

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

進 藤 怜 史*・浅 野 清 光

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

Satoshi SHINDO* and Kiyomitsu ASANO

(平成22年11月25日受理)

Silicon Carbide (SiC) is the compound semiconductor showing 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 Mo thin films /SiC(0001) interfaces formed by RF magnetron sputtering method have been studied by measuring the I-V properties before and after annealing. The Mo/SiC(0001) interface before annealing showed the varistor properties. We calculated the ideal Schottky barrier heights by extrapolation from ideal factor and the Schottky barrier heights. The Schottky barrier heights of the Mo/SiC(0001) contacts indicated about 1.3eV before annealing, and about 1.4eV after 500°C annealing. These results are fundamental for improving the contact in future electronics based on wide-band-gap semiconductors such as SiC, GaN, and diamond.

1. 緒言

現在のパワーデバイスは、全てSiで作成され、これらはVLSI技術の微細加工を駆使して高性能化が図られてきた。しかし、今や、物性に起因するSiパワーデバイスの性能限界が見え、今後の飛躍的な発展は期待できないとされており、Siに取って代わる新材料として注目されているパワー半導体SiCへの期待は大きい¹⁾。

そのSiを超える物性値を有するSiCへの期待から、半導体各社で機器の電力消費抑制につながるSiC半導体の量産を数年内に本格化する動きがある。例えば、三菱電機は09年度から3年間で100億円をSiC半導体デバイス開発に投じ、そのモジュールを太陽光発電システム用パワーコンディショナーや鉄道車両、ハイブリッド車用インバーターなどに組み込む予定である。その三菱電機は09年にSiCパワー半導体を用いて電力損失をSi製に比べて9割低減できるインバーターの開発に成功している^{2) 3)}。

このようなSiC半導体デバイスを作成するために必要なプロセス技術には多くの要素技術がある。その中でもSiCへのオーミックコンタクト形成技術の重要性は極めて高い。数多くのSiCポリタイプの中で、現在最もデバイス応用に適していると考えられている4H-SiCの電子親和力は約3.6[eV]、禁制帯幅は3.26[eV]であるので、高濃度ドーピングを行わなければ、ほとんど全ての金属は高温熱処理を加えない限り、ショットキー接触となる。つまり、Siに比べてSiCではショットキー障壁の作成は容易であるが、オーム性接触を得るのは困難であると言える。よってSiC半導体へのオーミックコンタクト形成技術は現状の半導体プロセスにおいて強く待ち望まれている⁴⁾。

以上のような背景から、本研究では、オーミックコンタクト作成を目的として、RFマグネトロンスパッタ法を用いてn型4H-SiC(0001)面へMoナノ薄膜を作成した。そして、I-V法を用いてショットキー障壁 ϕ_B と理想因子nを算出し、Mo/4H-SiC(0001)面の接触界面の評価及び考察を行った。

* 秋田高専学生

2. 金属/半導体接触界面における現象

2.1 ショットキー障壁による整流現象

半導体と金属を接触させると金属/半導体接触界面にポテンシャル障壁 ϕ_B が生じ、整流現象が現れる。この障壁をショットキー (Schottky) バリアと呼ぶ。1940年に、Schottkyは ϕ_B を以下の関係で表わされると提案した⁵⁾。

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

ここで、 ϕ_M は金属の仕事関数で、 χ_S は半導体の電子親和力である。この式に依れば、障壁 ϕ_B はある種の半導体 (例えばSiC) への金属電極を任意に変更することで、その量を制御できる。しかし、代表的な半導体であるSiやGaAs, Geといった共有結合性の強い半導体は (1)式に依らない。

一方、1947年にBardeenは半導体表面にはダングリングボンド等のために、表面準位が存在し、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る結果、障壁 ϕ_B が生ずると考えた。つまり、 ϕ_B は金属の仕事関数に依存せず、半導体表面準位濃度のみによって決まるとするモデルである⁶⁾。

