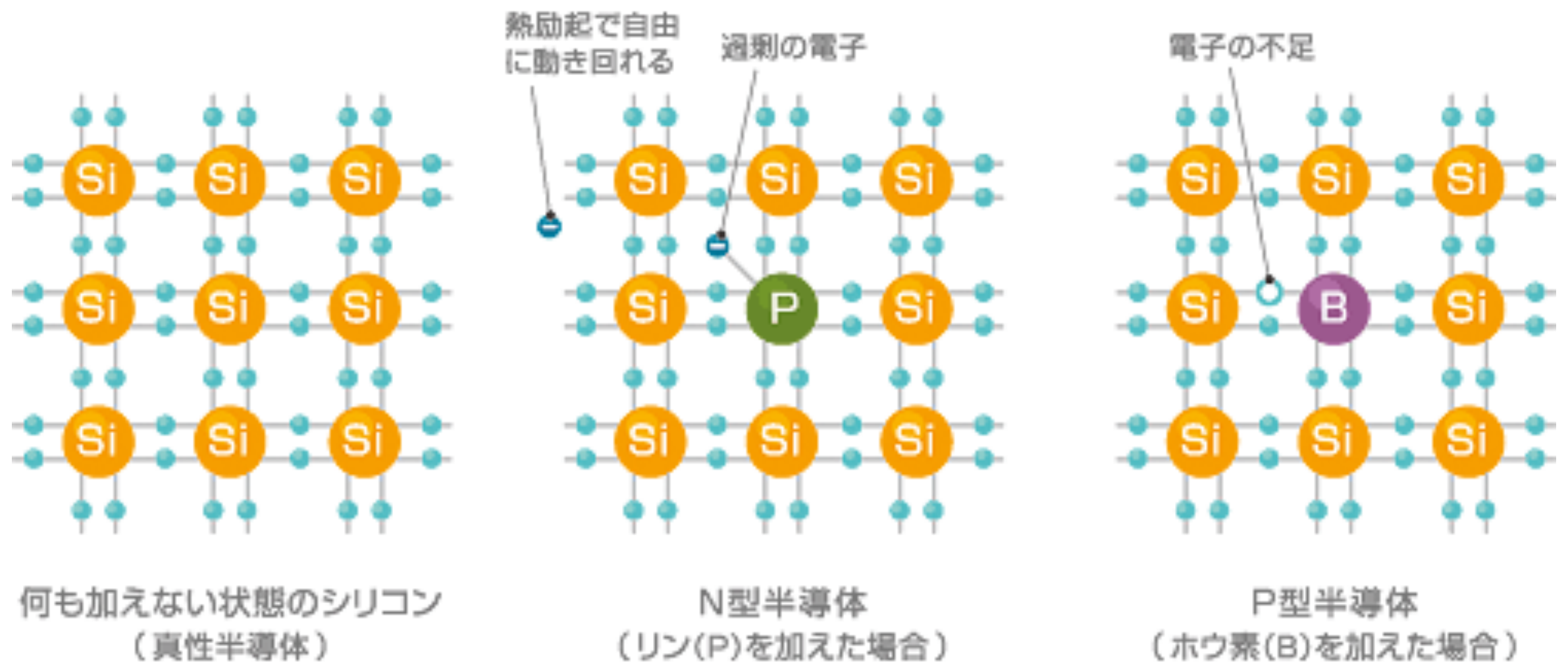
真性半導体の電子と正孔の分布



真性準位 $E_i = (E_c + E_v)/2$

2-13 図 真性半導体の電子と正孔の分布. $f(E)$ はフェルミ分布, $\rho(E)$ は電子の状態密度, $\rho_p(E)$ は正孔の状態密度.

P型半導体, N型半導体(I)



P型半導体, N型半導体(3)

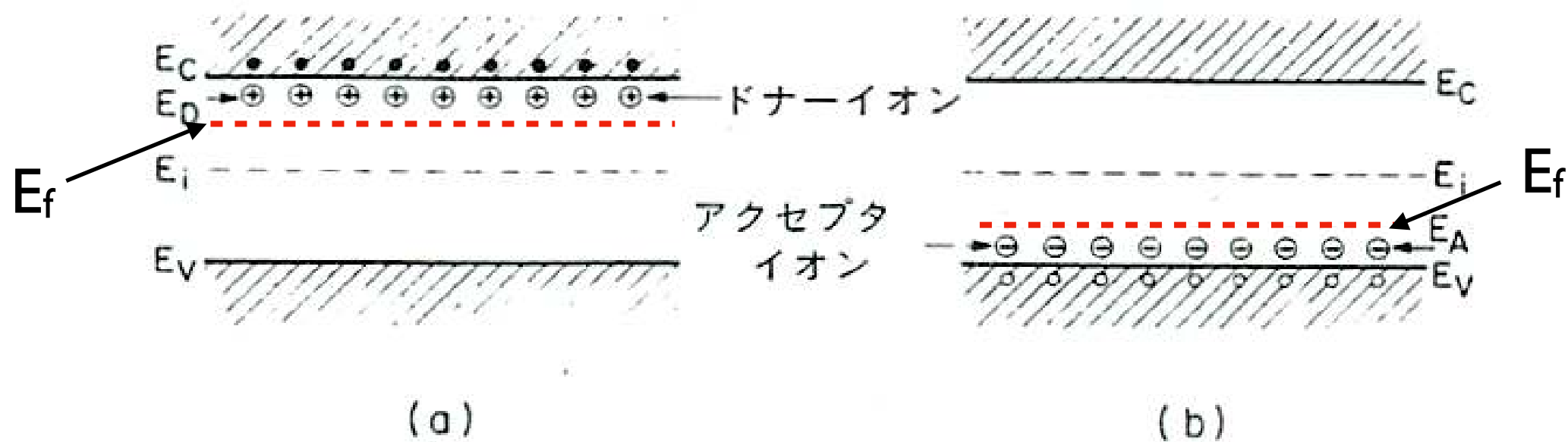


図 19 ドナーイオン(a) およびアクセプタイオン(b) を有する外因性半導体のエネルギーバンド図.

$$n = N_D \quad E_C - E_F = kT \ln \left[\frac{N_C}{N_D} \right], \quad p = N_A \quad E_F - E_V = kT \ln \left[\frac{N_V}{N_A} \right].$$

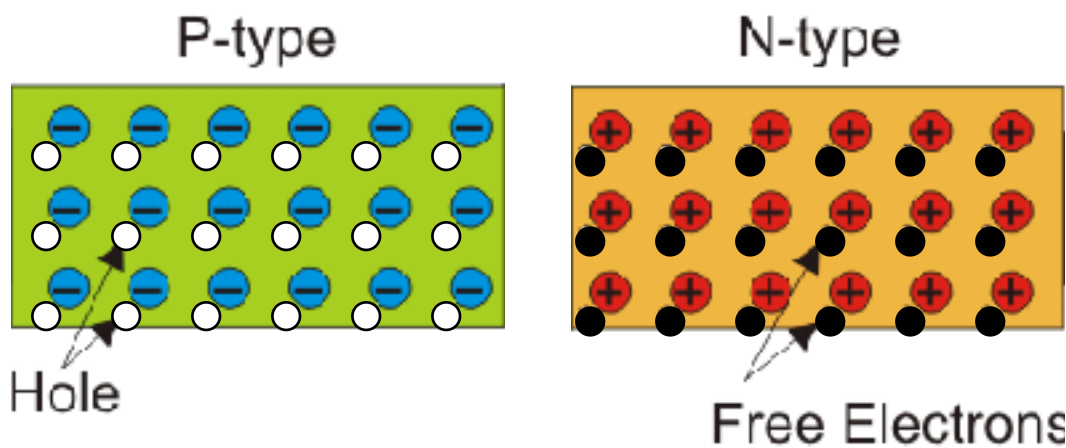
ドナー濃度が高いほど $(E_C - E_F)$ は小さくなる。
すなわち、フェルミ準位は伝導帯の底に接近する。

