

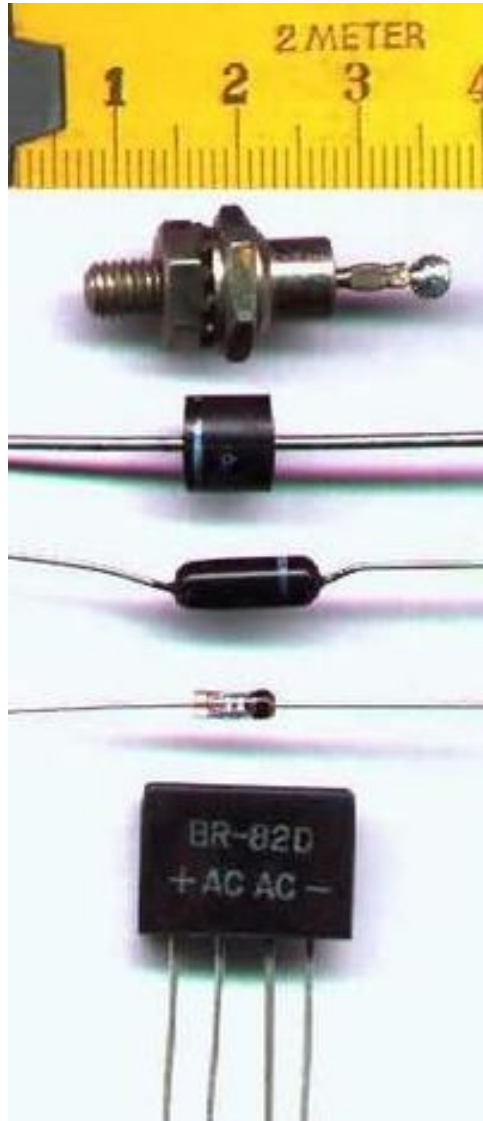
電子デバイス工学

03

半導体ダイオード

(pn接合：熱平衡／非平衡)

今回、学ぶこと

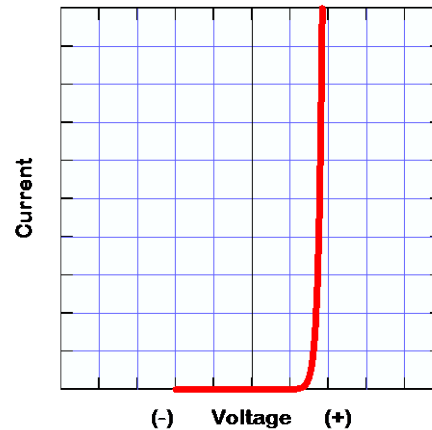
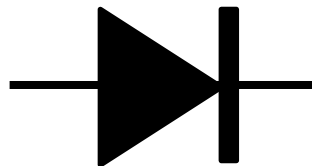


ダイオード (英語 : Diode)

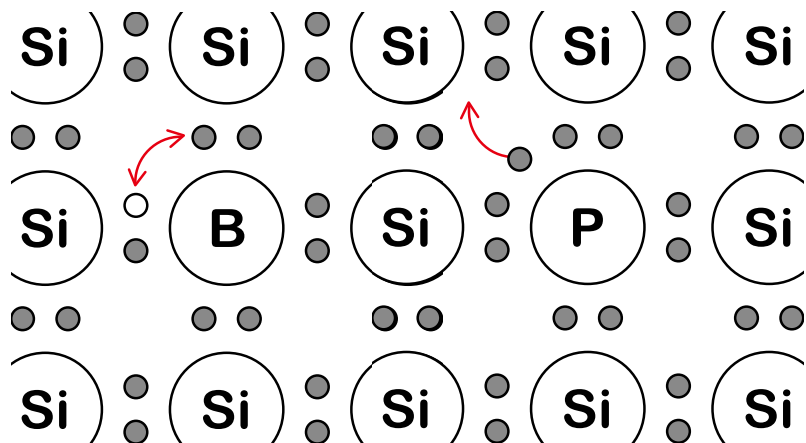
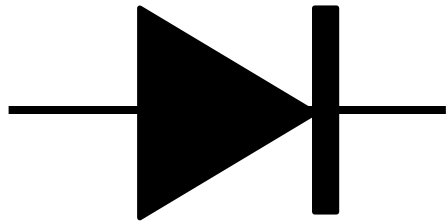
整流作用 (電流を一定方向にしか流さない作用) を持つ電子素子

最初のダイオードは2極真空管で、後に半導体素子である半導体ダイオードが開発された。今日では単にダイオードと言えば、通常、半導体ダイオードを指す。

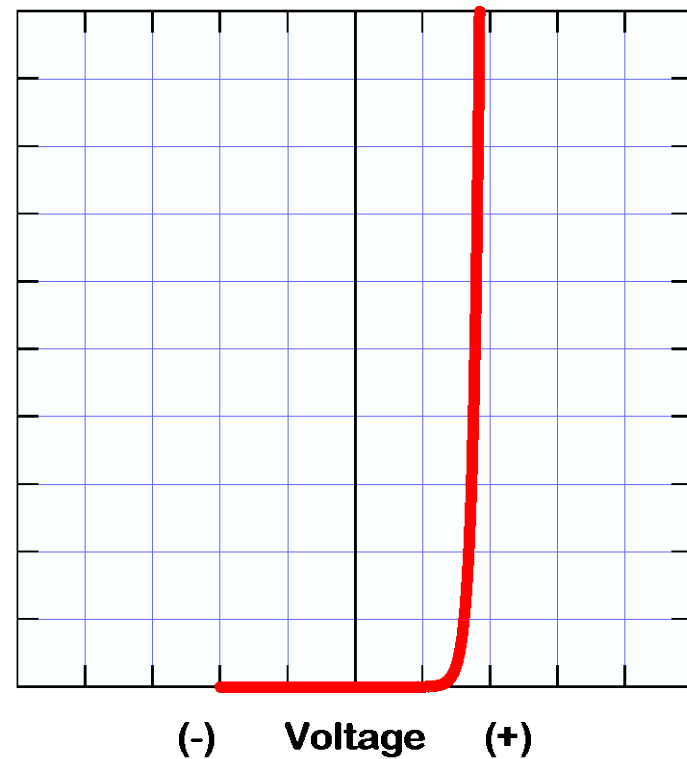
1919年、イギリスの物理学者 William Henry Eccles がギリシア語の di = '2' と ode = 「道」を合わせて造語した。



