

## 10. Semiconductor Detectors

半導体を用いた検出器 (特に Si, Ge) : 1930 ~ 1950年代に発達

### 原理

粒子が半導体中を通過すると、電子、ホール対という形で電気的信号が生じる。対を形成するのに必要なエネルギーが小さいため ( $3\text{eV} < \epsilon_{\text{Si}}$ )、1つの入射粒子に対して多くの対が形成される。

### 利点

- エネルギー分解能が高い (1 MeV の線に対して数 eV ほど)
- 密度が大きいので、ガス検出器に比べてサイズを小さくでき、response time が小さい。

### 欠点

- Ge 検出器だと、液体窒素で冷やす必要がある。(1日1回は飲ませる)
- 放射線に対して脆く、検出能力が弱くなっていく。

様々な検出器について学ぶ前に、ここでは半導体とその接合について復習する。

## 10.1 Basic Semiconductor Properties

まずは“不純物”の入っていない純粋な半導体について学ぶ。

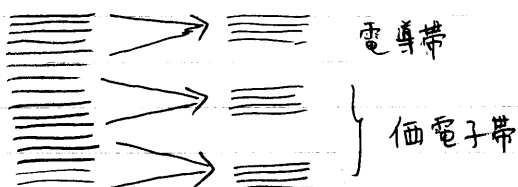
### 10.1.1 Energy Band Structure

半導体とは...

価電子が特別なエネルギーバンド構造を示す結晶のこと (図 10.1)

- バンド領域 : エネルギー準位間の差が十分小さくて、連続スペクトルとみなせる領域
- 禁止帯 : 許されるエネルギー準位が全くない領域

これらのバンド構造は結晶中の隣り合う電子の波動関数が重なると、パウリ排他律から価電子のエネルギー準位の縮退が溶けて互いのお互いに離れた準位を形成するためにできる。



• エネルギーが最も高い準位 = 伝導帯

この準位の電子のみが結晶内を自由に動き回ることかでき、電気伝導に寄与する。

• エネルギーギャップの大きさは結晶構造や温度、圧力に依存

• エネルギーギャップが存在せず、室温の熱エネルギーで伝導帯に遷移できる物質 = 伝導体

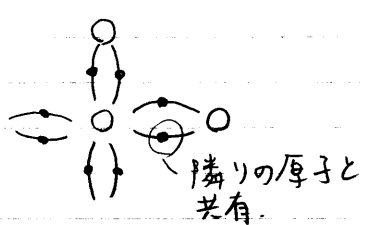
• エネルギーギャップが大きく、外場電圧をかけたも伝導帯に遷移できない物質 = 絶縁体

☆ 半導体は、上の2つの中間的な物質で、伝導帯に遷移できる電子がほんの数個の物質 (冷却すると伝導率は下がる) (図 10.1)

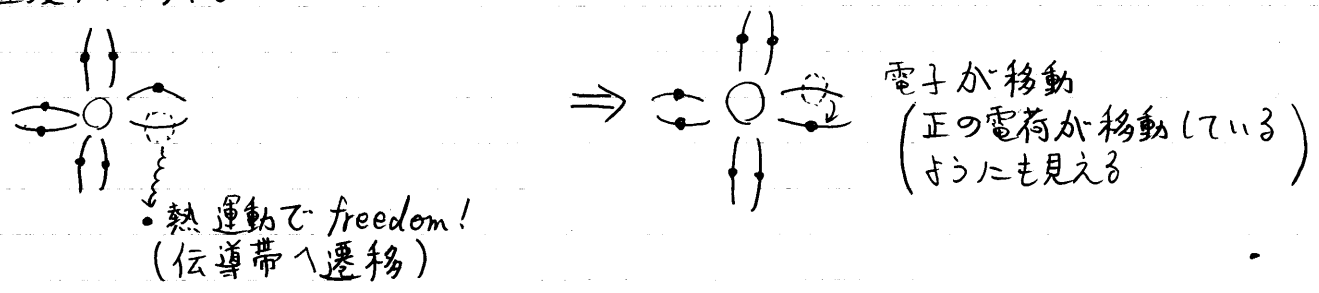
### 10.1.2 Charge Carriers in Semiconductors