同様に、アクセプタ濃度が高いほど
フェルミ準位は価電子帯上端に近づく。

質量作用則 (式(24)) によれば、 n と p の積は真
性半導体の場合と等しい ($np = n_i^2$)。

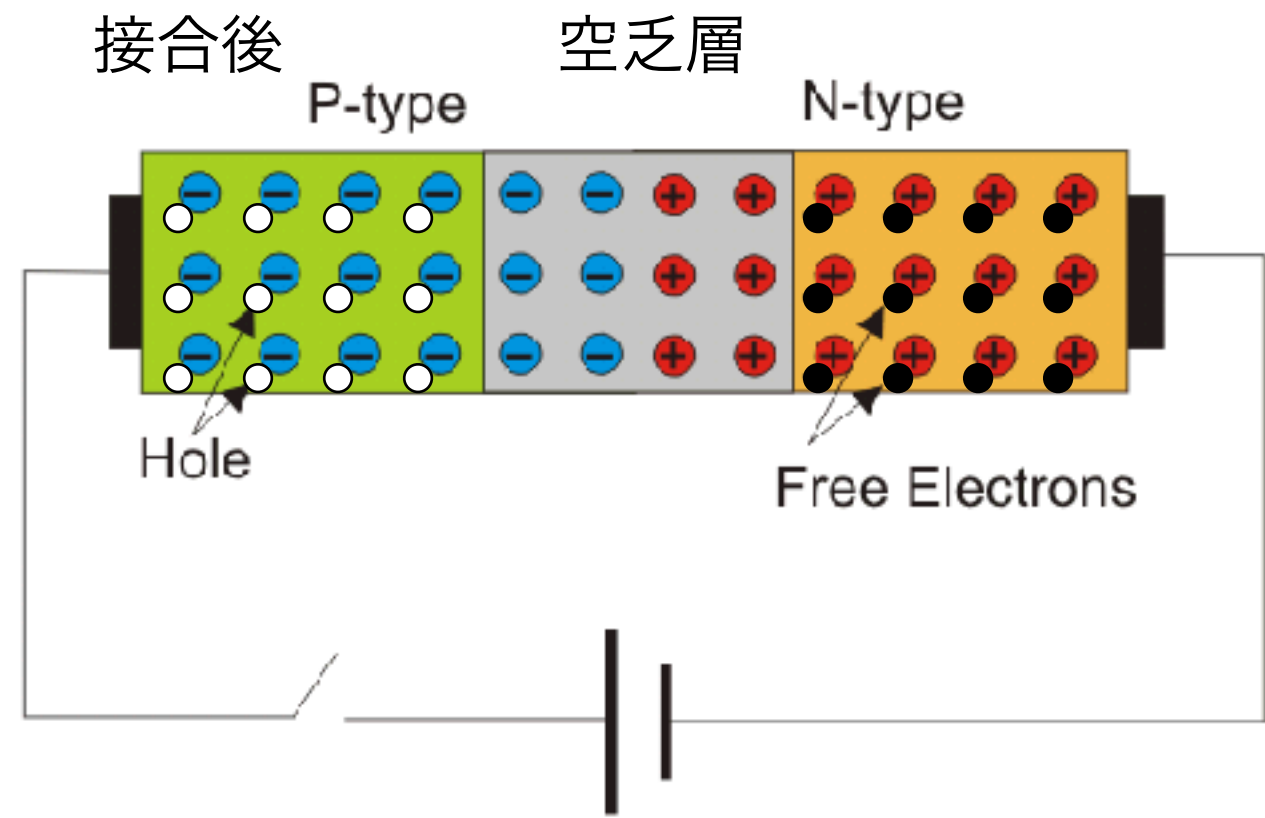
pn接合ダイオードの構造と動作(I)

接合前

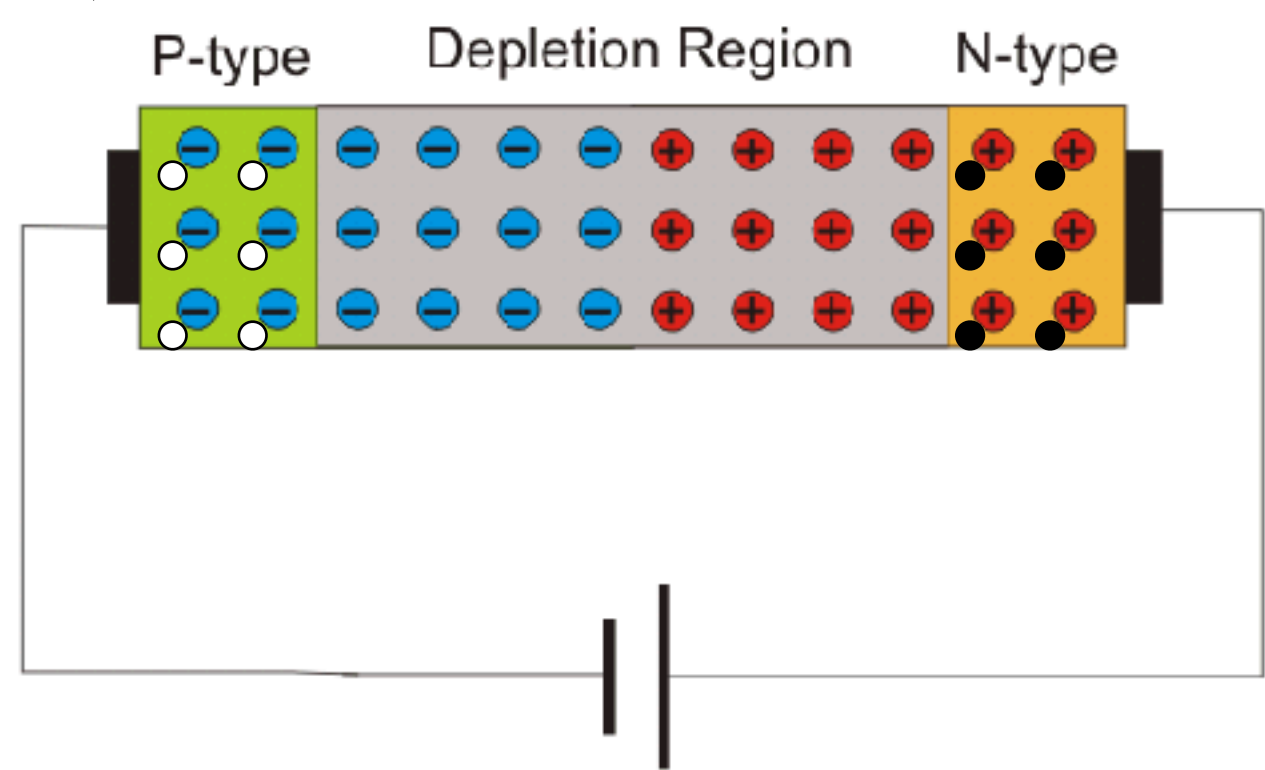


実際には、それぞれ独立に作ったP型とN型を物理的にくっつけるわけではない。もともと1つの結晶シリコンにP型とN型の領域を作る。

接合後



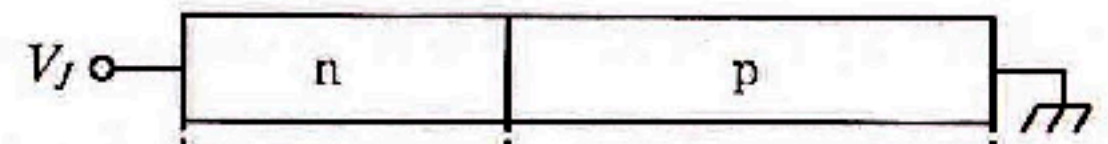
逆方向バイアス



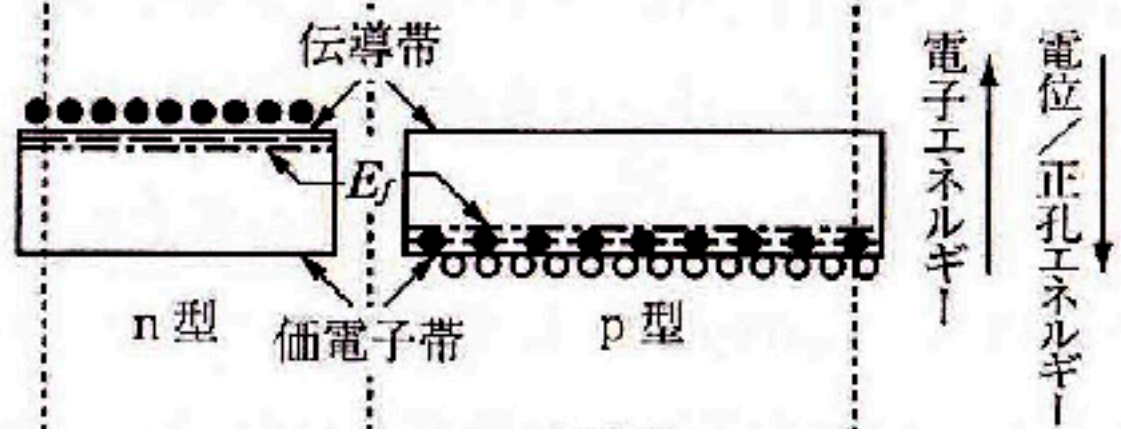
pn接合ダイオードの構造と動作(2)

