

# 半導体理工学

# 授業予定

1. ガイダンス
2. 半導体の歴史
3. 半導体の作製方法(1)
4. 半導体の作製方法(2)
5. 半導体の種類(1)
6. 半導体プロセスの復習(ビデオ視聴)
7. 半導体の種類(2), バンド理論(1)
8. バンド理論(2), キャリア密度(1)
9. キャリア密度(2) (電気的性質(2))
10. 半導体の電気伝導
11. pn接合の理論(1) (pn接合)
12. pn接合の理論(2) (電流-電圧特性)
13. pn接合の理論(3) (空乏層容量, 降伏)
14. 試験とまとめ

※変更の可能性有

# 電氣的性質(2)

## 2.2.4 つづき

伝導帯の電子密度 $n_0$ と価電子帯のホール密度 $p_0$ が分かった(2.2.4(p.19))

- $n_0$ と $p_0$ の積をとる

$$n_0 p_0 = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) \times N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{kT}\right)$$

$E_g$ : バンドギャップ

ここで、

キャリアの有効質量

$$N_c N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \times 2 \left( \frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 4 \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_n^* m_p^*)^{\frac{3}{2}}$$

である。

熱活性型:

分子(今は $E_g$ )は活性化エネルギー  
井戸型ポテンシャルを表す。

$$\therefore n_0 p_0 = 4 \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^3 (m_n^* m_p^*)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (2.13)$$

材料固有の値！

キャリア密度は温度のみに依存する！  
※キャリアの有効質量とバンドギャップ  
も温度依存する。

## 2.2.4 つづき

(a) 真性半導体(p.20)

■ キャリア密度は？

真性半導体のキャリア密度 $n_i$ は、 $n_i = n_0 = p_0$ である。  
従って、

$$n_0 p_0 = n_i^2 \quad (2.14)$$

となる。

熱平衡状態において、  
「電子と正孔の再結合数」  
||  
「電子・正孔対の熱生成数」  
を意味する。

キャリア密度 $n_i$ は(2.13)式より

$$n_i = \sqrt{n_0 p_0} = 2 \left( \frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_n^* m_p^*)^{\frac{3}{4}} \exp\left(-\frac{E_g/2}{kT}\right) \quad (2.15)$$

となる。

(2.13)と同じく、キャリア密度は温度のみに依存する。  
活性化エネルギーはバンドギャップの半分( $E_g/2$ )。

大雑把には

$$n_i = T^{1.5} \cdot \exp(1/T)$$

と書ける。温度依存が大きすぎて制御不可能



ちょっとした温度変化で動作が変わる。  
(例: 夏と冬、日本とアフリカ)  
真性半導体はデバイスとして使用できない！

## 2.2.4 つづき

(a) 真性半導体(p.20)

■ フェルミ準位は？

課題2):

Siにおいて(2.16)式の第2項が室温付近(300K)で無視できるか否か示しなさい。

※パラメータは教科書裏表紙の付表1を参照のこと。

$n_i = n_0 = p_0$ より、

$$N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) \rightarrow \exp\left(\frac{-E_c + E_F + E_F - E_v}{kT}\right) = \frac{N_v}{N_c}$$

両辺の自然対数(底e)を取って、

$$\frac{-E_c + 2E_F - E_v}{kT} = \ln \frac{N_v}{N_c}$$

となる。したがって、

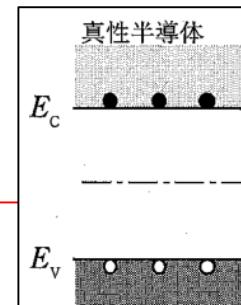
$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c} = \boxed{\frac{E_c + E_v}{2} - \frac{3kT}{4} \ln \left( \frac{m_n^*}{m_p^*} \right)} \quad (2.16)$$

(2.12)  
↓  
(2.10)

高温以外は第2項は無視できる。

真性半導体のフェルミ準位は伝導帯と価電子帯のほぼ中間(バンドギャップのほぼ中間)にある！

第2項があるので



## 2.2.4 つづき

(b) n形半導体(p.21)

■キャリア密度は？

1) 4価のSiに5価のPを添加すると、不純物のPは電子を与えるドナーとなる。



2) このとき、伝導帯底よりわずかに低いエネルギー位置に不純物準位(ドナー準位 $E_D$ )を作る。



3) その「わずか」とは、室温の熱エネルギー $kT$ と同程度以下である。つまり、 $E_D$ の電子は容易に伝導帯に熱励起される。(不純物はイオン化する)