0K では価電子は全て共有結合に用いられる (図 10.2)

(例: Si, Ge は価電子が4個)



温度が上がると



半導体における電流には2つの起源がある

- ① 伝導帯にいる自由電子の移動
- ② 価電子帯でのホールの移動

(cf. 導体では自由電子だけであった)

### 10.1.3 Intrinsic Charge Carrier Concentration

電子、ホール対は常に生成、消滅が繰り返され、平衡状態が保たれている

$n_i$  を電子、ホール対の個数濃度とすると

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) = A T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (10.1)$$

( $N_c, N_v$ : 伝導帯, 価電子帯の準位数)  
 ( $E_g$ : エネルギーギャップの大きさ)

T = 300K では  
 (Ge :  $2.5 \times 10^{13}$  個/cm<sup>3</sup>  
 Si :  $1.5 \times 10^{10}$  個/cm<sup>3</sup>  
 全体のうち  $10^{-9}$  くらいしか 対を形成しない

10.1.4. Mobility

外部から電場をかけた時の電子、ホールドリフト速度は

$$\begin{cases} v_e = \mu_e E \\ v_h = \mu_h E \end{cases} \quad (10.2)$$

$\mu$ : mobility で 温度, 電場の関数

Si だと

- (  $E < 10^3$  [V/cm] ) :  $\mu$  は定数
- (  $10^3 < E < 10^4$  ) :  $\mu \propto E^{-1/2}$
- (  $10^4 < E$  ) :  $\mu \propto \frac{1}{E}$  ( $v$  は  $10^7$  cm/s くらいに落ちつく)

半導体中の電流密度は

$$J = e n_i (\mu_e + \mu_h) E \quad (10.3) \quad \text{で与えられる}$$

伝導度  $\sigma$  は

$$\sigma = \frac{J}{E} = e n_i (\mu_e + \mu_h) \quad (10.4)$$

抵抗率は  $\sigma$  の逆数

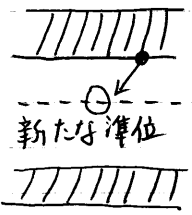
10.1.5 Recombination and Trapping

電子とホールが再結合して価電子帯に戻るには、両者の運動量がちょうど逆向きで、大きさが等しくなければならず、確率は低いはず  
 理論的に計算してみると寿命は  $1s$  くらい



しかし実験では  $ns \sim 100 \mu s$  しかない  
 \* 何か他のメカニズムが存在していることを示している

① 最も重要なものは、不純物混入による recombination centers



capture されている間にホールと待ち合わせ

recombination impurities があるとキャリアの寿命を短縮  
この寿命が電荷を集めるのにかかる時間よりも短いと検出器の分解能が下ってしまう。



不純物の存在は  $10^{10}$  個 /  $\text{cm}^3$  以内であることが必要

② trapping

キャリアのうちどちらか一方のみをトラップする (結合を起さない)

トラップ時間が長いと分解能に悪影響

→ 熱を加えたり放射線を加えると壊れる

上のような禁止帯上の準位は結晶構造の欠陥によっても生じる

ここでは不純物による悪影響のみを考えたが、ものによっては新たな準位が伝導帯、価電子帯のすぐ近くに生じることで、半導体の価値を高めることがある

## 10.2 Doped Semiconductors

半導体物質よりも価電子が1個だけ多い(少ない)物質を混入させることで、電子、ホールペアのバランスを変えることができる

① n型半導体

ドナー

価電子が1つだけ多い物質を混入させる (As, P, Sb)

新たな準位は伝導帯のすぐ下にできるため、余分な電子は簡単に伝導帯へ遷移

この電子はホールを埋めることもある (図10.4)



キャリアは負 (negative) の電荷

② p型半導体

価電子が1つだけ少ない物質 (アクセプター) を混入させる (Ga, B, In)

新たな準位は価電子帯のすぐ上にできる



キャリアは正 (positive) の電荷

不純物の密度は  $10^{18}$  個/cm<sup>3</sup> 程 (10億分の1の割合)  
不純物が多い ( $10^{20}$ 個/cm<sup>3</sup>) 半導体は  $p^+$ ,  $n^+$  のように表す