接合前

(a) pn 接合モデル



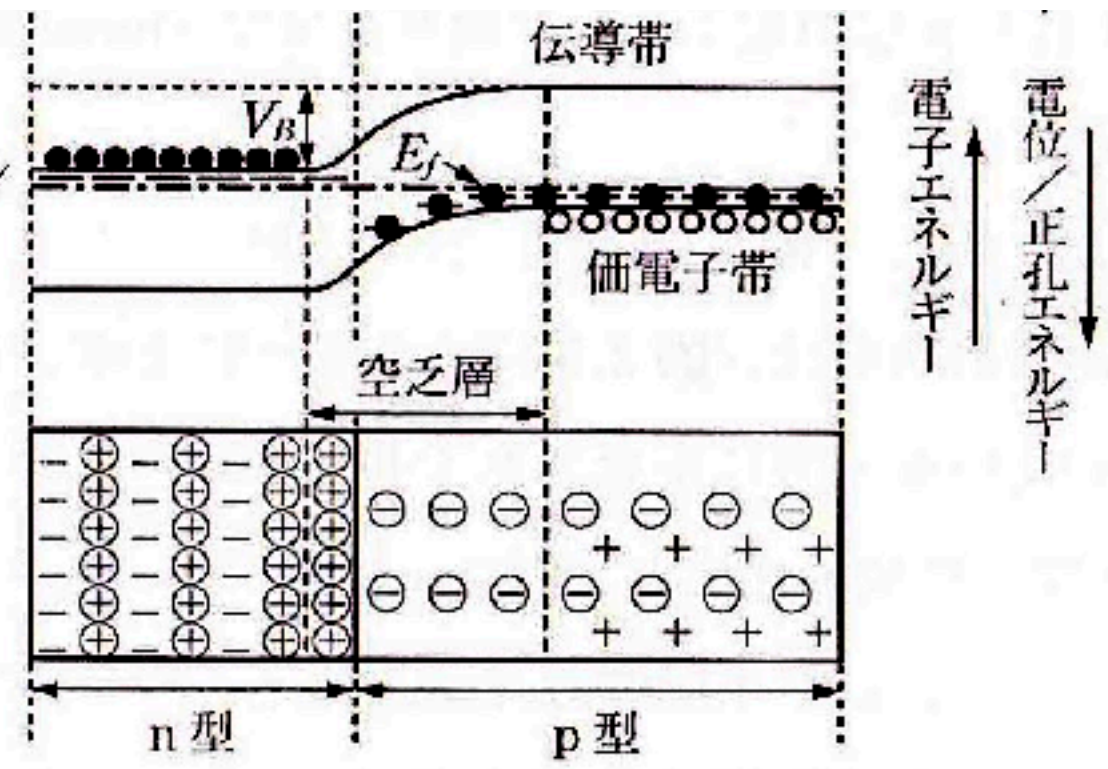
(b) 非接合エネルギー帯図



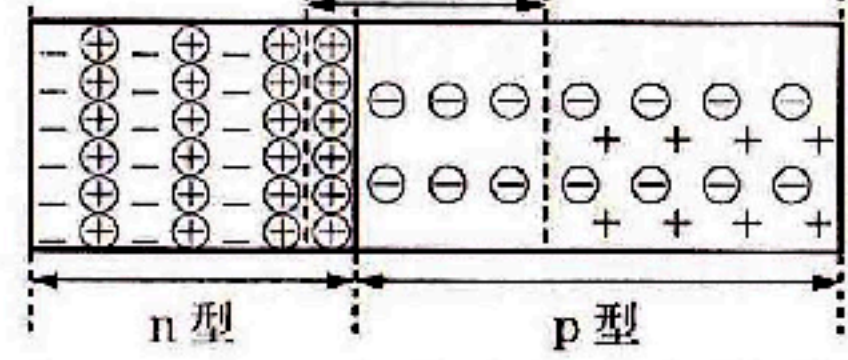
接合後

$V_j = 0\text{ V}$
またはオープン

(c) 接合エネルギー帯図



(d) 接合空間分布図



平衡状態 ● - : 電子 - ⊕ : イオン化ドナー
○ + : 正孔 ● ⊖ : イオン化アクセプタ

V_B : ビルトイン電圧
シリコン : $\sim 0.6\text{ V}$

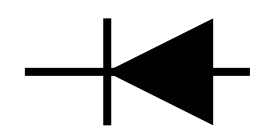
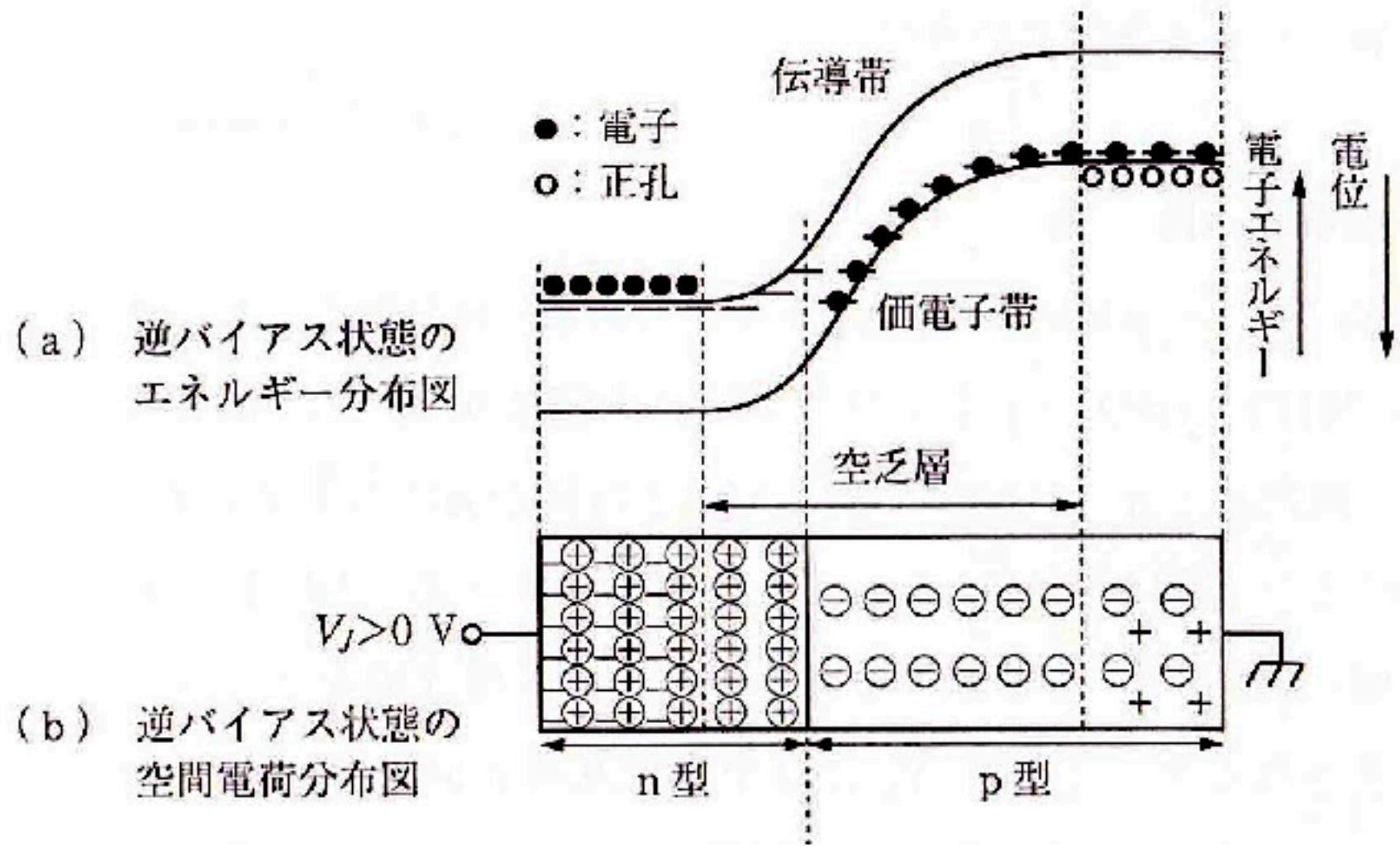


