

電子デバイス工学

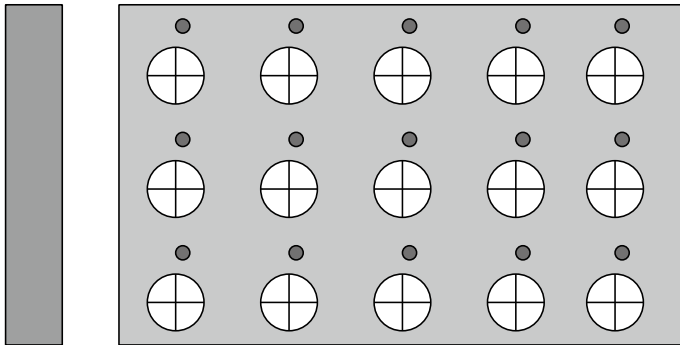
05

半導体ダイオード (ショットキーダイオード)

金属・半導体接触

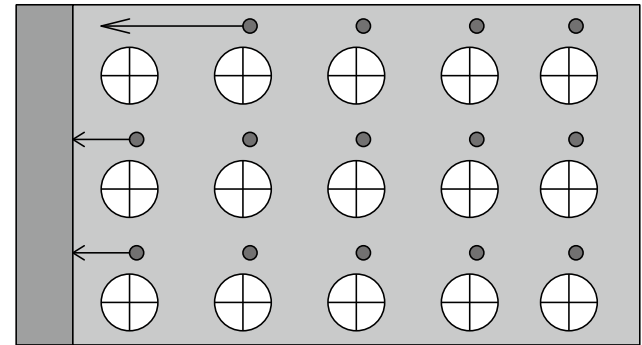
金属

n 形半導体



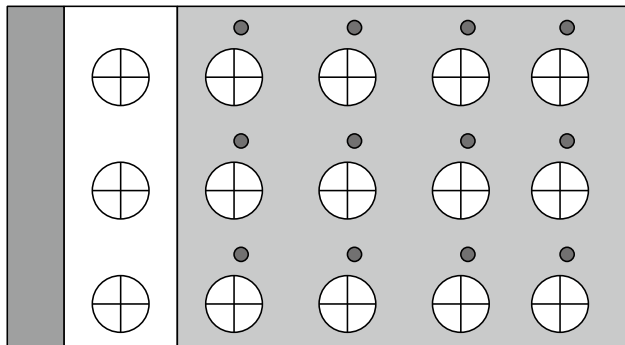
+

順方向バイアス



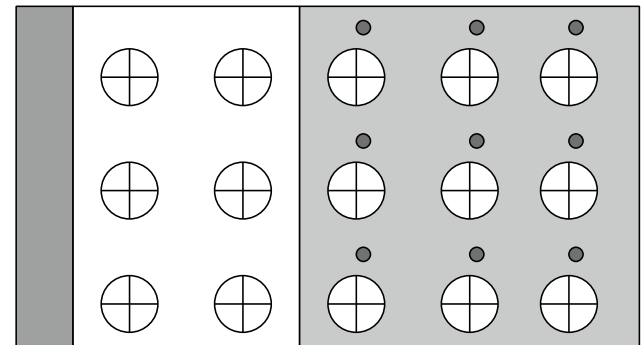
-

空乏層



-

逆方向バイアス



+

n 形半導体の中の電子が金属のそれよりも高いエネルギー準位にある場合

このような場合，整流性が現れる

金属半導体接触の エネルギーバンド図

金属／n形半導体のショットキー接触

$\phi_M > \chi$ ➡ ショットキー接触

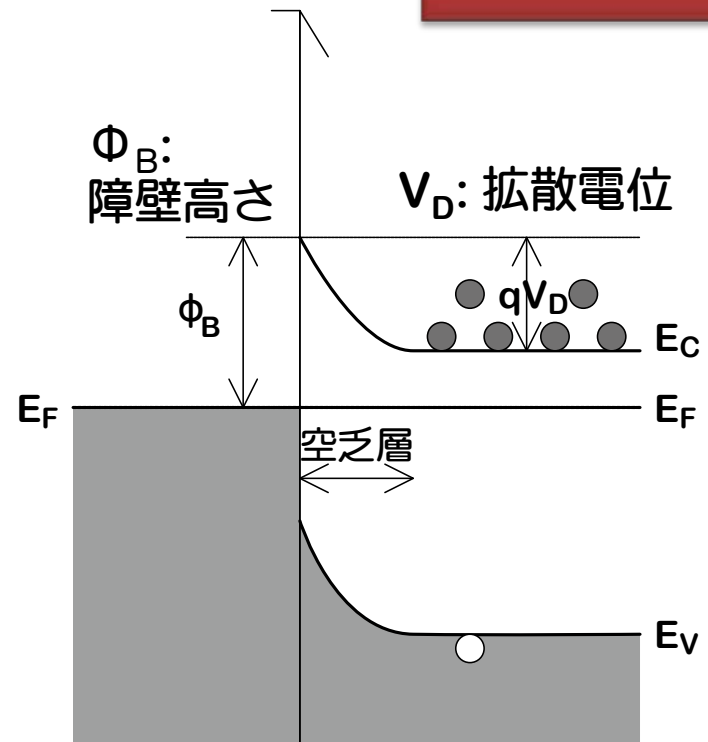
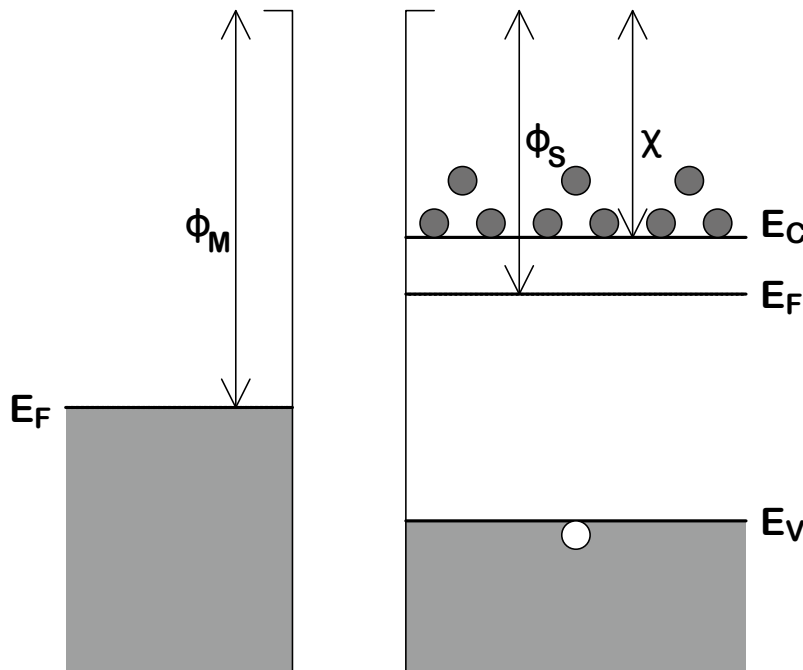
ϕ_M

