

はじめにお読みください

この文章は、研究室に所属する学生が研究活動の一環として作成してくれたものです。研究室セミナーの時間に輪番で発表してもらい、研究に関連した事項の基礎知識の向上をはかりました。内容・文章ともに未だ不完全なものもありますが、2018 年度に調査してくれたものを公開いたします。

※学生の作成してくれたファイルをそのまま公開しております。ところどころ誤った記述もあるため、内容については保証いたしかねます。ご注意ください。
(2019 年度以降、少しずつ改訂していく予定です。)

2018 年 3 月 名古屋工業大学 川崎・石井研究室
<http://kawasaki.web.nitech.ac.jp/jp/tips/index.shtml>

【執筆者一覧】

・ 卒研究生

伊達 怜実、堀之内 理紗、山田 えみり、吉谷 駿、渡邊 裕介

・ M1

浅井 七海、亀岡 真祐子、近藤 航平、長谷川 毅、横井 和真、高橋 実夏子

・ M2

石亀 弘基、久野 潤也、中村 元海、林 遼治、松下 一樹、眞鍋 駿

・ D3

李 蒼昊

【半導体物理】

金属-半導体接触、半導体-半導体接触について、界面のバンド構造を解説してください。

作成日： 2018 年 6 月 3 日

担当者： 眞鍋 駿

金属-半導体接触

まずは、金属と n 型半導体の接触について考える。その上で、 Φ_m を金属の仕事関数、 χ を半導体の電子親和力、 E_F をフェルミ準位、 E_G を半導体のバンドギャップとする。

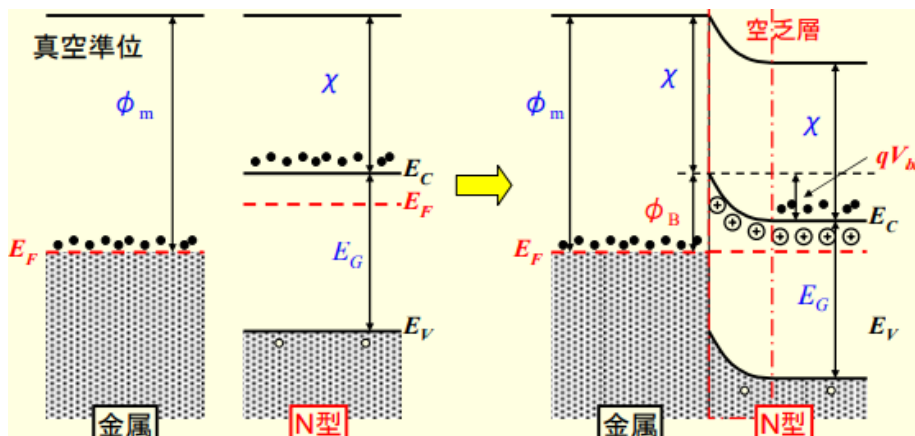


Fig.1 $\Phi_m > \chi$ のときの金属、n 型半導体の接触 [1]

る。

これを空乏層（空間電荷層）という。ここで、接触により半導体内部に発生した電位差 V_{bi} をビルトイン電圧という。このとき、金属と半導体の間には、大きさ $\Phi_B = \Phi_m - \chi$ の大きさの障壁が生じるため、半導体から金属に向けては電子が流れやすいのに対し、金属から半導体に向けて電子が流れにくくなる。（整流性が生じる）このような接触のことをショットキー接触という。

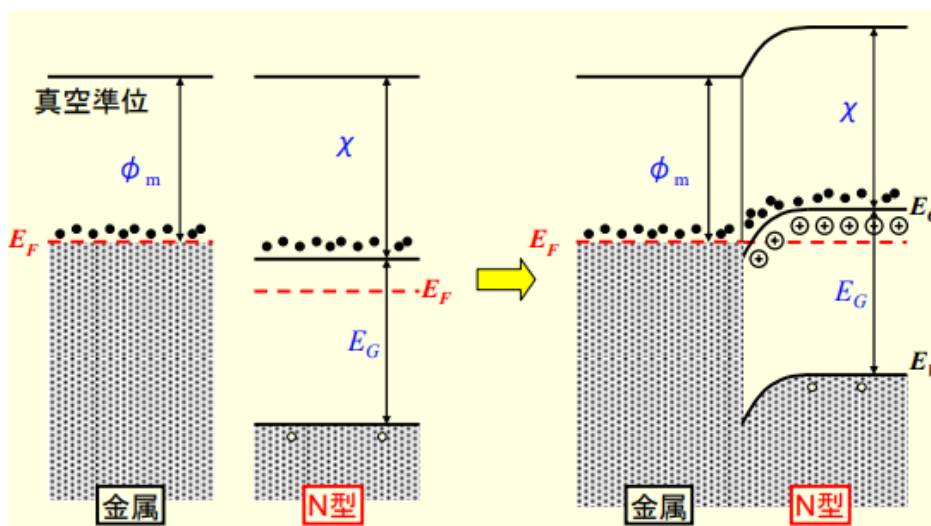


Fig.2 $\Phi_m < \chi$ のときの金属、n 型半導体の接触 [1]