p n 接合ダイオード

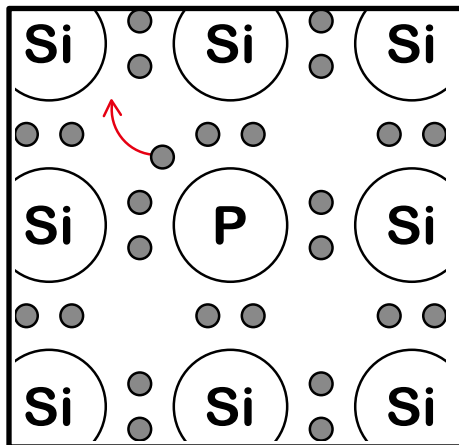


Current



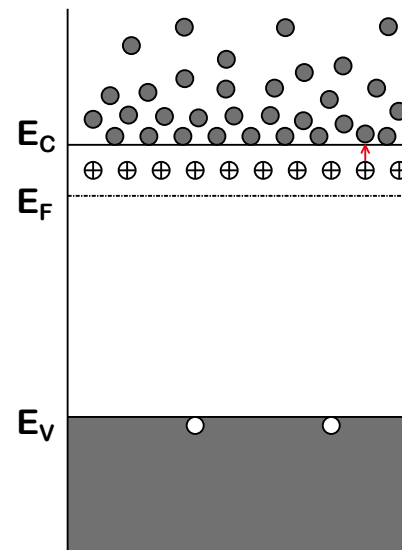
今回、思い出して欲しいこと

n形半導体

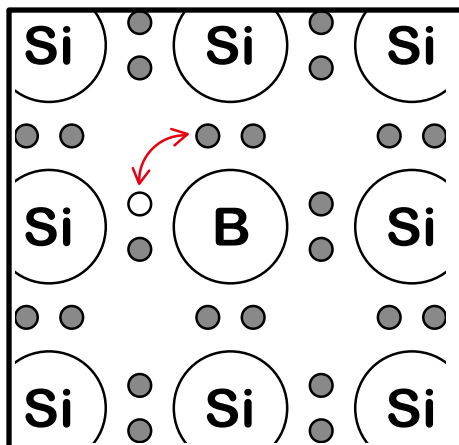


IV族にV族を添加
電子が余る

少ないエネルギーで
伝導キャリア生成 = 電子

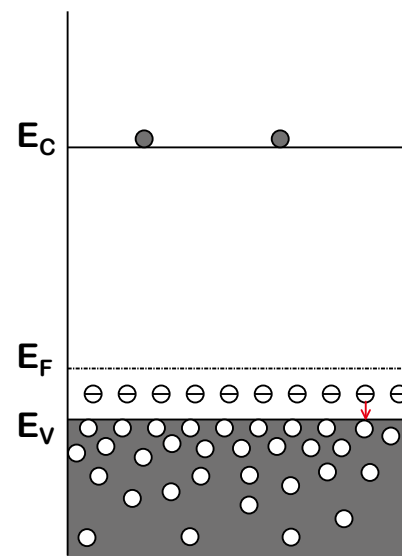


p形半導体



IV族にIII族を添加
電子が不足

少ないエネルギーで
伝導キャリア生成 = 正孔



準備

半導体中の電気伝導を理解するには？ →
電流の担い手の密度を知る必要がある

電子・正孔の密度の計算

半導体中の電気伝導を理解するには？ → 電流の担い手の密度を知る必要がある

$$\text{電子の密度} = (\text{座席の密度}) \times (\text{電子の存在確率})$$

$$= \text{状態密度関数 } Z_n(E) \times \text{分布関数 } f_n(E)$$

$$\text{正孔の密度} = (\text{座席の密度}) \times (\text{正孔の存在確率})$$

$$= \text{状態密度関数 } Z_p(E) \times \text{分布関数 } f_p(E)$$

分布関数ってどんな式？

状態密度関数ってどんな式？

分布関数

フェルミ分布関数

基盤学問：統計力学

温度が高い → 高いエネルギー準位まで電子があがる
温度が低い → 低いエネルギー準位までしか電子が上がらない

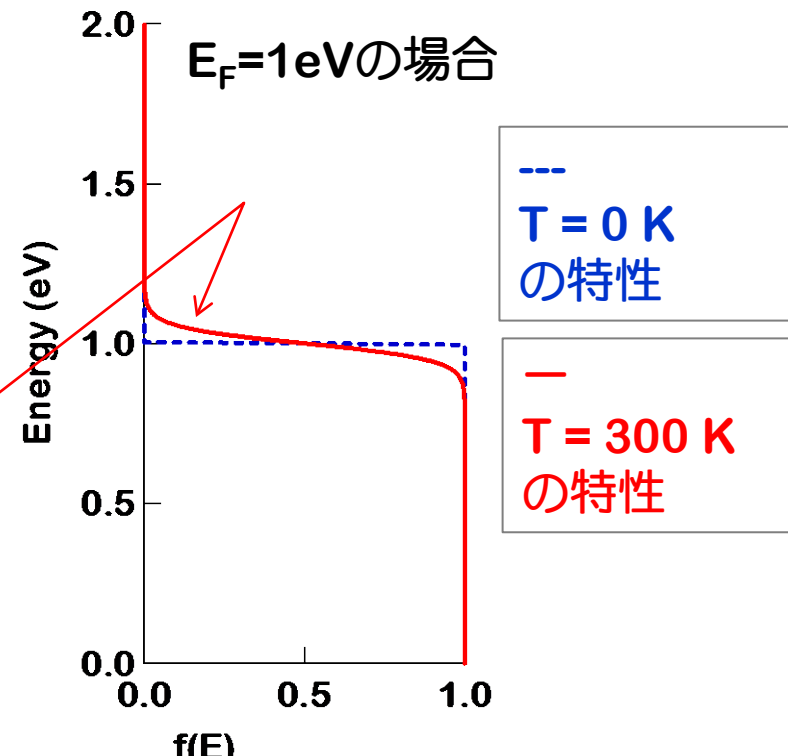
これを理論的な式で表すもの = フェルミ分布関数

フェルミ分布関数とは：
電子がエネルギーEの準位を実際に占める確率密度関数

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

絶対零度のとき
EFより上には
電子が存在
できない

温度が上がると
EFより上にも
電子が存在
できる



E_F って何？

絶対零度でのフェルミ粒子系の状態においてフェルミ粒子によって占められた準位のうちで最高の準位のエネルギー

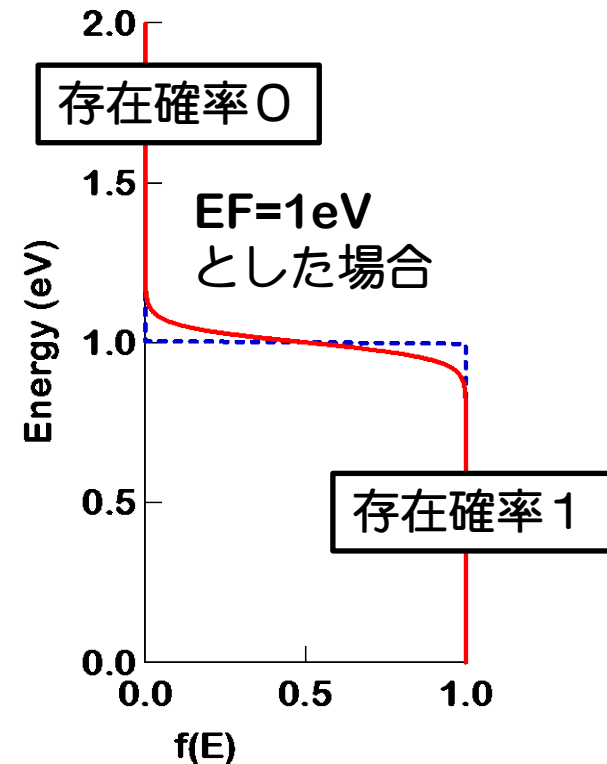
フェルミ粒子って何や？

フェルミ粒子とは、1つの体系内で2個の粒子がある同じ量子状態になることが許されない粒子。パウリの排他原理に従う粒子とも言える。

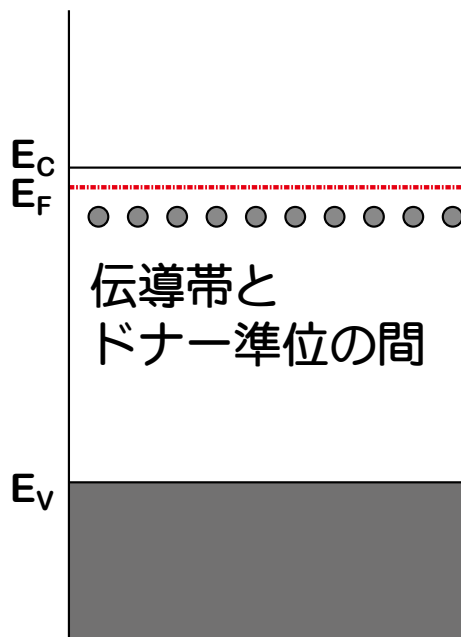
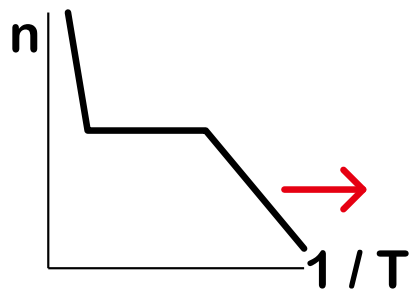
電子 は フェルミ粒子

E_F を電子に対して言い換えると、...
エネルギー準位の下から順番に電子を詰めていったときの最上位（但し、絶対零度で詰めること）

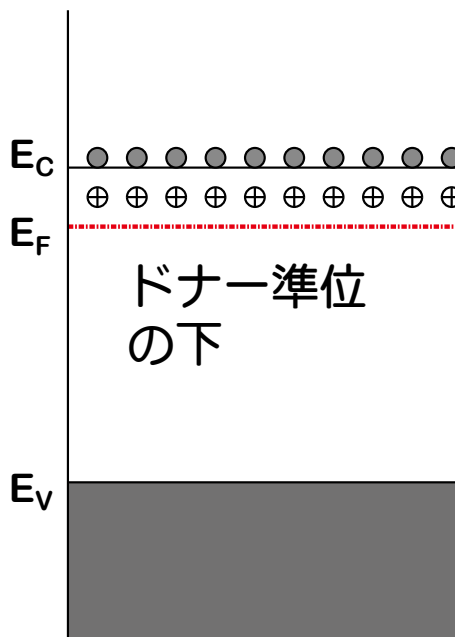
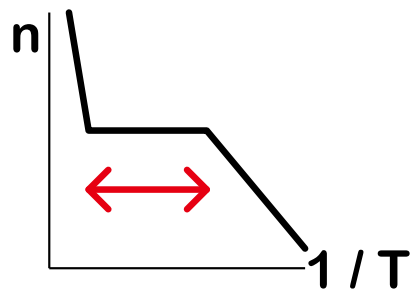
ややこしい言い方をすると、...
電子の存在確率が1から0に変わるところとも言える
1から0に緩やかに変わる場合は、
0.5のところ、ということだ...