図 2.7 pn 接合

pn接合ダイオードの構造と動作(3)

逆バイアス



順バイアス

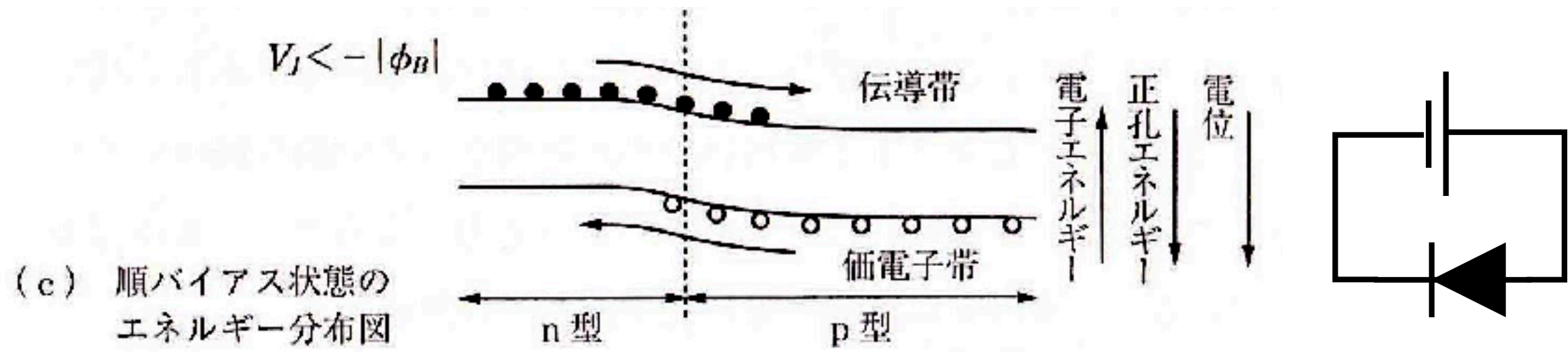


図 2.8 pn 接合のバイアス状態

pn接合ダイオードの構造と動作(4)