金属の仕事関数

χ

半導体の電子親和力

整流性
がある



ϕ_S : 半導体の仕事関数に相当するもの

金属／n形半導体のオーミック性接触

$\phi_M < \chi$ ➡ オーム性接触

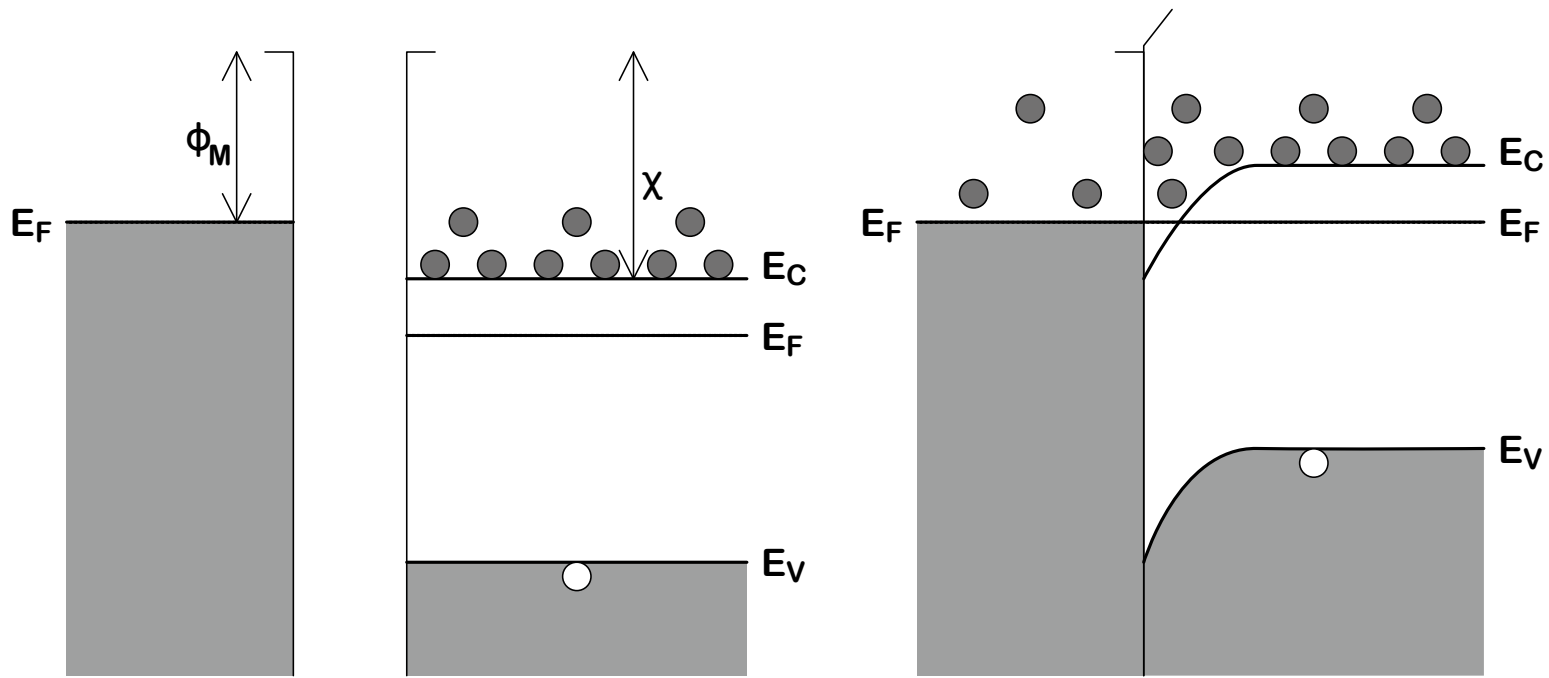
ϕ_M

金属の仕事関数

χ

半導体の電子親和力

整流性
はない



金属／p形半導体のショットキー接触

$\phi_M < \chi + E_G \rightarrow$ ショットキー接触