前者のモデルをショットキーモデル、後者をバーディーンモデルと呼ぶ。これらのモデルを実験結果から定量的に評価するために、普通、次式で定義される金属/半導体界面の界面定数Sが用いられる。

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

S=1の時、ショットキーモデルに対応し、ショットキー極限とも呼ばれている。また、S=0ならバーディーンモデルに対応し、バーディーン極限とも呼ばれている。

ここで、図1にショットキー極限とバーディーン極限の比較を示す⁵⁾。図1では ϕ_B が金属の電気陰性度 χ_M で整理されているが、金属の仕事関数 ϕ_M と金属の電気陰性度 χ_M は、 $\phi_M = \chi_M + \text{const.}$ のPauling-Gordyの関係があるからである。

図をみると、SiO₂は金属の種類を任意に変更する事で、障壁 ϕ_B が制御できているのが分かる。つまり、この半導体はショットキーモデルに従っていると言える。逆にSiに現る障壁は金属の種類に依らず、ほとんど一定であり、バーディーンモデルに従っている。

また、半導体のS値は比誘電率と深い関係があるとされている。この誘電率の大小はオーミックコンタクト等の金属/半導体界面で生ずる低温固相反応

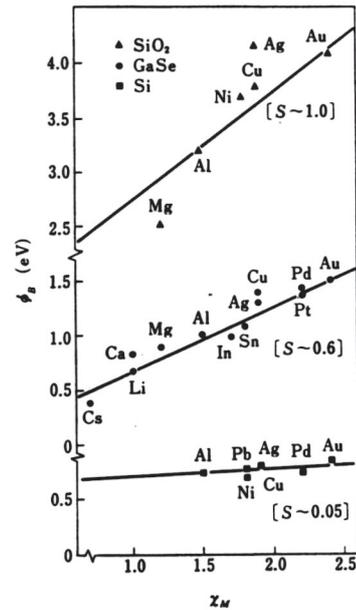


図1 種々の金属と各半導体間に認められるショットキー障壁と金属の電気陰性度の関係⁵⁾

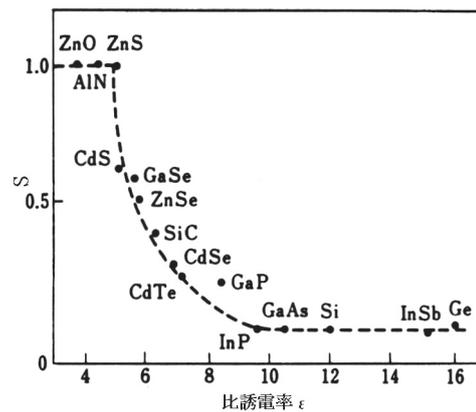


図2 種々の半導体の比誘電率とS値の関係⁵⁾

とも関係があると報告されている⁷⁾。

その関係を図2⁵⁾に示す。この図から、本研究で評価及び考察を行うSiCのS値は0.4程度と読み取れる。よって、図1におけるGaSeのようにショットキーモデルとバーディーンモデルの中間の振舞いをすると考えられる。従って、SiCの金属/半導体接触界面機構を考察する上では両モデルに対しての検討が必要である。

しかし、最近の研究では、4H-SiCの比誘電率は10程度と言われている⁸⁾。もしそうならば、図2と照らし合わせると、S値はSiと同程度になり、バーディーンモデルに従うはずである。この点も考察の際に考慮しなければならないだろう。

2.2 オーミックコンタクト形成について

前述のように金属/半導体接触では、形成機構が何であれ、ショットキー障壁によって整流作用が現れ、オーム性を示さない場合が多い。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なることである。