$n, p$  を電子, ホールの濃度とすると (10.1) お  
$$np = n_i^2 = AT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right) \quad (10.5)$$

半導体の電荷は全体としては 0 なので  
$$N_D + p = N_A + n \quad (10.6)$$
  
( $N_D, N_A$  は ドナー, アクセプター濃度)

$n$  型半導体では  $N_A = 0$  で  $n \gg p$  お  
 $n \approx N_D \quad (10.7)$   
つまり 電子濃度は ドナー濃度にほぼ等しい  
(10.5) お  
$$p \approx \frac{n_i^2}{N_D} \quad (10.8)$$

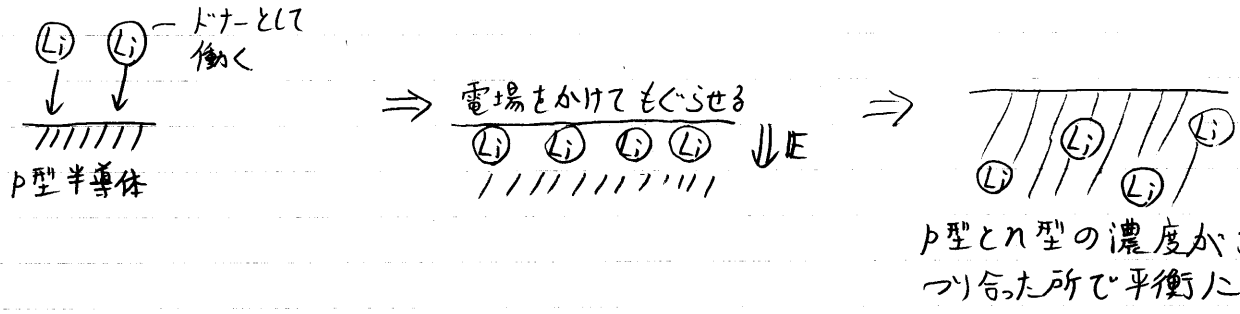
伝導度 (抵抗率) は (10.4) お  
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \approx e N_D \mu_e \quad (10.9)$$

### 10.2.1 Compensation

$n$  型,  $p$  型の不純物を同時に入れることもできる  
このとき 正味の濃度は ドナーとアクセプター濃度の差  $|N_D - N_A|$  になる  
( $\circ N_D > N_A$  なら  $n$  型半導体  
 $\circ N_D < N_A$  なら  $p$  型半導体)  $\rightarrow$  ドナーとアクセプターが互いに“埋め合”をするというニュアンス

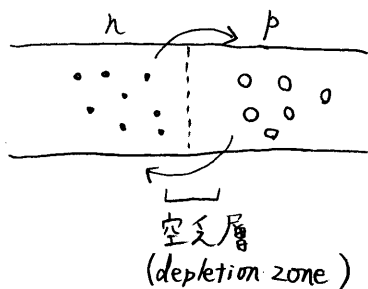
$N_D = N_A$  の場合, Compensation と呼び, “i” を付ける

$i$  型半導体の作り方は 1960年代に Pell によって発見される (lithium drifting method)



- i型半導体は抵抗率が非常に高く、検出器としては都合が良い  $\rightarrow$  §10.5.4, 10.7.1
- Ge結晶内ではLiイオンの運動性が高いために検出器として機能させるためには液体窒素で冷却する必要がある。

### 10.3 The np Semiconductor Junction. Depletion Depth



p型, n型半導体を接合すると  
電子, ホールの移動が起こる



電荷の偏りから、電場が生じる  
境界面付近でポテンシャル変化が起こる (図10.5)  
( $1V < 5u$ )

電場がある領域に放射線が入って、電子, ホールペアが生じると、両者は分離されて、電気信号となる。

#### 10.3.1 The Depletion Depth.

pn接合をすることで、どのようなポテンシャル変化が起こるかを計算する  
空乏層での電荷密度を  $\rho(x)$  とすると、ポアソン方程式より

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (10.10)$$

簡単な例として、図10.6 のような電荷分布を考える

$$\rho(x) = \begin{cases} eN_D & (0 < x < x_n) \\ -eN_A & (-x_p < x < 0) \end{cases} \quad (10.11) \quad (x_n, x_p \text{ は空乏層の広がりを表す})$$