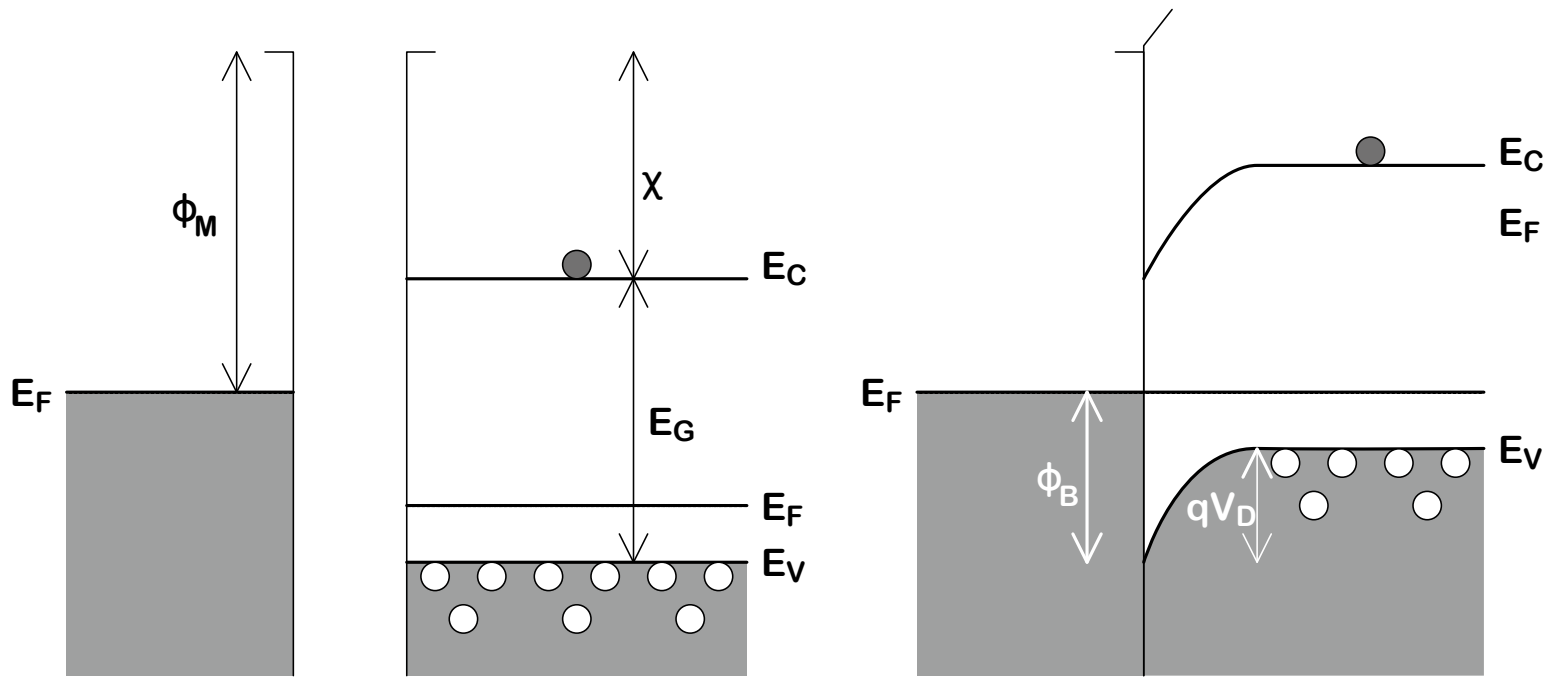
ϕ_M

金属の仕事関数

χ

半導体の電子親和力

整流性
がある



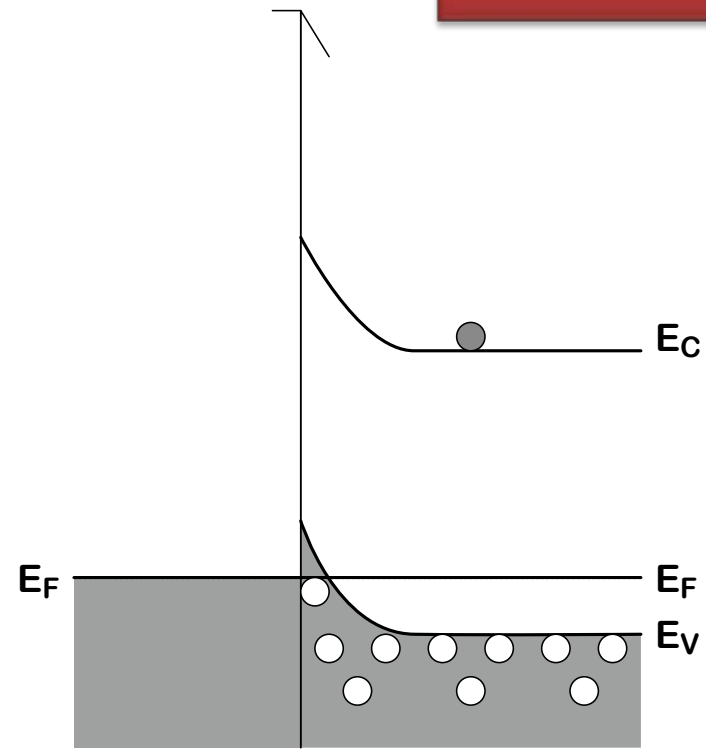
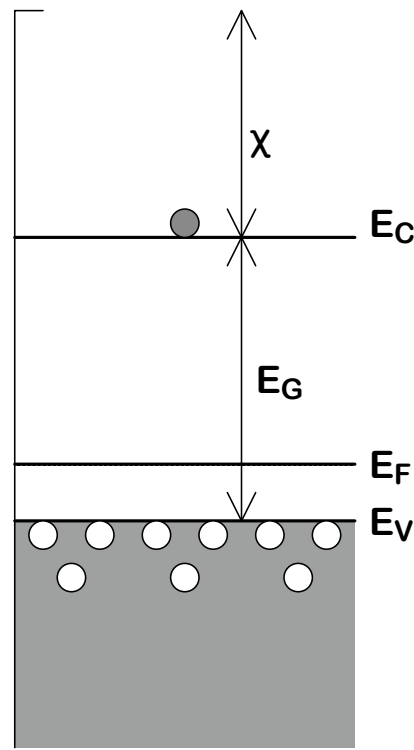
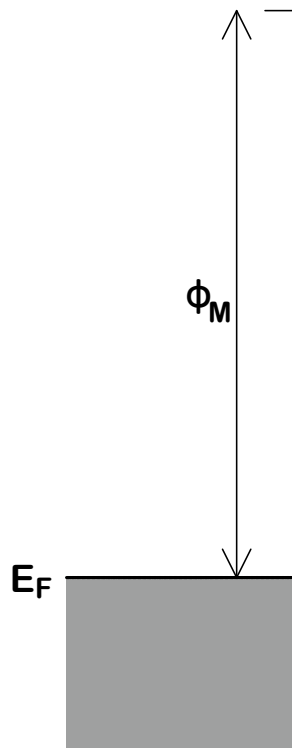
金属／p形半導体のオーミック性接触

