

金属-半導体接触及び MOS 構造のエネルギーバンド図を描画するマルチメディア教材の開発

辻 琢人* 矢野 琢也* 吉田 由香利*

Multimedia Teaching Resource of Energy Band Diagram of Metal-Semiconductor Contacts and MOS Structure

Takuto TSUJI, Takuya YANO, and Yukari YOSHIDA

Synopsis

Recently, an advancement of the semiconductor devices is remarkable. Thus, it is important to understand a physics of semiconductor devices. However, it is impossible to see a motion of electron and hole in the semiconductor devices. Therefore, in this study, multimedia teaching resource which draw energy band diagram of metal-semiconductor contacts and that of MOS structure at various applied voltage are programmed by Java. It is expected that these teaching resource are effective for understanding the physics and principle of semiconductor devices.

1. 緒言

パソコンや携帯電話など我々の身の回りに存在する電子機器類は、その中に数多くのトランジスタなどの半導体デバイスが用いられており、現在の我々の生活は半導体デバイスを抜きにして考えることはできない。本校のように電子・情報・通信系の技術者を目指す学生には、数多く存在する電子機器類の基幹部品として用いられている各種半導体デバイスの動作原理や物理現象を理解することは非常に重要である。そのため、本校では本科 4・5 年時に半導体工学、もしくは電子工学などを開講しており、著者も情報通信工学科でそれらの講義を受け持ってきた。

一般に半導体工学では、あるデバイスの動作原理の説明に、その現象を表した数式と共に、エネルギーバンド図などを使って電子や正孔の流れを図示して解説することが多い。これまで半導体工学に関係する科目を受け持ってきて、半導体中の物理現象が実際に目に見えないため、学生にとって非常に難解な科目となっていて、物理現象を表している数式などを導出し、エネルギーバンド図を描いて説明しても学生がその現象をイメージできず、理解が十分でないと感じていた。

アニメーションに慣れ親しんでいる学生が半導体デバイスの動作原理や物理現象をより理解するためには、テキストなどに静止した状態で描かれているエネルギーバンド図を印加する電圧

に応じて動的に描画することができれば、非常に有効な手段ではないかと考えられる。

そこで我々はこれまで、価電子帯・伝導帯中の正孔・電子濃度分布、pn 接合ダイオード及び npn バイポーラトランジスタのエネルギーバンド図を動的に描画するマルチメディア教材を卒業研究で作成してきた¹⁻³⁾。

その作成には、インターネットとの親和性が高く、無料で配布されており、OS などの動作環境に依存しない Java 言語を用いた。

今回、それらに引き続いて金属-半導体接触のエネルギーバンド図及び MOS 構造のエネルギーバンド図を描画するマルチメディア教材を作成したので報告する。

2. 金属-半導体接触のエネルギーバンド図

2.1 金属と半導体の接触により生じる物理現象

金属と半導体を接触させると、整流性が現れるものと現れないものがあり、整流性が現れるものをショットキー接触、整流性が現れないで電流-電圧特性が直線関係になるものをオーミック接触という。これは金属と半導体の種類によって決まり、仕事関数が重要になる。仕事関数とは、真空準位とフェルミ準位とのエネルギー差のことである。

金属と n 型半導体の場合、金属の仕事関数を ϕ_m 、半導体の仕事関数を ϕ_s とすると、 $\phi_m > \phi_s$ ならば、半導体の伝導帯にある伝導電子が金属中の

* 情報通信工学科

伝導電子より高いエネルギーをもつ。したがって、伝導電子が半導体表面から移動し、その後には空乏層が形成される。したがって、半導体表面で伝導電子濃度: n が減少する。 n が減少すれば(1)式より、 n 型半導体の伝導帯底とフェルミ準位のエネルギー差: $E_C - E_F$ が大きくなる。

$$E_C - E_F = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{n} \quad [eV] \quad (1)$$

