

## 第 4 章 ショットキーダイオード

半導体と金属を接触させると、整流ダイオードのような働きをすることがある。これをショットキー接触といい、これを整流素子として利用するときはショットキーダイオードと呼ばれる。ショットキー接触になるか否かは、一般的には金属と半導体の仕事関数差で理解される。この章ではショットキーダイオードについて解説するが、整流素子の一つとしてだけではなく、半導体の電極の特性を理解するためにも重要な章となる。このほか、近年研究が盛んな有機エレクトロニクスでもショットキー接触が大きな役割を果たしている。好むと好まざるとにかかわらず、決して無縁ではないので、しっかり学んでいこう。

### 1. n型半導体と金属との接触

一般に金属の仕事関数を  $q\phi_M$ 、半導体の仕事関数を、すなわち真空準位とフェルミレベルの差を  $q\phi_S$  としたときに、金属の仕事関数の方が大きい ( $q\phi_M > q\phi_S$ ) のときにはショットキー接触となる。ショットキー接触を考えると、バンド図を使った方が分かりやすい。

図 1 は金属と n 型半導体のバンド図をかいたものである。

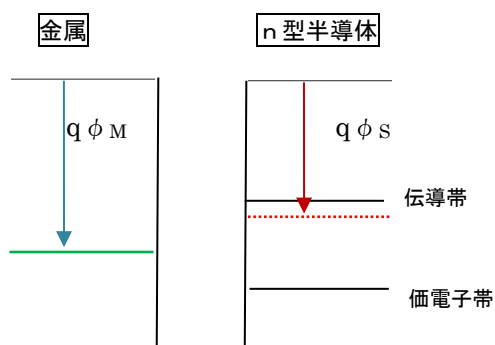


図 1 ショットキー接触を考えるための出発イメージ 金属と n 型半導体を別々バンド図で描いた

簡単には、金属は緑の線まで電子が詰まっている、半導体は赤の線まで電子が詰まっていると考えてよい。もちろん赤の線は半

導体のバンドギャップ内なので、フェルミ準位の位置に電子がいるわけではない。伝導帯と価電子帯に電子が分布していて、合わせてみれば赤い線まで電子がいるとみなせるということである。

金属と n 型半導体が接触したとすると、接触前は n 型半導体は高い位置の伝導帯に電子がいるので、水が高い方から低い方へ流れる道理のように、n 型半導体から金属に電子が流れ、残ったところに固定電荷ができ、バンドの曲がりが生じる。こうしてできるバンド図は図 2 のとおりである。

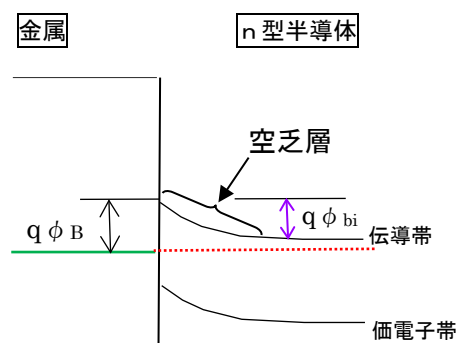


図 2 n 型半導体によるショットキー接触のバンド図

図 2 のバンド図を考えるために、接触界面ではそのまま独立していたときの位置関係

が保存されると考える。したがって、バンド図を書くときには、まず金属と半導体を独立してバンド図を描き、くっつける。その後半導体側において、接触面から遠くなるに従って金属の仕事関数の位置と半導体フェルミレベルをいっしょになるように半導体の価電子帯と伝導帯を曲げてかけばよい。半導体でバンドが曲がっている領域は、電界が発生し、空乏層になる。

このような接触ができた場合、金属から半導体側をみたときに  $q\phi_B$  の障壁ができているが、これはシヨットキー障壁と呼ばれ、次の式で表される。

$$q\phi_B = q\phi_M - q\phi_s \quad (1)$$

この式で  $q\phi_s$  は n 型半導体の電子親和力である。n 型半導体の仕事関数を  $q\phi_s$  との関係は、次の式で表される。

$$q\phi_s = q\phi_x + (E_c - E_f) \quad (2)$$

また半導体側から金属をみたときに、半導体のバンドが金属の表面までかけて反り上がっているが、この高さが内蔵電位  $\phi_{bi}$  になる。

$$q\phi_{bi} = q\phi_M - q\phi_s = q\phi_M - (q\phi_x + E_c - E_f) \quad (3)$$

金属側に  $\phi_{bi}$  の電位をかけると、このバンドの坂はフラットになるため、フラットバンド電圧とも呼ばれる。

シヨットキー障壁は電流の注入特性を決める要素であり、フラットバンド電圧は太陽電池として使った場合は発電電圧を決める要因になる

金属の仕事関数が半導体の仕事関数より小さい場合、 $\phi_M < \phi_s$  のときは、非整流性接触 (オーミック接触) となる。このときのバンド図は図 3 のような考え方で描く。今度は金属側を下げてかく。フェルミレベル

は  $\phi_M$  の位置と合わせてフラットとして書けばよい。

オーミック接触の場合は、半導体の伝導帯は接触面で落ち込んでおり、この落ち込んだ部分に電子がたまっている。バイアスを加えたときに、半導体側からも金属側からも全く障壁がないので、整流性を示さない。