$\phi_M > \chi + E_G \rightarrow$ オーム性接触

ϕ_M
 χ

金属の仕事関数
半導体の電子親和力

整流性
はない

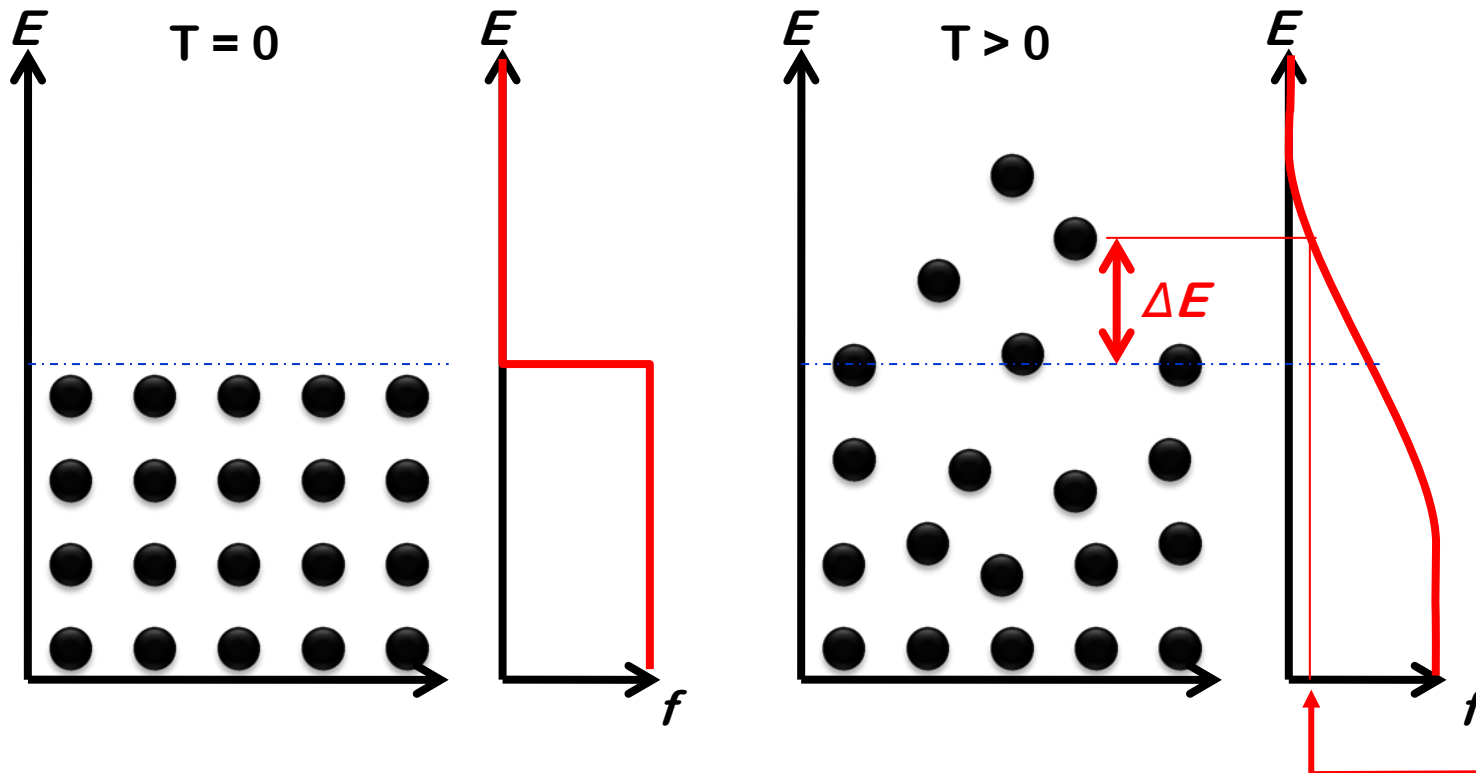


シヨットキー接触の 電流電圧特性

復習：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



金属／n形半導体ショットキー 順方向バイアス時

半導体から金属に向かう電子

$$I_{S \rightarrow M} = K_1 \exp\left(-\frac{q(V_D - V)}{kT}\right)$$

定性的説明

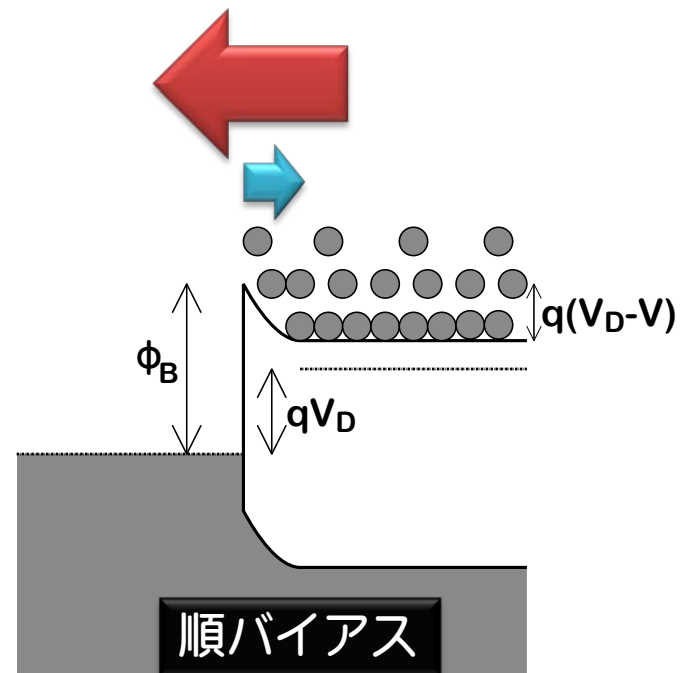
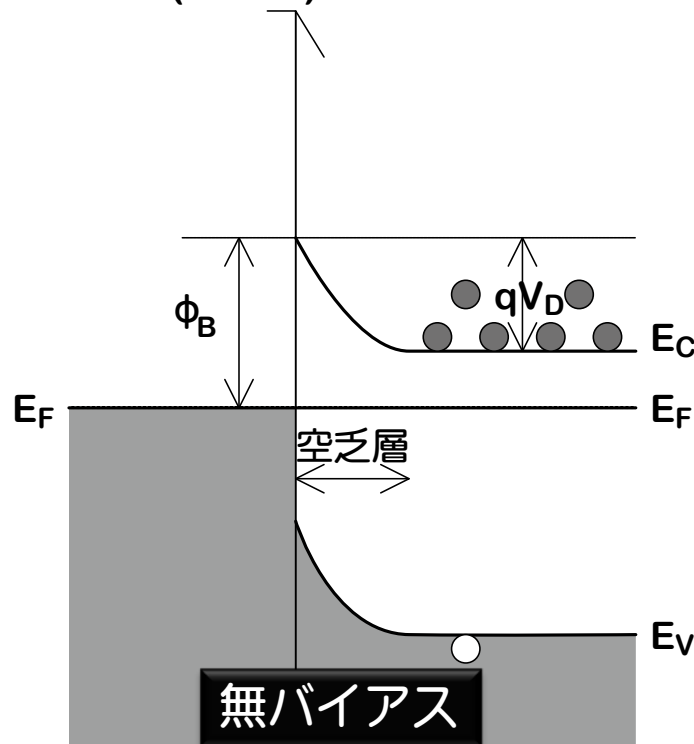