ただし、 k :ボルツマン定数、 T :絶対温度、 q :電子電荷の絶対値、 N_c :伝導帯の有効状態密度である。

したがって、 $\phi_m > \phi_s$ のとき、金属と n 型半導体のエネルギーバンド図は接触面で上に曲がる。この場合、金属側に正電圧を加えると半導体側から見た障壁が下がり、半導体から金属へと電子が移動する。それに対して、金属側に負電圧を加えると障壁が増え、金属側から見た金属のフェルミ準位と半導体表面の伝導帯底との差以上のエネルギーをもつ非常にわずかな電子電流しか流れない。このような整流性を示す金属-半導体接触をショットキー接触という。

一方、 $\phi_m < \phi_s$ ならば(1)式より n が増えれば $E_C - E_F$ が小さくなり、 n がさらに増えた場合、 $E_C < E_F$ となり、 E_F が E_C より高いエネルギーレベルになる。したがって、金属側から n 型半導体、及び n 型半導体側から金属側を見たときに、電子はエネルギーの壁を感じず、電子は自由に金属- n 型半導体の間を移動することができる。この場合、電流-電圧特性は直線関係となり、このような金属-半導体接触をオーミック接触という。

金属と p 型半導体との接触の場合には正孔が多数キャリアであるため、金属- n 型半導体の接触の場合と逆の関係になる。

2.2 金属-Si 半導体接触の描画プログラム

作成した教材は、金属-シリコン(Si) 半導体接触のエネルギーバンド図を描画するものである。図 1 に 金(Au: $\phi_m = 4.8[eV]$)とドナー濃度: $N_D = 1.0 \times 10^{18}[cm^{-3}]$ の n 型 Si を接触させたショットキー接触の熱平衡状態($V=0[V]$)のエネルギーバンド図を描画したプログラムの実行結果を示す。図 1 に示すように、作成した教材では、選択ボタンで Si に接触させる金属及び Si のキャリア濃度を任意に選択することができ、スクロールバーにより印加電圧を変えることができる。また、キャリア濃度分布や印加電圧に対する空乏層幅の変化も描画できるようにし、印加電圧、障壁の高さ、拡散電位、 $E_C - E_F$ 、空乏層幅の計算値を表示できるようにした。空乏層領域のポテンシャル分布は理論的には双曲線状となるが、本教材では簡易的に直線で描いている。

図 1 に示すショットキー接触に順バイアスを

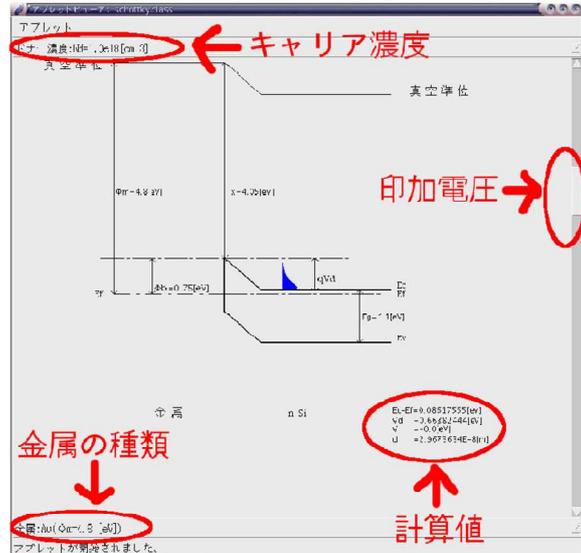


図 1. 熱平衡状態のショットキー接触の実行結果

印加する場合、図 2 に示すように、Au に対して n 型 Si のポテンシャルエネルギーが印加した順バイアス分上昇するため電位障壁が減り、減少した電位障壁より高いエネルギー状態にある伝導帯の電子が金属へ移動しえることが描画される。同時に、印加した順バイアスに応じて空乏層幅が減少している様子も描かれる。

