

# 半導体デバイス工学 講義資料

## 第3章 ダイオード

(p. 41～p. 67)

# 3. ダイオード (1)

## 3.1 pn接合ダイオード

### 3.1.1 pn接合

### 3.1.2 電流-電圧特性

### 3.1.3 pn接合の空乏層容量

### 3.1.4 ダイオードの降伏

## 3.2 ショットキーダイオード

### 3.2.1 金属と半導体の接触モデル

### 3.2.2 電気的特性

### 3.2.3 ショットキー接触空乏層容量

## 3. ダイオード (2)

### 3.3 種々のダイオード

3.3.1 整流・定電圧ダイオード

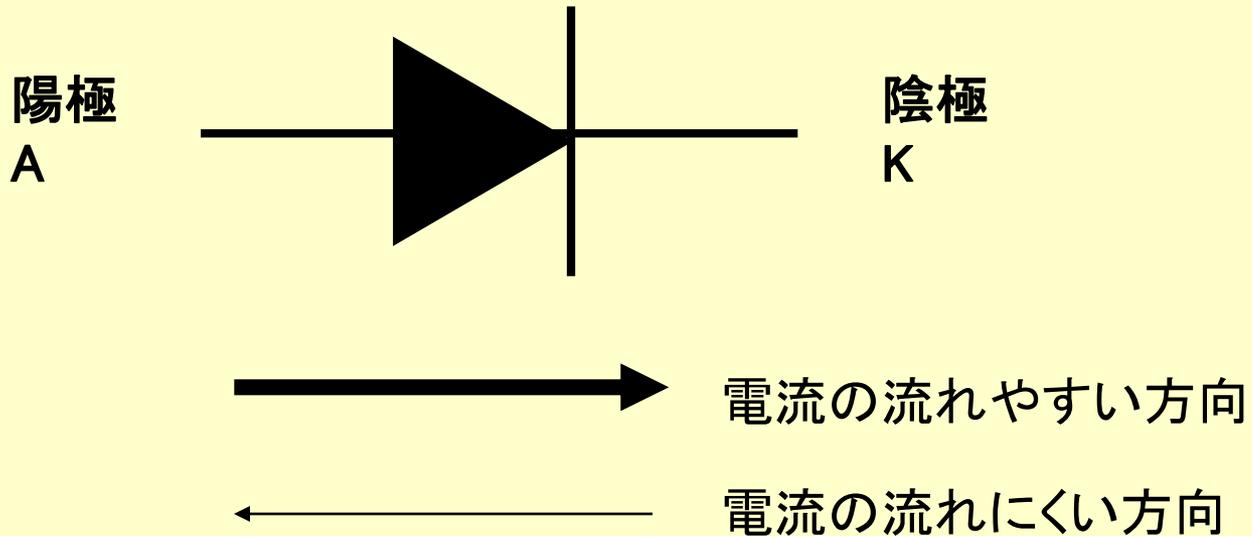
3.3.2 フォトダイオードと太陽電池

3.3.3 発光ダイオードとレーザダイオード

# 3.1 pn接合ダイオード

ダイオード (diode) は.....

”陽極 (anode: アノード) と陰極 (cathode: カソード) の2つ (di: ダイ) の電極を持った”という意味で, 整流, 電气的分離, 電荷蓄積, 光-電気変換などの性質を持っている.



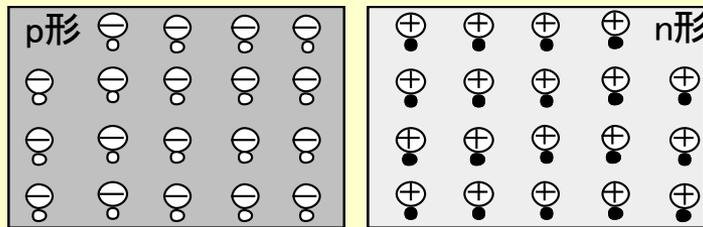
# 3.1.1 pn接合 (1)

pn接合 (pn junction) : 半導体中でp形からn形に伝導形が変化している領域

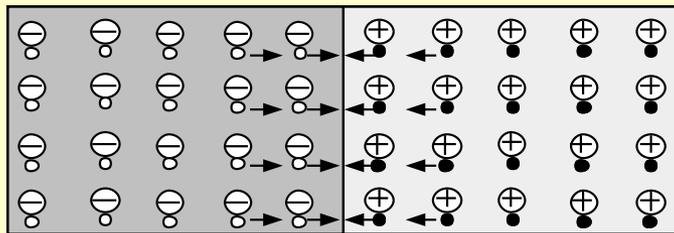
p形とn形半導体を接合した場合, キャリアに大きな濃度差が生じ, キャリアがお互い逆方向へ拡散, 再結合する. 一方, ドナーやアクセプタイオンは固定. その結果,

- ① p側n側それぞれの接合近くで多数キャリアが減少した領域ができる.
- ② その領域には添加不純物イオンによる空間電荷が存在する.
- ③ その空間電荷のためn領域からp領域に向かう電界が発生する.

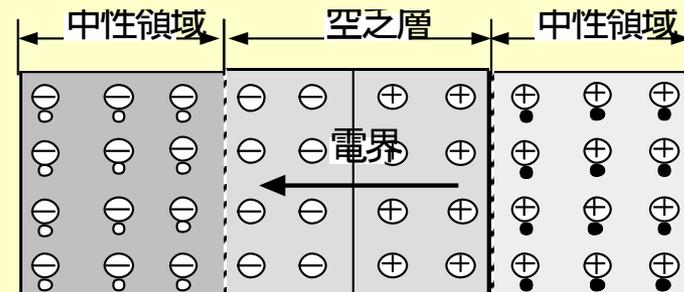
○ 正孔 • 伝導電子 ⊕ ドナー ⊖ アクセプタ



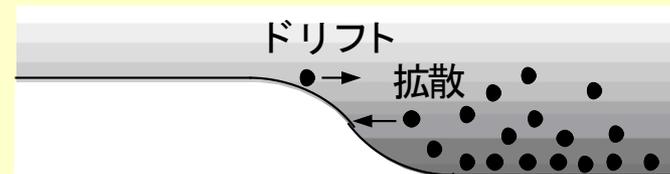
(a) p形とn形が独立に存在する場合



(b) pn接合の形成過程



(c) pn接合形成後



(d)伝導帯での電子の動き

図3-1 pn接合の定性的説明図

## 3.1.1 pn接合 (2)

・熱平衡状態ではp形とn形半導体のフェルミ準位は一致する。

・接合から遠く離れたところでは、接合の影響が無視でき、フェルミ準位の位置は、p形、n形それぞれの半導体が単独で存在したときと変わりはない。

・pn接合の近くでは電界によりエネルギー帯が曲がっている。

(エネルギー帯は電子のエネルギーを表すもので、その勾配は静電ポテンシャルと逆符号になることに注意)

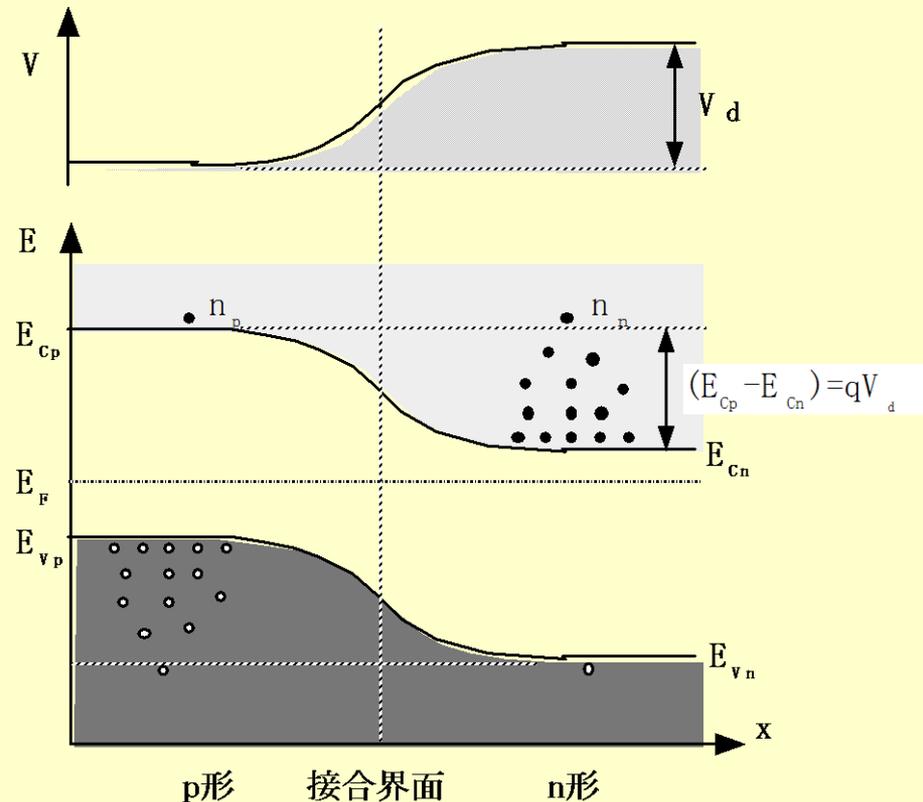


図3-2 pn接合の電位とエネルギー帯図

# 3.1.1 pn接合 (3)

拡散電位 $V_d$ : 正孔がp形からn形に移動するのに必要な電圧(電子がn形からp形に移動する場合も同じ)