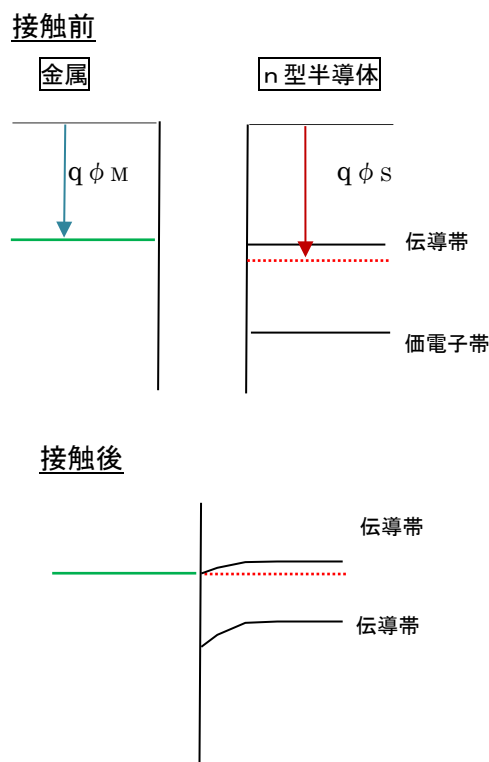


図3 n型半導体によるオーミック接触のバンドの考え方

## 2. p型半導体と金属の接触

p型半導体と金属の接触をかんがえるときにも、前節のように考えればよい。p型半導体の場合は、n型とは逆に  $q\phi_s > q\phi_M$  のときシヨットキー接触となる。バンド図は次のとおりである。

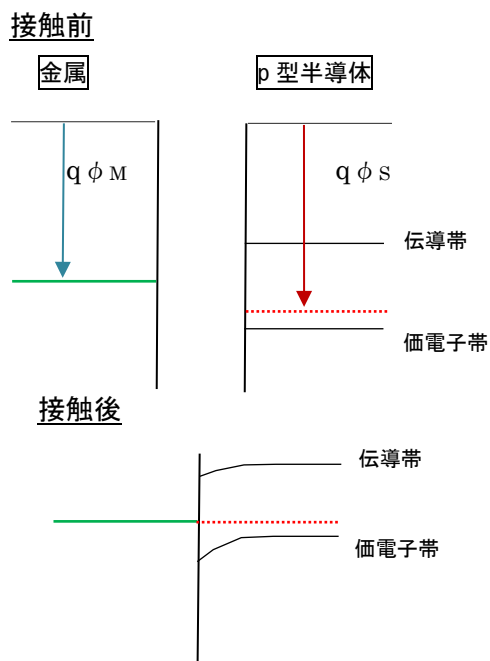


図4 p型半導体によるショットキー接触のバンドの考え方

$q\phi_s < q\phi_M$  の場合、オーミック接触となる。

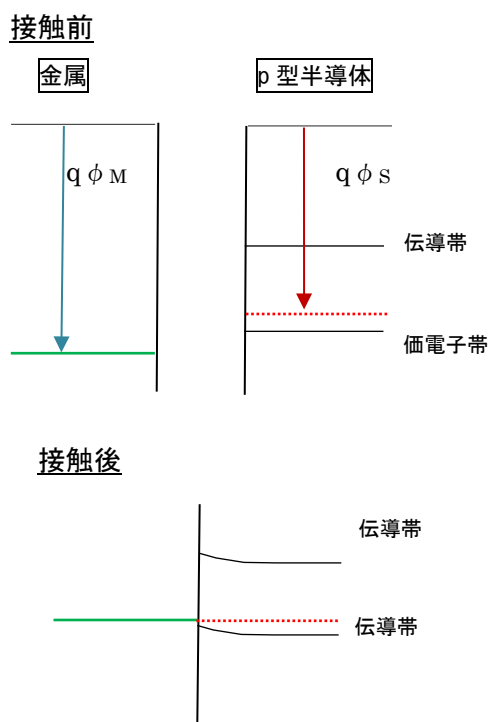


図4 p型半導体によるオーミック接触のバンドの考え方

ホールを考えると戸惑いやすいのは

電子と反対の正電荷を持っていることである。バンド図は電子の位置エネルギーの高低差を示しており、ホールでは高い方へ動きやすいのである。ショットキー接触では半導体側の価電子帯が下に曲がっているが、これはホールにとっては上り坂と一緒である。したがってこの部分が空乏層になる。

### 3. ショットキー接触となる金属の仕事関数

n型Siとショットキー接触になる材料は次の表1のとおりである。Siにおいては、仕事関数はドーピング濃度にも依存するために、電子親和力を載せておいた。

表1 Siの電子親和力とn型Siとショットキー接触となる金属の仕事関数

材料	仕事関数 Siでは電子親和力 (eV)
n-Si	4.05
Al	4.4
Au	5.2
W	4.6
Pt	5.3

p型Siとショットキー接触になる材料は次の表2のとおりである。p型Siでも、仕事関数はドーピング濃度にも依存するために、イオン化エネルギーを載せておいた。

表2 Siのイオン化エネルギーとp型Siとショットキー接触となる金属の仕事関数

材料	仕事関数 Siではイオン化エネルギー (eV)
n-Si	5.15
In	4.12
Sn	4.3

#### 4. ショットキー接触でできる空乏層内の電界強度、電位の計算

この場合も pn 接合で学んだガウスの式の微分形を用いて解くことになる。この時の前提として次のようなショットキー接触を考える。金属との界面を  $x=0$  とおいて幅  $W$  のところまで空乏層が広がっている。空乏層内にはイオン化されたドナー（固定電荷）がドーピング密度  $N_d$  で存在している。また誘導電荷が金属表面に現れており、空乏層内のイオン化されたドナーと同じ数の電子が表面に誘起されている。空乏層外では誘導電荷の電気力線と空乏層内からのイオン化されたドナーの電気力線が打ち消しあうため、ゼロとなる。