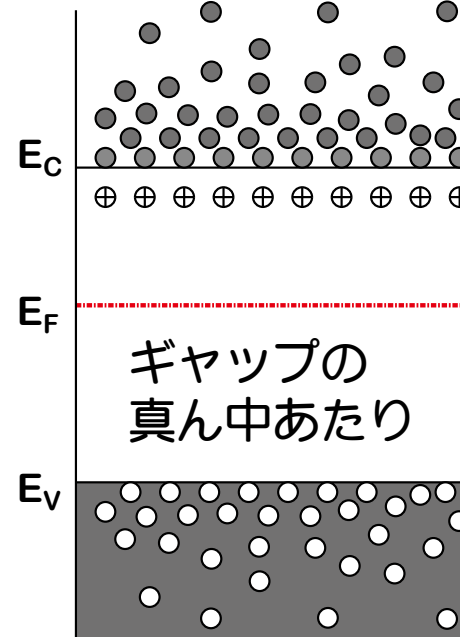
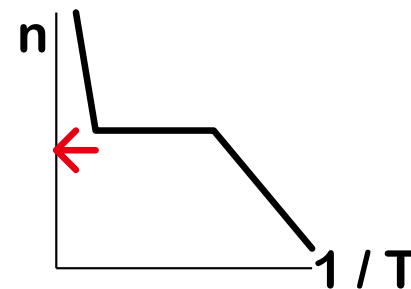
E_F の温度依存性



$T = \text{絶対零度}$



$T = \text{出払い領域}$

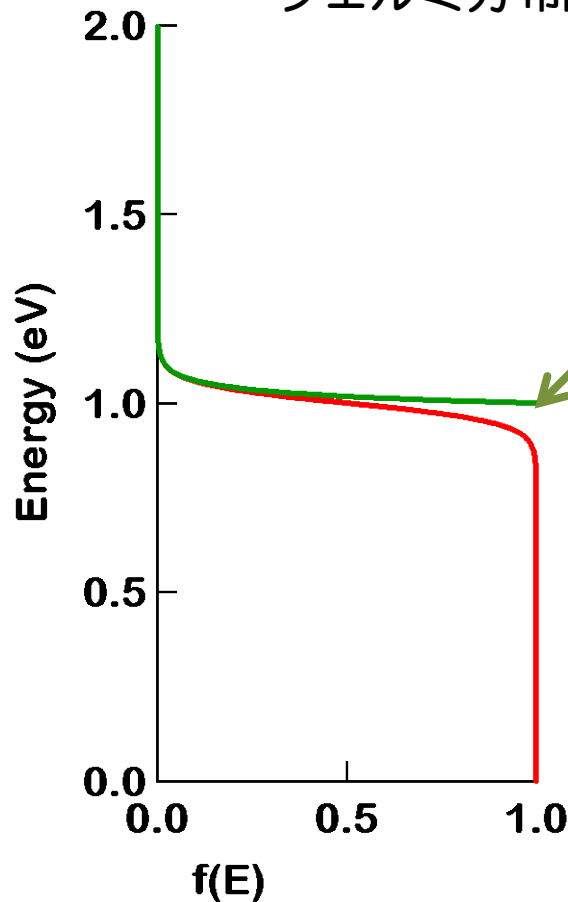


$T = \text{真性領域}$

ボルツマン分布関数

温度が十分高いときのフェルミ分布関数の近似

$E - E_F \gg kT$ ならば,
フェルミ分布関数はボルツマン分布関数で近似できる



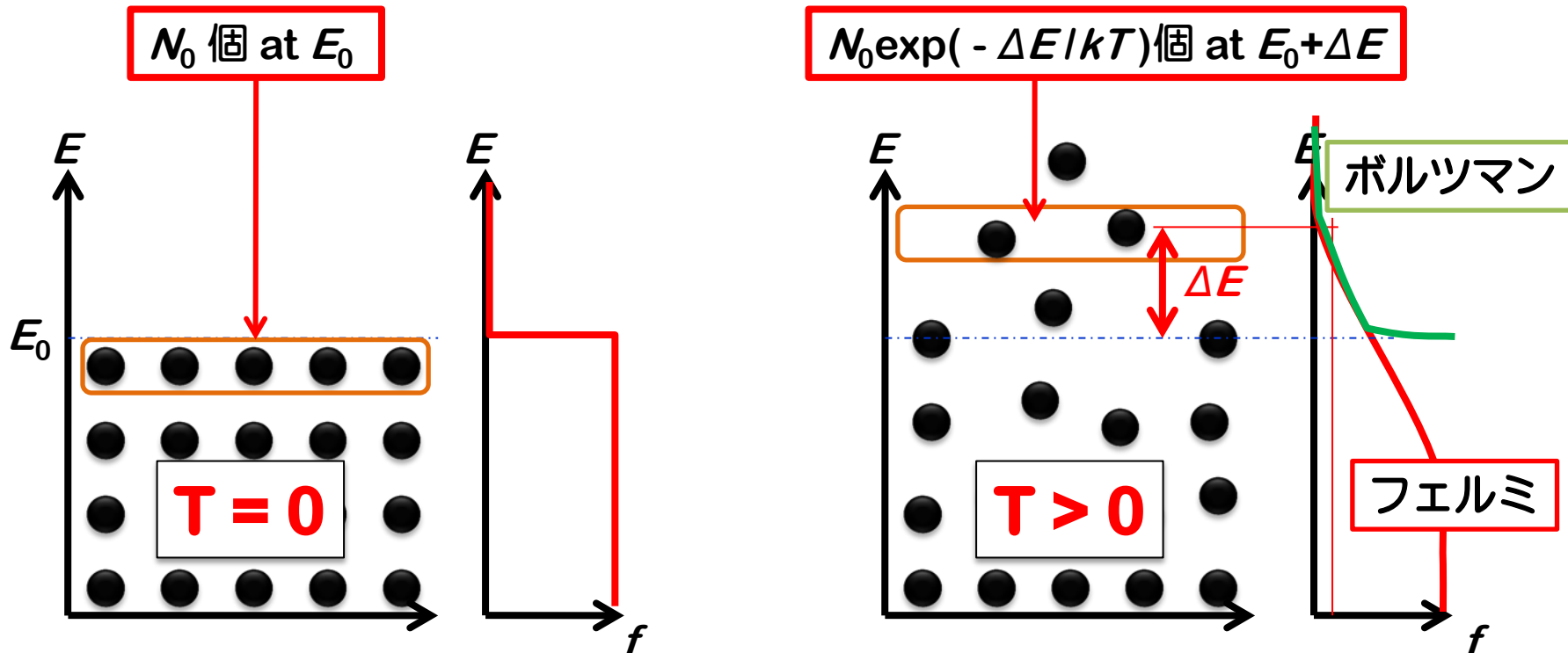
$$f_n(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

$$\begin{aligned} f_n(E) &= \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1} \\ &\approx \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \\ &= \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right) \end{aligned}$$

