

半導体工学

目次

| | | |
|-------|--------------------------|---|
| 第 1 章 | 半導体工学の基礎 | 2 |
| 1.1 | 半導体について | 2 |
| 第 2 章 | 半導体の基礎的性質 | 4 |
| 2.1 | 自由電子密度と正孔密度の関係 | 4 |
| 2.2 | 真性半導体 | 4 |
| 2.3 | n 型半導体 | 5 |
| 2.4 | p 型半導体 | 6 |
| 2.5 | 不純物密度による性質 | 7 |
| 2.6 | キャリア密度 | 8 |

第 1 章

半導体工学の基礎

はじめに

半導体工学はエレクトロニクス (電子工学) の基礎をなすものである。扱うものは半導体デバイス、素子でありその代表格はトランジスタである。例えばトランジスタの種類は多く、増幅器 (アンプ)、高周波トランジスタ*1、電力用トランジスタ*2が挙げられる。ダイオードも半導体デバイスの代表格であろう。整流ダイオードや発光ダイオード (LED)、レーザーダイオード*3など種類はこちらも豊富である。他にも忘れてはならないのが PC に利用されるデバイスである。集積回路や CPU/MPU、メモリーがこれにあたる。太陽電池もそうだしセンサー全般も当てはまる。

さて以降の講義でのキーワードを挙げる。これらは自ら説明できるほどの理解が必要である。

- p 型と n 型
- 多数キャリアと少数キャリア
- pn 接合
- フェルミ準位
- エネルギーバンド図
- 電界効果

1.1 半導体について

1.1.1 半導体とは

半導体とは絶縁体の一種でありそれに加えて、n 型、p 型の制御可能なものをいう。この制御自体を不純物ドーピングという。絶縁体と導体の間という理解では不十分であろう。

1.1.2 種類

IV 族半導体 Si, Ge, SiGe, SiC

*1 通信に利用される。

*2 AC アダプターやハイブリッド車電源に利用される。

*3 レーザーポインター、DVD 読み取り、光ファイバー通信などに利用されている。

Ⅲ-V 族半導体 GaAs, GaP, InP, GaN

Ⅱ-Ⅳ 族半導体 ZnS, ZnO

1.1.3 伝導帯から見る半導体の性質

半導体の性質をエネルギー準位図から見ると注目すべきは伝導帯のみであるといって構わない。伝導帯での電子の充填を考えるうえで鍵となるのはフェルミ準位である。フェルミ準位の位置がどこであるのかを考えることで充填がどこまでなのかが分かる*4。またこれには温度がかかわることに注意したい。

1.1.4 半導体のキャリアについて

半導体は大きく 3 つに大別される。

- 真性半導体
超高温において存在。半ば机上の空論のような存在
- n 型半導体
- p 型半導体

これらの区別のため以下の 2 数を定義する。

$$n \text{ (cm}^{-3}\text{)} \cdots \text{自由電子密度}$$
$$p \text{ (cm}^{-3}\text{)} \cdots \text{正孔密度}$$

定義した 2 数で 3 種の半導体は以下のように区別できる。

$$\begin{aligned} \text{真性半導体は} \quad n &= p \\ p \text{ 型半導体は} \quad n &> p \\ n \text{ 型半導体は} \quad n &< p \end{aligned}$$

また、n 型 p 型半導体のキャリアの性質は表 1.1 で示す。

表 1.1 半導体のキャリア

| | 多数キャリア | 少数キャリア |
|-----|--------|--------|
| n 型 | 電子 | 正孔 |
| p 型 | 正孔 | 電子 |

*4 例えば 0K の場合、フェルミ準位より大きなエネルギーの場所には電子が存在しないため電子の充填はそこまでであるとわかる。

第 2 章

半導体の基礎的性質

2.1 自由電子密度と正孔密度の関係

p 型と n 型の半導体では自由電子密度と正孔密度の大小で区別がなされているが、値としてどれほどかけ離れているのかというのは少し気になるところである。発想としては半導体におけるキャリアは絶えず増えたり減ったりしてそれが平衡状態になっているというところから式を立てる*1ことである。

