

電気的特性による Pt/Mo/4H-SiC(0001) 接触界面に関する研究

佐久間涼*・進藤怜史*・浅野清光

Interface Properties of Pt/Mo/4H-SiC(0001) Contacts by Electrical Measurements

Ryo SAKUMA*, Satoshi SHINDO* and Kiyomitsu ASANO

(平成25年11月28日受理)

SiC is the compound semiconductor with excellent physical properties such as the wide band gap and high breakdown field strength, and the promising material to realize high-performance power devices. The electrode formation for the semiconductor is required to gain low resistive ohmic contacts with metal materials, but it is difficult to gain the good ohmic contact on the SiC surfaces. The Pt/Mo/4H-SiC(0001) interfaces formed by RF magnetron sputtering method have been studied by measuring the I-V properties before and after annealing, to consider influence on Schottky barrier height caused by the oxidized thin film. We calculated the ideal Schottky barrier heights by extrapolation from ideal factor and the Schottky barrier heights. The Schottky barrier height of the Mo/4H-SiC(0001) contacts indicated about 0.87eV after 500°C annealing. On the other hand, the Schottky barrier height of the Pt/Mo/4H-SiC(0001) contacts indicated about 0.72eV after 500°C annealing. These results show that the platinum thin film coating prevents the Mo electrode on 4H-SiC(0001) from oxidizing.

Keywords: 4H-SiC(0001), RF magnetron sputtering, metal/semiconductor contacts, Schottky barrier height, Ohmic contact

1. 緒言

電気エネルギーを生成しそれを消費するまでの間には、いくつもの段階による電力変換が行われている。交流・直流変換、電圧変換、周波数変換などがこれにあたり、この手順において多数のパワー半導体デバイスが用いられている。しかしながら、電力変換のたびに、主にパワーデバイスに発生するジュール熱のために変換電力の約 10～15%に相当するエネルギーが廃熱されている。したがって、パワーデバイスの高性能化は電力利用効率の向上に繋がる、重要なエコ技術である¹⁾。

現代におけるパワーデバイスのほとんどが Si によって作製されているが、技術が成熟するにつれ、その物性に起因するデバイスの性能に限界が見え始めてきている。このような状況下で、新たなパワーデバイス用半導体材料への期待が大きくなっており、

新規半導体材料として、パワーデバイスに適した物性値を有するといわれている SiC (シリコンカーバイド) への期待度が高まっている¹⁾²⁾。

従来のパワー半導体材料である Si とその物性を比較すれば、禁止帯幅が約 3 倍、熱伝導率が約 3 倍、絶縁破壊電界強度が約 10 倍など、さまざまな優越点を持っている。広い禁止帯幅と熱的安定性はこの材料が高温動作デバイスに適しているということを示唆し、高い絶縁破壊電界強度は電力用パワーデバイスとしての優位性を示している¹⁾。

以上の事柄から、本研究では、低接触抵抗率のオーミック電極の作製を目的として、RF マグネトロンスパッタ法により Mo ナノ薄膜および Pt ナノ薄膜を 4H-SiC(0001) 面へスパッタした。そして、I-V 特性を測定することによってショットキー障壁高さ ϕ_B と理想因子 n を算出し、Mo/4H-SiC(0001) 界面の評価及び考察を行った。

* 秋田高専専攻科学生

2. 金属 / 半導体接触³⁾

半導体の電極作製の際に必要な概念である金属 / 半導体接触について述べる。整流性を示す要因としてショットキー障壁という概念があり、その形成機構にはショットキーモデルやバーディーンモデルといった解釈があり、統一的な見解がなされていないことについて説明する。また、実際のオーミック接触の作成技術に大きく影響してくるであろう低温固相反応について説明する。

2.1. ショットキー接触と整流現象

金属と半導体を接触させると、その金属 / 半導体接触界面にポテンシャル障壁 ϕ_B が生じる。このポテンシャル障壁によって、電子の移動が一方のみに制限されるため、電流が片方の方向にしか流れない整流現象が現れる。このポテンシャル障壁は、ショットキー障壁あるいはショットキーバリアと呼ばれている。この障壁高さ ϕ_B は、 ϕ_M を金属の仕事関数、 χ_S を半導体の電子親和力として、1940年にSchottkyによって提案されたショットキーモデルにより、

$$\phi_B = \phi_M - \chi_S \quad (1)$$

と書くことができる。すなわち、障壁高さ ϕ_B は金属電極の仕事関数に依るものであり、これを任意に変更することで定量的に制御できるということになる。しかしながら、代表的な半導体であるSiやGe, GaAsなどの共有結合性の強い半導体においては、障壁高さ ϕ_B は(1)式に従わないことがわかっている。