ボルツマン分布関数

$$f_n(\Delta E) = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

温度 $T > 0$ の時に, ΔE だけ高いエネルギー準位に電子を見つける確率



状態密度関数

状態密度関数

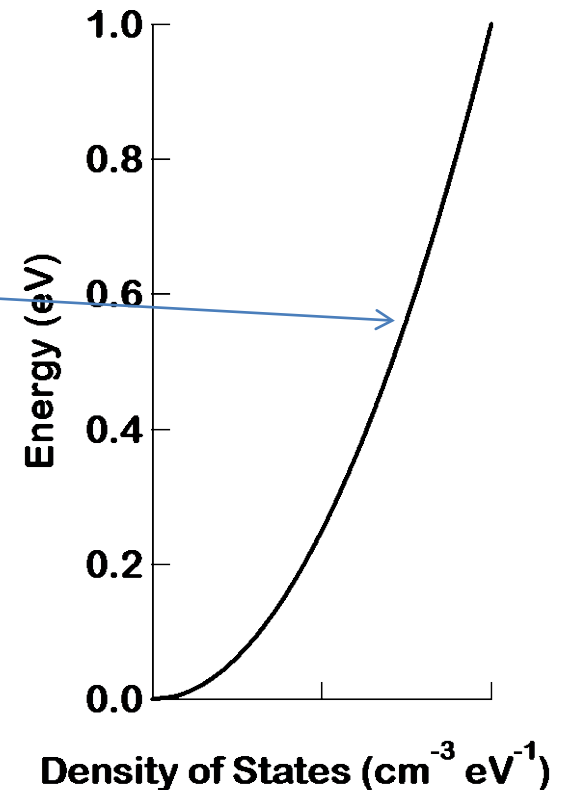
電子が入ることのできるエネルギー準位の密度を表す

単位体積あたり，単位エネルギーあたりの電子の座席数

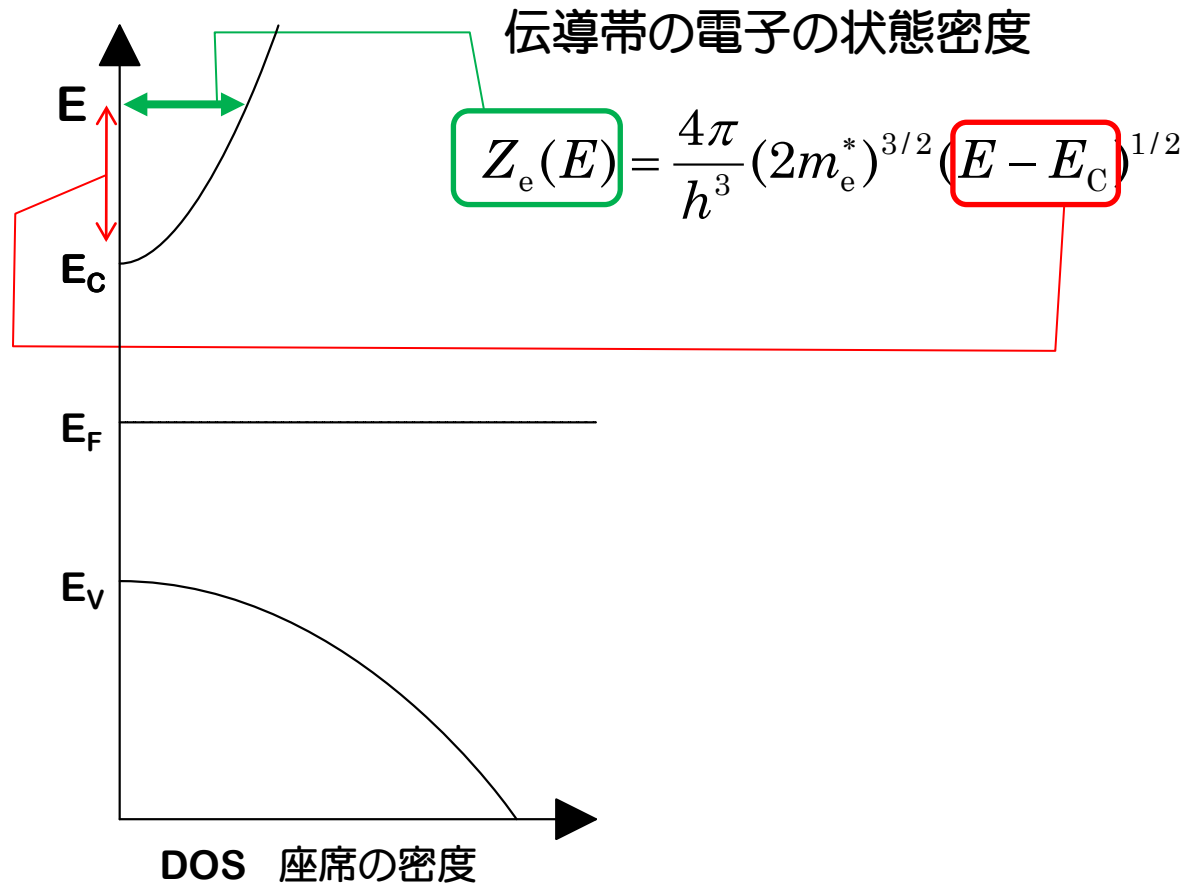
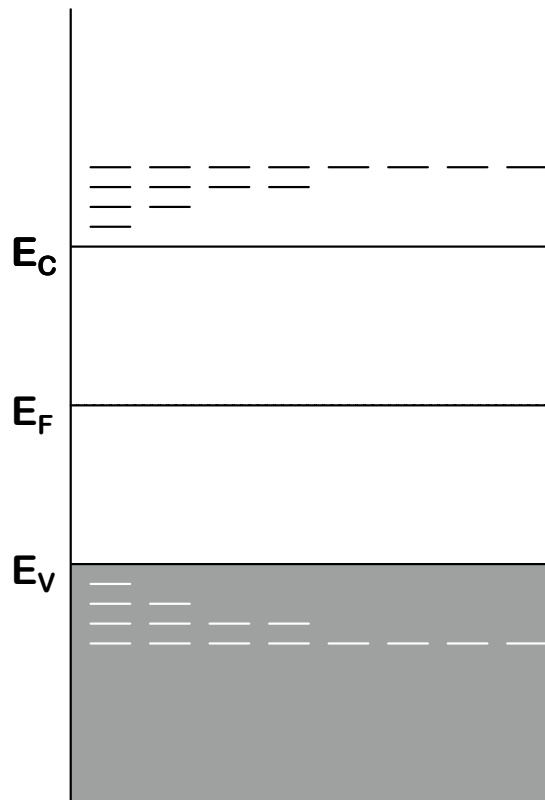
ゾンマーフェルト(Sommerfeld)の金属モデル
に基づく理論によると

$$Z(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2} E^{1/2}$$

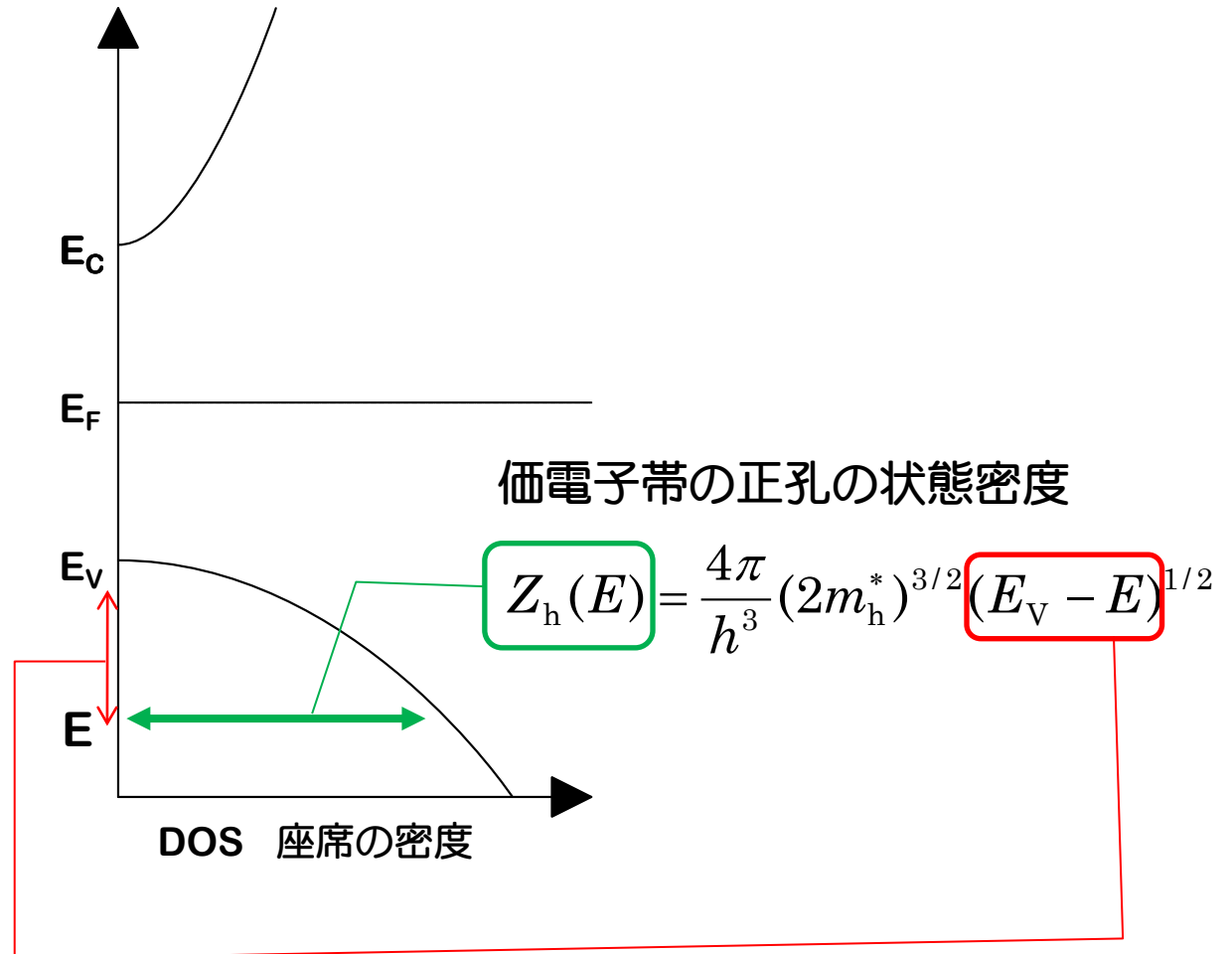
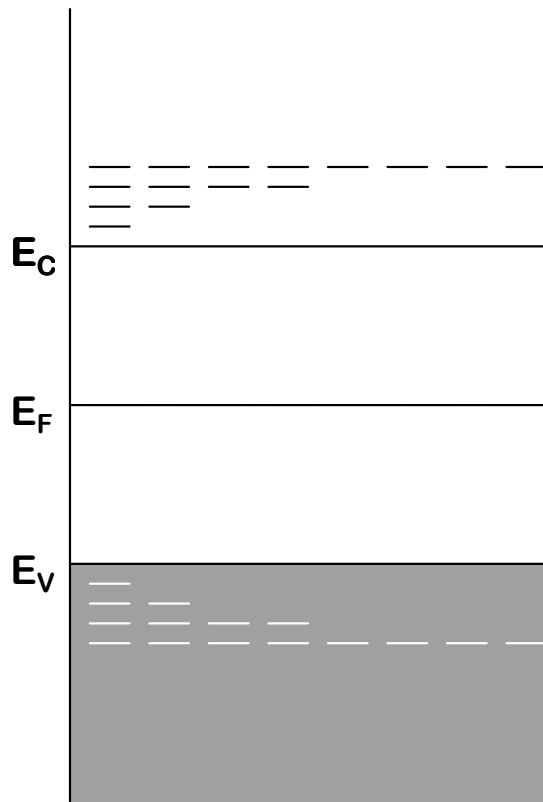
Density of States (DOS)