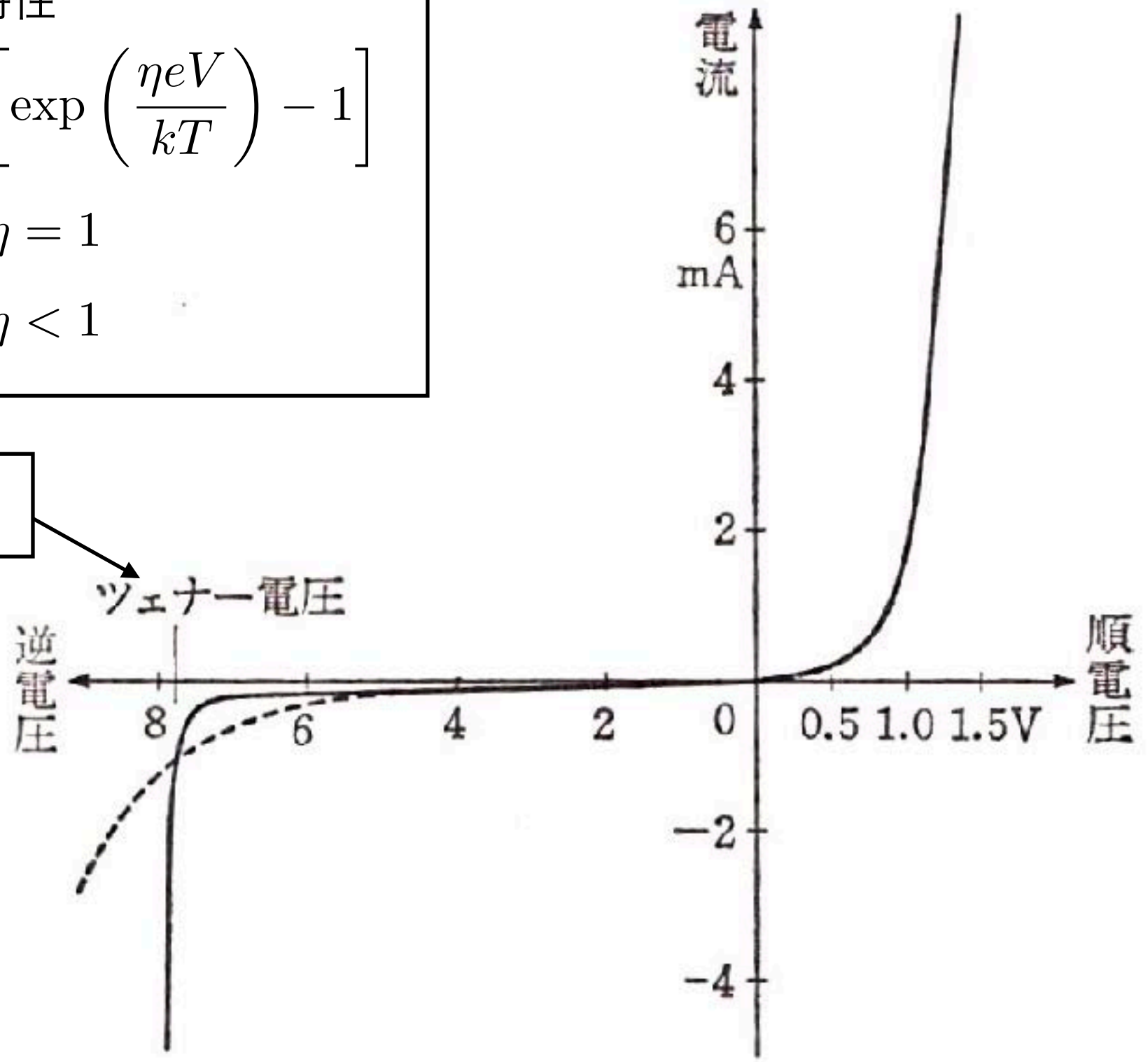
電流-電圧特性

$$I = I_s \left[\exp \left(\frac{\eta eV}{kT} \right) - 1 \right]$$

理想的 $\eta = 1$

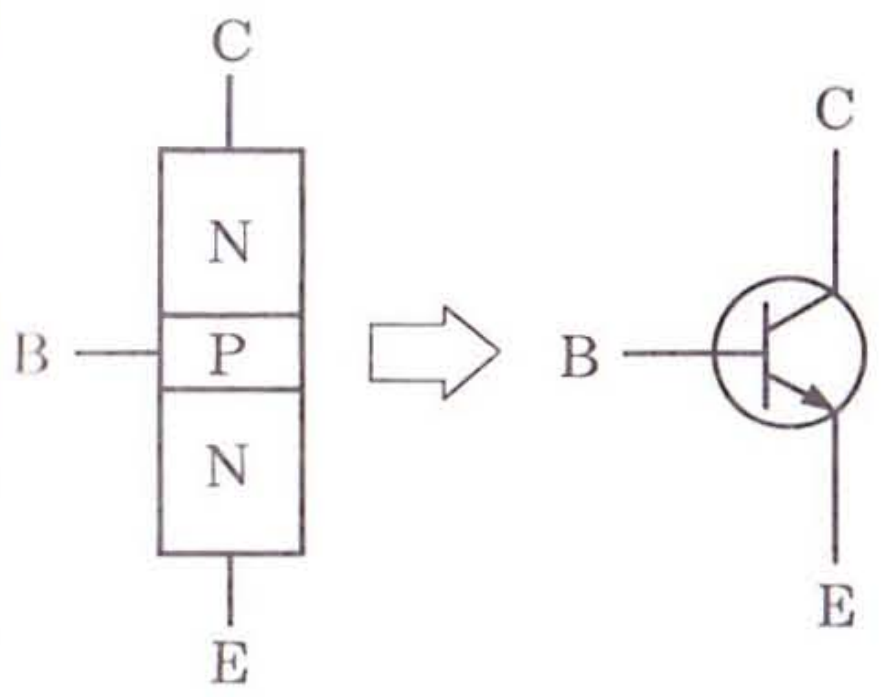
現実 $\eta < 1$

トンネル効果で空乏層を通り抜けることで電流が流れる

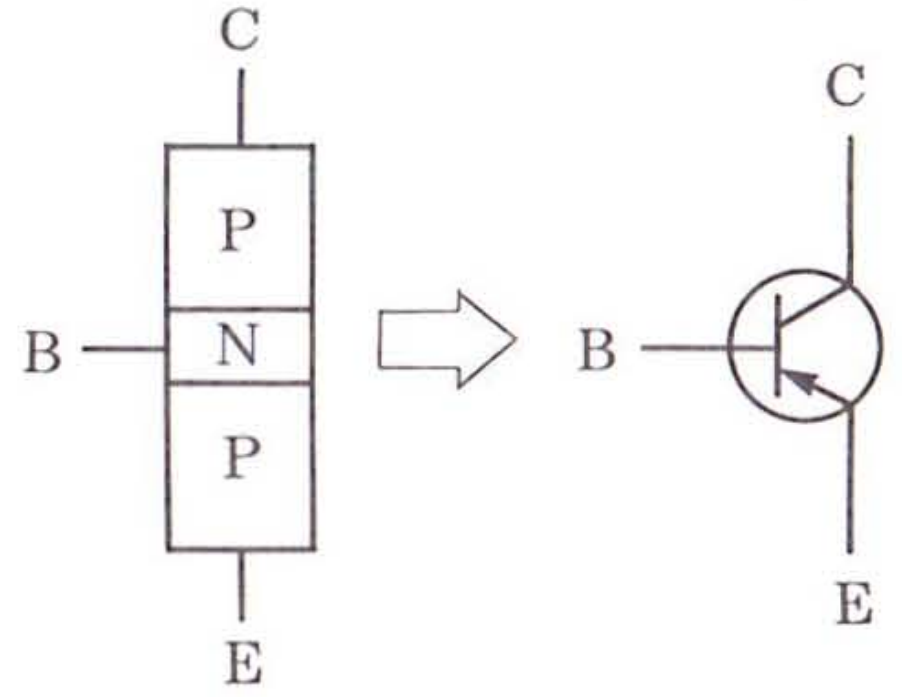


3-1 図 pn 接合ダイオードの電圧 - 電流特性

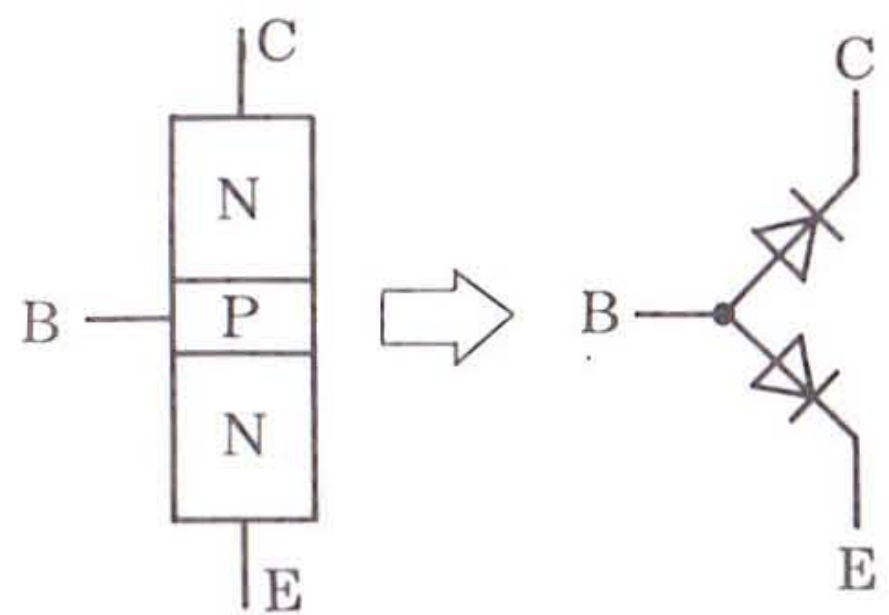
バイポーラトランジスタの動作(I)



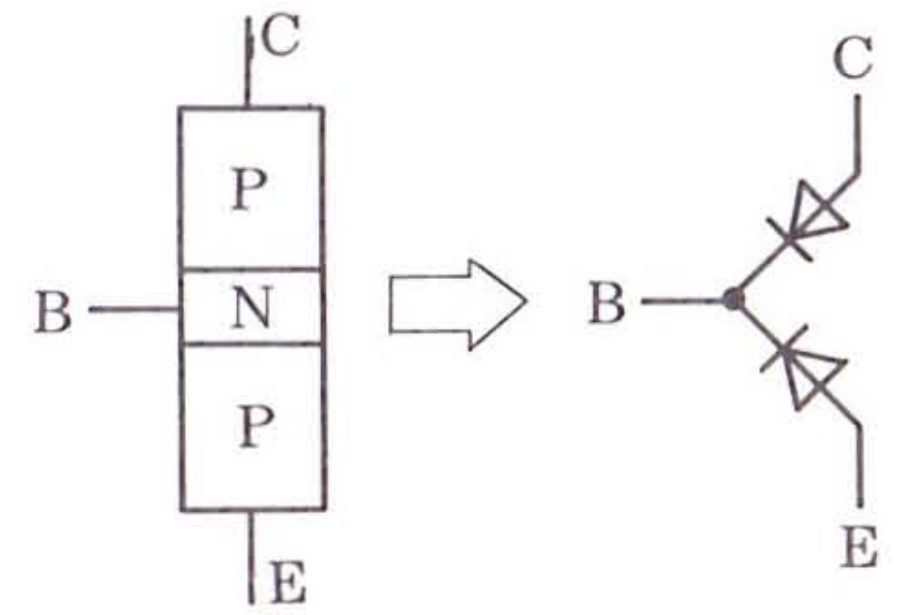
(図 a) NPNトランジスタ



(図 b) PNPトランジスタ

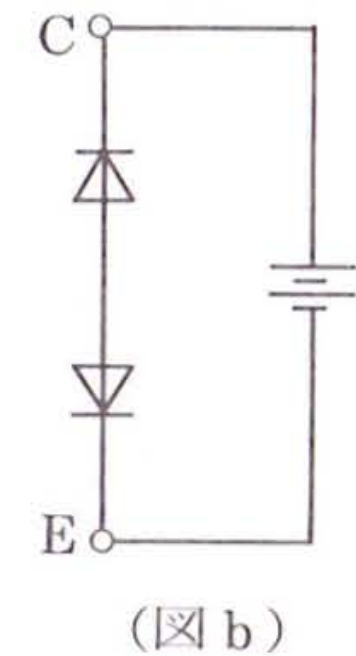
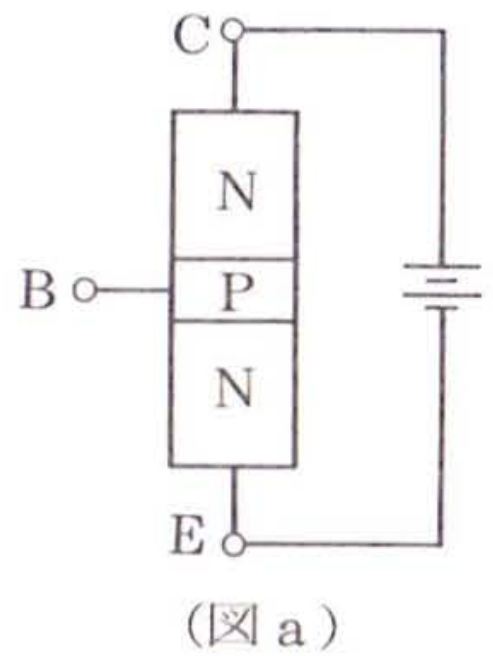


(図 a)