4) 電気が流れる

※真性半導体の問題点を思い出す→キャリア密度 $n_0$ が制御不能！



いまは、ドープするP量(ドナー密度 $N_d$ )によって電子数(キャリア密度 $n_0$ )を制御可能！  
上の3)から、

$$n_0 \cong N_d \quad (2.17)$$

となる。

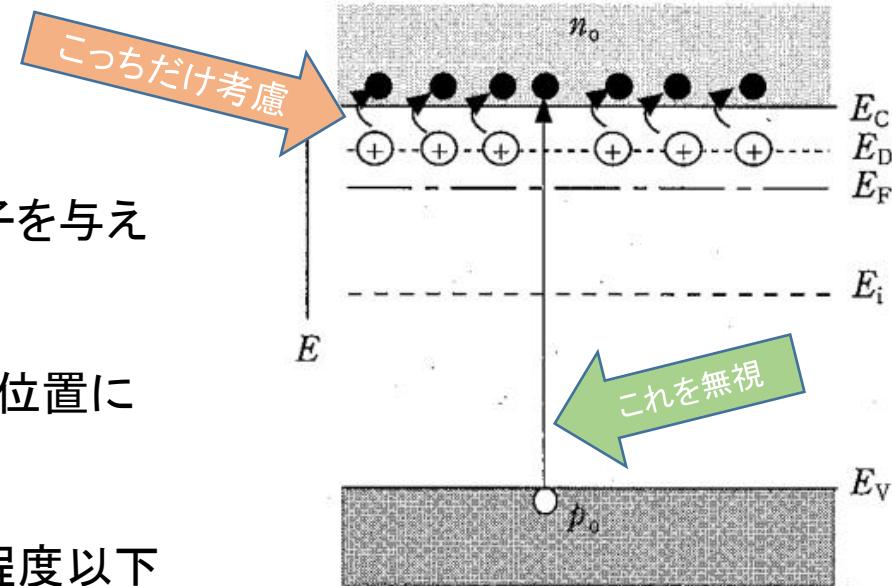


図 2.14 n 形半導体のエネルギー帯

※あくまでも室温付近の話  
価電子帯からの熱励起は無視できる！

## 2.2.4 つづき

(b) n形半導体(p.21)

■フェルミ準位は？

$$(2.10) \text{式と}(2.17) \text{式から} \quad n_0 \cong N_d = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$$

両辺の自然対数をとって、

$$\frac{-E_c + E_F}{kT} = \ln \frac{N_d}{N_c} \quad \rightarrow \quad E_F = E_c - kT \ln \frac{N_c}{N_d} \quad (2.18)$$

中央から伝導帯側に移動！

$N_c$ (2.10式)は温度上昇とともに指数関数的に増加するので、第2項の寄与は大きくなり、フェルミ準位は $E_c$ 付近から真性フェルミ準位 $E_i$ に向かって減少・漸近する。

このとき、ホール密度 $p_0$ は $n_0 p_0 = n_i^2$ より

$$p_0 = \left(\frac{n_i^2}{n_0}\right) \cong \left(\frac{n_i^2}{N_d}\right) \quad (2.19)$$

となる。

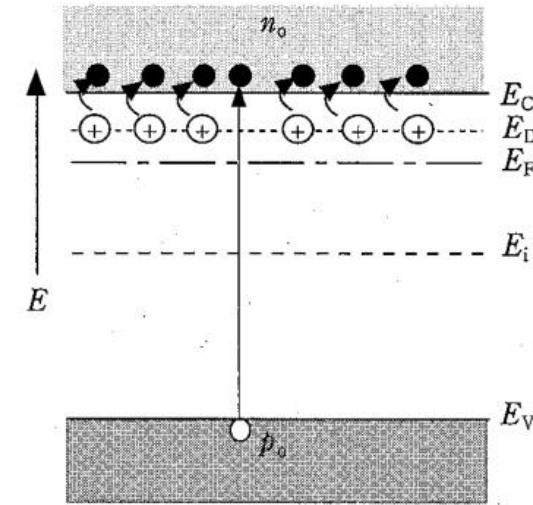


図 2.14 n 形半導体のエネルギー帯

## 2.2.4 つづき

### (c)p形半導体(p.22)

- ・4価のSiに3価のBを添加すると価電子帯の電子を受けとりホールができる。
- ・このとき不純物準位(アクセプタ準位 $E_A$ )が価電子帯のわずかに上にできる。
- ・価電子帯の電子が励起されるメカニズムはn形と同じ。

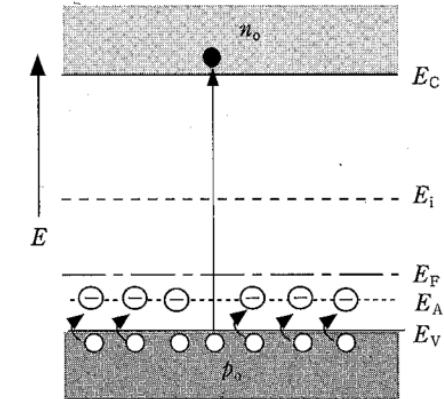


図 2.15 p 形半導体のエネルギー帯

■キャリア密度は？(アクセプタ密度 $N_a$ )

$$\text{ホール密度: } p_o \cong N_a \quad (2.20)$$

$$n_0 p_0 = n_i^2 \text{ より} \rightarrow \text{電子密度は?} \quad n_o \cong \frac{n_i^2}{N_a} \quad (2.21)$$