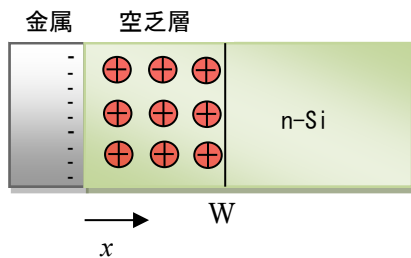


図 5 n 型半導体のショットキー接触内の電界分布を考えるための前提図

空乏層内部のポアソン式は次のとおりである。

$$\frac{dE}{dx} = \frac{qN_d}{\epsilon} \quad \text{ただし } 0 < x < W \quad (4)$$

これを積分して、 $x=W$  で  $E=0$  とすれば、

$$E = \frac{qN_d}{\epsilon}(x - W) \quad \text{ただし } 0 < x < W \quad (5)$$

さらに積分してマイナスをつければ電位が求められる。 $x=0$  で電位  $\phi$  をゼロとすれば次のようになる。

$$\phi = -\frac{qN_d}{\epsilon} \left( \frac{x^2}{2} - Wx \right) \quad \text{ただし } 0 < x < x_n \quad (6)$$

内蔵電位  $\phi_{bi}$  との関係は

$$\phi_{bi} = \frac{qN_d W^2}{2\epsilon} = \phi_M - \phi_S \quad (7)$$

となる。ここから空乏層幅は

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon \phi_{bi}}{qN_d}} \quad (8)$$

で与えられる。空乏層内の電荷  $Q_S$  は次の通りである。この式は後節で説明する C-V 特性を求める時に使う。

$$Q_S = \sqrt{2\epsilon q \phi_{bi} N_d} \quad (9)$$

#### 5. 電流－電圧特性

ショットキーダイオードの場合も、pn 接合のときと同様に、I-V 特性は次の整流方程式で記述される。

$$I = I_S \left( \exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right) \quad (10)$$

この式において  $q$  は単位電荷（素電荷）、 $V$  はバイアス電圧、 $n$  は理想係数で通常 1 から 2 の間である。 $k_B$  はボルツマン定数、 $T$  は絶対温度である。 $I_S$  は次の式であらわされる。

$$I_S = SA^{**} T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{k_B T}\right) \quad (11)$$

この式において、 $S$  はダイオードの面積、 $\phi_B$  はショットキー障壁、 $A^{**}$  はリチャードソン係数で、次の式で表される。

$$A^{**} = \frac{4\pi m k_B^2 q}{h^3} \quad (12)$$

n 型 Si では  $112 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$ 、GaAs では  $8 \text{ A/cm}^2 \text{ K}^2$  の値をとる。ここで、 $m$  は電子の有効質量である。

(11)式は、熱電子放出の式あるいは Richard-Dashman の式とも呼ばれる。この式の意味するところは、障壁  $q\phi_B$  を越えることができる熱エネルギーをもった電子が電気伝導に寄与できることを表す。

### 6. C-V 特性

単位面積当たりの空乏層容量を  $C$  とすると、 $C$  は次の式であらわされる。

$$C = \frac{\epsilon}{W} \tag{13}$$

ここで、 $\epsilon$  は半導体の誘電率、 $W$  は空乏層幅を表す。またショットダイオードに順バイアス電圧  $V$  をかけたとき、すなわち半導体を基準に金属に電圧  $V$  をかけたときの空乏層幅  $W$  は

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon(\phi_{bi} - V)}{qN_d}} \tag{14}$$

であるため、

$$C = \sqrt{\frac{q\epsilon N_d}{2(\phi_{bi} - V)}} \tag{15}$$

となる。

$C$ - $V$  特性を取得したあと、 $C^{-2}$ - $V$  特性をプロットすると、特性線の傾きからドーピング濃度を求めることができる。

$$C^{-2} = \frac{2(\phi_{bi} - V)}{q\epsilon N_d} \tag{16}$$

次に示す事例は、P3HT という有機半導体に Al を接合させてショットキー接触を作って取った特性を示す。P3HT を基準に Al にかけた電圧を横軸に、縦軸に電流密度をとるときれいな整流特性になっていることがわかる。