半導体デバイスから信号を正しく取り出すには、良質なオーミック電極が是非とも必要であるが、半導体と電極に使用する金属の関係はショットキー障壁が生じないとか、障壁高さ ϕ_B の値が小さいという条件が常に成立するわけではない。このような場合、金属と接触させる半導体の表面のみを高キャリア濃度にする事で、障壁高さの値が高いままでも、キャリアは図3に示すように、障壁をトンネル効果で通過できるようになる⁹⁾。

よって、オーム性電極の接触抵抗率を低減するためには、高濃度ドーピングを行ってショットキー障壁の空乏層幅を薄くし、トンネル電流を大きくする必要がある。n型SiCでは $10^{19}[\text{cm}^{-3}]$ 程度の高濃度ドーピングを行えば、熱処理無しでもオーミックコンタクトが得られる。しかしながら、デバイス作成に十分な低い接触抵抗率を得るために通常は900~1000[°C]の高温熱処理が施される。n型SiCに対する代表的なオーム性電極はNiであり、これと高濃度ドーピングの組み合わせによって $10^{-6}[\Omega \cdot \text{cm}]$ あるいはそれ以下の接触抵抗率が得られている⁴⁾。

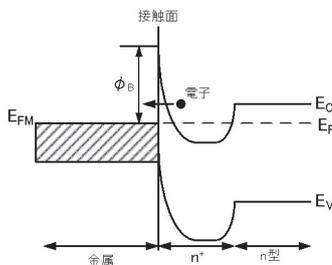


図3 トンネル効果によるオーミック接触⁹⁾

2.3 金属/半導体界面における低温固相反応¹⁰⁾

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を誘起する。この現象は低温固相反応と呼ばれる。この反応により、金属と半導体の界面で両者の合金層を形成するのだが、半導体デバイスの縮小化に伴って重大な問題として注目されるようになった。

alloy penetrationと呼ばれる有名な低温界面反応によるトラブルを図4に示す¹⁰⁾。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。Alの次にポピュラなコンタクト金属であるAuを用いた場合にも同じ現象が起きてしまう。

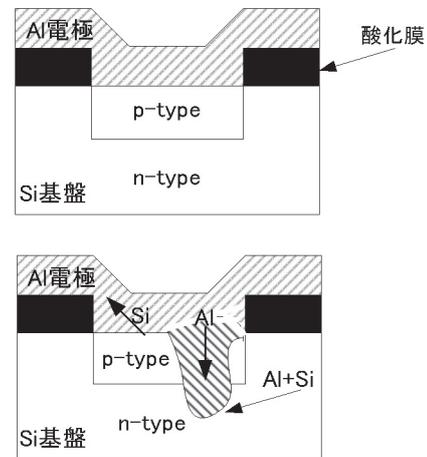


図4 バイポーラ素子にみられるAl(電極)/Si(基板)での低温界面反応による劣化現象¹⁰⁾

一方、SiがPd, Pt, Niなどシリサイドを作る金属と接触するとSiと合金層の界面は均一で平らとなる。200~400[°C]の温度範囲で生成されたこのようなシリサイドは、金属の性質をもち、電気的なコンタクトとして機能する。さらに、熱処理の温度や時間、最初の金属の厚さなどを適当に選択すると、望む種類、厚さの均一なシリサイド層を得られる。

エネルギーギャップ E_g が2.5[eV]以下、または比誘電率 ϵ が8以上の半導体は金属と接触すると例外なく低温反応を起こすと報告されている。

4H-SiCの比誘電率 ϵ の値は10程度であるので、この現象が起こる事が予想される。この低温固相反応による界面のシリサイド形成は、これから微細化してくるプロセスにおけるコンタクト作成において重要な事柄であるので、この点も実験結果を考察する際に考慮に入れねばならない。

3. 実験方法

3.1 RFマグネトロンスパッタ法による試料の作成

まず、2inch ϕ のn型4H-SiCウェハ基板に対して以下の手順で表面洗浄を行った。

- (1). DIW : 10min
- (2). HF-H₂O (1 : 20) : 1min
- (3). DIW : 5min
- (4). HCl-H₂O₂-H₂O (1 : 1 : 6) : 10min
- (5). DIW : 10min