このような半導体における障壁高さの形成機構はどのようなになっているのか。1947年、Bardeenはショットキーモデルとは別の解釈を提案した。共有結合性の強い半導体は、その表面にダングリングボンドを持つために表面準位が変わることがある。これにより、自由表面においてもキャリアが表面準位にトラップされ、ショットキー障壁が生ずるという解釈であり、この解釈をバーディーンモデルと呼ぶ。バーディーンモデルの意味する事は、障壁高さ ϕ_B は金属の仕事関数に依存せず、半導体の表面準位のみによって定まるということである。

これらのモデルを定量的に評価する方法を説明する。以下の(2)式で定義される界面定数を用いて、 $S=1$ の時(あるいはその値に限りなく近い時)は、ショッ

トキーモデルに依存し、 $S=0$ の時(あるいはその値に限りなく近い時)は、バーディーンモデルに依存する。

$$S = \frac{\partial \phi_B}{\partial \phi_M} \quad (2)$$

(2)式で計算される界面定数Sがどのような意味を持つかを説明するために、図1⁴⁾にSiO₂, GaSe, Siにおけるショットキー障壁高さ ϕ_B と電気陰性度 χ_M の関係を示す。なおこの図では金属の仕事関数 ϕ_M ではなく金属の電気陰性度 χ_M によって整理されているが、これは $\phi_M = \chi_M + \text{const.}$ のPauling-Gordyの関係があるからである。

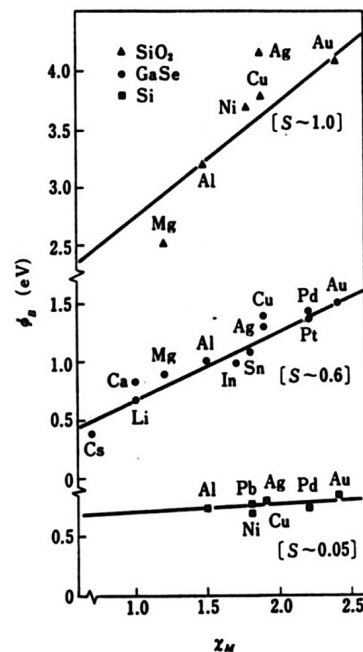


図1 種々の金属と各半導体に認められるショットキー障壁と金属の電気陰性度の関係⁴⁾

図をみると、Siに現れるショットキー障壁は、金属の種類によらずどの金属を接触させても値はほとんど変わっていない。 $S \approx 0.05$ 、つまりグラフの傾きは0に限りなく近い。すなわち、Siはバーディーンモデルに従っているということがわかる。

金属とn型半導体(以降M/n-Sを記す)の接触について説明するために、図2に接触後のエネルギーバンド図を示す。図中の ϕ_M は金属の仕事関数、 ϕ_S は半導体の仕事関数、 χ_S は半導体の電子親和力、 E_c , E_v はそれぞれ伝導帯下端、フェルミ準位、価電子帯上端である。ここでは、 $\phi_M > \chi_S$ の状態を考える。

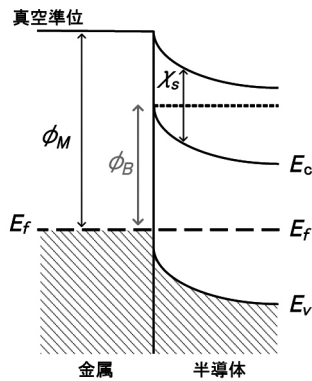


図2 金属/n型半導体接触のエネルギーバンド図 ($\phi_M > \chi_s$), 接触後

金属に比べて半導体のフェルミ準位がより高いエネルギーを持っており、半導体中の伝導電子のほうが金属中の伝導電子よりも高いエネルギーを持つ。従って、これらを接触させると、伝導電子が半導体表面から金属へと移動し、イオン化したドナーだけが残されることとなる。形成された空乏層により、半導体から金属に向かって、電界が生じ、伝導電子はこの電界により半導体から金属へと移動する向きとは逆方向の力を受け、移動は停止する。この状態を定常状態といい、この状態からバイアスを受けるとポテンシャル障壁 ϕ_B により、一方向にしか電流が流れない整流接触を示すのである。この金属側から見たポテンシャル障壁 ϕ_B は、金属のフェルミ準位と半導体表面の伝導帯下端との差で与えられ、このような障壁をショットキー障壁と呼ぶ。