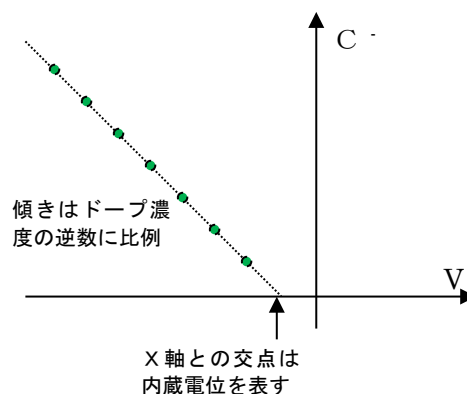


図 6  $C^{-2}$ - $V$  特性の例

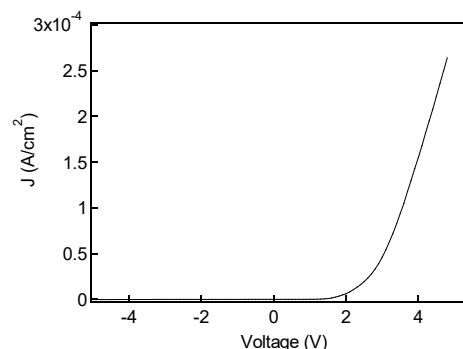


図 7 P3HT/Al のショットキーダイオードの電流電圧特性

このダイオードの  $C$ - $V$  特性を  $C^{-2}$ - $V$  特性にして表示すると図 8 のようになる。

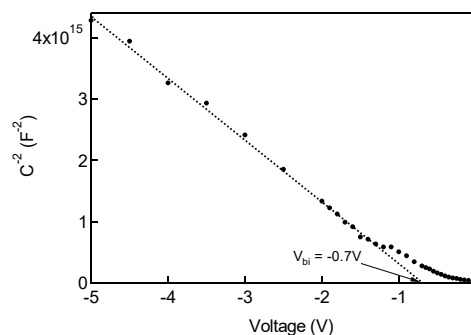


図 8 P3HT/Al のショットキーダイオードの  $C^{-2}$ - $V$  特性

この図において、直線になっているのは半導体としての P3HT 内部のキャリア密度が

深さによらず一定であることを示している。さらに直線の切片は内蔵電位を表す。

なお C-V 特性から、キャリア密度の深さ分布を求めることができる。空乏層幅  $W$  を (14)式からもとめ、さらにキャリア濃度を  $n$  とするとき、

$$N = -\frac{2}{q\epsilon} \left( \frac{dC^{-2}}{dV} \right)^{-1} \quad (18)$$

として、その関係を散布図にするとキャリア濃度の深さ分布を求めることができる。キャリア濃度はほぼドーピング濃度に等しいため、SIMS などをもちいずとも簡便にドーピング濃度を求めることが可能である。次の例は、図 9 の  $C^{-2}$ -V 特性からのキャリア濃度の深さ分布をもとめたものである。

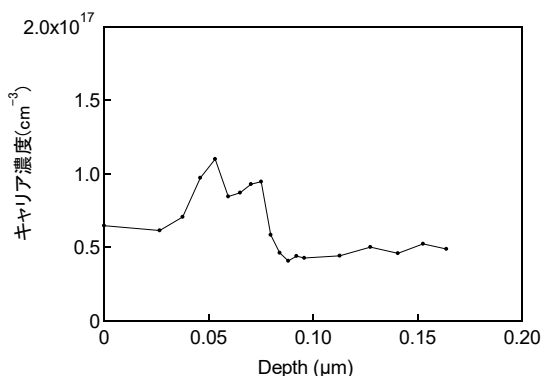


図 9 P3HT/Al のショットキーダイオードから求めた P3HT のキャリア濃度の深さ分布の例

## 7. オーミック接触とコンタクト抵抗

半導体をデバイスとして利用するときには必ず電極が必要であり、その場合はオーミック接触を実現して、余計な直列抵抗が電極にのらないように、**接触抵抗(コンタクト抵抗)**を低減する必要がある。

半導体と金属とのコンタクト抵抗を低く抑えるためには、先に説明したようにオーミック接触になるよう仕事関数を持つ金属の選定が必要である。しかし、n 型 Si にお

いてはほとんどの金属はショットキーとなり、またオーミックになるような金属を選んでも、実際にデバイス形成をしてみると、界面での固定電荷や界面準位による**フェルミレベルピンニング**でショットキーになることも多い。

半導体プロセスでは、オーミック接触を作るために、半導体側のドーピング濃度を  $10^{20}/\text{cm}^3$  まで高める。それにより、ショットキー障壁ができて、空乏層幅を非常に小さくして、トンネルで電流が注入できるようになり、コンタクト抵抗が低減し、見かけ上オーミックになる。

## 8. フェルミレベルピンニング

ショットキー障壁は、ショットキーダイオードを整流素子としてみた場合は、逆バイアス時の降伏電圧、すなわち耐電圧を決める要因となる。また、これを光センサーや太陽電池として使用する場合は、出力電圧を制限する数値となる。ショットキー障壁  $q\phi_B$  は、ショットキー理論によれば、金属の仕事関数  $q\phi_m$  と n 型半導体の仕事関数  $q\phi_s$  との差  $q\phi_m - q\phi_s$  で与えられることになっている。しかし実際に測定で得られたショットキー障壁は、ほとんどの場合では一致していない。図 10 に A.M.Cowley らによって示された、n 型 Si と各種金属との接合から得られたショットキー障壁の測定例を示す。ショットキー理論によれば、この図においてショットキー障壁の傾きは 1 になるはずであるが、実測では抑制された傾きとなる。この現象はフェルミレベルがあたかもピン止めされた効果にみえるので、**フェルミレベルピンニング**と呼ぶ。Si 以外でも殆どの半導体と金属との接合でフェルミ

レベルピンニングがみられ、ショットキー理論に基づく理想ダイオードを実現したとする例は少ない。

フェルミレベルピンニングの機構は、完全に解明されていないが、金属と半導体の間に界面層（主に自然酸化膜）ができ、界面層と半導体層との界面にできる界面準位に捕獲電荷が溜まるのが原因とされる。

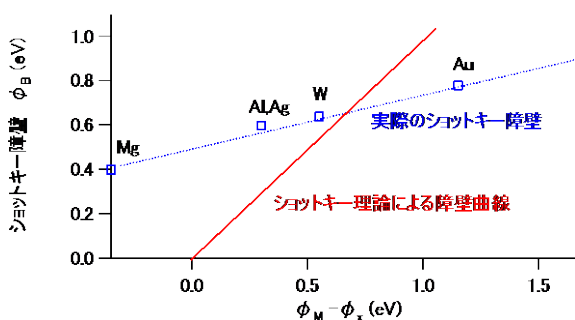


図 10 n 型 Si と各種金属でできるショットキー障壁と  $\phi_m - \phi_s$  との関係  
n 型 Si の  $\phi_s$  は 4.05eV である。  
測定値は、Journal of Applied Physics  
Vol.36(1965)3212.から再プロットした。