$I(S \rightarrow M)$ は電圧 V とともに指数関数的に**増加**

$I(M \rightarrow S)$ は電圧 V によらず一定

金属から半導体に向かう電子

$$I_{M \rightarrow S} = K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{kT}\right)$$

電流がよく流れる



金属／n形半導体ショットキー 逆方向バイアス時

半導体から金属に向かう電子

$$I_{S \rightarrow M} = K_1 \exp\left(-\frac{q(V_D + V)}{kT}\right)$$

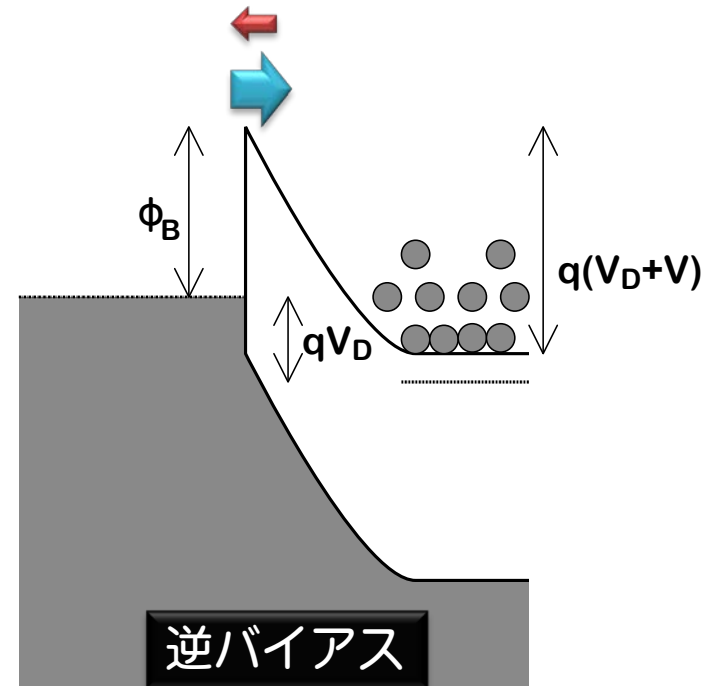
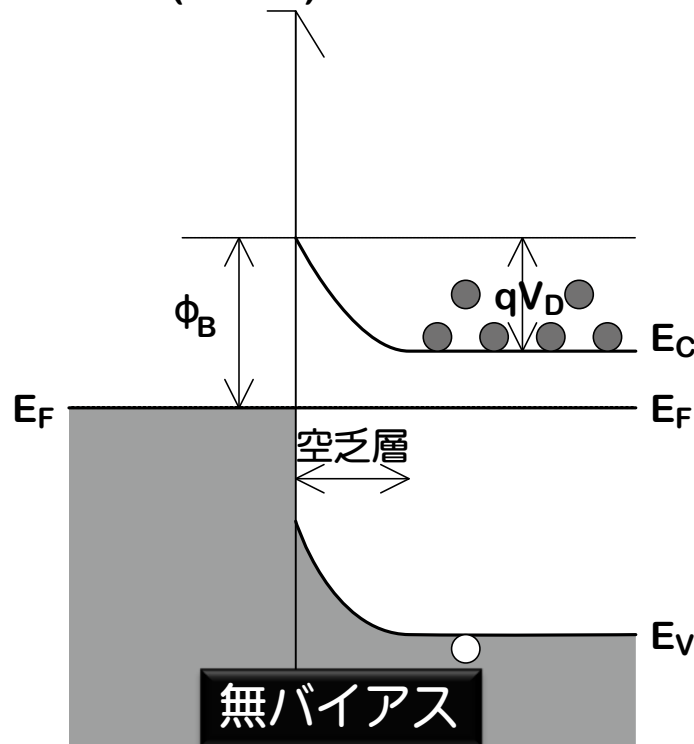
定性的説明