p形領域の電子濃度 $n_p$

$$n_p = N_C \exp\left(-\frac{E_{Cp} - E_F}{kT}\right)$$

n形領域の電子濃度 $n_n$

$$n_n = N_C \exp\left(-\frac{E_{Cn} - E_F}{kT}\right)$$

$$\therefore \frac{n_n}{n_p} = \exp\left(\frac{E_{Cp} - E_{Cn}}{kT}\right)$$

$$V_d = (E_{Cp} - E_{Cn}) / q \text{ より}$$

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

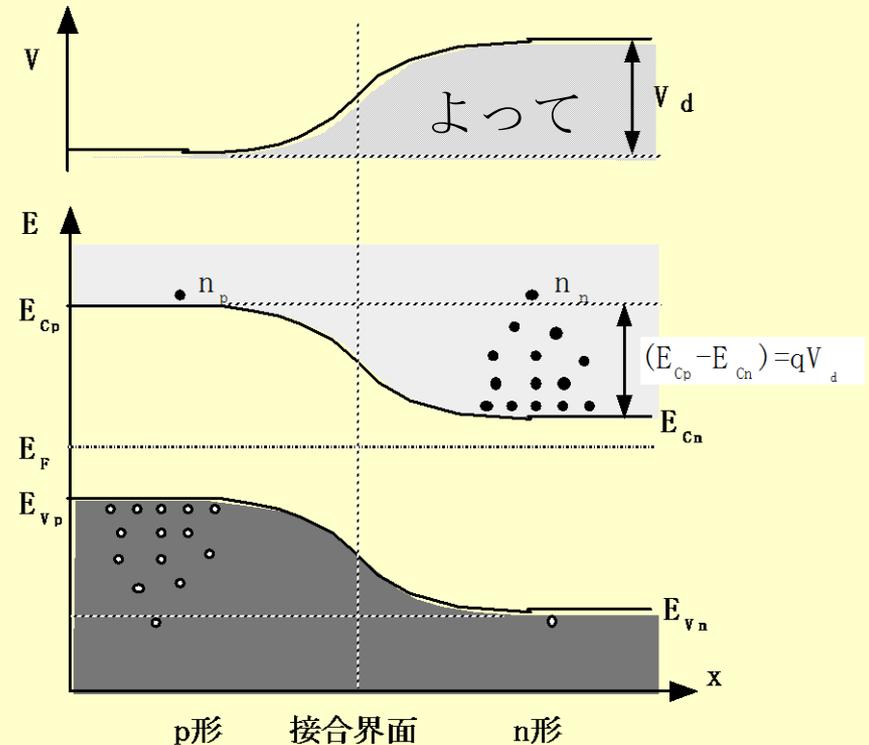


図3-2 pn接合の電位とエネルギー帯図

拡散電位は温度と不純物濃度の関数である

## 3.1.2 電流-電圧特性 (1)

- ①pn接合では電流-電圧特性に整流作用がある. この現象は空乏層中の電荷による拡散電位が起因している. このような素子をpn接合ダイオードという.
- ②外部から電圧を加えるそのほとんどが空乏層にかかる.
- ③n形が負, p形が正の電圧 $V_F$ を加えると, エネルギー障壁は $qV_F$ だけ低くなって $q(V_d - V_F)$ となる.
- ④p形領域の多数キャリアである正孔がn形領域へ, n形領域の多数キャリアである電子がp形領域へ拡散により移動し, 電流が流れるようになる.
- ⑤この極性の外部電圧を順方向バイアス (forward bias) という.

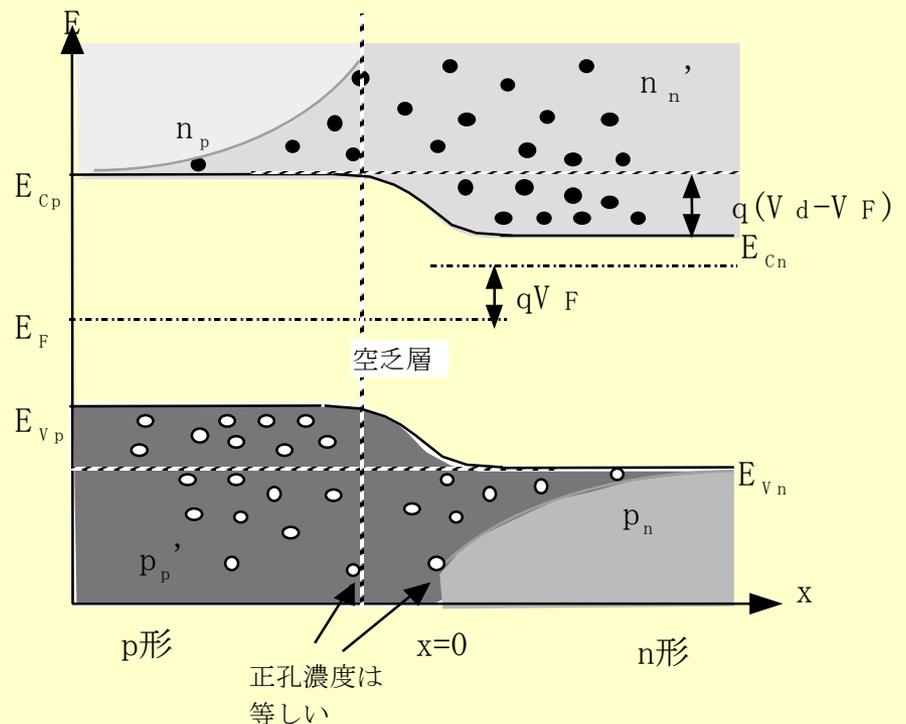


図3-3 順方向バイアスを加えたpn接合のエネルギー帯図と少数キャリア拡散の様子

## 3.1.2 電流-電圧特性 (2)

無バイアスにおいて、拡散電位 $qV_d$ を越えることのできる電子濃度 $n_n$ は、n形領域において $qV_d$ 以上のエネルギーを持つ電子の濃度のこと、これはp形領域中の電子濃度 $n_p$ に等しいので次式のように表せる。

$$n_p = n_n \exp\left(-\frac{qV_d}{kT}\right) \quad (3.3) \quad (n_n \text{ は n 領域における電子濃度})$$

順バイアス $V_F$ を加えると障壁の高さは $q(V_d - V_F)$ となるので、障壁を越えることのできる電子濃度を $n_p'$ は次式となる。

$$n_p' = n_n \exp\left\{-\frac{q(V_d - V_F)}{kT}\right\} = n_p \exp\left\{\frac{qV_F}{kT}\right\} \quad (3.4)$$