図 11 に界面層と界面準位を仮定したショットキーダイオードのバンドモデルを示す。界面には典型的な界面層として  $\text{SiO}_2$  の存在を仮定している。 $\text{SiO}_2$  と半導体との界面には、未結合手となるダングリングボンドや格子欠陥が存在し、これが禁制帯においても電子の存在を許す界面準位の原因となっている。界面において、フェルミレベル以下の界面準位に電子が捕獲されて、負に帯電し、これが n 型 Si での空乏層内部の電界を弱め、バンドの曲りを緩和し、ショットキー障壁を緩和する働きがある。

上記のモデルは、界面準位や界面層を抑制することで理想ショットキーが得られることを示唆するもので、多くのデバイス研究者がダングリングボンドを不活性化する

ために水素終端処理を試し、効果をあげている。実際のデバイス製造現場では、界面酸化層を抑制するために、半導体表面を化学洗浄し、最終工程でフッ化水素酸処理を行って表面を水素終端し、それでも発生する酸化層を金属堆積後に、水素雰囲気中で熱処理を行うことで金属と Si を合金化させて、酸素を還元する工夫がとられる。これら工夫で、ショットキーダイオードの耐圧の向上とリーク電流の抑制が図られる。また、完全に原子整合した理想接合を実現する試みが SiC 研究者の中でおこなわれている。

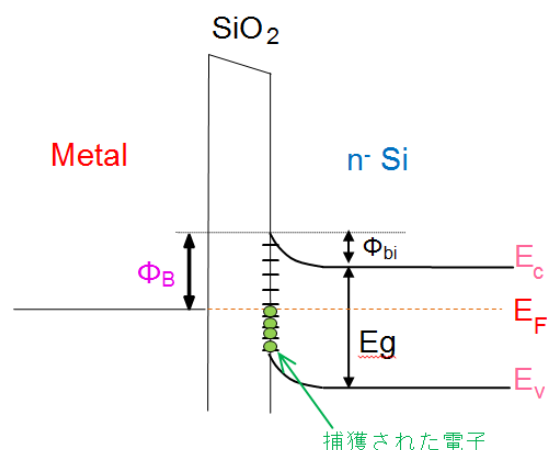


図 11 界面層と界面準位を仮定した n 型 Si と金属のショットキー接合のバンドモデル

## 9.MIS 型ショットキーダイオードの電流電圧特性 <発展>

前節で示したように、ショットキーダイオードを製造する際に、半導体界面において、自然酸化層や不純物の偏析層が、好むと好まざるとに関わらず発生する。したがって、ショットキーダイオードの整流方程式においても、界面層の存在を仮定して、Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) 型の接合として修正することが、Card らによって試みられている。(J. Phys. D, Vol.4(1971)1589)

図 12 に Card らが使用したバンドモデルを示す。このモデルで、絶縁層（界面層）は電子のトンネルを起こすほど十分に薄いという前提で説明が進められている。Card 理論によれば、MIS ショットキーの順方向電流の式は、

$$J_s = \frac{4m\pi q}{h^3} (k_B T)^2 \exp\left(-\chi^{1/2}\delta\right) \times \exp\left(-\frac{q}{k_B T} (V_D + \varphi_n)\right) \quad (19)$$

で与えられる。この式で、 $m$  は電子の有効質量、 $\chi$  は絶縁層（界面層）の平均障壁、 $\delta$  は界面層の厚み、 $V_D$  は半導体側のバンドの高低差で、表面電位とも呼ばれ、ゼロバイアス時の表面電位は拡散電位  $V_{D0}$  となる。 $\varphi_n$  は、ゼロバイアス時のフェルミレベルと導電帯の差になる。また、この式の  $\exp(-\chi^{1/2}\delta)$  の項は、界面層を電子がトンネルする確率を表している。この式において、理想係数  $n$  は、印加バイアス  $V$  に対する表面電位  $V_D$  の変動比で与えられる。

$$n = -V/\Delta V_D \quad (20)$$

$V_D$  において次の等式が成り立つ。

$$V_D = V_{D0} + \Delta V_D = V_{D0} - \frac{V}{n} \quad (21)$$

またゼロバイアス時において、ショットキー障壁の電位差  $V_b$  との関係は、

$$V_D + \varphi_n = V_b$$

となるため、順方向電流密度は

$$J_s = \frac{4m\pi q}{h^3} (k_B T)^2 \exp(-\chi^{1/2}\delta) \times \exp\left(-\frac{qV_b}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right) \quad (22)$$

となる。この式において、 $\frac{4m\pi q}{h^3} (k_B T)^2$  の項は、前出のリチャードソン係数である。つまり、界面層が存在することで、順方向電流が  $\exp(-\chi^{1/2}\delta)$  倍、抑制されると考えることができる。

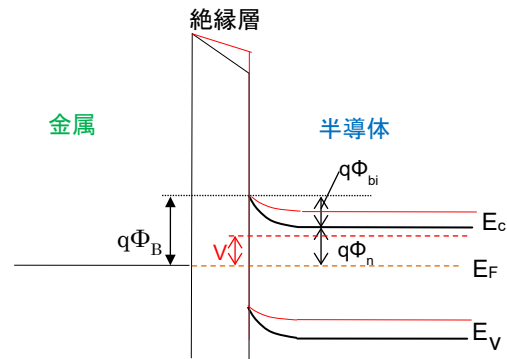


図 12 MIS ショットキーダイオードの順バイアス時のバンド変化

黒線が無バイアス時 赤線がバイアス印加時を表す。界面層と界面準位を仮定した  $n$  型 Si と金属のショットキー接合のバンドモデルである

MIS 型のショットキーダイオードにおいては、理想係数  $n$  が 1 を超える高い値がしばしば観測される。この理想係数  $n$  は、Card 理論によれば、次の式で与えられる。

$$n = 1 + \frac{\left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right) \left(\frac{\epsilon_s}{W} + qD_{sb}\right)}{1 + \left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right) qD_{sa}} \quad (23)$$