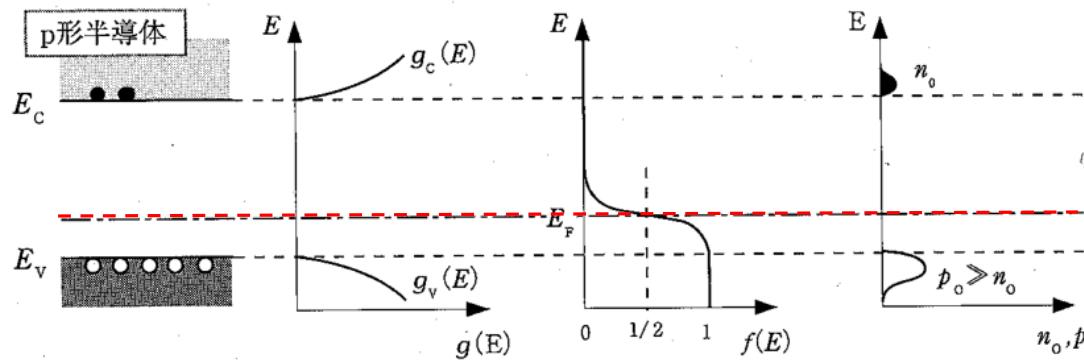
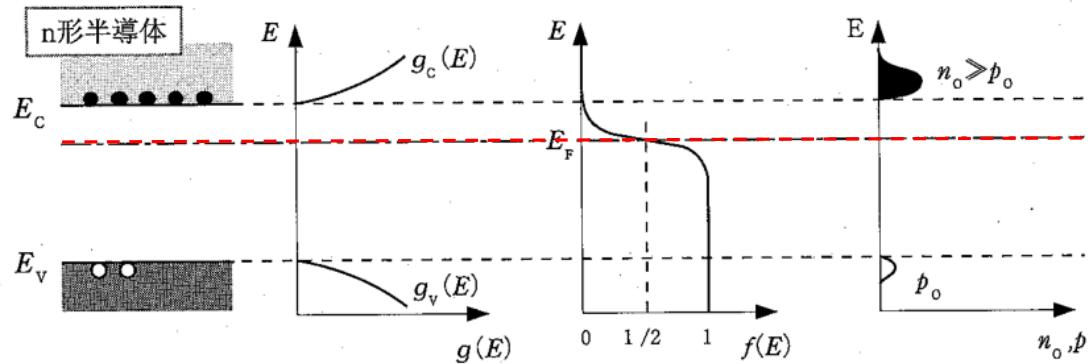
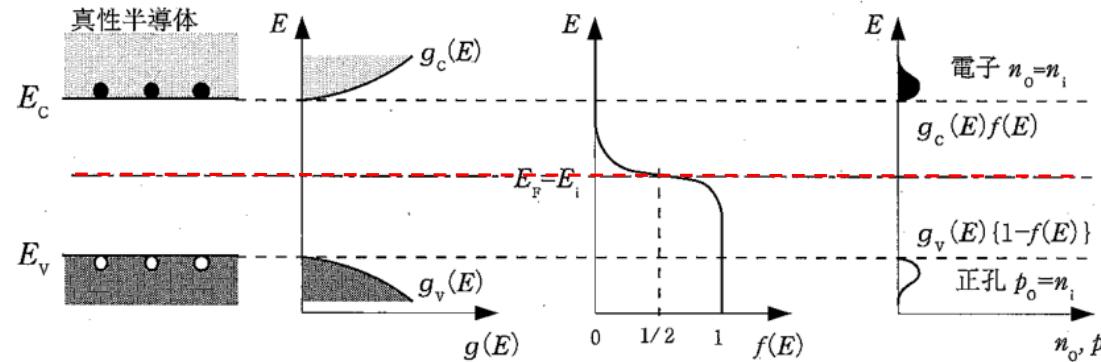
■フェルミ準位は？

$$p_o \cong N_a = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \rightarrow \text{フェルミ準位は?}$$

$$E_F = E_V + kT \ln\left(\frac{N_v}{N_a}\right) \quad (2.22)$$

中央から価電子帯側に移動！

## 2.2.4 つづき



(a) エネルギー帯図

(b) 状態密度

(c) フェルミ分布関数

フェルミ準位の変化に注意！

(d) キャリア密度分布

## 2.2.4 つづき

(d)キャリアの補償と温度依存性(p.23)