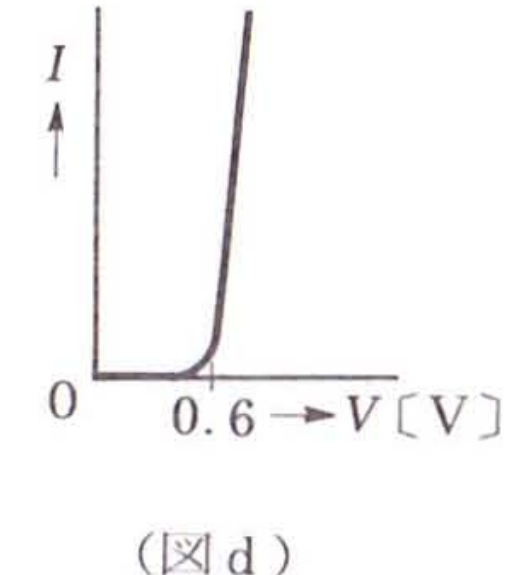
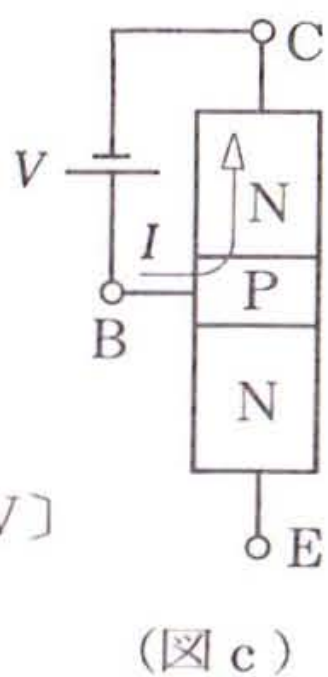
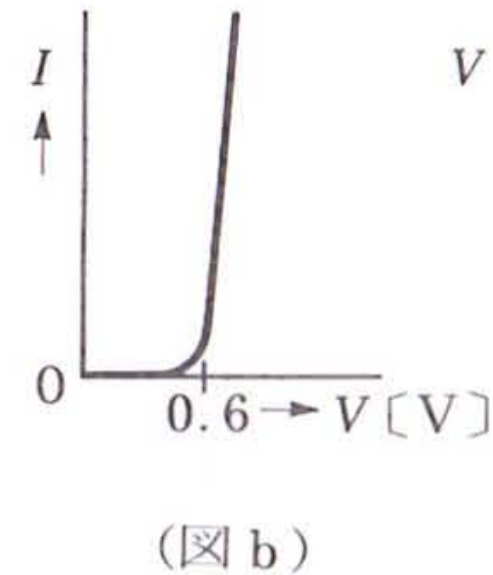
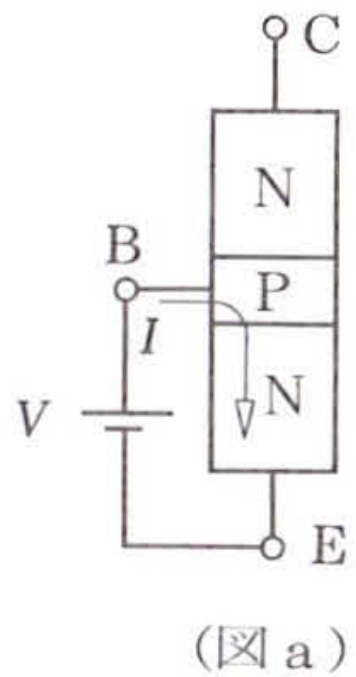


(図 b)

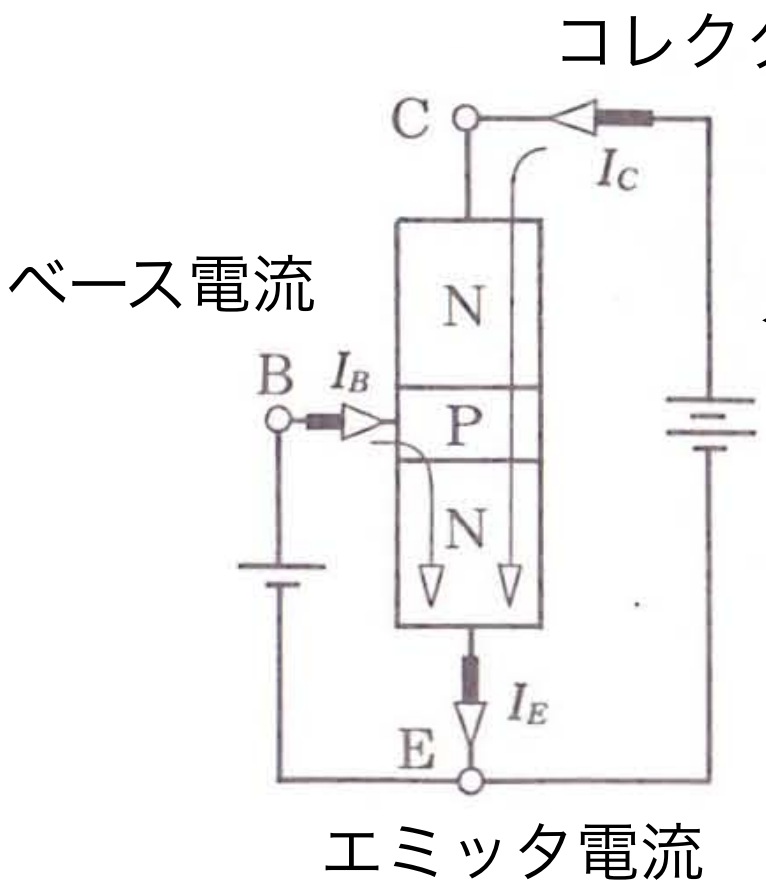
バイポーラトランジスタの動作(2)



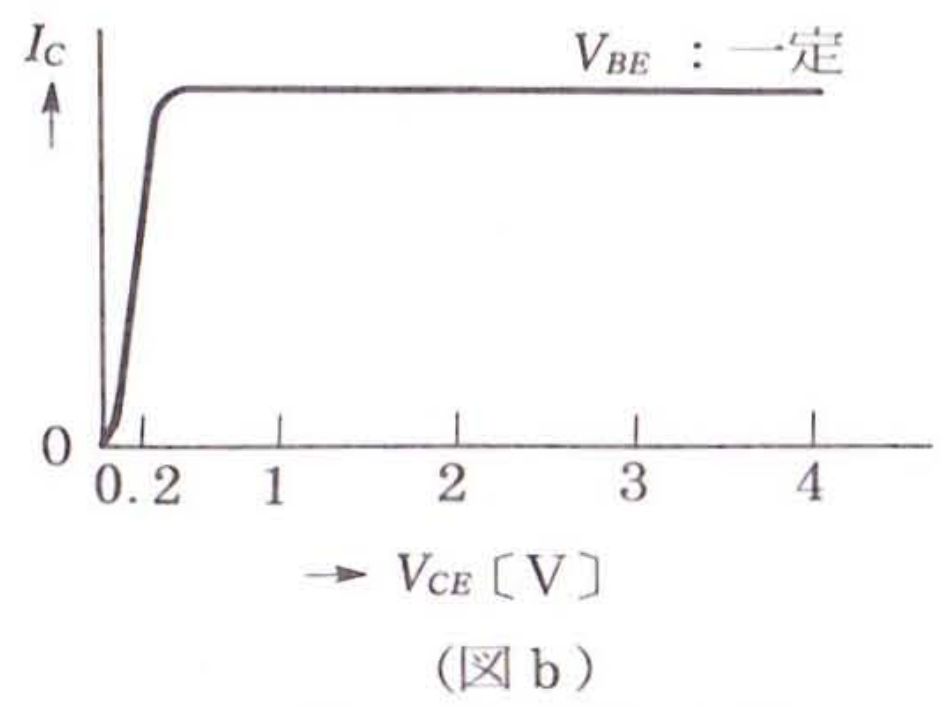
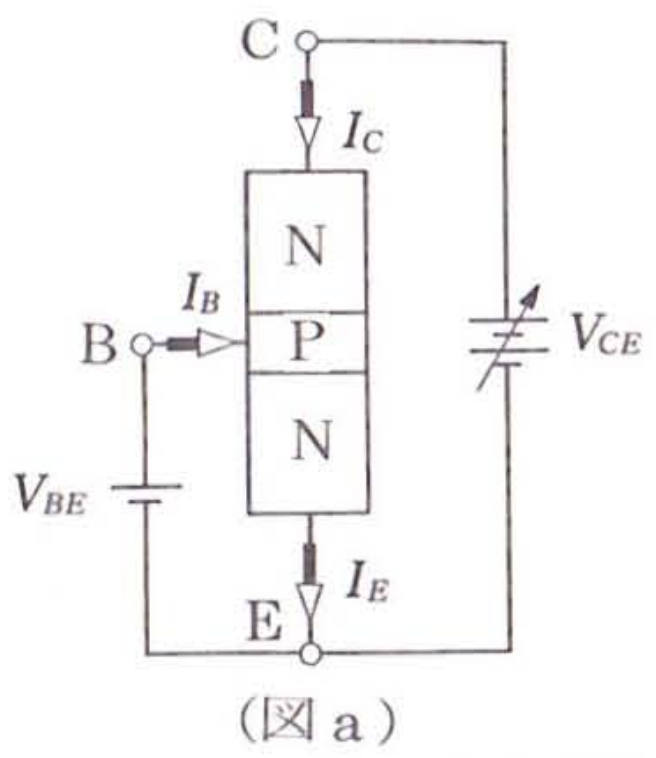
電流は流れない