この式において、 $\epsilon_i$  と  $\epsilon_s$  は、それぞれ界面層、半導体層の誘電率を表す。 $W$  は半導体側でできる空乏層の幅である。 $D_{sb}$  は半導体と界面層との界面の界面準位密度、 $D_{sa}$  は金属と界面層の界面付近の界面準位密度である。これまでの解析事例で、 $D_{sa}$  は非常に小さいと仮定されることが多く、その場合  $n$  は次の式で表される。

$$n = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left(\frac{\epsilon_s}{W} + qD_{sb}\right) \quad (26)$$

以上説明したように、Card モデルによれば、ショットキーダイオードにおいて、理想係数  $n$  が 1 を超える場合は、界面層の膜厚と、界面準位密度が影響を与えていると考えることができる。



### 10.MIS ショットキー接合における AC コンダクタンスからの界面準位密度の評価 <発展>

ショットキー接合における半導体界面の界面準位密度は、ショットキー障壁や拡散電位を決定する重要な数値である。界面準位密度を評価する方法として、MIS 接合の AC コンダクタンスから抽出する方法が IBM の Werner らによって説かれている。(J. Werner, K. Ploog, H.J. Queisser, Physical Rev. Lett. Vol.57(1986)1080)

彼らの手法では、図 13 に示されるように、半導体界面で界面準位が存在し、その量は単位 eV 当たり、単位平方センチあたりの、states/eV·cm<sup>2</sup> の単位で表現される。界面準位密度を  $D_{it}$  とする。

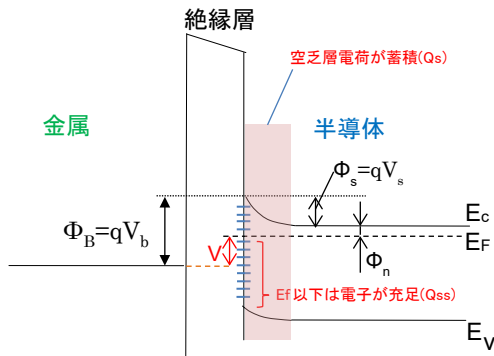


図 13 MIS ショットキーダイオードの界面準位を仮定したときのバンドモデル

MIS 構造に順バイアス  $V$  を印加したときに表面に誘起される電荷  $Q_t$  は、半導体の空乏層領域のイオン化したドナーによる電荷  $Q_s$  と界面準位に貯まる電荷  $Q_{ss}$  の和となる。

$$Q_t = Q_{ss} + Q_s \quad (25)$$

この様相は、接合を等価回路で表した場合、接合の全容量は空乏層容量  $C_s$  と界面準位容量  $C_{ss}$  の並列回路で表されると考えるこ

とができる。ショットキー接合の等価回路は、図 14 に示されるとおりである。 $C_{ox}$  は界面層 (酸化膜) の容量であるが、非常に大きい値で接合全体のインピーダンスに占める割合は小さい。さらに  $C_p$  は並列容量、 $G_p$  は並列導電率となる。

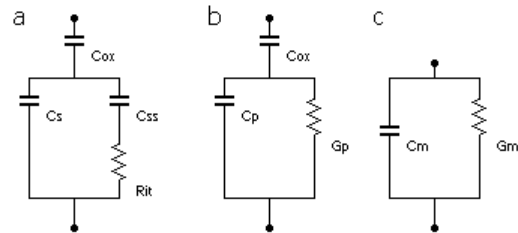


図 14 MIS ショットキーダイオードの等価回路モデル a は詳細モデル b は a の等価回路である。c はもっとも簡略化した等価回路である。LCR メーターで計測される並列容量と並列導電率が  $C_m$  および  $G_m$  となる。

このとき、並列容量  $C_p$  は

$$C_p = C_s + \frac{C_{ss}}{1 + (\omega\tau_{it})^2} \quad (26)$$

で表される。この式で、 $C_{ss} = qD_{it}$ 、 $\tau_{it} = R_{it}C_{ss}$  となる。 $R_{it}$  は界面準位の蓄積電荷の充放電時の抵抗になる。

そして、 $\omega$  で規格化された並列導電率は、

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{q\omega\tau_{it}D_{it}}{1 + (\omega\tau_{it})^2} \quad (27)$$

で表される。ここで  $\tau_{it}$  は、界面準位への電荷の捕獲や消失に関わる時定数で、次の式で表される。

$$\tau_{it} = \frac{1}{v_{th}\sigma_n N_d} \exp\left(\frac{qV_s}{k_B T}\right) \quad (28)$$

この式で  $v_{th}$  は捕獲電子の熱速度、 $V_s$  は表面電位、 $\sigma_n$  は界面準位の捕獲断面積、 $N_d$  は半導体のドープ濃度である。電子の捕獲、放出が、フェルミレベル近傍 ( $k_B T/q$  の 2~3 倍以内) で行われるとすると、(27)式は次のように修正される。

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qAD_{it}}{2\omega\tau_{it}} \ln(1 + (\omega\tau_{it})^2) \quad (29)$$