すい状態となっている。（整流性が無い、非整流性）このような接触をオーミック接触という。

$\Phi_m > \chi$ のとき

Fig.1 のように、金属及び半導体のフェルミ準位の位置が釣り合うように半導体から金属に電子が移動することで、半導体のバンド構造が曲がる。すると、半導体の表面付近には、電子が移動したことによって、イオン化したドナーが残った層ができる。

$\Phi_m < \chi$ のとき

Fig.2 のように、今度は金属から半導体に電子が移動することによってフェルミ準位が釣り合うようになる。半導体からの電子の移動が無いためドナーはイオン化せず、空乏層は形成されない。さらに、この接触状態ではエネルギーの障壁は存在せず、金属及び半導体のどちらからでも電子が流れや

次に金属と p 型半導体の接触した場合について話す。

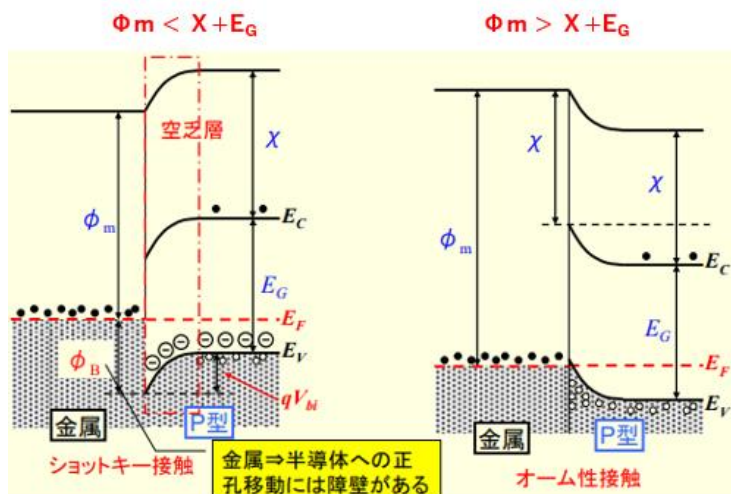


Fig.3 金属と p 型半導体の接触 [2]

渡す（電子を受け取る）ことによってイオン化し。この層が空乏層となる。この時、金属と半導体の間には、大きさ $\Phi_B = \chi + E_G - \Phi_m$ の大きさの障壁が生じるため、金属から半導体に向けてホールが流れにくくなる。（半導体から金属に向けて電子が流れにくくなる。）これもショットキー接触と呼ばれる。

$\Phi_m < \chi + E_G$ のとき

この場合は、金属のフェルミ準位が半導体よりも低いため、金属から半導体にホールが流れることでフェルミ準位が釣り合う。この時は半導体中のアクセプターがイオン化しないため空乏層が生じず、金属と半導体の間に障壁もできないため、オーミック接触となる。

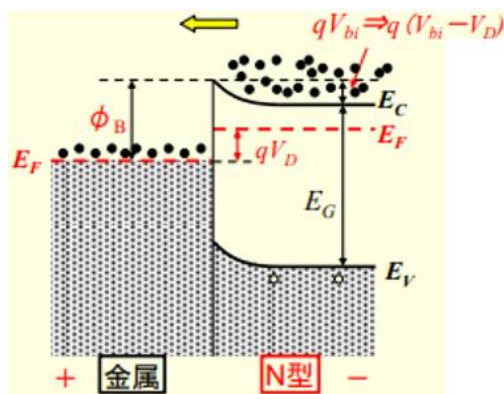


Fig.4 電圧をかけた時の障壁の変化 [1]

空乏層の大きさについて [3]

金属と n 型半導体が接触した場合を考える。Fig.4 のように、半導体側に大きさ V_D の電圧を印加したと考える。 q を電荷素量とすると、半導体から金属に電子が進む上での障壁の大きさは qV_{bi} から $q(V_{bi} - V_D)$ に減少するため、半導体から金属に電流が流れやすくなる。Fig.5 に接触時の金属と半導体の概略図を示す。金属と半導体の界面を $x=0$ として半導体方向が正となるように x 軸を取り、空乏層の幅を x_n 、イオン化されたドナーのドーピング密度を N_D 、半導体内の電位を V 、電界を E とする。

ポアソンの方程式より

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{qN_D}{\epsilon} \dots \textcircled{1}$$