2.2. オーミック接触

金属と半導体を接触させてもショットキー接触にならない場合について説明する。これは電流 - 電圧特性が比例関係、すなわちオームの法則が成り立つ接触である。説明のために、以下の図 2 に M/n-S 接触後のエネルギーバンド図を示す。ここでは、 $\phi_M < \chi_s$ の状態を考える。

ショットキー接触の場合とは逆に金属のフェルミ準位が半導体のそれよりも高いため、接触させると伝導電子は金属から半導体へと流れ込む。図 3 は接触後の定常状態のエネルギーバンド図であり、この図に示すように空乏層は形成されない。このような場合、電流 - 電圧特性は直線を示し、整流性が現れない。このような接触をオーミック接触と呼ぶ。

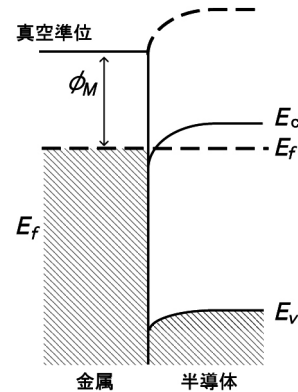


図3 金属/n型半導体接触のエネルギーバンド図 ($\phi_M < \chi_s$), 接触後

どのような半導体デバイスにおいても、電極を付けて外部回路と接続し、信号を取り出すのに整流性を示すのは好ましくない。そのため、オーミック接触が半導体素子の中で果たす役割は極めて大きいといえる。

実際では、半導体デバイスに電極を付けると、オーミック接触が現れることは多くはなく、ショットキー障壁が現れ整流性を示すことがしばしばである。良好なオーミックコンタクトとは、金属と半導体の間で接触抵抗が無視できるほど小さく可能な限りオーミック性に近づけるということである。

これを実現する別の方法として、図 4⁵⁾ に示すように金属と接触する半導体の表面を高キャリア濃度にする事で、ショットキー障壁高さが高いままであっても量子力学的なトンネル効果によって障壁を自由に通過できるようにするという方法がある。

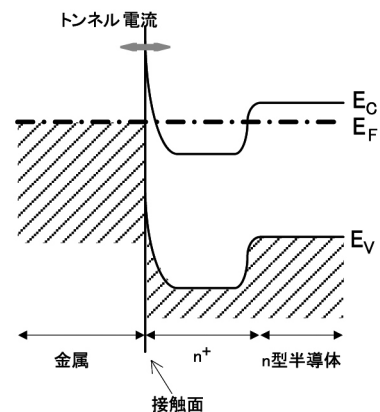


図4 トンネル効果によるオーミックコンタクト⁵⁾

2.3. 低温固相反応

金属 / 半導体界面において、両者は室温程度の低い温度で互いの構成原子の相互移動を伴う固相間反応が起こる。この現象を低温固相反応と呼ぶ。

Si が Pd, Pt, Ni, Mo などのシリサイドを作る金属と接触すると上記に述べたような低温固相反応が同じように起こる。200 ~ 400[°C] の温度範囲で生成されたシリサイドは、金属の性質を持ち、電気的コンタクトとして機能する。このようなシリサイドは熱的安定性を有し、比較的低い接触抵抗率を持つので電極への抵抗を低下させることができる可能性がある。⁶⁾ また、MoSi₂ / Si 接触界面におけるショットキー障壁高さは $\phi_B = 0.57[\text{eV}]$ という報告があり、本研究における Mo/4H-SiC(0001) 試料および Pt Mo/4H-SiC(0001) 試料で、ショットキー障壁高さを低減させることができる可能性がある。

一方で、半導体デバイスの小型化・省スペース化に伴った問題点も注目されるようになってきている。Alloy penetration と呼ばれる低温固相反応によるトラブルを図 5⁷⁾ に示す。Si と Al の合金層がごく薄い Si 層を貫通してデバイスを破壊してしまう現象である。