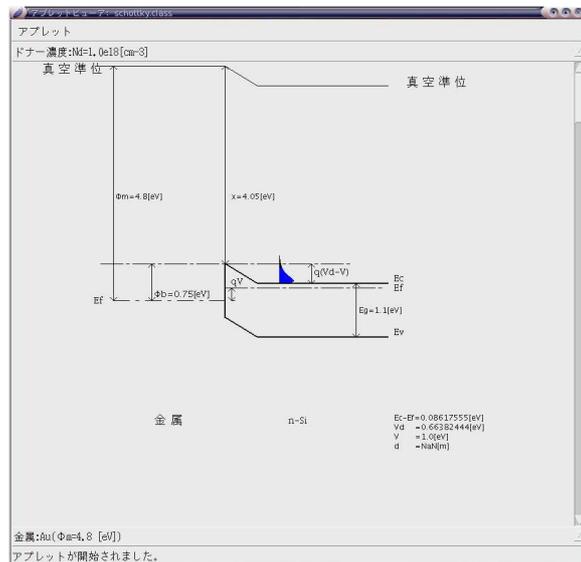


図 2. ショットキー接触に順バイアスを印加

図 1 のショットキー接触に逆バイアスを印加する場合、図 3 に示すように、Au に対して n 型 Si のポテンシャルエネルギーが印加した逆バイアス分下がるため電位障壁が増え、伝導帯の電子が金属側へ移動することが困難である様子が描かれる。また、印加した逆バイアスに応じて空乏層幅も増加している様子も描かれる。

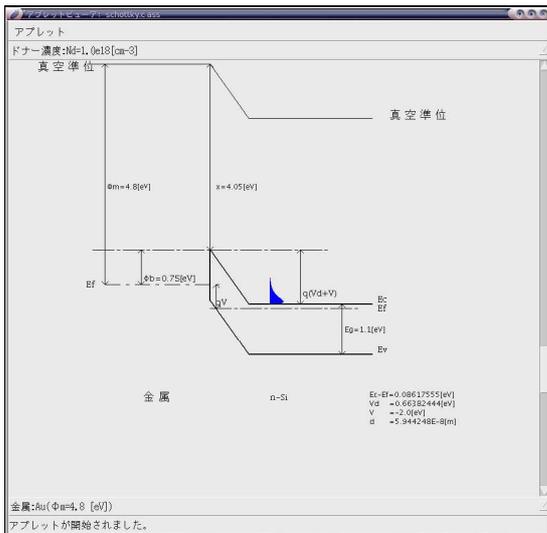


図 3 . ショットキー接触に逆バイアスを印加

次に、金属としてインジウム(In : $\phi_m = 4.0[\text{eV}]$)とドナー濃度: $N_D = 5.0 \times 10^{17}[\text{cm}^{-3}]$ のn型Siを接触させたオーミック接触の熱平衡状態($V=0[\text{V}]$)のエネルギーバンド図を描画したプログラムの実行結果を図4に示す。図4に示すように、 $\phi_m < \phi_s$ が成立するため、Inとn型Siの間に電位障壁は形成されず、電子が自由に移動できる様子が描かれている。

金属とp型Siの接触の場合も同様に、ショットキー接触及びオーミック接触のエネルギーバンド図を描画するプログラムを作成しており、金属とn型Siの接触の場合と同様、ウェブ上で公開している^{4,5)}。