■ドナーとアクセプタが共存したら？(キャリアの補償)

- ・ドナー密度  $N_d >$  アクセプタ密度  $N_a \rightarrow n$  形
- ・ " " < " "  $\rightarrow p$  形

当然、電子とホールは結合して打ち消し合う(補償される)



両者の密度差が正味のキャリア密度となる。

(差がゼロ  $\rightarrow$  見かけ上「真性」半導体となる)

“完全に補償された”半導体と呼ばれる。

## 2.2.4 つづき

(d) キャリアの補償と温度依存性 (p.23)

### ■ キャリア密度の温度依存性

熱エネルギーで価電子帯の電子が直接伝導帯に励起される。

$$n_i = T^{1.5} / \exp(1/T)$$

ドナー密度  $N_d \ll n_i$  (真性半導体と同じ!)

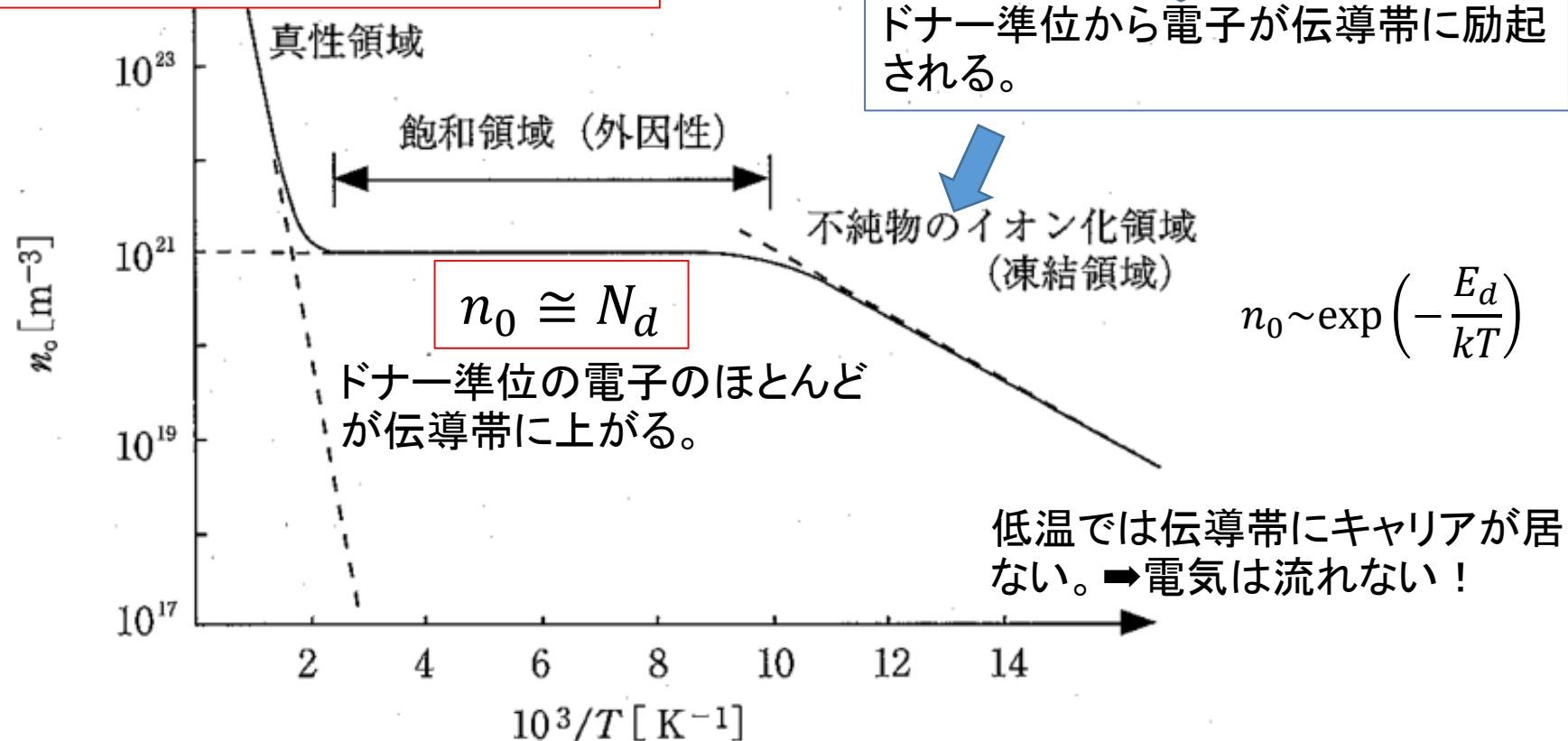


図 2.17 n 形半導体のキャリア密度の温度依存性