同様に、順バイアスで障壁を越えることのできる正孔濃度 $p_n'$ は、

$$p_n' = p_n \exp\left\{\frac{qV_F}{kT}\right\} \quad (3.5)$$

障壁を越えてキャリアを移動させることをキャリアの注入という。

## 3.1.2 電流-電圧特性 (3)

p領域に注入された電子及びn領域に注入された正孔は熱平衡濃度より高いのでそれぞれの領域内に拡散する。

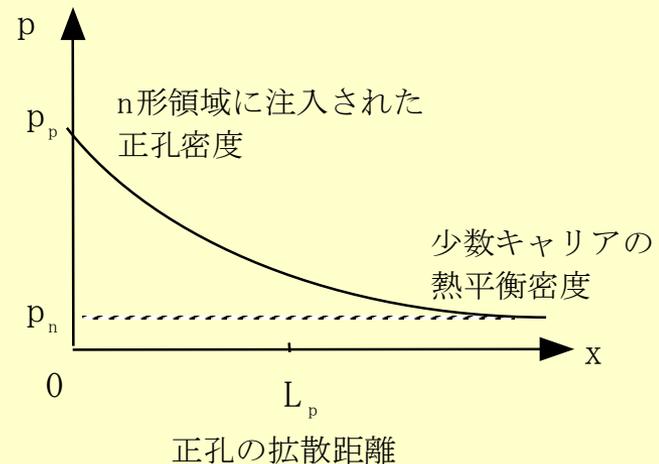
注入されたキャリアは再結合により減少し、電子分布及び正孔分布は距離xに対して定常的な分布を示す。その結果、定常的な拡散電流が流れる。

n形領域内における正孔の濃度分布を解く。正孔分布の時間的変化はないので、式(2.39)は、 $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$  として、正孔の拡散方程式は、

$$\frac{d^2 p(x)}{dx^2} = \frac{p(x) - p_n}{L_p^2} \quad (3.6)$$

ただし、 $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

$L_p$ は拡散距離。注入した正孔がn形領域へ進入できる距離の指標となる。



少数キャリア拡散の様子

## 3.1.2 電流-電圧特性 (4)

空乏層内のキャリア再結合を無視すると,  $x=0$ の正孔濃度はp領域中の正孔濃度 $p_n'$ に等しく, n形領域が十分に長いとき境界条件は,

$$x=0 \text{ において } p(0) = p_n \exp\left\{\frac{qV_F}{\kappa T}\right\} \quad x \rightarrow \infty \text{ において } p(\infty) = p_n \quad (3.7)$$

従ってn形領域の正孔濃度分布は

$$p(x) = p_n \left\{ \exp\left(\frac{qV_F}{\kappa T}\right) - 1 \right\} \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) + p_n \quad (3.10)$$

正孔による電流密度 $J_p$ は,  $x=0$ における拡散電流濃度から求められる.

同様に, 電子電流密度 $J_n$ は,

$$J_p = -qD_p \left. \frac{dp(x)}{dx} \right|_{x=0} = \frac{qD_p p_n}{L_p} \left\{ \exp\left(\frac{qV_F}{\kappa T}\right) - 1 \right\} \quad (3.11) \quad J_n = \frac{qD_n n_p}{L_n} \left\{ \exp\left(\frac{qV_F}{\kappa T}\right) - 1 \right\} \quad (3.12)$$

全電流密度  $J$  は,

$$J = J_p + J_n = q \left( \frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n} \right) \left\{ \exp\left(\frac{qV_F}{\kappa T}\right) - 1 \right\} = J_s \left\{ \exp\left(\frac{qV_F}{\kappa T}\right) - 1 \right\} \quad (3.13)$$

## 3.1.2 電流-電圧特性 (5)

n形が正, p形が負に加えた外部電圧 $V_R$ を逆方向バイアスという.

n形領域のエネルギーは $qV_R$ だけ低くなり, 障壁の高さは $q(V_d + V_R)$ となる.

多数キャリアは高い障壁のため他方に移動することができない.

空乏層端の少数キャリアは電位障壁を下って他方に移動できるが, 少数キャリア密度は逆バイアス電圧によらず一定で, きわめて少数である.

その結果, 逆方向バイアスで電流はほとんど流れない.

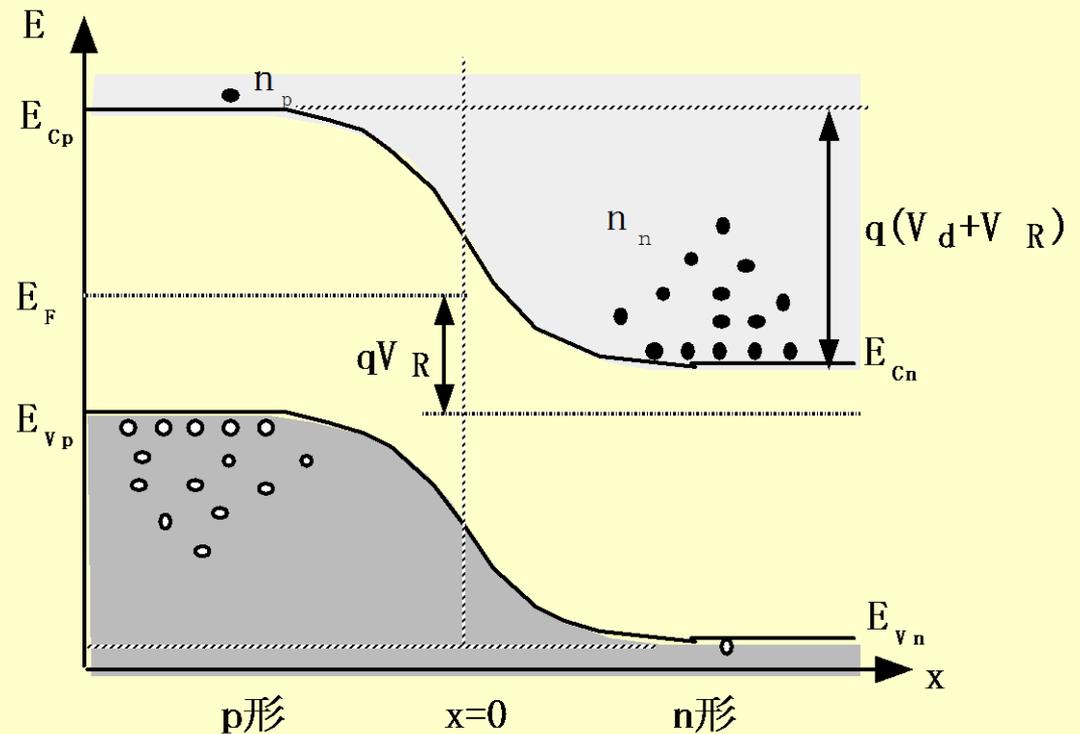


図3-4 pn接合の逆方向バイアス時のエネルギー帯図

## 3.1.2 電流-電圧特性 (6)

### 順方向バイアス

$V_F$ が大きくなると指数項が大きくなり1は無視でき、電流密度は指数関数的に大きくなる。電流が急激に増加する電圧を立ち上がり電圧( $V_T$ )とよぶ。

$V_T$ は拡散電位 $V_d$ にほぼ等しく、材料によって異なり、Siを用いたダイオードの場合 0.6~0.7V, Geでは0.3V程度, GaAsでは1.0V程度になる。

### 逆方向バイアス

指数項が1よりも小さくなり無視できるので、一定の電流 $J_s$ が流れるようになる。この $J_s$ を、逆方向飽和電流濃度といい、空乏層端の少数キャリアの拡散に起因した電流である。

$$J = J_s \left\{ \exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (3.13)$$

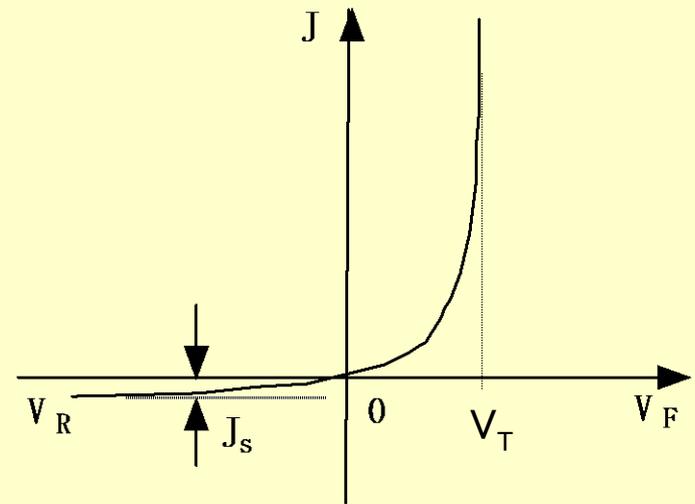


図3-5 pn接合ダイオードの電流-電圧特性

## 3.1.2 電流-電圧特性 (7)

### 実際のpn接合ダイオードの順方向特性

(3.13)式の1は無視して両辺の対数をとると,

$\ln J$ は $V_F$ に対して傾き $q/kT$ の直線で表され, 切片が逆方向飽和電流密度である. 実際には傾きはそれより小さくなり,

$$J = J_0 \left\{ \exp\left(q \frac{V_F}{n k T}\right) - 1 \right\} \quad (3.17)$$

と表せる.  $n$ は理想係数と呼ばれ, この値から, 電流の成分が推定できる.