本実験で用いた 4H-SiC においても低温固相反応が起こることが予想される。本研究ではこの現象の利用と共に、以上に述べた問題点についても考察する際に考慮に入れなければならない。

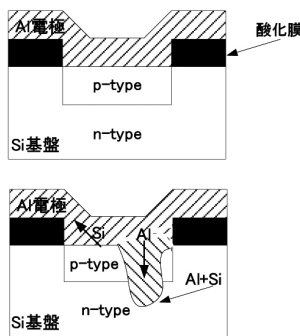


図 5 バイポーラ素子に見られる Al/Si での低温固相反応による劣化現象⁷⁾

3. 実験方法

3.1. スパッタ装置

本研究における各試料は RF マグネトロンスパッタ法で作製されている。以下の図 6 に使用した RF マグネトロンスパッタ装置の概略図を示す。ロータリーポンプ、クライオポンプによりチャンバー内を 0.655[Pa] 以下の超高真空まで排気し高純度 Ar ガスを導入した。その後、

RF パワー 50[W] で、15 分間スパッタを行った。これらのスパッタ条件を表 1 に示す。

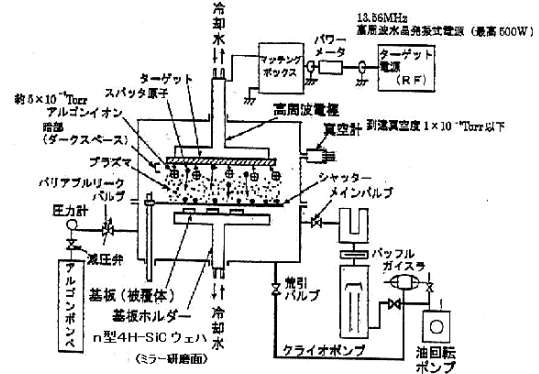


図 6 実験で用いた RF マグネトロンスパッタ装置の概略図

表 1 本実験におけるスパッタ条件

投入パワー	50[W]
Ar 圧力	0.655[Pa]
Ar 純度	99.999[%]
ターゲット・試料間距離	4[cm]
スパッタ時間	15[min]

3.2. ウェハ洗浄方法

まず、各試料を作製するため 2inch の n 型 4H-SiC ウェハ基盤に対して以下の手順で表面洗浄を行った。また、洗浄・スパッタ後の写真を図 9 に示す。

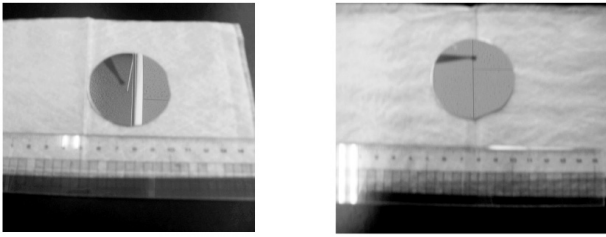
1. セミコクリーン 23 (図 7) 200cc / 10 分間超音波洗浄器 (図 8) で洗浄。
2. DIW(蒸留水) 200cc × 5 / 10 分間超音波洗浄器で洗浄。
3. 水切り



図 7 セミコクリーン 23



図 8 実験で使用した超音波洗浄機



Mo/4H-SiC(0001) Pt/Mo/4H-SiC(0001)

図 9 作製した試料

3.3. PDA 処理

タクトを形成する手法として最も広く用いられているのが PDA(Post Deposition Annealing) である。この手法は、コンタクト領域上にスパッタ法等で金属層を形成し、これに熱処理を加えることで、金属層原子と半導体基盤上原子との間で化学反応を促し、界面中間層を形成する技術である。PDA 処理では、熱的に安定なコンタクトを作製可能などの利点があるが、SiC デバイスに PDA 処理を行う場合、化学的に安定な SiC との反応促進に高温 (900 ~ 1000[°C] 付近) の熱処理が必要であるという欠点がある⁸⁾。これに関して本研究では、200 ~ 300[°C] 加熱で低温固相反応を促し界面中間層の形成を目指した。

3.4. 理想係数 n, 障壁高さ ϕ_B の算出方法

作製した試料は、数 mm² ~ 数十 mm² の大きさに分割し、それぞれ PDA 処理を施したうえで I-V 特性を測定し、理想係数 n と障壁高さ ϕ_B の算出を行った。まず、実験時の試料の測定条件を以下に示す。加熱方法に関しては、PID 制御電気炉を使った。60[min] で目標温度まで温度を上昇させ、その後さらに同温度で 60[min] 加熱を行い、炉冷して試料が室温程度になってから測定を行った。