が成り立つ。さらに

$$E = -\frac{dV}{dx} \dots \textcircled{2} \text{ より、 } \frac{dE}{dx} = \frac{qN_D}{\epsilon} \dots \textcircled{3} \text{ が成り立つ。}$$

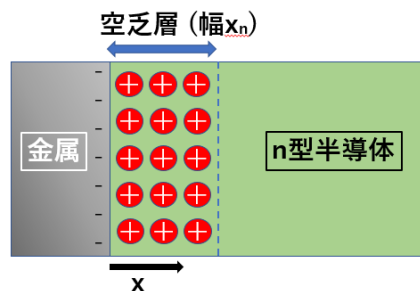


Fig.5 接触時の概略図

ここで $x=x_n$ のとき、 $E=0$ が成り立つため、③を積分すると、

$$E = \frac{qN_D}{\varepsilon} (x - x_n) \cdots \cdots \textcircled{4} \quad [0 < x < x_n]$$

となる。 $x=0$ のとき、 $V=0$ であるため、②、④より

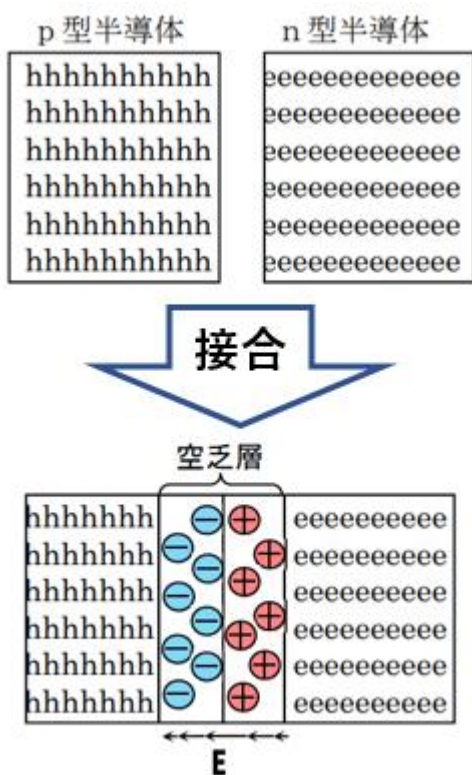
$$V = -\frac{qN_D}{2\varepsilon} x(x - 2x_n) \cdots \cdots \textcircled{5} \quad [0 < x < x_n]$$

が成り立つ。また、 $x=x_D$ において $V = V_{bi} - V_D$ が成り立つので、⑤より、

$$V_{bi} - V_D = V(x = x_n) = \frac{qN_D}{2\varepsilon} x_n^2$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_{bi} - V_D)}{qN_D}} \cdots \cdots \textcircled{6} \quad \text{となる。}$$

半導体-半導体接触



ここでは、n 型半導体と p 型半導体の接触について考える。Fig.6 の上側のように、p 型半導体は電子を吸引するアクセプターをドーピングした半導体であるため、多数のホールを持ち、同様の理屈で n 型半導体は多数の電子を持つ。これら二つを接合すると、p 型から n 型にホールが、n 型から p 型に電子がそれぞれ拡散する。すると、接合面付近にはキャリアを渡し、イオン化されたドナー及びアクセプターが取り残されたような層ができる。この層を空乏層、または空間電荷層と呼ぶ。このとき、ホールが出た後のアクセプター領域には負の固定電荷が、電子が出た後のドナー領域には正の固定電荷ができる。すると、空乏層内において、正から負の電荷の方向に電界 E が発生する。この電界 E の発生によって、n 型及び p 型半導体のそれぞれのキャリアが相手方の半導体に向けた拡散が防がれている。

Fig.6 n 型及び p 型半導体の接触 [2]

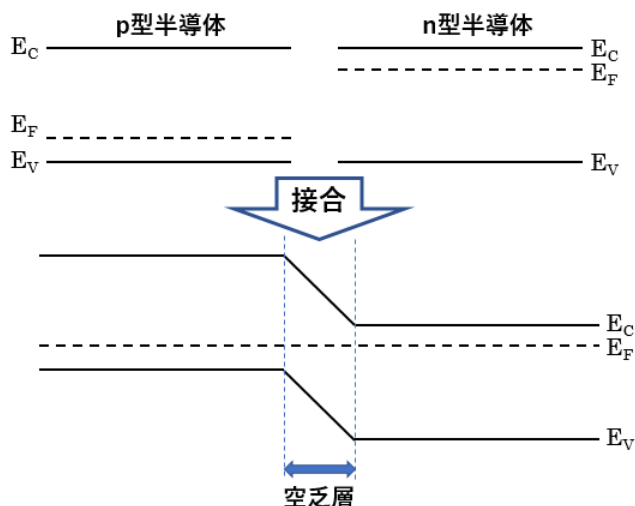


Fig.7 バンド図を用いた半導体同士の接触

E_C : 伝導帯の下端、 E_F : フェルミ準位

E_V : 価電子帯の上端

次に半導体同士の接合を、バンド図を用いて説明する。Fig.6 のように、異なる半導体同士を接触させると、先述のように電子及びホールが拡散が起こる。やがて両者のキャリアの存在確立が等しくなる時、つまりフェルミ準位が一致した時に、キャリアの移動は停止する。ここで、先述のように、キャリアの移動を妨げる方向の電界が発生し、エネルギーバンド図が曲がる。