$n=1$ : 拡散電流

$n=2$ : 再結合電流

再結合電流とは, 空乏層内でのキャリアの再結合による電流成分を意味する.

大電流領域において $n$ 値が大きいのは, 基板の直列抵抗の影響である.

$$\begin{aligned} \ln J &= \ln \left\{ J_s \exp\left(q \frac{V_F}{k T}\right) \right\} \\ &= q \frac{V_F}{k T} + \ln J_s \quad (3.15) \end{aligned}$$

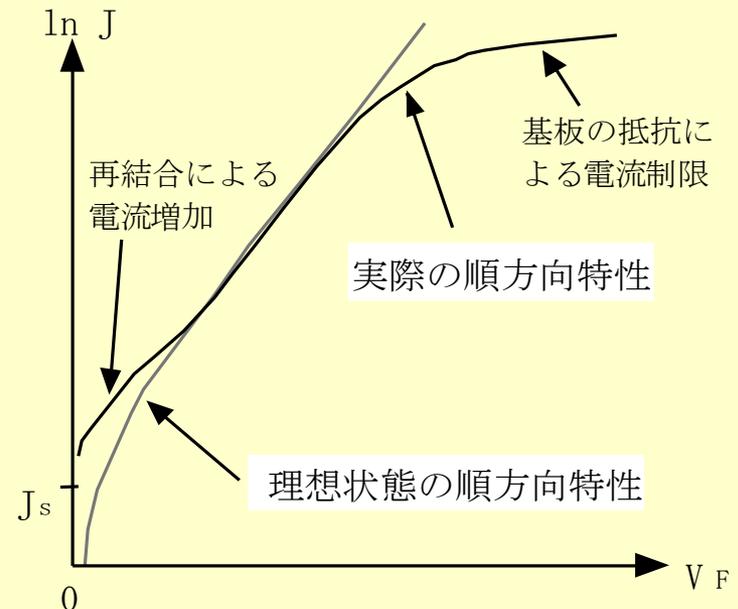


図3-6 pn接合ダイオードの順方向特性

### 3.1.3 pn接合の空乏層容量 (1)

階段接合: アクセプタ, ドナー濃度が一定  
空間電荷(電界)は空乏層だけに存在

逆バイアス( $V_R$ )時, ポアソンの方程式は,

$$\frac{d^2 V_{Rp}}{dx^2} = \frac{qN_a}{\epsilon} \quad (-x_p \leq x \leq 0) \quad (3.19)$$

$$\frac{d^2 V_{Rn}}{dx^2} = -\frac{qN_d}{\epsilon} \quad (0 \leq x \leq x_n)$$

$$\frac{dV_{Rp}}{dx} = 0 \quad (x \leq -x_p)$$

境界条件  $\frac{dV_{Rn}}{dx} = 0 \quad (x_n \leq x)$

(3.21)  $\frac{dV_{Rp}}{dx} = \frac{dV_{Rn}}{dx} \quad (x = 0)$

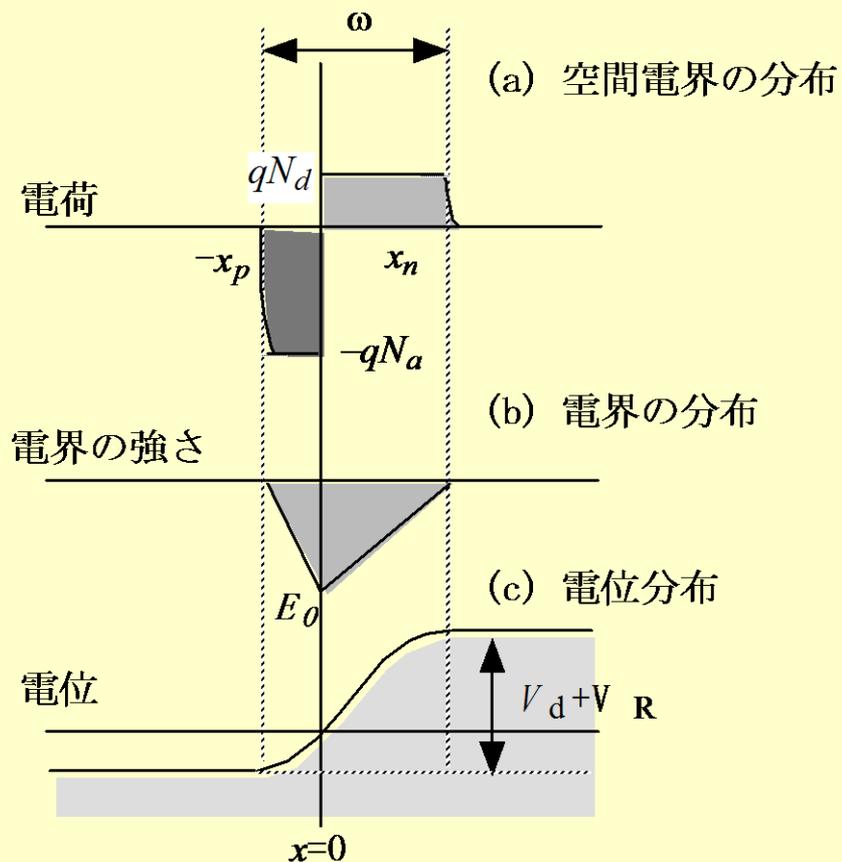


図3-7 pn接合での空間電荷, 電界および電位分布

$$N_a x_p = N_d x_n$$

空乏層中の正負の空間電荷総量は等しく, 空乏層は濃度の低い方により広がる

### 3.1.3 pn接合の空乏層容量 (2)

空乏層幅を $w$ として、 $w$ と $V_R$ の関係を解くと、

$$V_d + V_R = \frac{qN_a N_d}{2\varepsilon(N_a + N_d)} w^2$$
$$\therefore w = \sqrt{\frac{2\varepsilon(N_a + N_d)}{qN_a N_d} (V_d + V_R)} \quad (3.28)$$

逆バイアス $V_R$ を加えた時、

- ①空乏層幅が拡がり、p側、n側ともに空間電荷の総量が増加する。
- ②空乏層中の電界が増加する。

空乏層中に空間電荷として電荷が蓄えられており、その電荷の総量が印加電圧によって変わるので、pn接合は静電容量を持つ。

逆方向電圧の変化、空乏層幅の変化、単位面積あたりの空間電荷の変化から、単位面積あたりの接合容量は、

$$C = \frac{dQ}{dV_R} = \frac{dQ}{\frac{dQ}{\varepsilon} w} = \frac{\varepsilon}{w} \quad (3.29)$$

両式より、

$$C = \sqrt{\frac{\varepsilon q N_a N_d}{2(N_a + N_d)} \cdot \frac{1}{(V_d + V_R)}} \quad (3.30)$$

### 3.1.3 pn接合の空乏層容量 (3)

容量は $(V_d+V_R)$ の平方根に反比例する

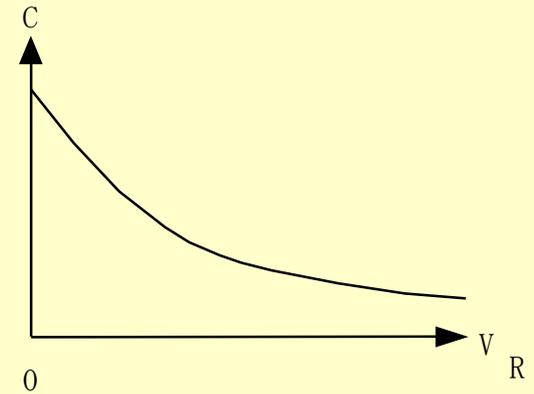
$$C = \sqrt{\frac{\epsilon q N_a N_d}{2(N_a + N_d)} \cdot \frac{1}{(V_d + V_R)}} \quad (3.30)$$

$V_R$ について変形して,

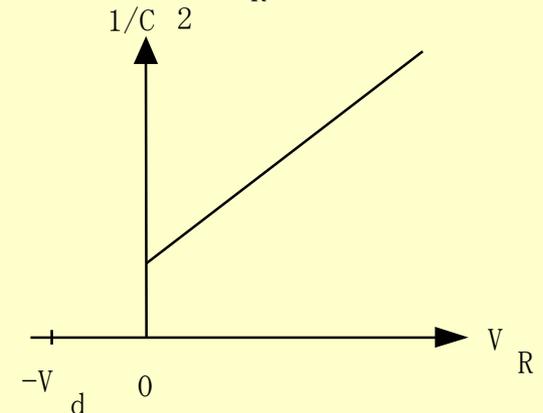
$$V_R = \frac{\epsilon q N_a N_d}{2(N_a + N_d)} \cdot \frac{1}{C^2} - V_d \quad (3.31)$$

$V_R$ と $1/C^2$ をプロットすれば直線となり, 電圧軸切片が拡散電位に相当する.