この式において A はデバイスの面積である。(29)式において、 $G_p/\omega$ が $\omega\tau_{it}$ の関数として見たときに、 $\omega\tau_{it}$ が 1.98 のときにこの関数は極大をとる。このとき  $D_{it}$  はつぎの関係をもつ。

$$D_{it} = \frac{(G_p/\omega)_{max}}{0.402qA} \quad (30)$$

つまり、並列導電率の  $\omega$  による除数を周波数を変えてプロットし、極大値を読み取り、(30)式から界面準位密度を計測できる。上記の計算で得る界面準位密度は、伝導帯から、 $q\Phi_s + q\Phi_n$  分だけ下がった位置、或いはショットキー障壁を  $q\Phi_B$  としたときに、 $q\Phi_B - qV/n$  だけ下がった位置を評価していると考えればよい。

実際の測定方法であるが、LCR メーターでパラレルモデル (図 14c) を利用し、 $C_m$  と  $G_m$  を測定し、次の式から  $G_p$  を計算する。

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{j_{dc}}{k_B T / e} \frac{\omega C_{ox}(C_m - C_{HF})}{G_m^2 + \omega(C_m - C_{HF})^2} \quad (31)$$

$J_{dc}$  は実際の DC バイアスかけたときの、ダイオード電流密度である。 $C_{ox}$  は、順バイアスをかけて空乏層が殆どないときのダイオード両端の容量となる。これは C-V 特性の  $C_{MAX}$  値に相当する。 $C_{HF}$  は、高い周波数 (1 MHz 以上) のときのダイオード両端の容量であり、 $C_{ox}$  と  $C_s$  の直列接続の合成容量に相当する。

図 15 に、著者の研究室で解析した、P3HT/n-Si ショットキーダイオードのアドミッタンス解析の例を示す。LCR メーターで、測定した並列容量  $G_m$  と並列アドミッタンス  $G_m$  から、 $G_p/\omega$  が計算できる。 $C_{HF}$  は  $C_m - f$  特性の高周波領域でのプラトー領

域から読み取る。 $C_{ox}$  は順バイアスとして内蔵電位より高い 0.6V を掛けたときの、100Hz 程度の低い周波数領域で読み取っている。計算された  $G_p/\omega$  の最大値から、界面準位密度が計算でき、その時の周波数  $\omega$  は、 $\omega\tau_{it} = 1.98$  の関係があり、そこから  $\tau_{it}$  を求めることができる。

以上述べた方法であるが、前節で述べたように、理想係数 n から界面準位密度を求める方法もあるが、AC コンダクタンス法では不確定な変数がすくないことから、広くショットキーの界面準位密度の解析法として利用されている。

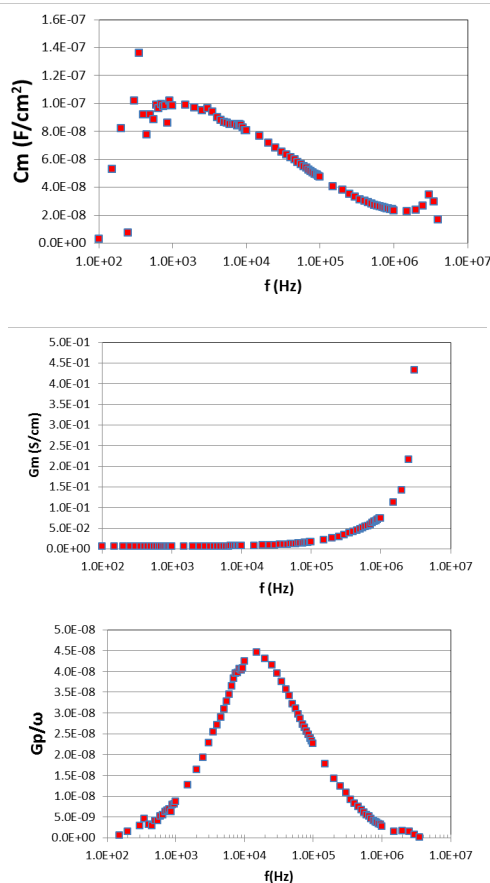


図 15 P3HT/n-Si ショットキーダイオードのアドミッタンス解析の例  
上 2 つは、実測した並列容量と並列コンダクタンスである。この 2 数値から、式 31 を使って  $G_p/\omega$  を計算した例。ピーク強度から、(30)式を用いて界面準位密度を計算できる。

### 1.1. ショットキー特性の諸数値の解析方法

ショットキーダイオードの V-I 特性を取得することで、ショットキー障壁やダイオードの直列抵抗、どれくらい理想的な接触になっているのかを評価できる理想係数を求めることができる。

これを得るには、Cheung らによって開発された解析法 (Appl. Phys. Lett. Vol.49, (2), 1986, p.85) が利用されている。ダイオードの直列抵抗を  $R_s$  とし、ダイオードの整流方程式(10)式は次の通り修正される。

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nk_B T}\right) - 1 \right] \quad (32)$$

また飽和電流  $I_s$  は、次のように表わされる。

$$I_s = SA^{**}T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{k_B T}\right) \quad (33)$$

(32)式の両辺を飽和電流  $I_s$  で割り算し、自然対数をとると次のようになる。

$$\log\left(\frac{I}{I_s}\right) = \frac{q}{nk_B T} V - \frac{qI}{nk_B T} R \quad (34)$$

ここで、電流密度  $J$  を定義する。 $J$  は  $I/S$  であり、さらに、次のように変形することができる。

$$\begin{aligned} \log\left(\frac{J}{A^{**}T^2 \exp(-q\phi_B/k_B T)}\right) \\ = \frac{q}{nk_B T} V - \frac{qI}{nk_B T} R \end{aligned} \quad (35)$$