バイポーラトランジスタの動作(3)

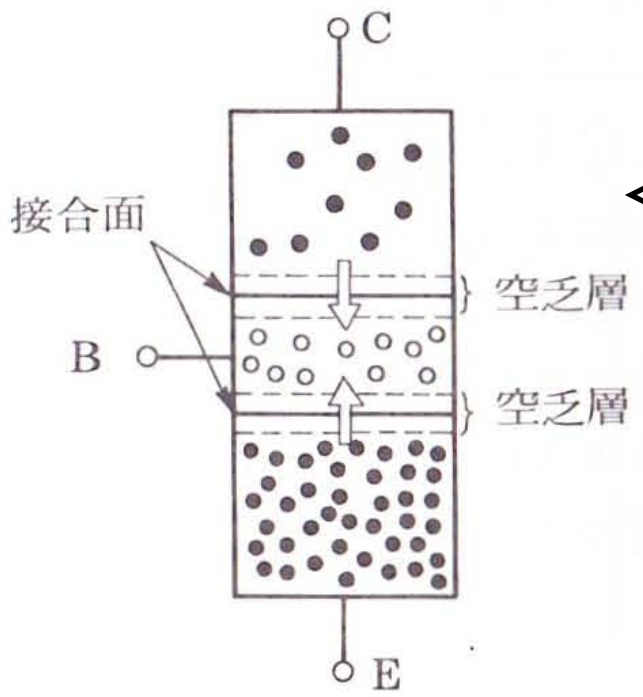


電流は流れる。
 エミッタからの電子はベースのみならず、コレクタにも流れるようになる。むしろ、コレクタへの電流がほとんど。
 ベース電流とコレクタ電流は比例する。

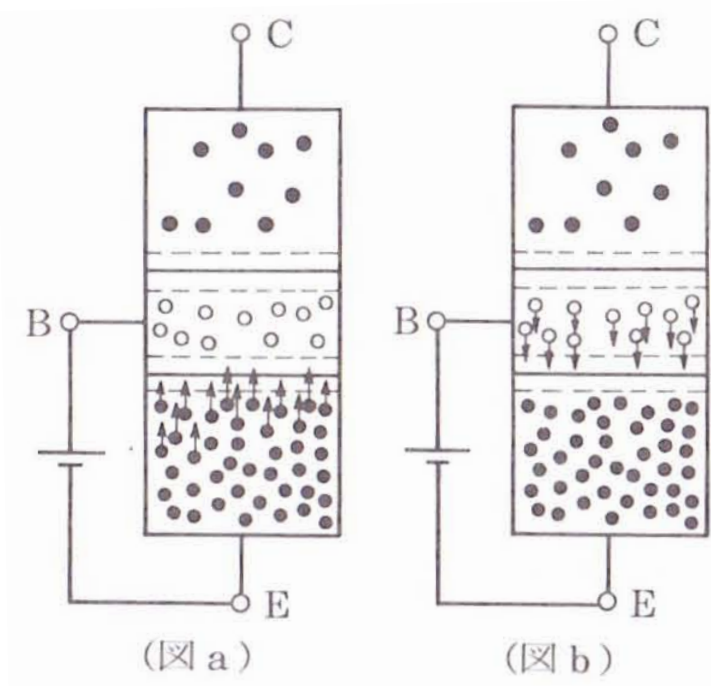
$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \sim 100$$


$V_{CE} > 0.2V$ では、コレクタ電流は V_{CE} に依存しなくなる。
 ベース電流にのみに依存する。

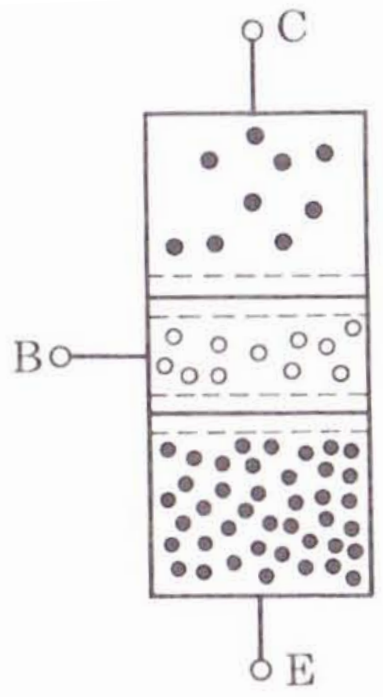
バイポーラトランジスタの動作(4)



ダイオード同様
ベースの両側に空乏層
ができる。
内蔵電圧(内部電解)も
作られる。

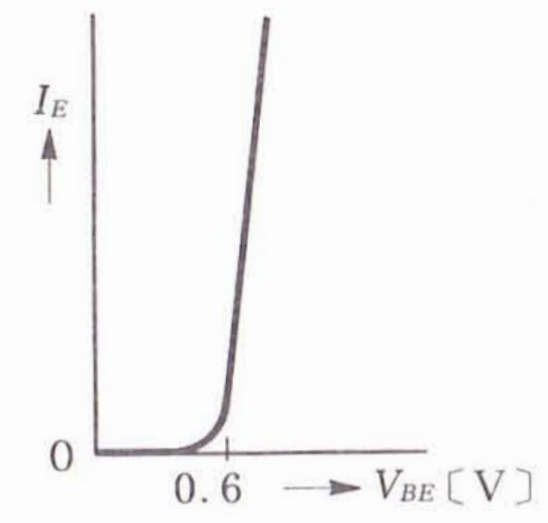
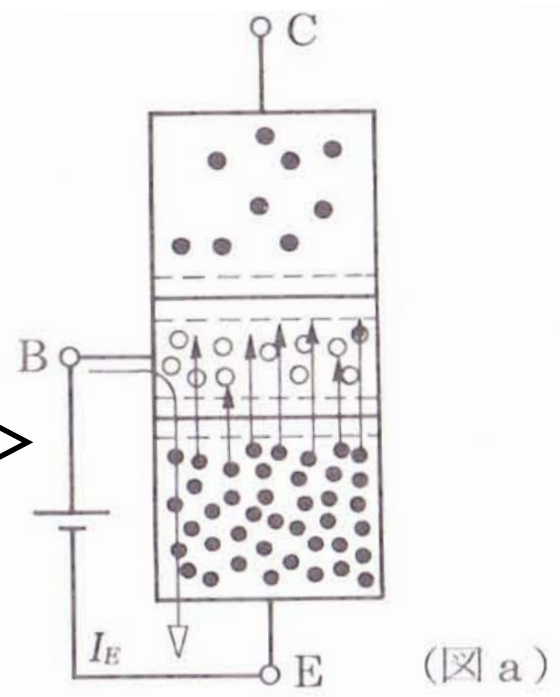