① SiC 試料の C 面に電極として InGa を塗布して、この面と Mo 電極面に対して Cu 電極を接触させ、I-V 特性を測定する。

② SiC 試料を PID 制御電気炉で 150 °C, 300 °C, 500 °C 加熱し①と同様にして I-V 特性を測定する。

次に、理想係数 n, ショットキー障壁高さ ϕ_B の算出方法³⁾ を述べる。一般的に、ショットキー障壁界面を通過する電流が、障壁の上だけを通過するような熱拡散電流のみであるという単純な場合は、ショットキー

接触の順方向電流密度は、

$$J = J_0 (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \quad (3)$$

と表せる。ここで、V は電圧、q は電荷、T は絶対温度、k はボルツマン定数、 J_0 は逆方向電流密度である。 $V \gg kT/q$ であるときは、指数項が 1 よりも非常に大きくなるため、無視できる値となる。よって、

$$J = J_0 e^{\frac{qV}{kT}} \quad (4)$$

また、障壁の上だけではなく、量子力学的なトンネル効果や漏れ電流がある場合には電圧が低くても電流が流れることとなり、これについて理想係数 n を使って考慮すると、

$$J = J_0 e^{\frac{qV}{nkT}} \quad (5)$$

と書き直すことができる。n=1 であれば障壁内部を通過する電流がない、熱拡散輸送電流のみの理想状態であることを表している。逆に、n の値が大きければなんらかの漏れ電流が流れているというわけである。また、 J_0 は次のように定義される。

$$J_0 = A^* T^2 e^{-\frac{\phi_B}{kT}} \quad (6)$$

A^* はリチャードソン定数、 ϕ_B はショットキー障壁高さである。ここで、 A^* は次式で定義される。

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (7)$$

m^* は電子の有効質量、h はプランク定数である。本研究では SiC の m^* を 0.3 m_0 (m_0 は電子の静止質量) とし、 A^* を $3.60 \times 10^5 [A/m^2 K^2]$ とする。ここで、両辺の常用対数をとると、

$$\log_{10} J = \frac{q \log_{10} e}{nkT} V + \log_{10} J_0 \quad (8)$$

となる、よって、(8) 式の傾きをグラフ上から求めると、

$$\frac{q \log_{10} e}{nkT} = \frac{\Delta \log_{10} J}{\Delta V} \quad (9)$$

以上の (9) 式から n について解くと、

$$n = \frac{q \log_{10} e}{kT \frac{\Delta \log_{10} J}{\Delta V}} \quad (10)$$

また、ショットキー障壁高さ ϕ_B は、(6) 式より、

$$\phi_B = kT \ln \frac{A^* T^2}{J_0} \quad (11)$$

と求められる。

4. 実験結果・考察

本研究では、空気雰囲気中において 400℃～500℃ 加熱で酸化が始まる Mo 電極をスパッタした Mo/4H-SiC(0001) 試料と、さらにその上に酸化しにくい Pt をスパッタした Pt/Mo/4H-SiC(0001) 試料の 2 種類を作製し、界面中間層による障壁高さの変化および酸化による障壁高さへの影響を考察した。また、各試料の C 面には電極として InGa を塗布したので、上記 2 種類の試料の他に電極のスパッタを行わずに、InGa を 4H-SiC の電極として両面に塗った InGa/4H-SiC(0001) 試料も用意し、結果の比較に用いた。

4.1. InGa/4H-SiC(0001) 試料における PDA 処理前後の理想係数 n と障壁 ϕ_B

以下のような手順で試料を作製した。また、加熱処理前後の I-V 測定の結果を以下の図 10 に、図 10 の結果により算出した障壁高さ - 理想係数のグラフを図 11 に示す。

- ① SiC ウェハの洗浄。
- ② Si 面に InGa を塗布。
- ③ PDA 処理を実行 (150℃加熱, 300℃加熱)。
- ④ C 面に InGa を塗布。