キャリアの増える速度は温度 T の関数 $q(T)$ で与えられます。さらにキャリアが減る速度は温度に依存する係数 $\gamma(T)$ によって γnp で与えられる。これが等しくなる時を考えればよい

$$np = \frac{q(T)}{\gamma(T)}$$

となる。つまり温度が定まれば、 np は定数となるのである。

さて、話はいったん真性半導体に移る。真性半導体に対しては以下の数が定義される。

$$n = p \equiv n_i \quad (\text{真性キャリア密度})$$

これによって

$$np = n_i^2 \tag{2.1}$$

という結論が得られる*2。ここから n, p の違いを導くことができる。また小さな変化で十分キャリアの配分が変わることが分かる。

2.2 真性半導体

例に IV 族の Si を例に挙げる。図 2.1 のように結晶は共有結合によって結合しているが熱などのエネルギーが与えられたとき、その一部の結合から電子が飛び出し、自由電子となる。バンド図では図 2.2 の通りで、 E_v が価電子帯のエネルギー準位で E_c が導電帯のエネルギー準位である。図 2.2 から価電子帯の電子が導電帯に移るには E_g のエネルギーが必要であるとわかり、これは常温で多くの電子が導電帯へ移るには厳しい値である。

*1 実際は n, p の時間微分に対して微分方程式を考えるが過渡現象を扱う必要はない。そこからキャリアが増える速度と、キャリアが減る速度が同じになるというところからの立式で十分であるといえる。

*2 暗に熱平衡の状態であることが条件。

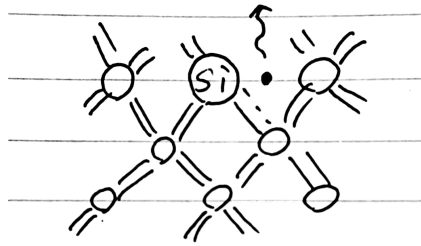


図 2.1 真性半導体の例：Si の結晶

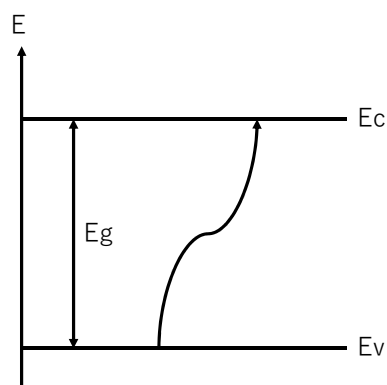


図 2.2 真性半導体のエネルギーバンド図

2.3 n 型半導体

シリコン結晶に不純物として V 族の P を加える。この時の不純物を加える操作をドーピング、加えられた P のことをドナーという。ドナーの存在は結晶中にいわゆるあぶれた電子を発生させ、小さなエネルギーによって自由電子のように電気伝導に関わる振る舞いをする。この電子が n 型半導体における主要なキャリアである。

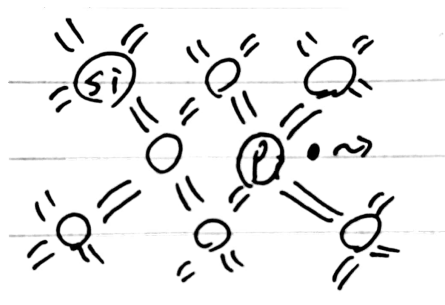
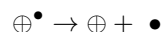


図 2.3 n 型半導体の例：Si の結晶に P のドーピング

しかし、結晶中で電子を 1 つ失うことになるドナーはどうなるのかというのは気になるところである。ドナーはもともと中性であるが電子を失うことでイオン化する。そのイオン化したドナーは電気伝導に関係するようにも思えるが結晶中で強く結合しているドナーは動くことができない。つまり電気伝導には関係ないのだ。以下に示すのは中性ドナーが電子を放出しイオン化ドナーになる概念図である。



次は今の話をエネルギーバンド図によって行う。図 2.4 がこの話のエネルギーバンド図で価電子帯と導電帯に注目したものになっている。 E_d というのがドナーにある電子の準位で容易に導電帯の準位へ移動できることが分かる。中性ドナーのイオン化エネルギーは $E_c - E_d$ で与えられ、これは常温下でイオン化ができるほどである。