伝導帯の電子の状態密度関数



価電子帯の正孔の状態密度関数



分布関数 (温度に依存)



状態密度関数



実際の電子・正孔の密度

伝導体中の電子密度

$$n = \int_{E_C}^{\infty} n(E) dE = \int_{E_C}^{\infty} Z_n(E) f_n(E) dE$$

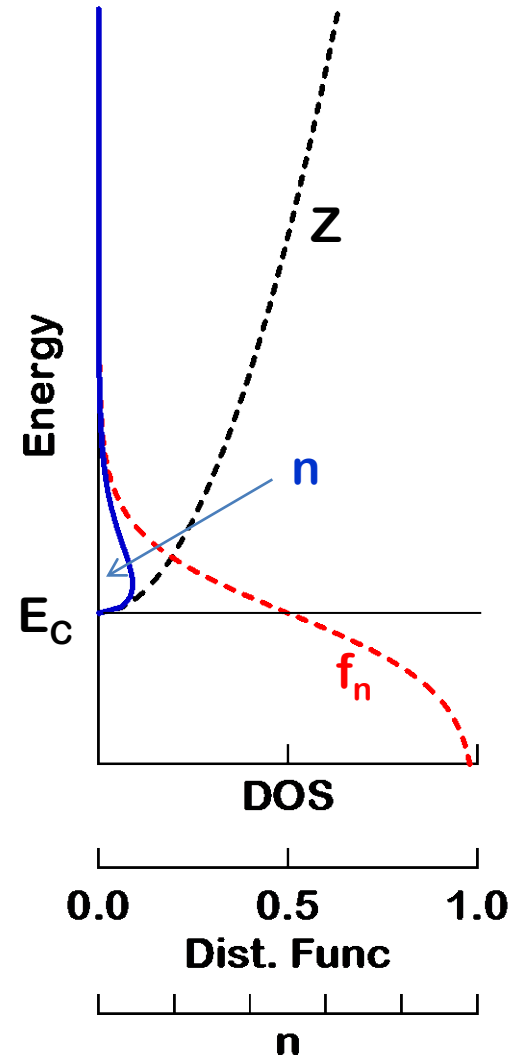
$$Z(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2} (E - E_C)^{1/2}$$

$$f_n(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$



$$n = 2 \left(\frac{2\pi m k T}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

正孔の場合もエネルギーバンド図の上下が逆になるだけで、同じ理論が適用できる



計算手順

$$(E - E_C)^{1/2} = x \quad \text{とおけば}$$

$$\frac{dx}{dE} = \frac{1}{2}(E - E_C)^{-1/2} \quad \longrightarrow \quad dE = 2(E - E_C) dx = 2x dx$$

$$n = \int_0^\infty \frac{\pi}{2} \left(\frac{8m}{h^2} \right)^{3/2} x e^{-x^2/kT} e^{-(E_C - E_F)/kT} 2x dx$$

$$n = \frac{\pi}{2} \left(\frac{8m}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_C - E_F)/kT} \times 2 \int_0^\infty x^2 e^{-x^2/kT} dx$$

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m k T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_C - E_F)/kT}$$

$$\int_0^\infty x^2 e^{-x^2/kT} dx = (kT)^{3/2} \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

伝導帯中の実効状態密度

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m k T}{h^2} \right)^{3/2}$$

伝導帯の実効状態密度

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k T}{h^2} \right)^{3/2}$$

結晶中で伝導電子が力を受けて移動する場合には、自由電子よりも動きやすい場合が多い。その効果を質量を表すパラメータにもたせる
=有効質量

価電子帯中の正孔密度

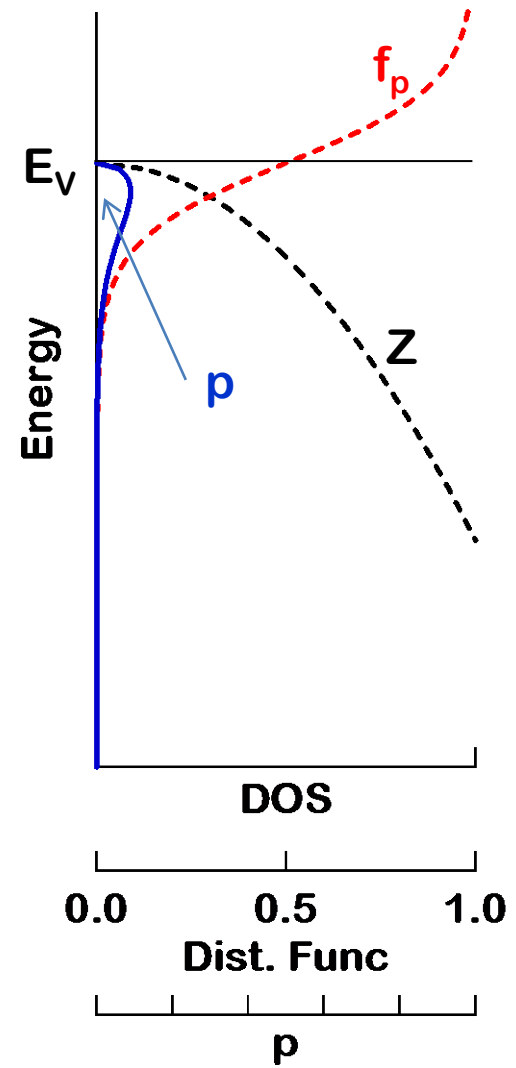
$$p = \int_{-\infty}^{E_V} p(E) dE = \int_{-\infty}^{E_V} Z_p(E) f_p(E) dE$$

$$Z_p(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_h^*)^{3/2} (E_V - E)^{1/2}$$

$$f_p(E) = \exp\left(-\frac{E_F - E}{kT}\right)$$



$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$



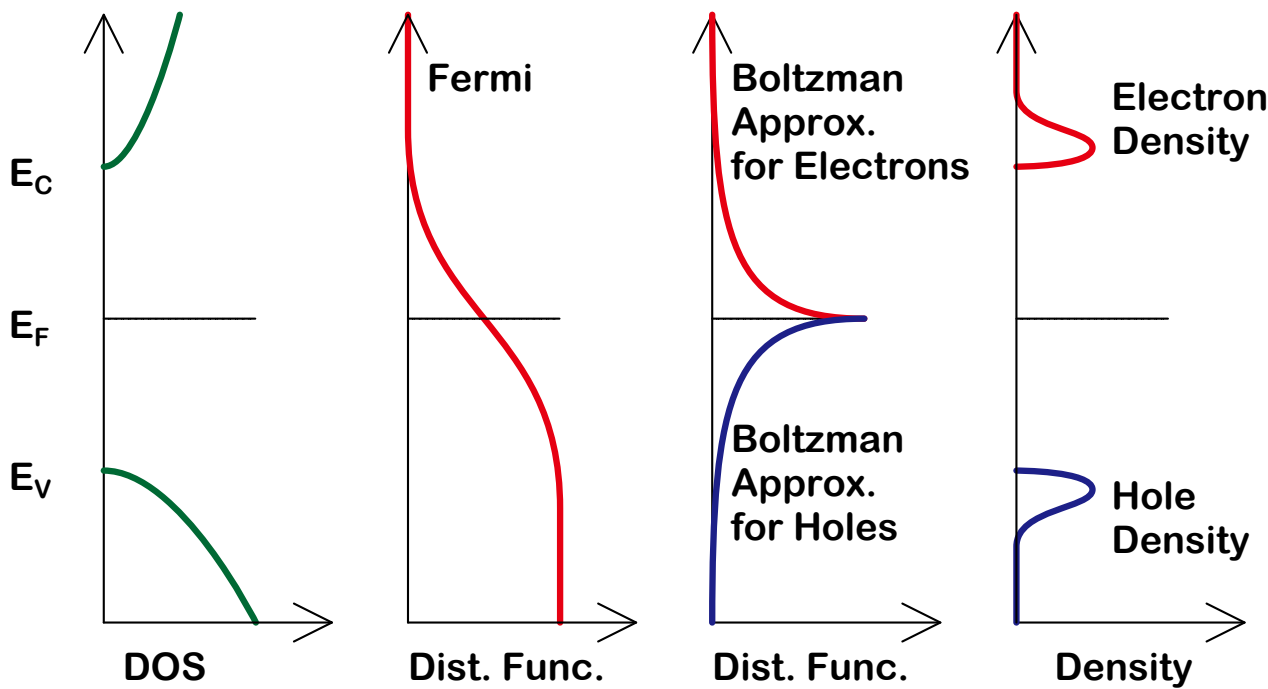
真性半導体の電子と正孔の密度

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$

$$N_C = 2\left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$

$$N_V = 2\left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}\right)^{3/2}$$