その後、洗浄したSiCウェハ基板の(0001)Si面にRFマグネトロンスパッタ法により膜厚30[nm]程度のMoナノ薄膜を作成した。

図5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。ロータリポンプ、クライオポンプにより、チャンバー内を 1.33×10^{-6} [Pa]以下の高真空まで排気し、高純度Arガスを導入した。その後、RFパワー50[W]で、15分間でスパッタした。実験の際のスパッタ条件を表1に示す。

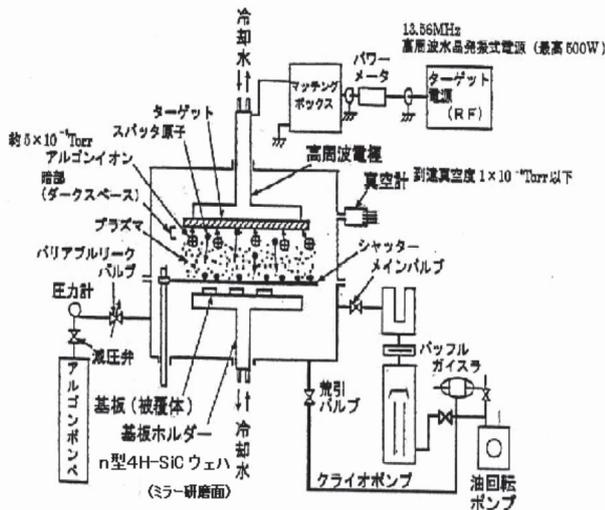


図5 RFマグネトロンスパッタ装置の概略図

表1 スパッタ条件

RFパワー[W]	50
Ar圧力[Pa]	0.665
ターゲット距離[cm]	4
Ar流量[ml/min]	15.5
スパッタ時間[min]	15

3.2 電気的特性による評価

作成した試料は、数十[mm²]の大きさに分割し、I-V特性を測定して、理想因子n、ショットキー障壁 ϕ_B を算出した。実験時の試料の測定条件を以下に示す。

- (1). SiC試料の(000 $\bar{1}$)C面とMo面に対してCu電極を接触させ、I-V特性を測定した。
- (2). SiC試料の(000 $\bar{1}$)C面に電極としてInGaを塗布し、(1)と同様の測定した。また、銀ペーストも同様に(000 $\bar{1}$)C面の電極として処理し、測定を行った。
- (3). SiC試料を電気炉で150, 300, 500[°C]加熱し、(2)のようにInGaを(000 $\bar{1}$)C面に塗布して、同様

の測定した。

加熱方法はPID制御を用いて、60[min]で目標値まで温度を上げ、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た後に測定した。

次にn、 ϕ_B の算出法¹¹⁾について以下に述べる。

一般的にSchottky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輸送機構で説明される単純な場合は、ショットキー接触の順方向電流密度J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。しかし、 $V \gg kT/q$ であるときは、指数項が1よりも非常に大きいことから、近似で以下になる。

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

また、障壁の上だけでなく、障壁内部をトンネリングなどにより通過する場合には電圧が低くても電流が流れてしまい、上式に当てはまらなくなるので、

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

と書き直す。ここでnは理想因子である。n=1ならば、熱拡散輸送電流のみの理想状態であり、nの値が大きければ、何らかの別の電流が流れている事になる。また、 J_0 は、

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

と表せる。 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^* は次式で表される。

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

m_e^* 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_e^* を $0.3m_0$ (m_0 は電子の静止質量)とし、 A^* を 3.60×10^5 [Am⁻²K⁻²]とする¹²⁾。そして、両辺の常用対数をとると、

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

と書き表せる。よって、(8)式の傾きをグラフ上から求めると、

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

(9)式からn値が求められる。

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

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。また、(11)式の J_0 は(8)式のグラフを $V = 0$ で外挿する事で求めた。