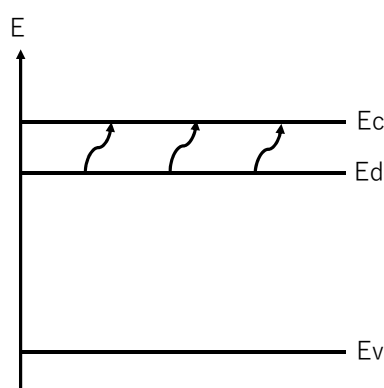


図 2.4 n 型半導体のエネルギーバンド図

2.4 p 型半導体

シリコン結晶に不純物として III 族の B を加える。この時の不純物をアクセプタという。B は最外殻に電子を 3 つしかもっていないため Si との共有結合を形成するのに 1 つ足りない。そのため他の Si 原子から価電子を 1 つ奪い結合をするのだが、奪われた Si 原子には電子の通り道となる正孔が生まれる。通常生まれた正孔

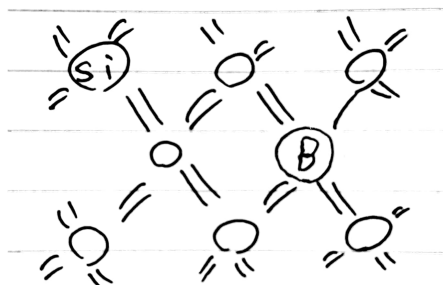
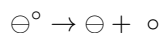


図 2.5 p 型半導体の例：Si 結晶に B をドーピング

は、電子を奪いイオン化したアクセプタと弱いクーロン力で結合するのだが、小さいエネルギーで自由正孔と

なりこれがキャリアの働きをする。ここでイオン化したアクセプタの話をするべきだがこれはイオン化したドナーと同様で電気伝導に関係しない。以下に示したのは中性アクセプタがホールを放出しイオン化アクセプタとなる概念図である。



ではこちらもエネルギーバンド図を使って話をする。図 2.6 が p 型半導体のエネルギーバンド図である。 E_a がアクセプタ準位といい、ここから価電子帯の準位に移動することで価電子帯に正孔が存在していることになり電気伝導に関わる。一見するとエネルギーが減少しているように見えるがこれは電子のエネルギーであって、正孔のエネルギーは増加している。このとき必要なエネルギーは $E_a - E_v$ で与えられるがこれは常温で十分なエネルギーである。

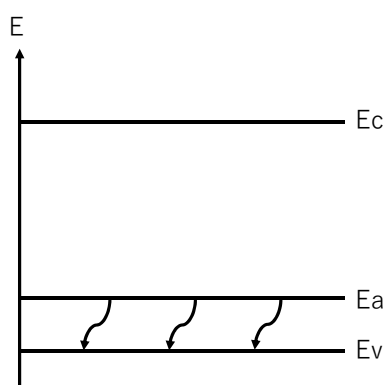


図 2.6 p 型半導体のエネルギーバンド図

2.5 不純物密度による性質

2.5.1 自由電子密度・正孔密度

不純物の存在によって半導体の性質がどうなるかは先の節である程度は理解できたことと思う。次はさらに不純物密度に目を向けてゆきたい。例に挙げるのは n 型半導体である。また前提としてドナーはすべてイオン化するものとしドナーの密度を N_d とする。n 型半導体の説明ではドナー準位にある中性ドナーが電子を放出する他に、もちろん真性半導体で説明した通り価電子帯から導電帯に励起する電子も存在する。前者の密度は前提より N_d 、後者は p とする。すると自由電子密度 n は

$$n = N_d + p$$

となる。これを式 (2.1) に代入する。

$$p^2 + N_d p - n_i^2 = 0$$

このように 2 次方程式が得られこれを解くことで自由電子密度、正孔密度を算出することができる。

しかし、この計算は正しくはあるがあまり実用的ではない。というのも、真性半導体のような価電子帯の準位から励起して導電帯の準位に来る電子の数は常温においてあまりに少ない。自由電子密度はほぼドナーの密度であるのだ。

$$n \simeq N_d$$

これから容易に

$$p \simeq \frac{n_i^2}{Nd}$$

が出てきて、これで十分なのである。

2.5.2 不純物の混合

不純物として III 族原子と V 族原子の両方をドーピングしたとき、その半導体は何型になるのだろうか。ふんわりとした想像でも差分の性質を示すだろうと結論づけられるがそれは正しい。アクセプタ密度を N_a 、ドナー密度を N_d とする ($N_a < N_d$)。すると計算の上ではドナー密度 $N_d - N_a$ として計算すればよい。これを不純物補償と呼ぶ。