実験結果では、電流密度 - 電圧特性のグラフの概形はバリスタ特性を示した。300℃加熱では特性が劣化している。InGa の仕事関数は 4.1～4.2[eV] であるが⁹⁾、ショットキーモデルに従うとすれば、理想障壁高さは 0.5～0.6[eV] となるが、実験結果では 0.71～0.76[eV] と少し高い値となっている。低電圧範囲における I-V 測定の結果を見ると 300℃加熱ではオーミック性になっており、障壁高さも 300℃加熱では低くなっている。この結果から、300℃加熱で InGa 合金と 4H-SiC(0001) の間に界面中間層が形成され、その影響により障壁高さが下がったものと考えられる。

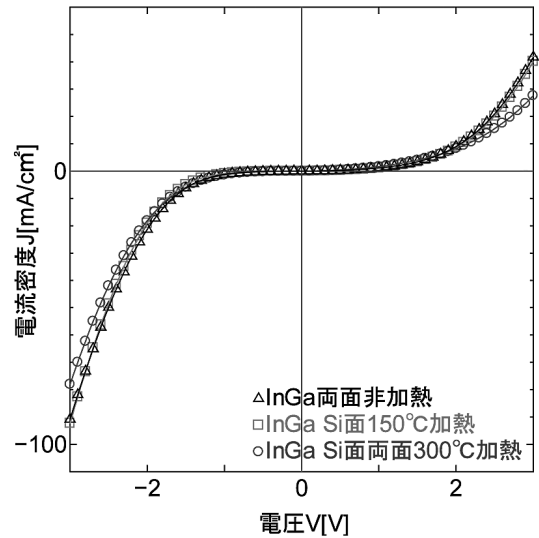


図 10 各加熱温度における電流密度 - 電圧特性 (InGa / 4H-SiC(0001) 試料)

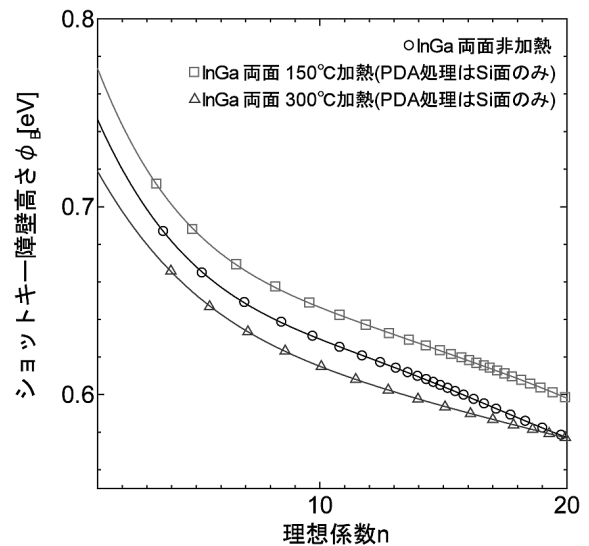


図 11 障壁高さ ϕ_B と理想係数 n の算出値 (InGa / 4H-SiC(0001) 試料)

4.2. Mo/4H-SiC(0001) 試料における PDA 処理後の理想係数 n と障壁 ϕ_B

半導体への電極作製後に、加熱処理を施すことで低温固相反応を促し、接触界面にシリサイドが形成され、良好なコンタクトが形成される場合がある。逆に特性が劣化することもある。そこで、PDA 処理として試料を電気炉で 150, 300, 500[°C] 加熱し、InGa を C 面に塗布してから、I-V 測定を行った。その結果を以下の図 12 に示す。

図 12 を見ると、非加熱, 150[°C] 加熱, 300[°C] 加熱ではいずれもバリスタ特性を示しており、500[°C] 加熱では完全に整流性を示していることがわかる。また、500[°C] 加熱では順方向電流も流れにくくなっているため、空気中での加熱処理によって Mo 薄膜が酸化したものと考えられる。

また、この結果から理想係数 n とショットキー障壁高さ ϕ_B を外挿法により算出した結果を図 13 に示す。図 13 を見ると、加熱温度の上昇と共に障壁高さ ϕ_B は高くなっている。コンタクト抵抗率はショットキー障壁高さに依存しているため、Mo 薄膜の酸化によってコンタクト抵抗率が増大し、それに伴って計算結果である理想状態におけるショットキー障壁高さ ϕ_B も高くなったものと考えられる。