$I(S \rightarrow M)$ は電圧 V とともに指数関数的に**減少**
 $I(M \rightarrow S)$ は電圧 V によらず一定

金属から半導体に向かう電子

$$I_{M \rightarrow S} = K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{kT}\right)$$

➡ 電流があまり流れない



金属／n形半導体ショットキー I-V特性

$$I_{S \rightarrow M} = K_1 \exp\left(-\frac{q(V_D - V)}{kT}\right) \quad I_{M \rightarrow S} = K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{kT}\right)$$

Vの符号：順方向のときはプラスとし、逆方向のときはマイナスとする
全電流は、

$$I = I_{S \rightarrow M} - I_{M \rightarrow S} = K_1 \exp\left(-\frac{q(V_D - V)}{kT}\right) - K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{kT}\right)$$

V=0でI=0であることから、

$$I = K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{kT}\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right)$$

式だけを見ればp n接合と同じ

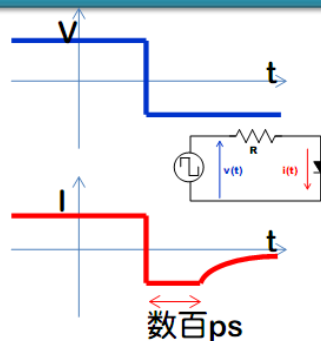
p n 接合と違うところは何か？

電流の担い手が少数キャリアか、多数キャリアか、で違う

ショットキーダイオード vs. p n 接合ダイオード

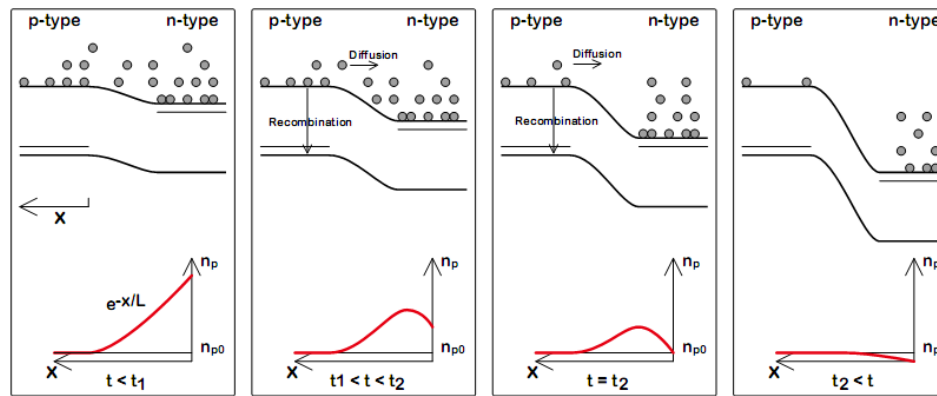
ショットキーダイオードには p n 接合に特有であった少数キャリアの蓄積が無い。
→ 高速でスイッチできる. という特長がある.

少数キャリアの蓄積効果

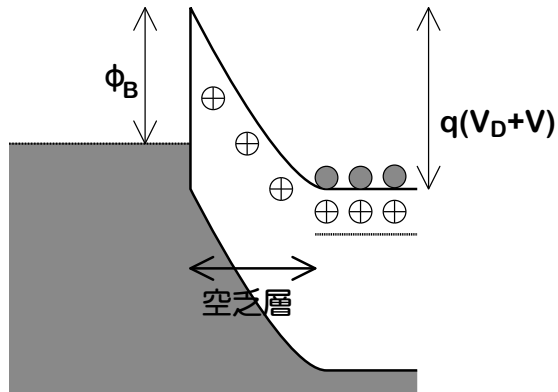


p型に注入された少数キャリア（電子）が消滅し、
静特性のときの密度になるまでには多少時間が必要

- (a) 順バイアス中
- (b) 逆バイアス印加直後
- (c) 境界での少数キャリア密度が熱平衡値になったとき
- (d) 境界での少数キャリア密度の減少に従って、(c)から
(d)へと空乏層に印加されている電圧が逆方向になり、
印加された電圧に近づくために、電流が減少する。



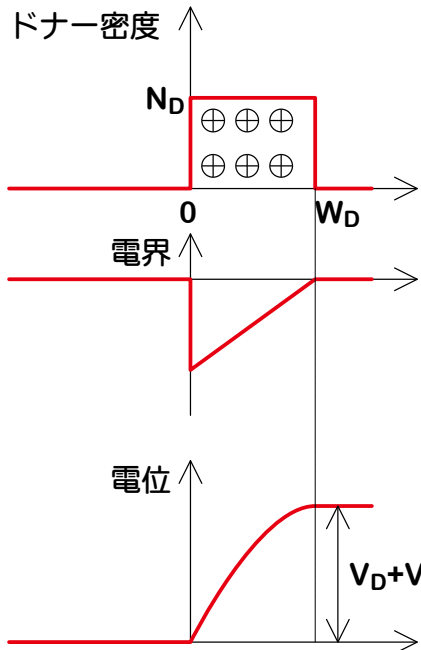
ショットキー接触の 空乏層解析



ポアソンの方程式
$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{qN_D}{\epsilon_S \epsilon_0}$$