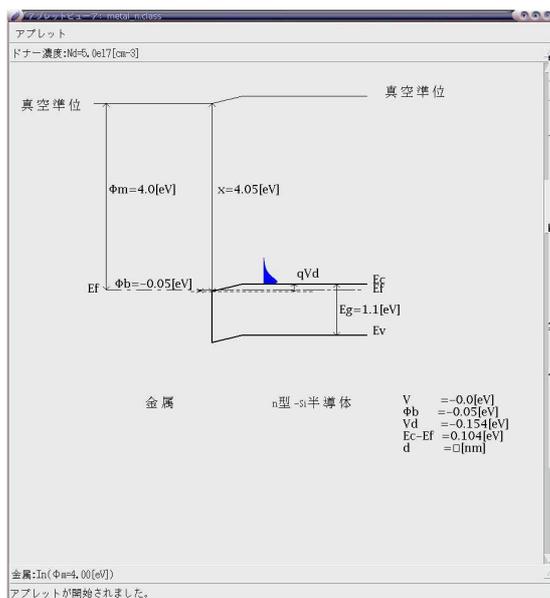


図 4 . オーミック接触の実行結果

3. MOS 構造のエネルギーバンド図

3.1 MOS 構造

MOS 構造とは金属(M)、酸化膜(O)、及び半導体(S)で作られる3層構造の略称である。

MOS 構造の金属電極にゲート電圧 V_G を加えると MOS 電界効果が始まる。ここでは代表として p 型半導体を使った理想 MOS 構造のダイオードを用いて説明する。まず、 V_G を負にすると、p 型半導体の表面に正孔が集まり蓄積状態となる。次に、 V_G を正にすると、表面では正孔が欠乏し、空乏層が形成され空乏状態となる。最後に、 V_G を正のままでその絶対値をさらに大きくすると、空乏層の拡大は一定の幅で止まり、p 型半導体表面には少数キャリアである電子が集まってくる。これを反転状態という。

3.2 MOS 構造のポテンシャル分布と表面キャリア濃度

半導体を p 型とし理想 MOS 構造のポテンシャル分布を考える。縦軸にポテンシャルエネルギーをとり、横軸に表面からの深さ x をとる。この場合、半導体の表面を $x=0$ とし、深さ方向をプラスにとる。

以上のように条件を設定し、アクセプタ濃度： N_A 、半導体の比誘電率： K 、空乏層幅： l_D 、真空の誘電率： ϵ_0 すると、MOS 構造の半導体表面の空乏層内のポテンシャル $\phi(x)$ は、ポアソンの方程式を用いて(2)式のように表され、図5に示すようなポテンシャル分布となる。

$$\phi(x) = \frac{qN_A}{2K\epsilon_0} l_D^2 \left(1 - \frac{x}{l_D}\right)^2 \quad (2)$$

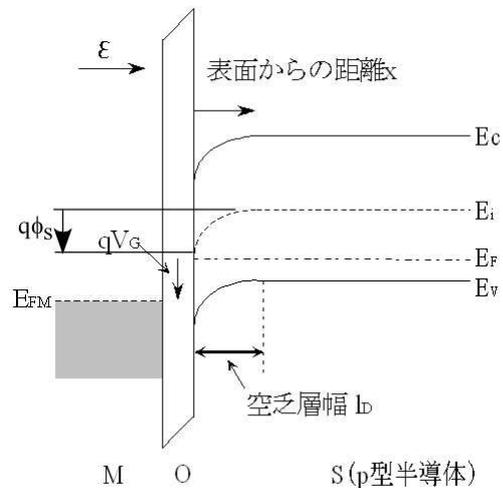


図 5 . MOS 構造の金属に正のバイアスを加えた蓄積状態のエネルギーバンド図

また図5に示すように 酸化膜-p型Si界面($x=0$)と半導体内部($x=l_D$)のポテンシャル差を表面ポテンシャル: ϕ_s といい, (2)式において $x=0$ のときの $\phi(x)$ の値が表面ポテンシャルとなる。

$$\phi_s = \frac{qN_A}{2K\epsilon_0} l_D^2 \quad (3)$$

表面ポテンシャル: ϕ_s を用いて半導体表面($x=0$)のキャリア濃度: p_s, n_s を表すと(4), (5)式となる。

$$p_s = p_{p0} e^{-q\phi_s/kT} \quad (4)$$

$$n_s = n_{p0} e^{q\phi_s/kT} \quad (5)$$

ただし, p_{p0}, n_{p0} はそれぞれ熱平衡状態の正孔濃度, 電子濃度である。

(4), (5)式から表面ポテンシャルが増すことによって, 半導体表面で電子濃度は増加, 正孔濃度は減少することがわかる。

3.3 MOS 構造のエネルギーバンド図の描画プログラム

3.2 節で述べた理論に基づいて作成した描画プログラムの熱平衡状態の実行結果を図6に示す。

画面右端に設けたスクロールバーにより, ゲート電圧 V_G を変化させることができる。 V_G の変化に対応して, 酸化膜と p 型 Si の表面のキャリア濃度分布及び p 型 Si のエネルギーバンドの変化を描画することができる。