p n 積一定の法則

$$pn = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$$

$$pn = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right) \quad E_G = E_C - E_V$$

不純物を含まない（ドナーやアクセプタを持たない）真性半導体の場合 $n=p$ であるため、特に名前を付けて、真性キャリア密度と呼んでいる。

$$n_i = n = p$$

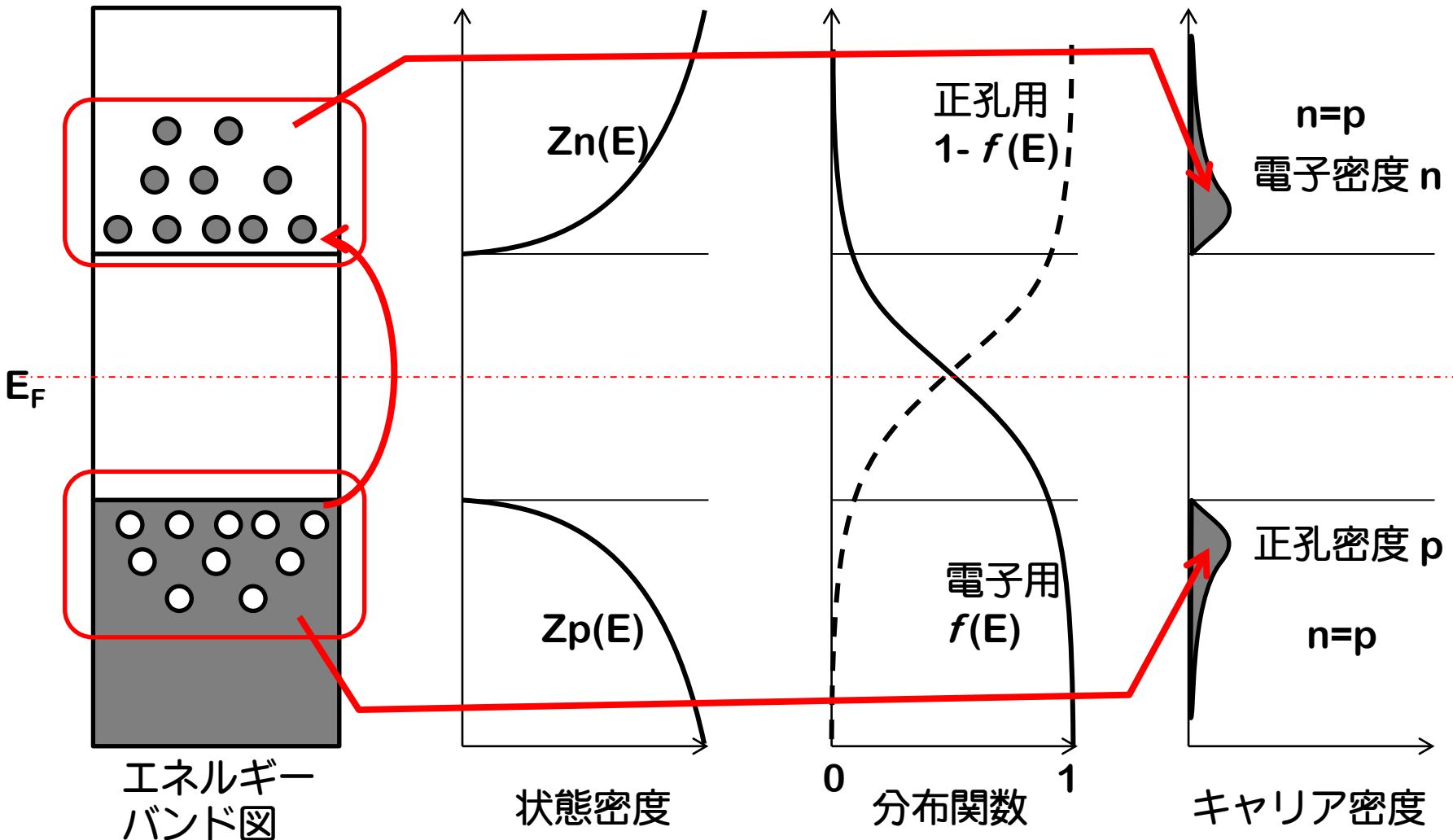
$$pn = n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right)$$