片方の不純物濃度が非常に大きい時, 例えば  $N_a \gg N_d$  では, 傾きは  $q \epsilon N_d / 2$  となるので, グラフの傾きから低い方の不純物濃度 ( $N_D$ ) を求めることができる. このような接合は片側階段接合と呼ばれ, 空乏層は不純物濃度の低い側のみに広がる.



(a)  $C$ と $V_R$ の関係



(b)  $1/C^2$ と $V_R$ の関係

図3-8 pn接合の容量-電圧特性

## 3.1.4 ダイオードの降伏 (1)

pn接合ダイオードに大きな逆方向電圧を加えると、あるところで急激に大きな電流が流れ始める。

この現象をダイオードの降伏といい、降伏が起こる電圧を降伏電圧という。

通常の目的で使用する場合は、逆方向の印加電圧は降伏電圧よりも十分小さいことが必要である。

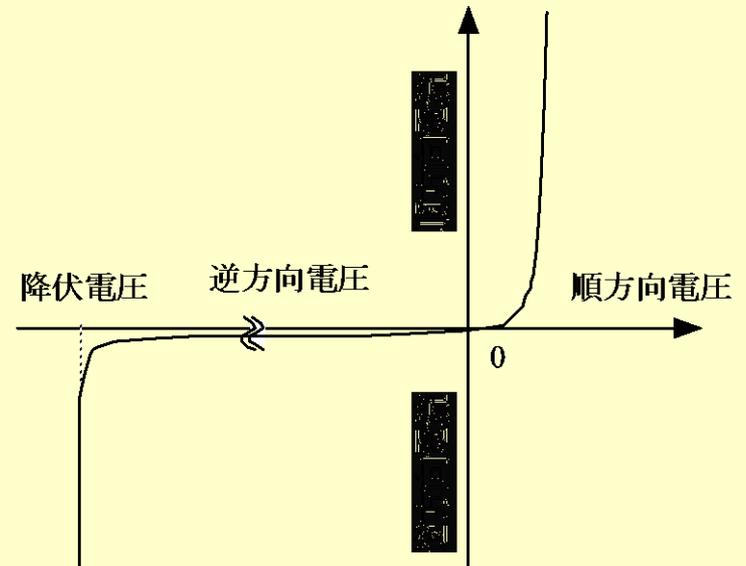


図3-9 降伏現象

降伏現象を利用した素子が定電圧ダイオード(ツェナーダイオード)である。

→降伏が起こると電流の変化に対して電圧の変化が無視できる程度に小さいため、基準電圧を発生させる素子に利用されている。

## 3.1.4 ダイオードの降伏 (2)

### ツェナー降伏

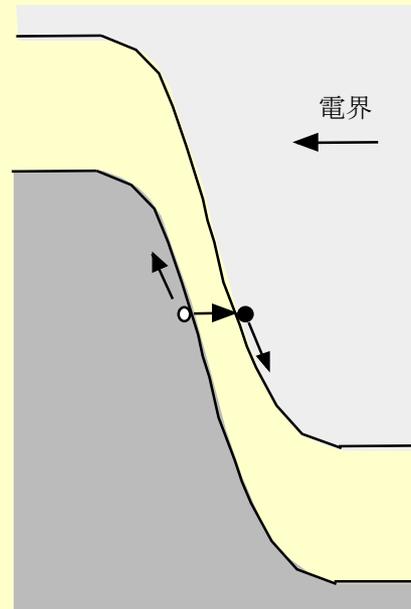
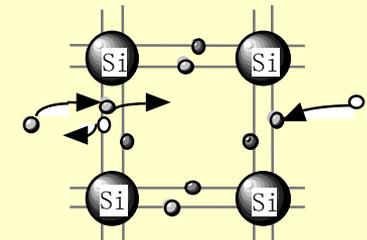
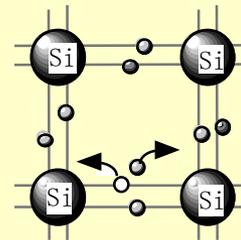
量子力学的なトンネル効果によって、価電子帯の電子が直接伝導帯へ通り抜ける現象である。

(不純物濃度の高いpn接合で起こりやすい)

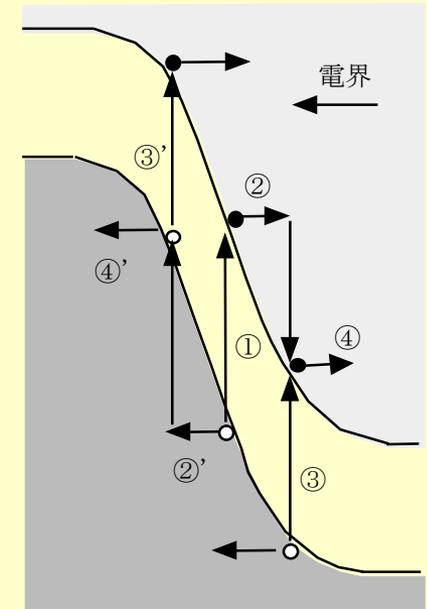
### なだれ降伏

電界によって加速されたキャリアが、結晶格子と衝突して電子-正孔対を作り、キャリアが電界により加速されて高いエネルギーを得て、それが結晶格子と衝突したとき、新しい電子-正孔対をつくる。この繰り返しのより電流が増倍される。

(不純物濃度の低いpn接合で起こり、降伏電圧は大きい)



(a) ツェナー降伏



(b) なだれ降伏

図3-10 降伏現象のメカニズム

# 3.2.1 金属と半導体の接触モデル (1)

## ショットキー接触:

整流性を示す半導体と金属の接触

$\phi_m$ ,  $\phi_s$ : 仕事関数 (金属から電子を取り出すのに必要なエネルギー)

$\chi_s$ : 電子親和力 (真空準位と伝導帯底とのエネルギー差)

金属と半導体を接触させると, pn接合と同様に電子の移動が起こる.

$\phi_m > \phi_s$  の場合, 金属と半導体を接触させると, フェルミレベルが一致するまで電子が半導体から金属に移動する. この結果,  $\phi_B = \phi_m - \chi_s$  の電位障壁ができると同時に, 半導体表面には空乏層が現れる.