熱平衡状態($V_G=0$)では, p 型 Si の表面のキャリア濃度はバルクと同一で, 表面に多数キャリアである正孔が価電子帯に分布している様子が描かれている。

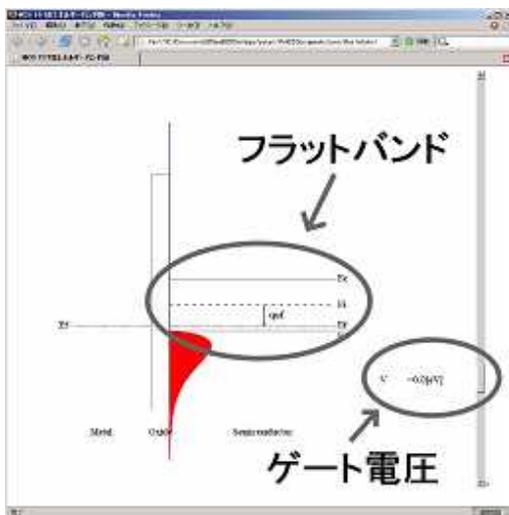


図6. MOS 構造のエネルギーバンド図

図6の熱平衡状態に負のバイアス($V_G < 0$)を加えると, 図7に示すように, 酸化膜と p 型 Si の界面近傍でエネルギーバンド図が上方に湾曲し, 表面の価電子帯の正孔濃度分布が熱平衡状態より大きくなる蓄積状態が描かれる。

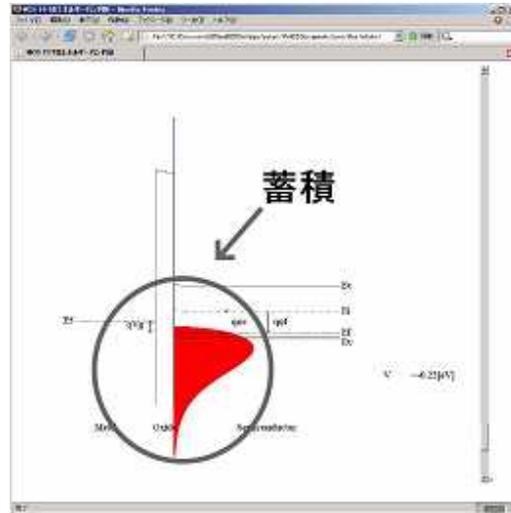


図7. 蓄積状態のエネルギーバンド図

逆に正のバイアス($V_G > 0$)を加えると図8のように, 酸化膜と p 型 Si の界面近傍のエネルギーバンド図が(2)式にしたがって双曲線状に下方に湾曲する。それに対応して, 表面の価電子帯の正孔濃度分布は小さくなり, p 型 Si の表面に空乏層が形成される空乏状態が描かれる。

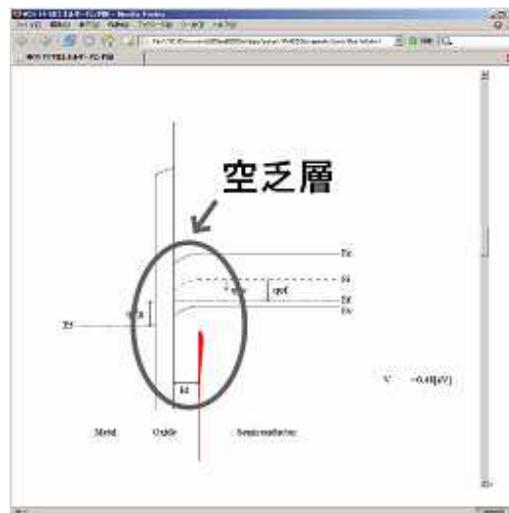


図8. 空乏状態のエネルギーバンド図

正のバイアスの絶対値を大きくすると, 図9に示すように, 酸化膜と p 型 Si の界面近傍のエネルギーバンドは更に下方に湾曲する。p 型 Si の表面には反転層が形成されるため, 多数キャリア

アの正孔が激減し、少数キャリアの電子が伝導帯に誘起される。作成したプログラムは図9に示すように、p型Si表面に形成される反転層の伝導帯の電子が V_G に応じて増加し、多数キャリアである価電子帯の正孔がそれに対応して減少する様子を動的に描くことができる。