$$p = n = n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right)$$

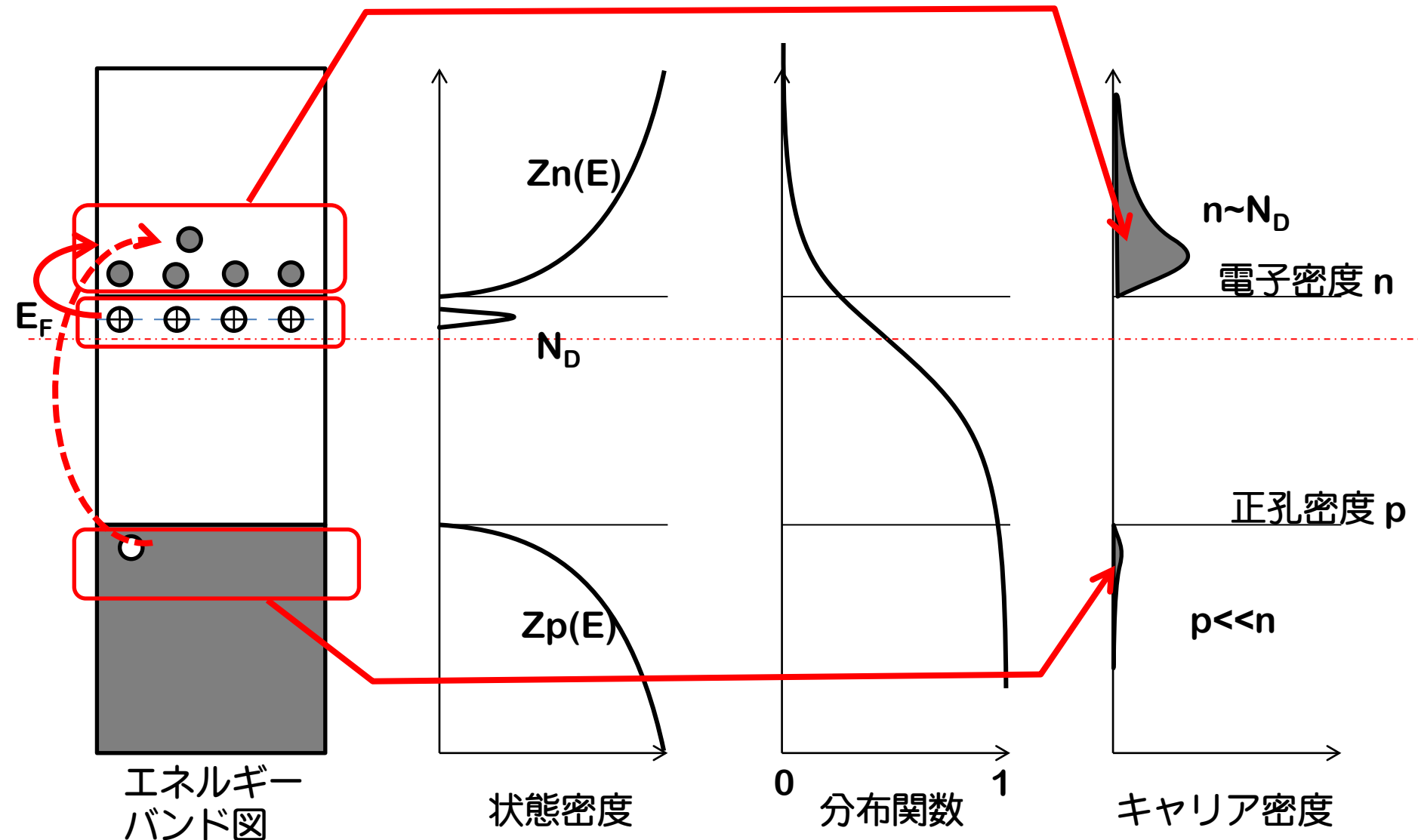
半導体中のキャリア密度

E_F はどこや？ 絶対零度で電子の存在確率が0から1になるところ

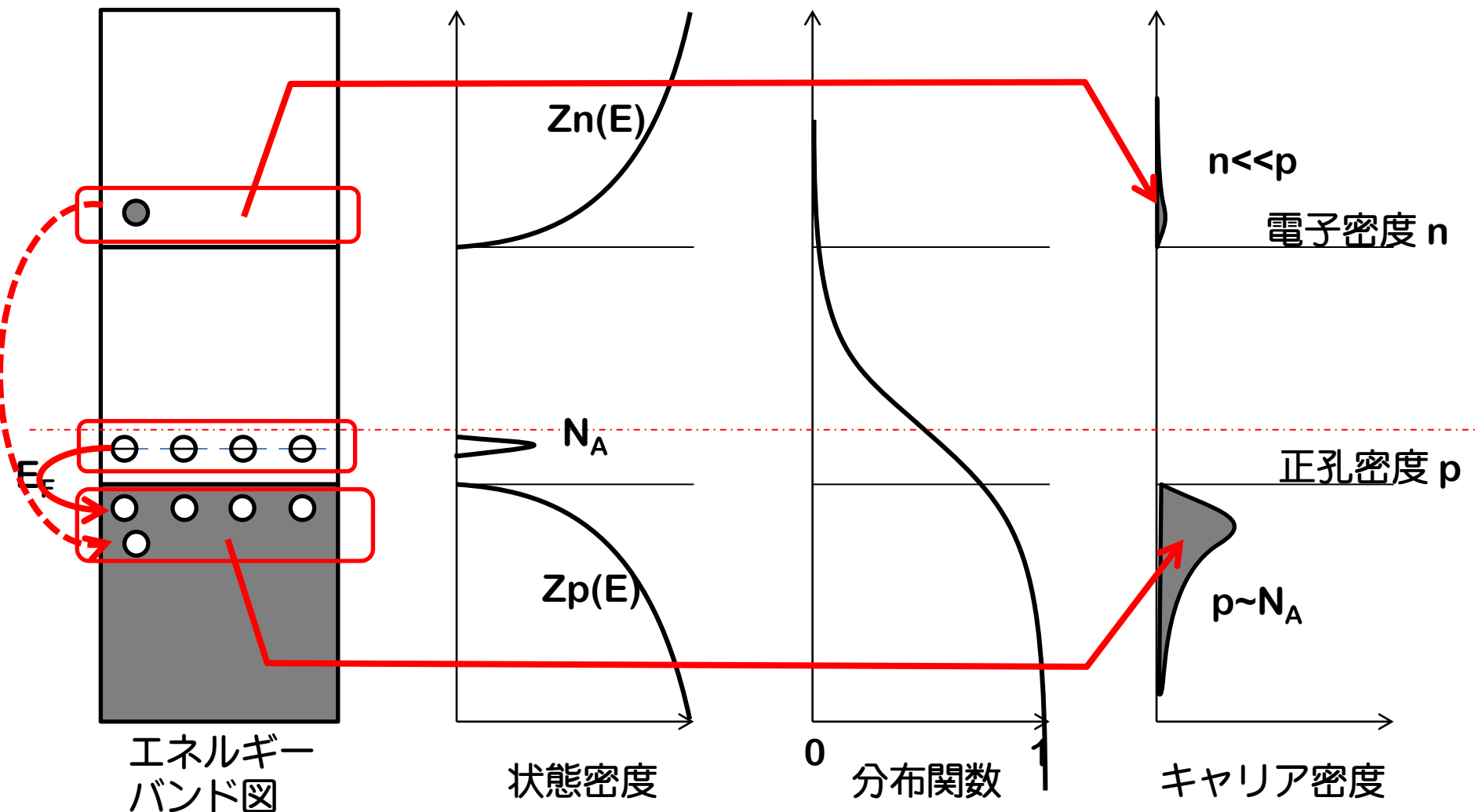
絶対零度では、伝導帯には電子無い。価電子帯に電子が充満。
→ 電子の存在確率が丁度0.5になるところは、バンドギャップの中央。



n型半導体中のキャリア密度

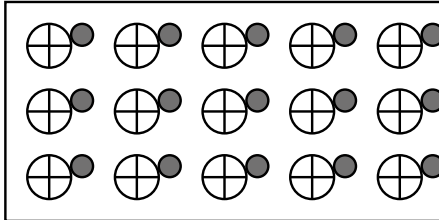


p型半導体中のキャリア密度



p型・n形半導体中のキャリア密度

n形



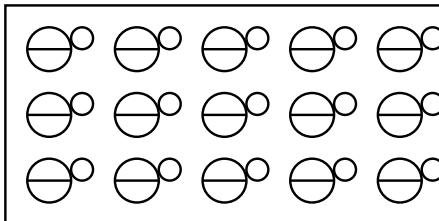
⊕ イオン化ドナ

● 電子

$$n = N_D \quad p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

温度が室温程度なら $n_i \ll N_D$ なので、 p は極めて小さい

p形



⊖ イオン化アクセプタ

○ 正孔

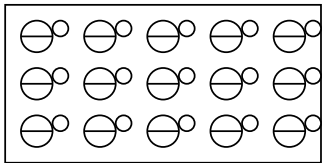
$$p = N_A \quad n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

温度が室温程度なら $n_i \ll N_A$ なので、 n は極めて小さい

p n 接合

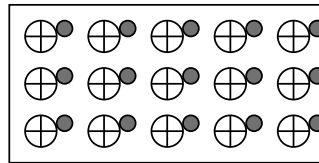
p形とn形の接合前と接合後

p形

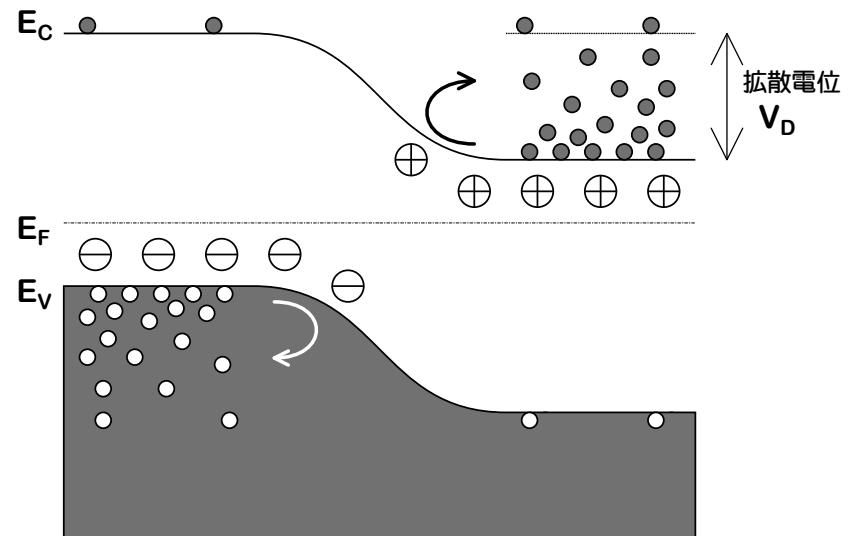
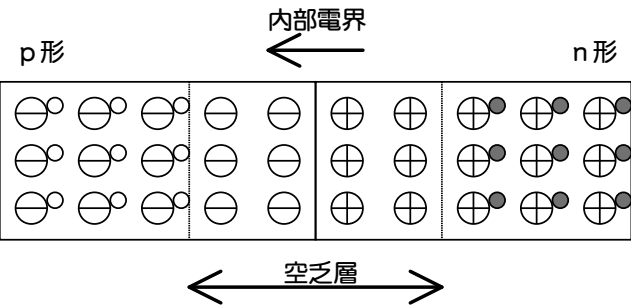
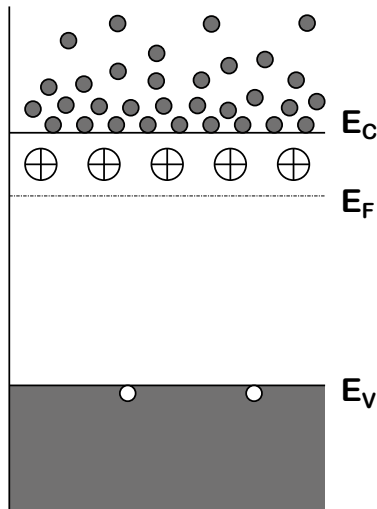
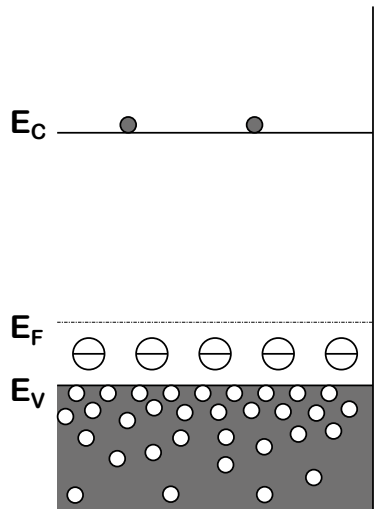