この式を整理すると

$$\begin{aligned} \log\left(\frac{J}{A^{**}T^2}\right) + \frac{\phi_B}{k_B T} \\ = \frac{q}{nk_B T} V - \frac{qI}{nk_B T} R_s \end{aligned} \quad (36)$$

となる。ここで  $\beta = q/k_B T$  とおいて、さらに

式を整理すると次のようになる。

$$V = R_s S J + n\phi_B + \frac{n}{\beta} \log\left(\frac{J}{A^{**}T^2}\right) \quad (37)$$

$$\frac{dV}{d(\log J)} = R_s S J + \frac{n}{\beta} \quad (38)$$

つまり、I-V 特性のデータを取得したら、電流密度の自然対数を計算し、電圧を電流密度の自然対数で数値微分を行い、グラフにすると、傾きと y 軸の切片から直列抵抗  $R_s$  と理想係数  $n$  を抽出できる。

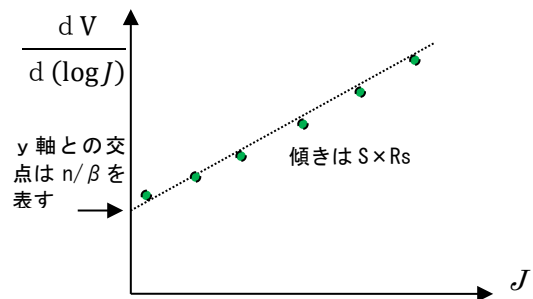


図 15 Cheung 法によるショットキーダイオードの直列抵抗  $R_s$  と理想係数  $n$  の求め方

さらにショットキー障壁の抽出方法であるが、 $H(J)$ なる次の関数を定義して、(37)式を変形する。

$$H(J) = V - \frac{n}{\beta} \log\left(\frac{J}{A^{**}T^2}\right) \quad (39)$$

$$H(J) = RSJ + n\phi_B \quad (40)$$

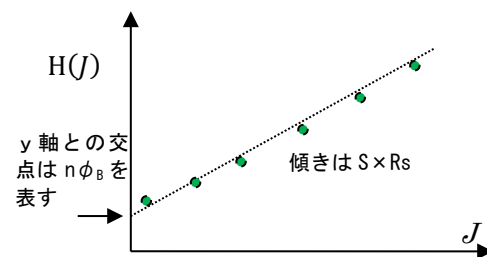


図 16 Cheung 法によるショットキーダイオードのショットキー障壁  $\phi_B$  の求め方

-事例-

次に示す例は筆者が有機半導体ペンタセンを低濃度  $n$  型 Si に接触させて、作製した

ショットキーダイオードの I-V 特性例を図 17 に示す。ここでは Si 半導体のドーピング濃度が非常に小さいため有機半導体側が電極として作用したショットキーダイオードとなっている。この測定において、ショットキーダイオードの面積  $0.07 \text{ cm}^2$  であり、測定温度は  $300 \text{ K}$  である。

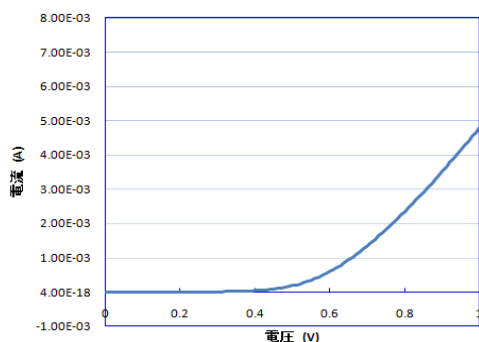


図 17 Pentacene/Si ショットキーダイオードの I-V 特性

図 17 の特性から計算した  $dV/d(\log J) - J$  特性を図 18 に示す。縦軸との交点から理想係数  $n$  を直読できるように縦軸を  $\beta$  倍してある。この場合、 $n$  値は  $2.5$  となる。 $2.5$  と理想係数が  $2$  を超えるのは、ペンタセンと  $n$  型 Si との界面に薄い絶縁層ができていたためと考えている。絶縁層を考慮して  $n$  値を解析するとほぼ  $1$  になることを確認している。

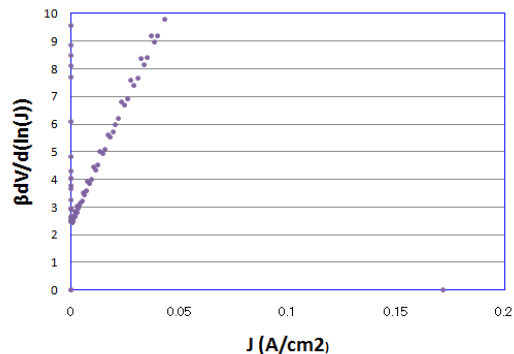


図 18 Pentacene/Si ショットキーダイオードの  $\beta dV/d(\log J) - J$  特性

図 19 に  $H(J) - J$  特性を示す。縦軸との交点は  $n \phi_B$  を表し、ここでは  $0.77 \text{ eV}$  と求められた。

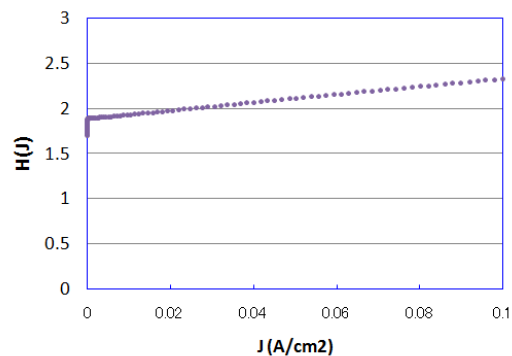


図 20 Pentacene/Si ショットキーダイオードの  $H(J) - J$  特性