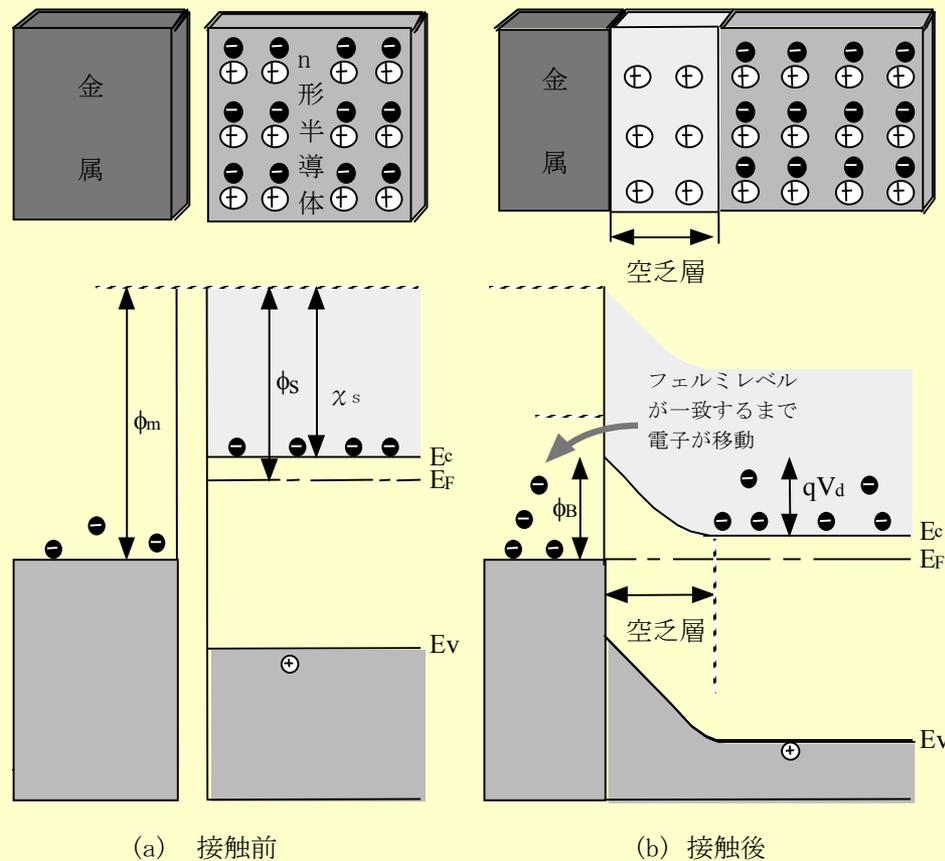


図3-11 金属とn形半導体とのショットキー接触のエネルギー帯図

## 3.2.1 金属と半導体の接触モデル (2)

**順方向特性:** 図 (a)のようにn形半導体に対して金属側が正となるように電圧を加えると、半導体中の電子は金属電極へと移動して電流が流れる。

**逆方向特性:** 金属電極が負となるように電圧を加えると、図 (b)のように電子は半導体内部へと追い払われ、空乏層幅が大きくなるのみで、金属と半導体との界面の障壁は変化せず、金属から半導体への電子の移動はほとんどなく、電流は流れない。

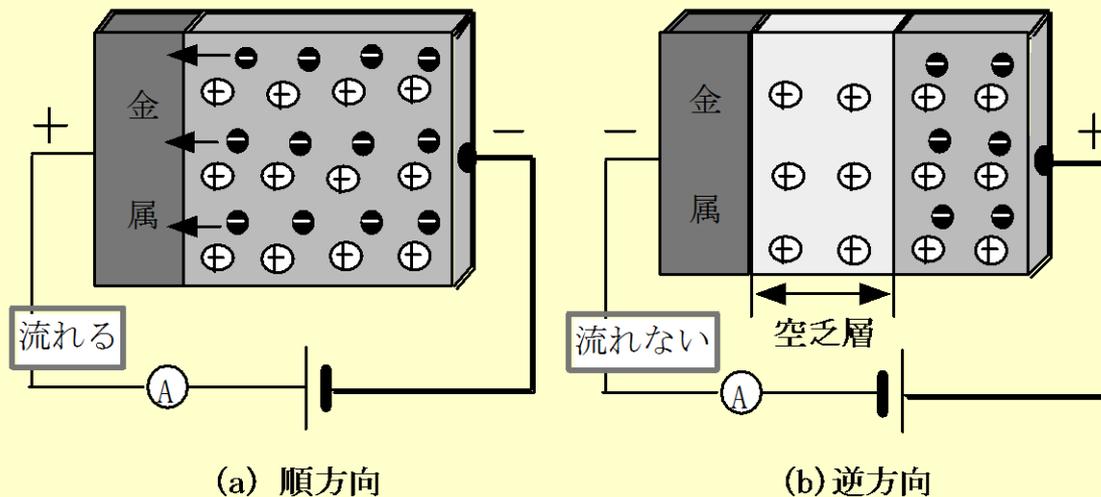


図3-12 金属とn形半導体のショットキー接触における順・逆方向特性の説明図

## 3.2.1 金属と半導体の接触モデル (3)

オーム性接触: 整流性の表れない金属-半導体接触

$\phi_m < \phi_s$  の場合, 金属のフェルミ準位が半導体より高いため, 電子は金属から半導体へと流れ込む. フェルミ準位が一致した後, 半導体表面には空乏層が形成されないため整流性は現われない.

半導体デバイスの電極はオーム性接触になるように適切な電極材料を選ぶ必要がある.

金属とp形半導体との接触もn形の場合と同様に金属と半導体との組合せで決まる.  $\phi_m < \phi_s$  ならば整流特性,  $\phi_m > \phi_s$  ならばオーム性特性が現われる.

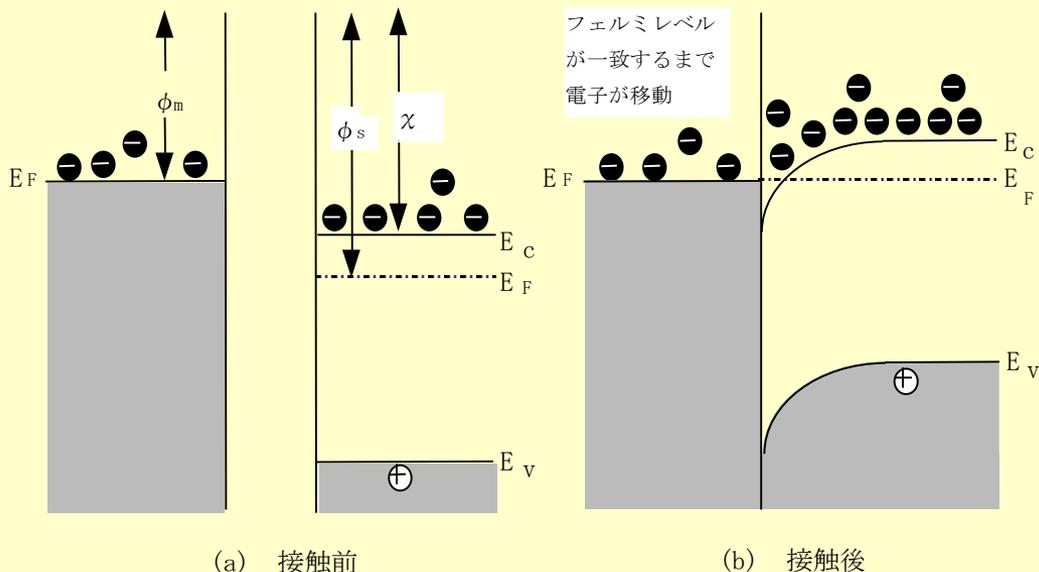


図 3-13 金属とn形半導体とのオーム接触のエネルギー帯図

## 3.2.2 電気的特性

半導体から金属への電子の移動は

$$J_{SM} = K_1 \exp\left\{-q \frac{(V_d - V_F)}{\kappa T}\right\}$$

金属から半導体への電子の移動は

$$J_{MS} = K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{\kappa T}\right)$$

電流密度Jは $J_{SM}$  と $J_{MS}$ の差から

$$\begin{aligned} J &= (J_{SM} - J_{MS}) \\ &= K_1 \exp\left\{-q \frac{(V_d - V_F)}{\kappa T}\right\} - K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{\kappa T}\right) \end{aligned}$$

$V_F = 0$ では $J = 0$ なので、

$$J = -K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{\kappa T}\right) \left\{ \exp\left(\frac{qV_F}{\kappa T}\right) - 1 \right\} = J_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV_F}{\kappa T}\right) - 1 \right\} \quad \text{ここで}$$

$$J_0 = K_2 \exp\left(-\phi_B / \kappa T\right)$$

ショットキー接触でも順バイアス時は電流が指数関数的に増加し、逆バイアスを加えた場合は障壁が $q(V_d + V_R)$ と大きくなり、 $J_{SM}$ は殆ど流れない。

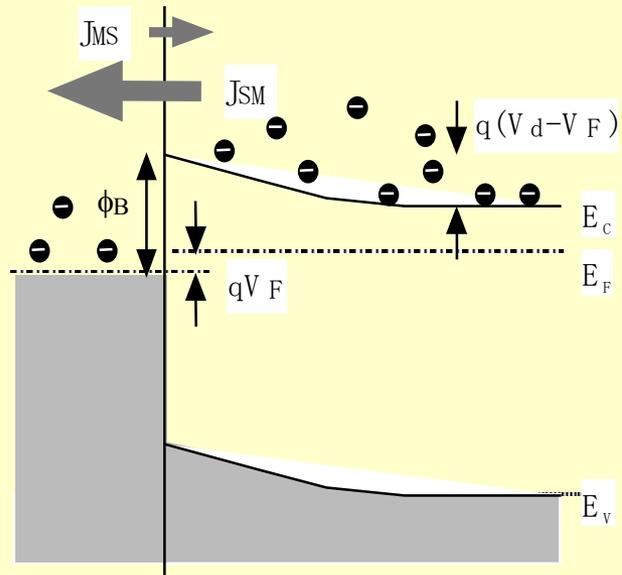


図3-14 ショットキー接触のエネルギー帯図  
(順方向バイアス印可時)