境界条件 $V(0)=0, V(W_D)=V_D+V$

$[dV/dx]_{W_D}=0$ (電界は空乏層のみにかかる)



電界分布

$$E = -\frac{dV}{dx} = \frac{qN_D}{\epsilon_S \epsilon_0}(x - W_D)$$

電位分布

$$V = -\frac{qN_D}{\epsilon_S \epsilon_0}x(x - W_D)$$

空乏層幅

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_S \epsilon_0 (V_D + V)}{qN_D}}$$

空乏層解析 計算詳細

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{qN_D}{\epsilon_S\epsilon_0} \quad \xrightarrow{\text{1回積分}} \quad -E = \frac{dV}{dx} = -\frac{qN_D}{\epsilon_S\epsilon_0}x + C_1$$

半導体中の電界はゼロ $E(W_D) = -[dV/dx]_{W_D} = 0$ であるから、
よって、電界分布が以下のように得られる。

$$C_1 = \frac{qN_D W_D}{\epsilon_S\epsilon_0}$$

$$-E = \frac{dV}{dx} = -\frac{qN_D}{\epsilon_S\epsilon_0}(x - W_D)$$

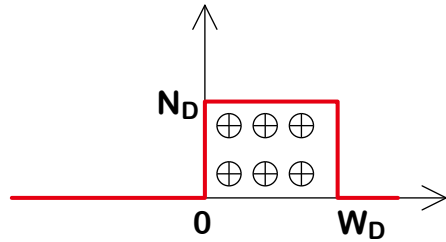
また、上式をもう一回積分すれば、電位分布が以下のように得られる。

$$V = -\frac{qN_D}{\epsilon_S\epsilon_0}x(x - W_D) \quad \text{V(0) = 0を使った}$$

空乏層幅は、 $V(W_D) = V_D + V$ であることを利用して、以下のように得られる。

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_S\epsilon_0(V_D + V)}{qN_D}}$$

空乏層解析 容量電圧特性



幅 W_D の中に、 $qN_D \times W_D$ の電荷が蓄積（単位面積当たり）

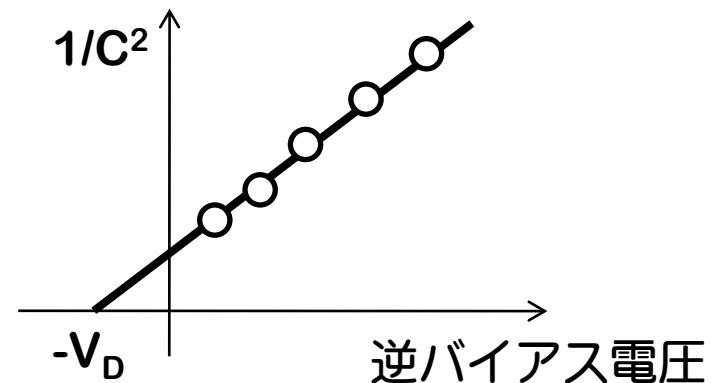
$$Q = qN_D W_D = \sqrt{2\varepsilon_S \varepsilon_0 q N_D (V_D + V)}$$

その容量は、

$$C = \frac{dQ}{dV} = \sqrt{\frac{\varepsilon_S \varepsilon_0 q N_D}{2(V_D + V)}}$$

以下のように $1/C^2$ と電圧が比例関係にある。切片が V_D となる。

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{\varepsilon_S \varepsilon_0 q N_D} (V_D + V)$$



トンネル現象と オーミック接触について

金属半導体の界面には界面準位というエネルギー準位がある。そのために、オーミックかショットキーになるかは、仕事関数と電子親和力の関係だけでは決まらない場合が多い。

オーミック接触は、個体表面に金属電極を付けて電氣的測定をするときには必ず必要な接触である。そこで、仕事関数や電子親和力がどんな場合でも、ほぼオーミック接触が保証される金属接触の方法が編み出されている。そこでは、量子力学的なトンネル現象が利用される。