接合前の電荷は0だったので、電荷保存則より

$$N_A x_p = N_D x_n \quad (10.12)$$

$x = x_n, -x_p$  で  $\frac{dV}{dx} = 0$  という条件のもとで (10.10) を積分すると

$$\frac{dV}{dx} = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\epsilon} (x - x_n) & (0 < x < x_n) \\ \frac{eN_A}{\epsilon} (x + x_p) & (-x_p < x < 0) \end{cases} \quad (10.14)$$

もう一度積分すると

$$V(x) = \begin{cases} -\frac{eN_D}{\epsilon} \left( \frac{x^2}{2} - x_n x \right) + C & (0 < x < x_n) \\ \frac{eN_A}{\epsilon} \left( \frac{x^2}{2} + x_p x \right) + C' & (-x_p < x < 0) \end{cases} \quad (10.15)$$

$x \rightarrow 0$  で 2つの  $V(x)$  は等しくなるという条件から  $C = C'$   
さらに  $x = x_n$  で  $V(x) = V_0$  なので

$$V_0 = \frac{eN_D}{2\epsilon} x_n^2 + C \quad (10.16)$$

$x = -x_p$  で  $V = 0$  より

$$0 = -\frac{eN_A}{2\epsilon} x_p^2 + C \quad (10.17)$$

2つの式から  $C$  を消すと

$$V_0 = \frac{e}{2\epsilon} (N_D x_n^2 + N_A x_p^2) \quad (10.18)$$

(10.12) を使って  $x_n, x_p$  について解くと

$$x_n = \left( \frac{2\epsilon V_0}{eN_D \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad x_p = \left( \frac{2\epsilon V_0}{eN_A \left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10.19)$$

もし  $N_A \gg N_D$  ならば  $x_n \gg x_p$  になる  
(混入物が少ない方に空乏層は広がる)

空乏層全体の長さは

$$d = x_n + x_p = \left( \frac{2\epsilon V_0}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10.20)$$

$N_A \gg N_D$  ならば

$$d \approx x_n \approx \left( \frac{2\epsilon V_0}{eN_D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10.21)$$

(10.9) での抵抗率  $\rho$  を用いると

$$d \approx (2\epsilon \rho_n \mu_e V_0)^{\frac{1}{2}} \quad (10.22)$$

$N_A \ll N_D$  ならば 同様にして

$$d \approx (2\epsilon \rho_p \mu_h V_0)^{\frac{1}{2}} \quad \text{になる}$$

n型 Si 半導体で  $\rho \sim 20000 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $V_0 = 1V$  とすると  
 $d \approx 75 \mu\text{m}$  となり、検出部分としてはかなり小さい。

### 10.3.2 Junction Capacitance

空乏層も、ある程度はコンデンサーとして働き、固有の容量をもつ。

↓  
 検出器のノイズとして影響する

A, d を空乏層の面積, 長さとするとき 容量は

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (10.24)$$

として表される。

### 10.3.3 Reversed Bias Junction

p-n 接合した半導体をそのまま検出器として用いても、内部電場だけでは電気信号を与えるには弱すぎるし、空乏層が小さいので、低エネルギーの粒子しか止められない。

↓  
 解決策として、p型の方に電源の-極を、n型の方に+極をつなげる。(図10.7)

↓  
 空乏層が広がる。

電圧を上げる程、広がるし、また電気信号を集めやすい。  
 でも電圧を上げすぎると接合がくずれてしまう。

$V_0$  を電源電圧とすると空乏層の広がり (10.20) の  $V_0$  を  $V_B$  に変更すればよい。

p型とn型の mobility  $\mu$  の違いから同じ電圧でもn型の方が空乏層の広がり  
 が大きい。(cf. (10.22) 式)

n型の Si 半導体において、300V の電圧をかけると、空乏層は 1mm まで広がる  
 しかし、広がられるのは 5mm までが限界

↓  
 さらに大きな抵抗率を得るために、より純度の高い半導体を用意するか、  
 compensation を行わなければならない。