4.3. Pt/Mo/4H-SiC(0001) 試料における PDA 処理前後の理想係数 n と障壁 ϕ_B

一方、Mo 薄膜上に Pt をスパッタした試料では、図 14 のような I-V 特性となった。加熱温度が高くなるにつれ整流性に近づくように見えるが、500[°C] 加熱では直前の加熱温度である 300[°C] よりも順方向電流が流れやすいという結果になった。このことから、300 ~ 500[°C] 加熱の間に界面反応の臨界点があると予想し、400[°C] 加熱試料, 600[°C] 加熱試料を作製し I-V 特性の測定を行ったところ、400[°C] 加熱は 500[°C] 加熱よりもさらに電流が流れやすくなっていた。

続いて、図 14 の結果から理想係数 n に対するショットキー障壁高さ ϕ_B を計算すると、以下の図 15 のようになった。400[°C] 加熱, 500[°C] 加熱の時を除けば同様の関数であり、加熱温度の上昇に伴って障壁高さは上昇しているが、前述の通り 400, 500[°C] 加熱では関数が変わっている。また、その障壁高さは 400[°C] 加熱以降ではほぼ一定の状態にあり、障壁高さが飽和していることがわかる。この結果から、400 ~ 500[°C] 加熱を行うことにより、界面になんらかの反応が起きていることが予想できる。

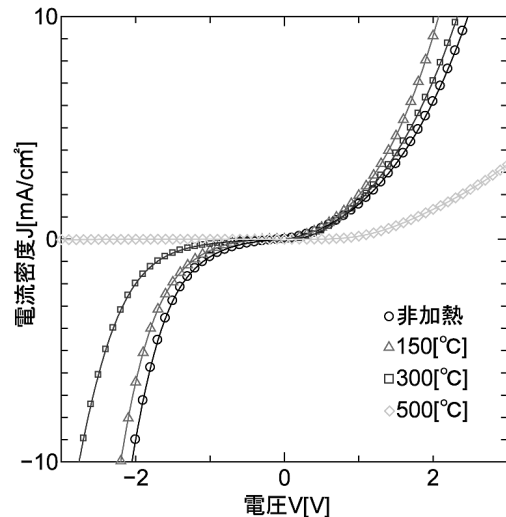


図 12 各加熱温度における電流密度 - 電圧特性 (Mo / 4H-SiC(0001) 試料)

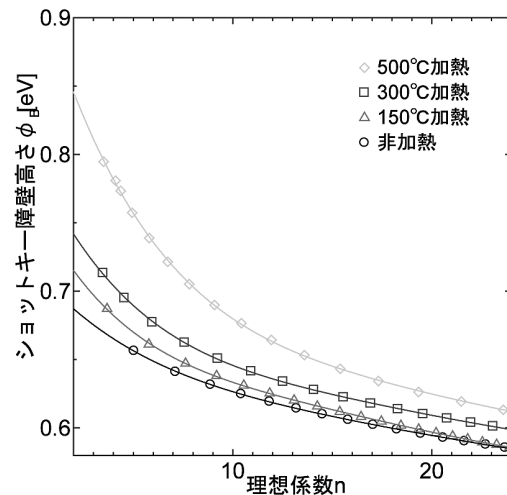


図 13 障壁高さ ϕ_B と理想係数 n の算出値 (Mo/4H-SiC(0001) 試料)

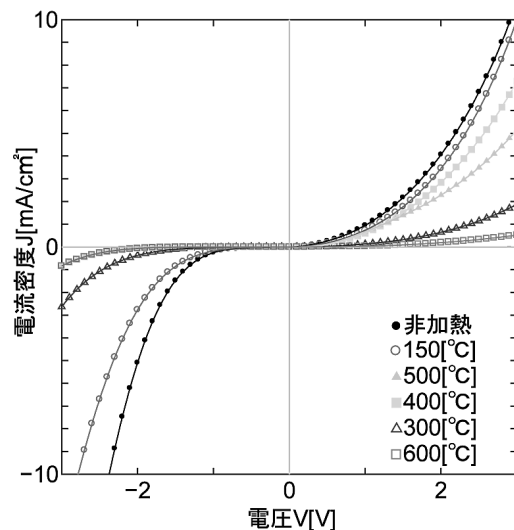


図 14 各加熱温度における電流密度 - 電圧特性 (Pt / Mo / 4H-SiC(0001) 試料)