### 3.2.3 ショットキー接触の空乏層容量

ショットキー接触にも静電容量が存在する  
ドナー濃度一定としてポアソンの方程式は、

$$\frac{d^2 V_R}{dx^2} = -q \frac{N_d}{\epsilon} \quad (0 \leq x \leq w) \quad (3.36)$$

境界条件は

$$x = 0 \quad \text{では} \quad V(0) = 0$$

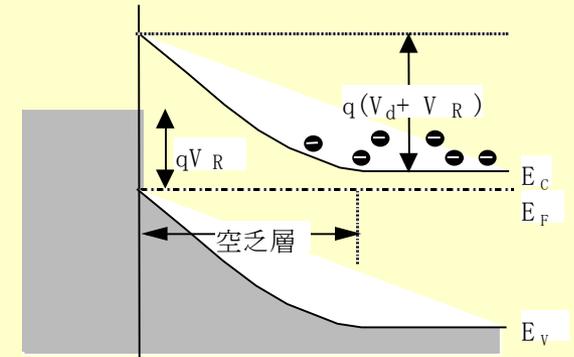
$$x = w \quad \text{では} \quad V(w) = V_d + V_R, \quad \frac{dV(w)}{dx} = 0$$

空乏層幅 $w$ と印加電圧 $V$ の関係は

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_d + V_R)}{qN_d}}$$

$$\text{空乏層容量} C \text{は} \quad C = \frac{\epsilon}{w} = \sqrt{\frac{q\epsilon N_d}{2(V_d + V_R)}}$$

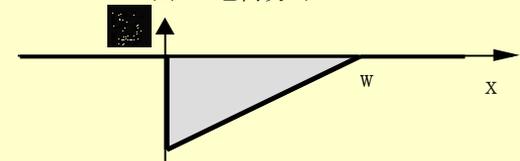
ショットキー接触でも不純物濃度が計算できる  
pn接合が片側階段接合の場合と同じ式になる



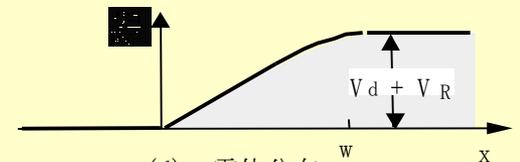
(a) エネルギー帯図



(b) 電荷分布



(c) 電界分布



(d) 電位分布

図3-15 ショットキー接触における電荷、電界、電位分布（逆バイアス印可時）

## 3.3.1 整流・定電圧ダイオード

pn接合に逆方向電圧を加えた場合、電圧の値が一定値を超えると、逆方向電流が急激に増加する降伏現象が発生する。この性質を利用して、pn接合定電圧ダイオードは、次のような用途に広く用いられている。

- ①定電圧ダイオード: 回路内で一定の参照電圧(リファレンス電圧)などを作り出す用途
- ②保護回路素子: ICの外部入・出力端子に乗る静電気などのノイズ電圧やサージ(surge)電圧に対し、内部素子を破壊から守る用途
- ③リミッタ: 電圧を一定値でカットし、それ以上の高電圧がかからないようにする。すなわち、電圧値を制限(リミット)する用途

## 3.3.2 フォトダイオードと太陽電池 (1)

価電子帯に存在する電子に拘束を振り切るだけのエネルギーを持つ光を半導体に照射すると、電子・正孔対が発生する。

$$h\nu \geq E_g$$

$\nu$  : 振動数,  $h$  : プランク定数,  $E_g$  : 禁制帯

図のようにダイオードの電流-電圧特性が光照射によりシフトする。無バイアスでも光電流 $I_{sc}$ (暗電流)が流れ、端子を開放した状態では起電力 $V_{oc}$ が生じる。

フォトダイオード (photodiode) :  
光電流により光の検出を行う素子

太陽電池 (solar cell) :  
光照射時の光起電力を電源として利用する

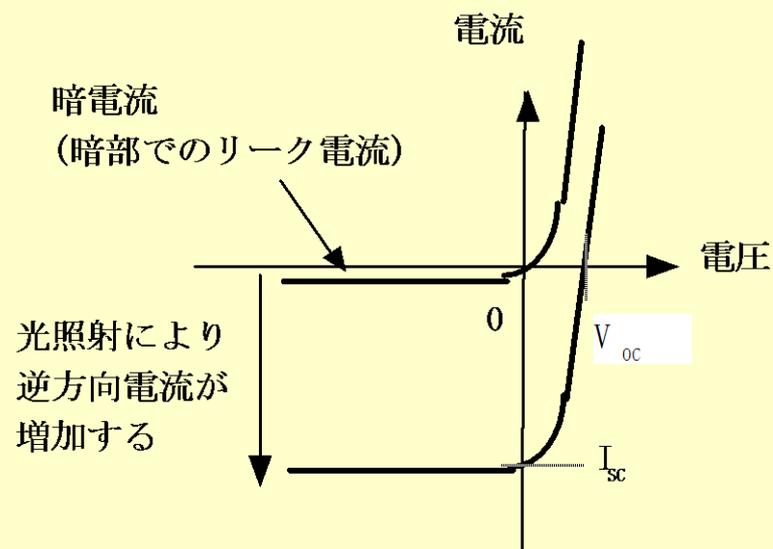


図3-16 pn接合への光照射による電気的特性の変化

## 3.3.2 フォトダイオードと太陽電池 (2)

フォトダイオードは、光通信の受光素子やCCDなどの光検出素子として用いられている。光信号に対する光電流の応答を速くするため、通常のフォトダイオードは逆バイアスを印加した使用されている。真性半導体層をpn接合に挟んだpin構造のフォトダイオードは空乏層容量が小さく、光検出の感度も高い。

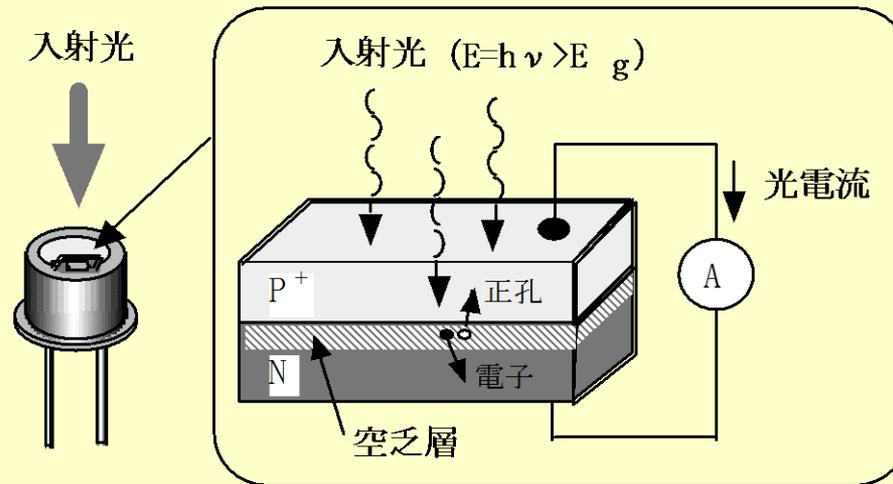


図3-17 フォトダイオードの基本構造と光電流発生の様子

## 3.3.2 フォトダイオードと太陽電池 (3)

地表における太陽からの放射エネルギーは $1\text{m}^2$ あたり約 $1\text{kW}$ である。

Siのpn接合では変換能率が $16\sim 18\%$ (理論的値 $22\%$ )で、シリコン太陽電池として良く利用されている。最近では禁制帯が大きいGaAs等の化合物半導体を用いた高効率の太陽電池も開発されている。

シリコン太陽電池の構造はn形シリコンの表面にほう素(B)を薄く拡散させてpn接合を形成している。光を受けると、p形領域がプラス、n形領域がマイナスとなるような起電力が発生する。受光面積を大きく取り、電極構造を工夫して内部抵抗を低減させている。