このように、蓄積・空乏・反転状態におけるp型Si表面のキャリア濃度分布を動的に描画する教材は、著者が知る限り見たことはなく、今回作成した教材は非常に独創的で、MOS構造の蓄積・空乏・反転状態におけるポテンシャル分布及びp型Si表面のキャリア濃度分布を学習する上で非常に有用であると思われる。

今回作成した教材及びこれまでJavaで作成したマルチメディア教材は著者のホームページで各項目に関連する講義資料とともに公開されており、授業内容を支援する教材として授業で有効活用している^{6,7)}。

以上の取り組みは、平成17年度四国地区高専共同事業 電子・情報系FD研修会で本校の代表として報告された⁸⁾。

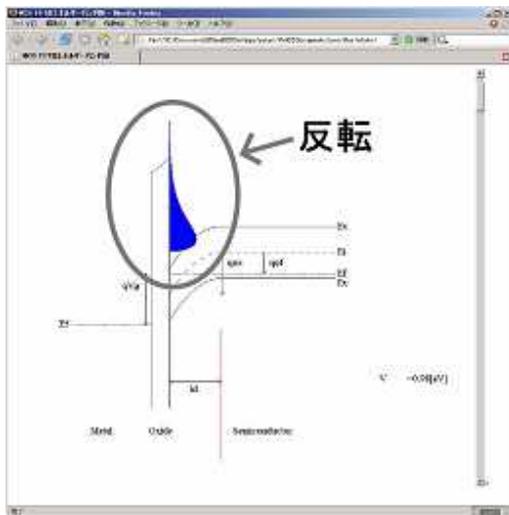


図9．反転状態のエネルギーバンド

4. まとめ

Javaを用いて金属-半導体接触のエネルギーバンド図及びMOS構造のエネルギーバンド図を描画するマルチメディア教材を作成した。金属-半導体接触のエネルギーバンド図においては、印加するバイアスに応じて半導体のポテンシャルエネルギーが変化し、電位障壁や空乏層幅が増減する様子が描くことができた。作成した教材ではポテンシャル分布を直線で簡易的に描いており、理論的な双曲線状のポテンシャル分布と異なるという点はあるが、金属-半導体接触を直感的に理

解しやすい教材となっている。

MOS構造のエネルギーバンド図においては、蓄積・空乏・反転状態のp型Siのエネルギーバンドの変化が描画され、更に、p型Si表面のキャリア濃度分布の変化を印加するバイアスに応じて動的に描画できた。

テキスト及び授業での説明と併せて、我々が作成した動的に半導体の物理現象を描画するマルチメディア教材を活用することで、理解しづらい半導体の諸現象を学生が理解しやすくなると思われる。これを一つのきっかけとして一人でも多くの学生が半導体工学に親しみをもち、積極的に学習する姿勢に繋がることを期待する。

本研究の一部は、平成17年度詫間電波工業高等専門学校・プロジェクト研究・教育方法改善経費の研究助成を得て行われた。

参考文献

- 1) 大西将也：半導体におけるキャリア濃度分布の描画プログラムの作成，詫間電波工業高等専門学校卒業研究論文，(2002).
- 2) 吉田彩子：pn接合におけるキャリア拡散の描画プログラム作成，詫間電波工業高等専門学校卒業研究論文，(2002).
- 3) 丸岡佳弘：Javaによるバイポーラトランジスタのエネルギーバンド図の描画，詫間電波工業高等専門学校卒業研究論文，(2003).
- 4) http://www.dt.takuma-ct.ac.jp/~tsuji/java/metal_n.html
- 5) http://www.dt.takuma-ct.ac.jp/~tsuji/java/metal_p.html
- 6) http://www.dt.takuma-ct.ac.jp/~tsuji/java/Mos_struct.html
- 7) http://www.dt.takuma-ct.ac.jp/~tsuji/lecture_java.html
- 8) 平成17年度四国地区高専共同事業 電子・情報系FD研修会実施記録，(2005).