⊖ イオン化アクセプタ
○ 正孔

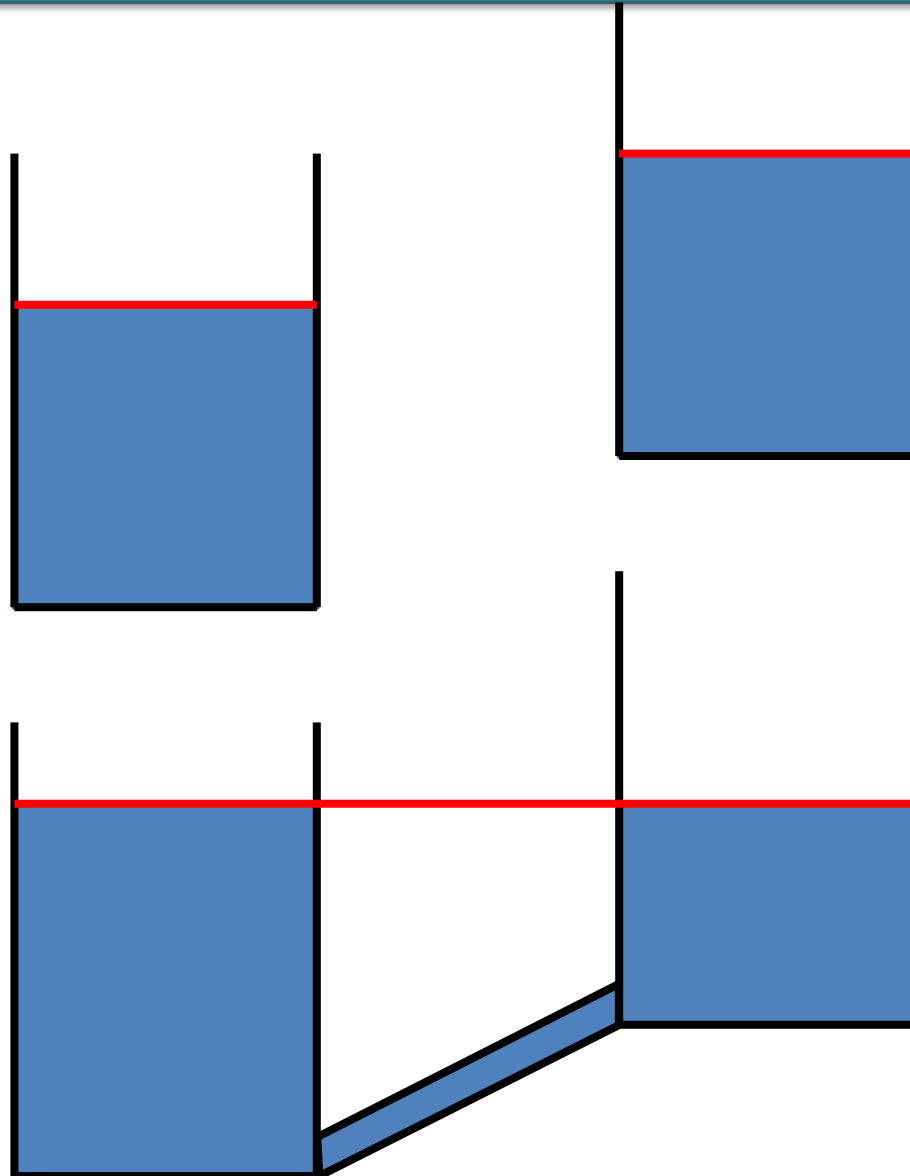
n形



⊕ イオン化ドナ
● 電子



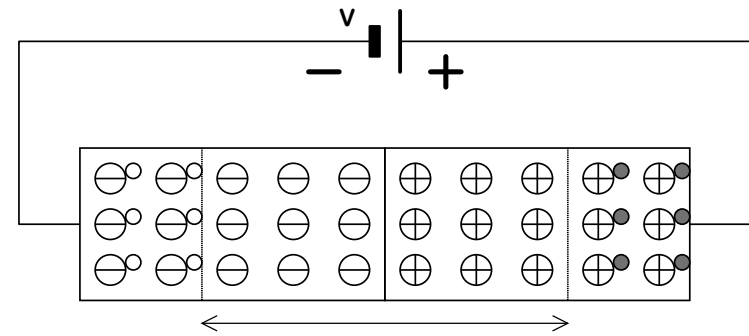
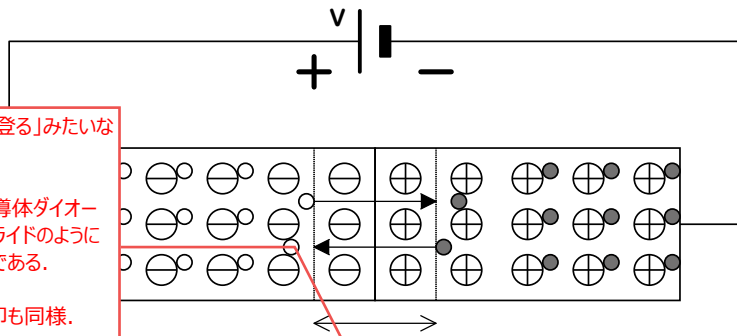
接合時のフェルミ準位



電圧を印加したときのp n 接合

電流が良く流れる

電流があまり流れない

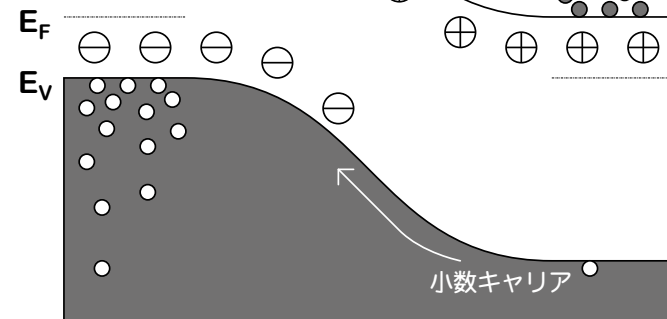
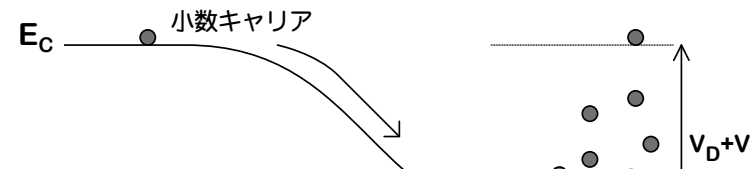
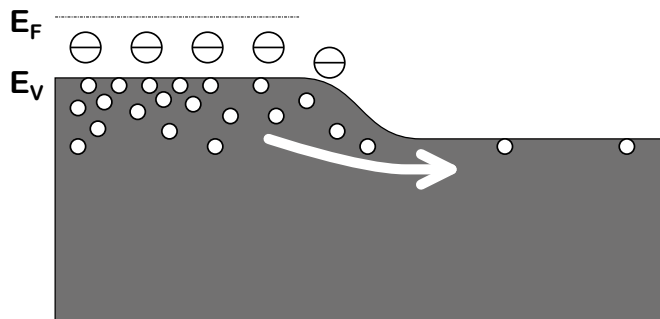
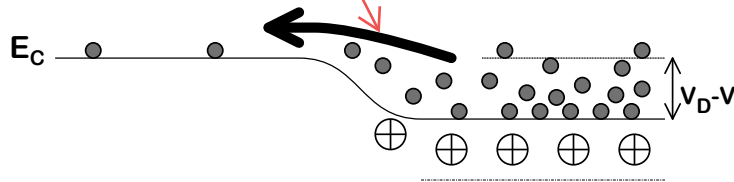


このような「勾配を登る」みたいな描像は間違い!

正しくは、「04半導体ダイオード」の14枚目のスライドのように水平矢印の描像である。

下の正孔の白矢印も同様。

2025-04-15-修正



次回 数式できちっと 電流電圧特性などを 導出

数式ばかりでちょっと鬱陶しいが. . .