ダイオード同様に
エミッタの電子もベー
スのホールも移動し、
電流は流れる。

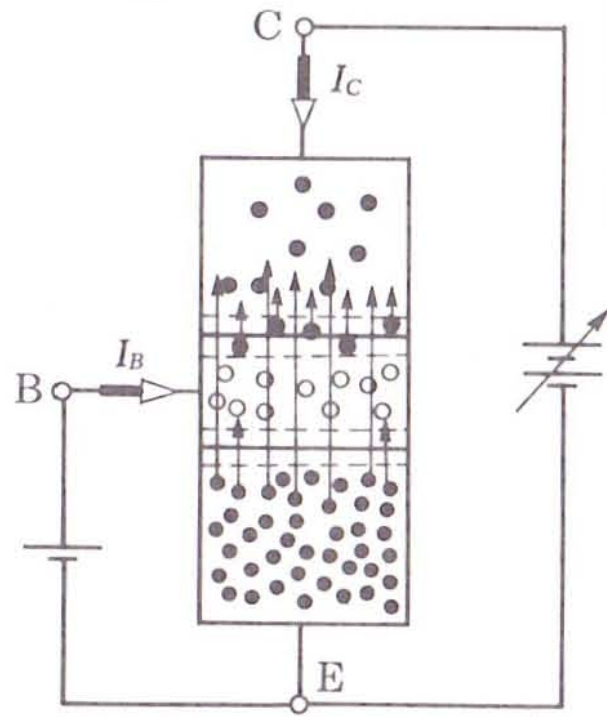


ただしトランジスタでは、
ベースの不純物濃度
 < エミッタ不純物濃度
ベースの厚みを薄くしておく

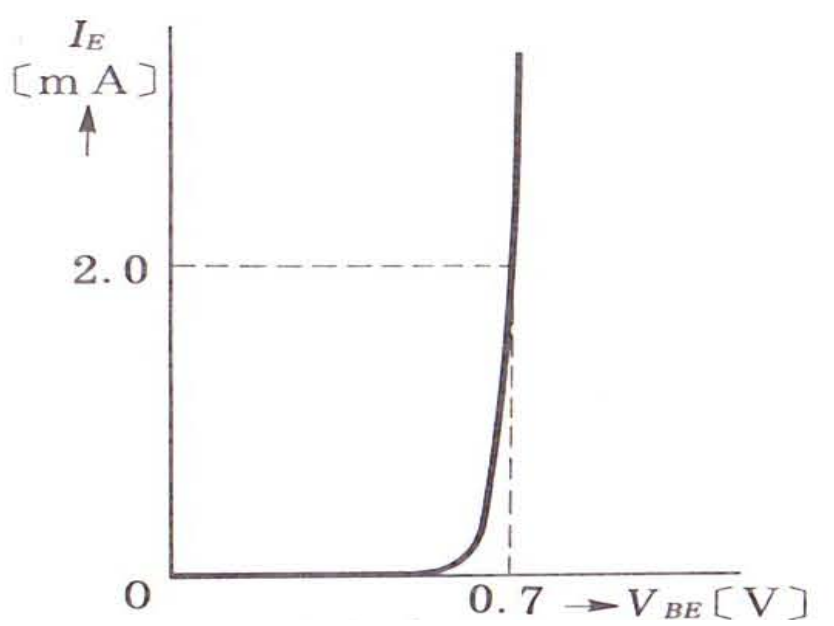
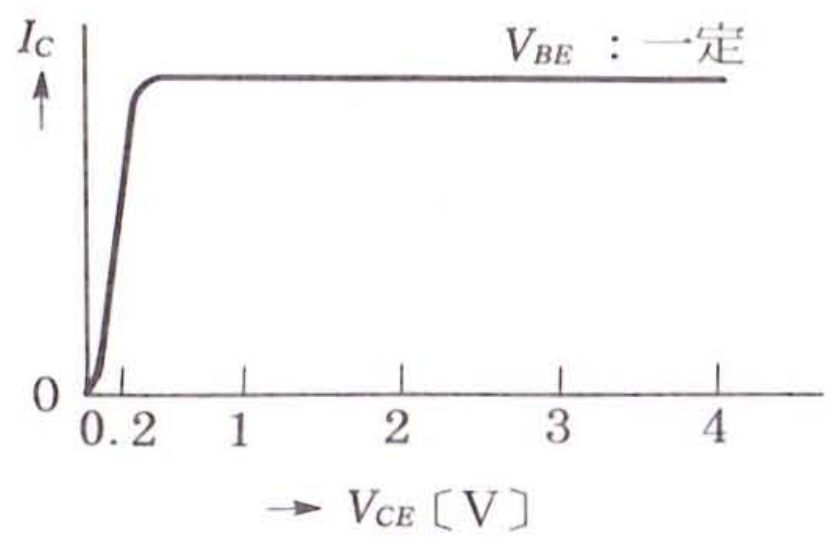
エミッタからの電子がCB間の空乏
層まで到達する。
しかし、結局はベースに流れること
になる。



バイポーラトランジスタの動作(5)



エミッタの電子がベースに移動する量は、BE間に加えた電圧で、決まる。CE間に加えた電圧は、単にCE間の空乏層に到達した電子を集めるだけ。なので、コレクタ電流はCE間の電圧には依存しない。これが0.2V。
 「BE間に加えた電圧に依存する」のだが、電圧に対して電流はexp的に増加するので、ON状態ではBE間の電圧は0.6V以上にはそれほど上がらない。



正しいステートメント

「VBEを印加することで、エミッタ電流(電子)が流れ、ベースとコレクタに、 $I:hFE = I_B : I_C$ の比で分流する」

よく言われるステートメント

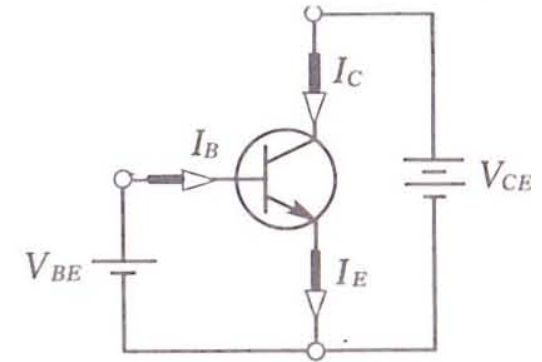
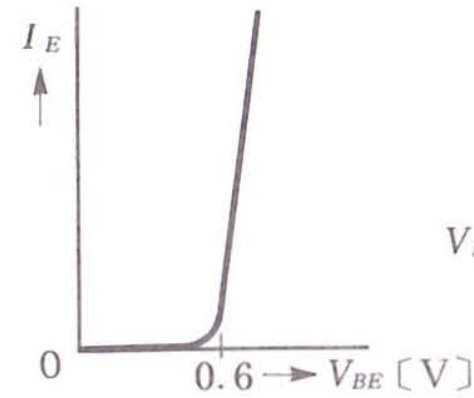
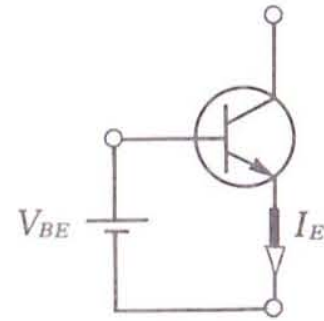
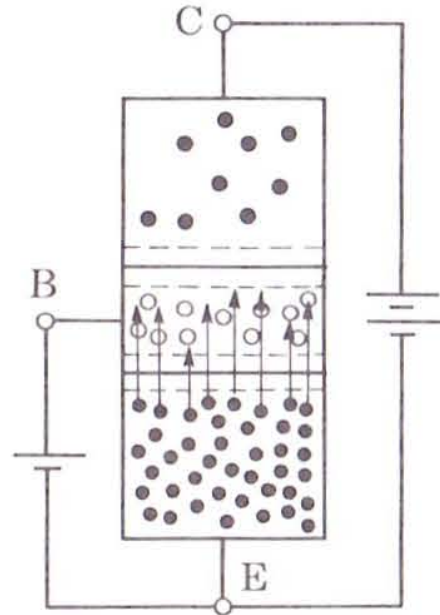
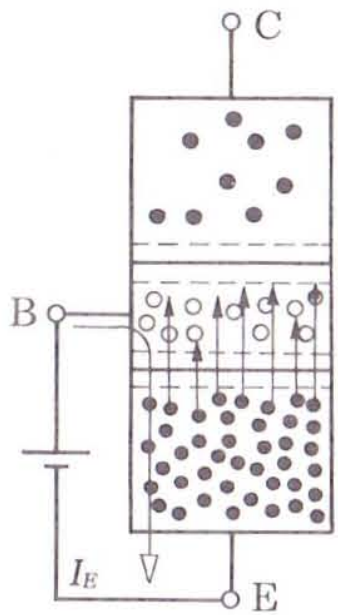
「VBEを印加することで、ベース電流が流れ、それによってコレクタ電流やエミッタ電流が流れる。その比は $I_B : I_C = I : hFE$ であり、つまりベース電流でコレクタ電流を増幅することになる」

トランジスタ「回路」を理解するコツ

「トランジスタがON状態ではVBEはほぼ0.6-0.7Vである。これによりベース電圧からエミッタ電圧が決まる。その結果、エミッタにつなげている回路素子により、結果的にエミッタ電流が決まる。VBEでICやIEを制御している」

バイポーラトランジスタの動作(6)

NPNトランジスタ



PNPトランジスタ