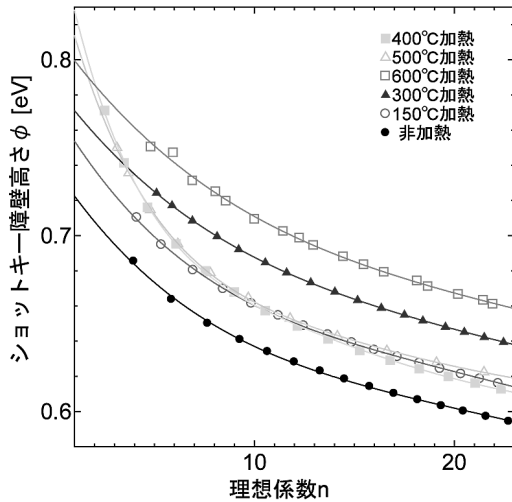


図 15 障壁高さ ϕ_B と理想係数 n の算出値 (Pt / Mo/4H-SiC(0001) 試料)

5. 結論

5.1. まとめ

本研究では、低接触抵抗率のオーミック電極の開発を目的として、RF マグネトロンスパッタ法により、Mo 薄膜および Pt/Mo 薄膜、Y 薄膜を n 型 4H-SiC(0001)Si 面へ作製し、I-V 法を用いて、理想係数 n 並びにショットキー障壁高さ ϕ_B を算出し、その金属 / 半導体接触界面について評価および考察を行った。また、Mo 薄膜電極上に酸化に強い Pt をスパッタすることによる Mo 電極の酸化防止効果についても考察をした。その結果として、次のような知見が見られた。

- (1) 障壁高さは加熱温度の上昇と共に高くなった。
- (2) 各加熱温度における電流密度 - 電圧特性の比較のグラフから、Pt 薄膜による Mo 電極の酸化防止効果を確認できた。
- (3) Pt/Mo/4H-SiC(0001) 試料では、酸化の影響は抑えられているので加熱温度の上昇にともなう障壁高さの増大は酸化以外の要因であることが考えられる。
- (4) Mo/4H-SiC(0001) 試料, Pt/Mo/4H-SiC(0001) 試料ともに界面反応が起きたと思われる変化がグラフ上に見られる。これより加熱温度によって障壁高さが増大したのは、加熱によって低温固相反応が促され、障壁高さが変化したものと思われる。

5.2. 今後の課題

Pt による酸化防止効果は確認できたが、電気抵抗

の変化の仕方は酸化防止前後で変わらなかった。これは、加熱温度の上昇に伴って障壁高さが増加しているのは、界面中間層が影響している可能性が高いため、その反応について検討する必要がある。これを調べるためには界面中間層がどのようなプロセスで形成され、それが障壁高さにどのような影響を与えうるのかを詳細に調査する必要があると考えられる。

また、本研究における 3 種類の試料では、どの試料でも障壁高さがショットキーモデルに従わずある範囲内に落ち着くという結果になった。参考までにこれまでの実験結果を用いて界面指数 S を算出すると、 $S \approx 0$ となったため、4H-SiC に関するショットキー障壁の形成がバーディーンモデルに従っているという可能性についての検討をするということも課題として挙げられる。

参考文献

- 1) 木本 恒暢, 高効率電力変換用 SiC パワーデバイス, 応用物理 Vol.80, pp.673-678 (2011) .
- 2) 松波 弘之, SiC パワー半導体開発の現状と課題, 次世代パワー半導体 NTS, pp.19 (2009) .
- 3) 國岡昭夫, 上村喜一, 新版基礎半導体工学, 朝倉書店, pp.111-118, pp.121, pp.126-128 (1985) .
- 4) S.Kurtin, T.C.McGill,and C.A.Mead, Phys.Rev. Lett.22, 1433 (1969) .
- 5) 岸野正剛, 半導体デバイスの物理, 丸善, pp.109-110 (1995) .
- 6) アスタミューゼ, 技術用語 | シリサイド (2011) .
- 7) 平木昭夫, 成沢忠, 表面・界面の分析と評価, オーム社, pp.4-6 (1994) .
- 8) 長谷川文夫, 吉川明彦, ワイドギャップ半導体 光・電子デバイス, 森北出版, pp.17-18, pp.34-35 (2006) .
- 9) Hossam Haick, David Cahen, Making contact: Connecting molecules electrically to the macroscopic world, Progress in Surface Science 83 (2008).