太陽電池は、小形の電卓から無人中継局や無人燈台の電源や人工衛星や宇宙ロケットの電源に至るまで幅広く利用されている。

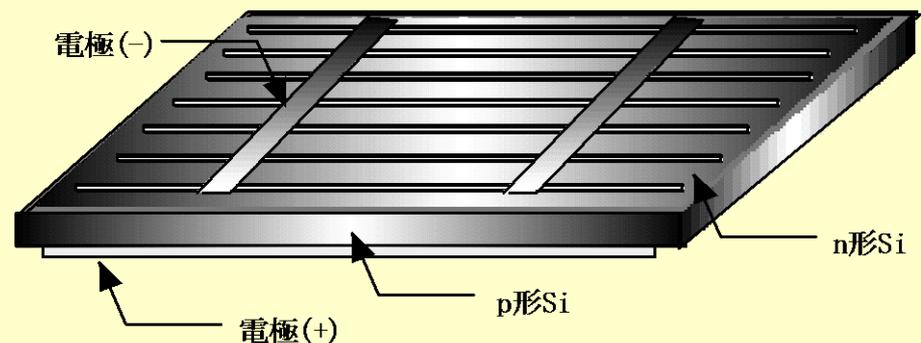


図3-18 Si太陽電池の構造

### 3.3.3 発光ダイオードとレーザーダイオード (1)

発光ダイオード(LED): 電気信号を光信号に変換するpn接合ダイオード

pn接合に順バイアスを加えると, p形領域には電子が, n形領域には正孔が少数キャリアとして注入される. 注入された電子と正孔は, それぞれの領域で多数キャリアと再結合する際に光を放出する. 放出される光は, 半導体の禁制帯 $E_g$ に対応した振動数を持っている. 半導体の種類により異なる発光色を得ることができる.

#### 光通信用

伝送に使う石英系の光ファイバーでの伝送損と分散特性の関係から, 長波長帯( $\lambda = \sim 1.3 \mu\text{m}$ と $1.5 \mu\text{m}$ )が主に用いられている.

#### 表示用LED

赤, 橙, 黄, 緑, 青など可視光の波長帯がよく用いられている.

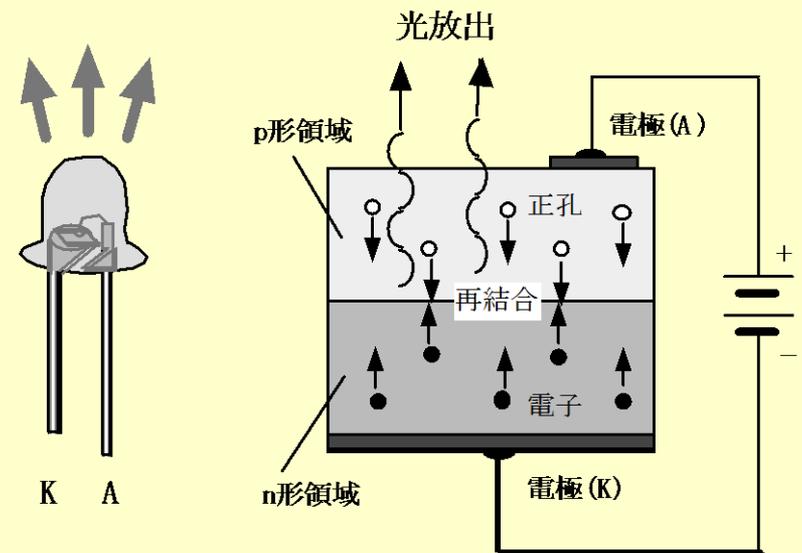


図3-19 発光ダイオードの構造

### 3.3.3 発光ダイオードとレーザーダイオード (2)

用途	化合物半導体材料 (2元系、3元系)	発光色・波長領域 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.4 1.6 1.8 (μm)
表示用	GaN, SiC GaP GaP, GaAsP GaAsP GaAsP, GaAlAs	青 緑 黄 橙 赤
通信用	GaAlAs GaInAs, InAsP	----- -----

### 3.3.3 発光ダイオードとレーザーダイオード (3)

レーザー(LASER)光: 波長が一定で位相のそろった光

種類: ガスレーザー(He-Neなど), 固体レーザー(ルビーなど), 半導体レーザー  
半導体レーザーの特徴: 小形, 高効率, 低電圧, 低消費電力, 長寿命, 高速変調.

半導体レーザーの構造: 通常はダブルヘテロ接合. 活性層をそれより禁制帯幅が大きく屈折率の小さいクラッド層で挟んだ構造.

原理: 活性層で電子と正孔が再結合して光を放出し, 屈折率の違いと反射鏡により光が活性層内に閉じ込められて誘導放出が起こる.

半導体レーザーでは, 入力電流が一定値(しきい値電流)を超えた時に発振が起こり, その後は注入電流とともに光出力が増加する.

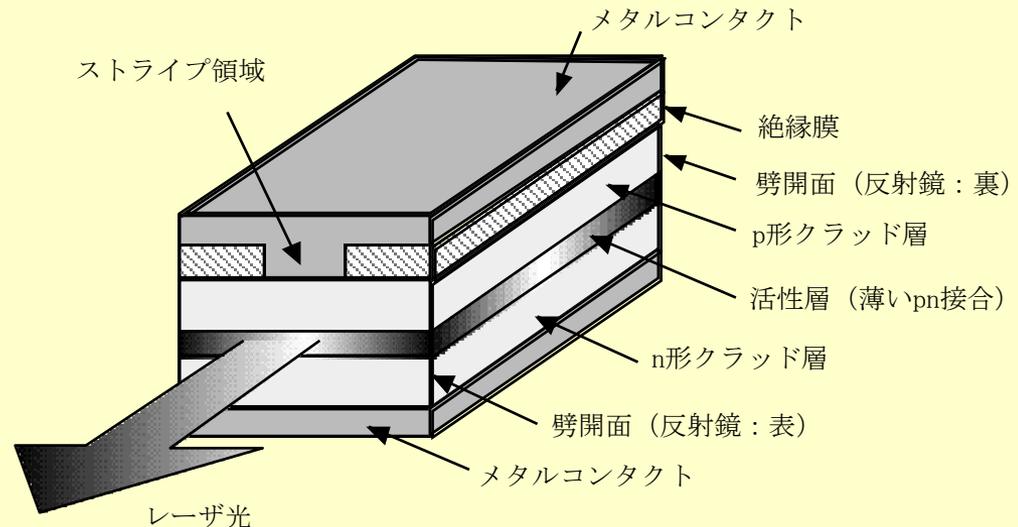


図3-20 半導体レーザーの構造

### 3.3.3 発光ダイオードとレーザーダイオード (4)

主な用途		レーザー波長と化合物半導体の材料	
通信用	基幹系	$\lambda=1.55 \mu\text{m}$	InGaAsP系
	アクセス系	$\lambda=1.3 \mu\text{m}$	(1.1~1.6 $\mu\text{m}$ )
ストレージ用	CDプレーヤー プリンタ . . .	$\lambda=0.78\mu\text{m}$	GaAlAs 系 (0.75~0.85 $\mu\text{m}$ )
	バーコードリーダ DVD . . .	$\lambda=0.65\mu\text{m}$	GaAl InP (0.63~0.69 $\mu\text{m}$ )

# 演習問題

- 問1 ドナー濃度 $10^{22} \text{ m}^{-3}$ , アクセプタ濃度 $10^{21} \text{ m}^{-3}$ のSi-n<sup>+</sup>pダイオードの拡散電位を求めよ. 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2 前問のダイオードの逆方向飽和電流密度を求めよ. ただし, 電子と正孔の拡散定数はそれぞれ $3.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ と $1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , 寿命はいずれも $100 \mu\text{s}$ とする.
- 問3 前問のダイオードに0.6Vの順方向バイアスを加えたときの電流密度を求めよ.
- 問4 前問のダイオードに1Vの逆方向バイアスを加えた時の空乏層容量を求めよ. ただし, Siの比誘電率は12とする.
- 問5 金属・p形半導体接触において,  $\phi_m < \phi_s$ なら整流特性を示すことをエネルギー帯図を用いて説明せよ.
- 問6 前問の接触において, 逆に $\phi_m > \phi_s$ ならオーム接触となることを説明せよ.
- 問7 フォトダイオードの受光感度を決定する要因について考えよ.