2.6 キャリア密度

そろそろ半導体の自由電子密度と正孔密度を正確に考えたい。ここでキャリア密度関数を導こう。計算自体はかなり困難であるが考え方のみであればそれほどではない。キャリア密度関数には以下の関係が成立する。

$$(\text{キャリア密度関数}) = (\text{状態密度関数}) \times (\text{フェルミ・ディラック統計による占有確率})$$

物性・デバイス基礎論を履修していればこのような関係は既に見たことがあるだろう。グラフの概念図は図 2.7 のとおりである。左から状態密度関数、占有確率、キャリア密度関数である。2 つのグラフの積からキャリア密度関数が導かれる。

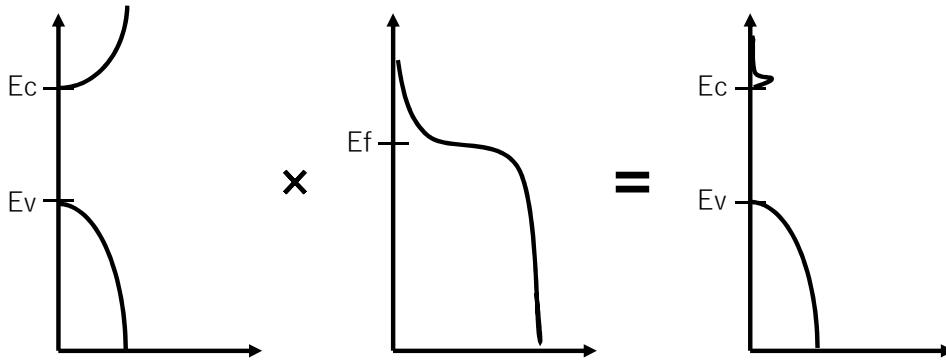


図 2.7 キャリア密度関数

さて、次は式の導出である。まず求めたいのは導電帯中の自由電子についてであるので、その部分のみ考えよう。導電帯における状態密度関数はエネルギーの平方根に比例することが分かっているので、

$$Z(E) = A(E - E_c)^{\frac{1}{2}}$$

次に占有確率に話は移るが、 E が十分に大きいときは以下の近似が成立する。

$$\begin{aligned} f(E) &= \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{K_B T}\right)} \\ &= \exp\left(-\frac{E - E_f}{K_B T}\right) \end{aligned}$$

ここからキャリア密度関数は決定でき、これを E_c より大きい全領域で積分すれば自由電子密度が得られる。

$$n = \int_{E_c}^{\infty} Z(E) f(E) dE$$

この計算は困難を極めるので割愛することにして、計算を完了させると、

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{K_B T}\right) \quad (2.2)$$

但し、

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.3)$$

となる。詳しい計算は教科書の P.25 を参照してほしい。

さて、同様の計算をすることで正孔密度も計算したい。大事なものは占有確率の解釈で、あの占有確率は電子に対するものなので正孔を考える場合は $1 - f(E)$ に置き換えたうえで計算をしなければならない。結果だけを示すと、

$$p = N_p \exp\left(-\frac{E_f - E_v}{k_B T}\right) \quad (2.4)$$

但し、

$$N_p = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* k_B T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.5)$$

となる。

自由電子密度と正孔密度が分かったので、真性キャリア密度を式 (2.1) から計算する。

$$n_i^2 = N_c N_v \left(-\frac{E_c - E_v}{k_B T} \right) \quad (2.6)$$

この結果は真性キャリア密度が温度とバンドギャップで決定することを示している。