復習事項

量子力学の復習

エネルギー障壁があっても、極めて薄ければ、電子がそれを通過できる。

本日の復習

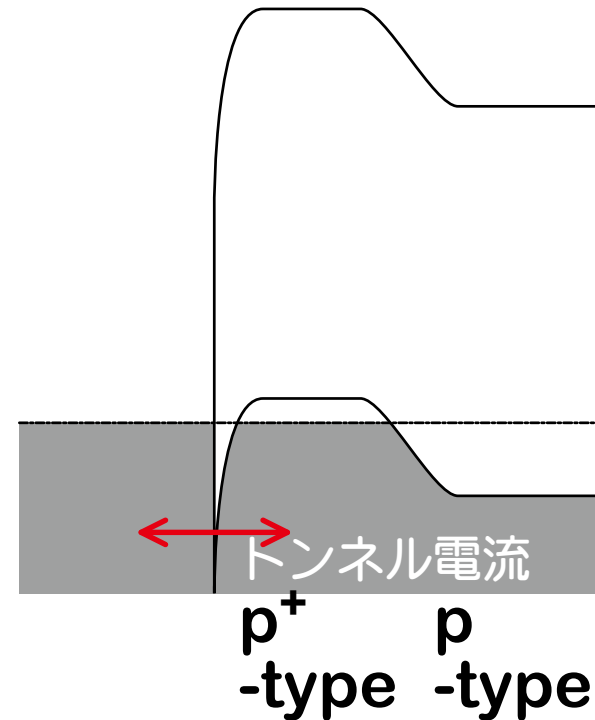
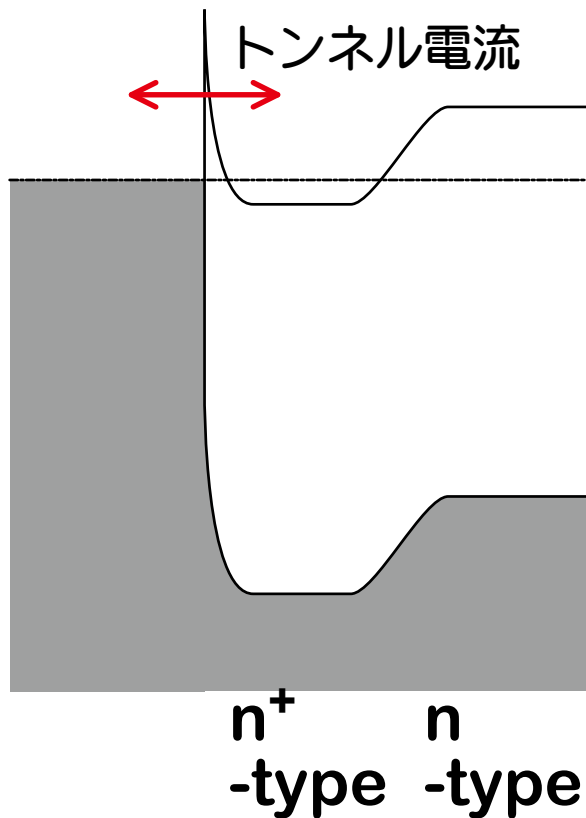
ショットキー障壁の厚み（空乏層の厚み）は、不純物濃度に反比例している（平方根が入っているが）



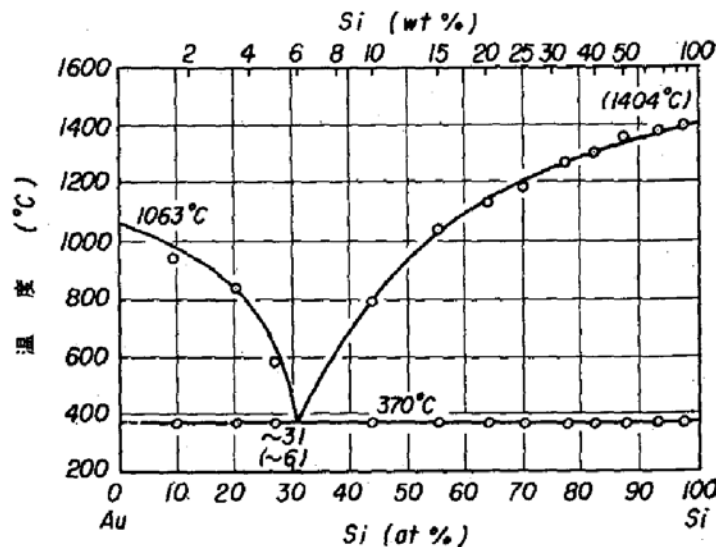
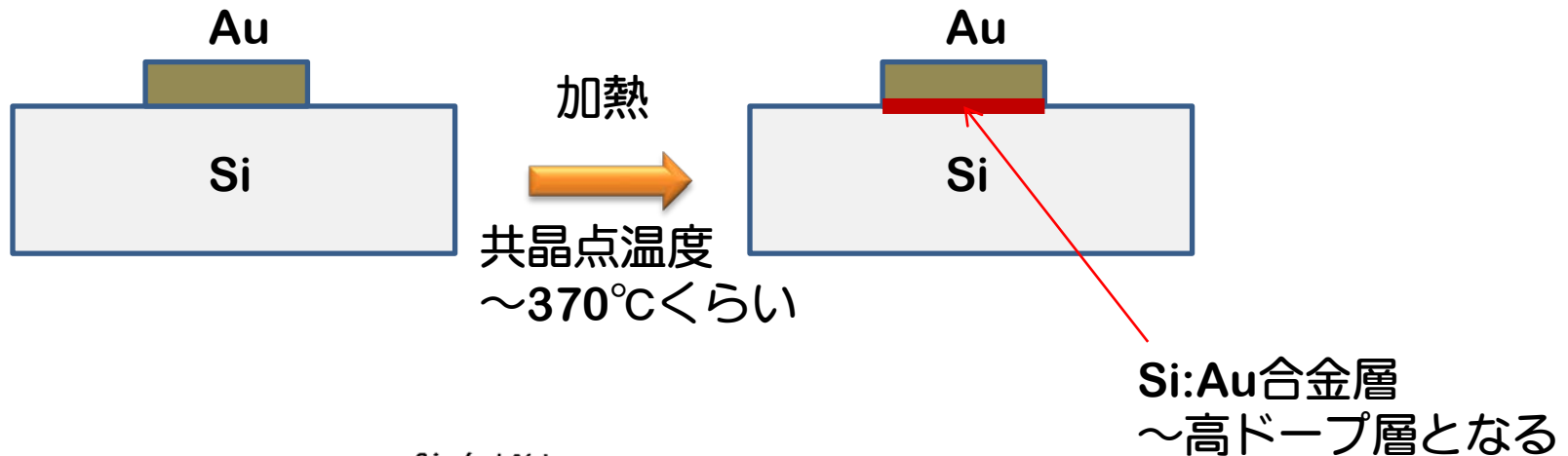
$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S\varepsilon_0(V_D + V)}{qN_D}}$$

高ドーピング層＝極薄障壁厚

高濃度に不純物を添加した極薄層を金属と半導体の間に設ける
→ トンネル電流によってオーム性接触がほぼ確実に得られる



高ドーピング層はどうやって得るの？



共晶点が比較的低温になる
金属を用いないと、どれくらい
高温にしないといけなくなる。
なんでもよい、というわけでもない。