空乏層の大きさについて

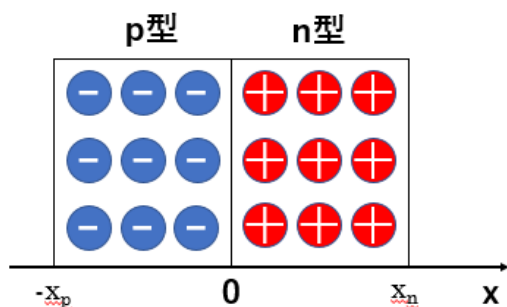


Fig.8 空乏層における固定電荷の分布

P 型半導体内のアクセプターのドーピング濃度を N_a 、n 型半導体内のドナーのドーピング濃度を N_D とする。Fig.8 のように、p 型半導体の空乏層幅を x_p 、n 型半導体の空乏層幅を x_n とする。

③より、半導体中の電場の大きさ E には、

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{qN_a}{\epsilon} \cdots \cdots \textcircled{7} \quad [-x_p < x < 0]$$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{qN_d}{\epsilon} \cdots \cdots \textcircled{8} \quad [0 < x < x_n]$$

の関係がある。 $x=x_n$ または $x=x_p$ のとき、 $E=0$ であるため、⑦、⑧を積分することで、

$$E = -\frac{qN_a}{\epsilon} (x + x_p) \cdots \cdots \textcircled{9} \quad [-x_p < x < 0]$$

$$E = \frac{qN_d}{\epsilon} (x - x_n) \cdots \cdots \textcircled{10} \quad [0 < x < x_n]$$

②、⑨、⑩より、半導体内の電位 V は、

$$V = \frac{qN_a}{\epsilon} x \left(\frac{1}{2}x + x_p \right) \cdots \cdots \textcircled{11} \quad [-x_p < x < 0]$$

$$V = -\frac{qN_d}{\epsilon} x \left(\frac{1}{2}x - x_n \right) \cdots \cdots \textcircled{12} \quad [0 < x < x_n]$$

空乏層内の電位（内臓電位） V_B は、

$$V_B = V(x_n) - V(-x_p) = \frac{q}{2\varepsilon} (N_d x_n^2 + N_a x_p^2) \cdots \cdots \textcircled{13}$$

ここで、電子とホールは 1:1 で反応するので、

$$x_n N_d = x_p N_a \cdots \cdots \textcircled{14}$$

⑬、⑭より、

$$V_B = \frac{q}{2\varepsilon} (N_d + N_a) \frac{N_d}{N_a} x_n^2 = \frac{q}{2\varepsilon} (N_d + N_a) \frac{N_a}{N_d} x_p^2 \cdots \cdots \textcircled{15}$$

ここで、フェルミディラック分布の考え方より、接続後に p 型から n 型へ飛び越えることができるホールの密度を N_a' は、p 型半導体のホールの濃度とボルツマン関数の積になるため、

$$N_a' = N_a \times \exp\left(-\frac{qV_B}{kT}\right) \cdots \cdots \textcircled{16}$$

N_a' は n 型半導体中のホールの密度に等しい。ここで、n 型半導体内における真性キャリア密度 n_i には、

$$n_i^2 = N_a' N_d \cdots \cdots \textcircled{17}$$

の関係があるため、⑯、⑰より、

$$\frac{n_i^2}{N_d} = N_a \exp\left(-\frac{qV_B}{kT}\right) \cdots \cdots \textcircled{18}$$

⑯、⑱より、空乏層幅 x_n と x_p は

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon N_a V_B}{q N_d (N_d + N_a)}} \cdots \cdots \textcircled{19}, \quad x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon N_d V_B}{q N_a (N_d + N_a)}} \cdots \cdots \textcircled{20}$$

[1] 半導体工学 (10) 金属と半導体の接合 藤野毅

http://www.ritsumei.ac.jp/se/re/fujinolab/FujinolabHP_old/semicon/semicon10.pdf

[2] 第三章 pn 接合ダイオード <http://fhiroseyz.yamagata-u.ac.jp/img/pn10.pdf>

[3] 第四章 ショットキーダイオード <http://fhiroseyz.yamagata-u.ac.jp/img/schot10.pdf>