4. 実験結果と考察

(1). 試料の(000 $\bar{1}$)C面とMo面に対してCu電極を接触させ、I-V特性を測定した時の電圧-電流密度特性を図6に示す。電圧の正方向つまり順バイアスの向きは、Mo面を高電位、(000 $\bar{1}$)C面を低電位とし、以後の実験もそれに準拠する。この実験では面積の異なる3つの試料に対してI-V特性を測定した。図6から、逆方向の電流は良く流れ、順方向電流はほとんど流れていない。この理由を説明するために図7、図8のようなモデルを示す。

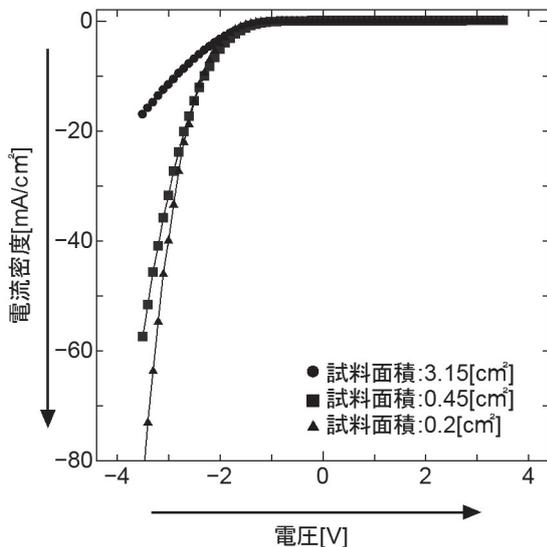


図6 非加熱Mo/4H-SiC-電圧-電流密度特性

図7より、順バイアス時に電流がほとんど流れなかった理由が説明できる。試料に対して順バイアスを印加すると、図のように2つの金属/半導体接触

すなわちCu/SiC, Mo/SiCに対して逆バイアス、順バイアスが印加されていると考えられる。つまり、図7に示されるダイオード接続のような関係となっており、逆バイアスの特性が現るはずである。よって、試料への順バイアスに対してほとんど電流が流れない現象を説明できると考えられる。

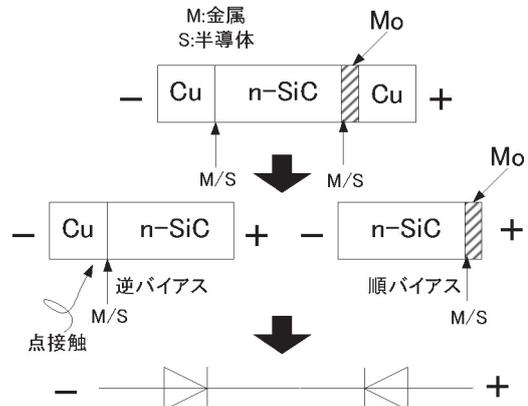


図7 Mo/4H-SiCの順バイアス時のモデル

このモデルからすると、試料に対していずれのバイアス電圧に対しても逆方向特性に依存するのだから、逆バイアスの時も電流はほとんど流れないはずである。しかし、実際の結果は異なり、逆方向に電流は良く流れてしまう。それを説明しているのが図8である。つまり、何が起きているのかということ、Mo/SiC界面でトンネル効果が起こり、金属/半導体界面で整流現象を生ずる障壁を通り抜け、その結果、逆バイアス時に電流が良く流れたと考えられる。しかし、順バイアス時にはトンネル電流は流れなかった。これは点接触であったがために、金属/半導体界面の接触面積が小さく、密着性も良好で無かったために、トンネル効果が起こらなかったのではないと思われる。

(2). 先程の実験結果からも分かる通り、(000 $\bar{1}$)C面/Cuは点接触であるために電流は流れなかった。そこで、試料の(000 $\bar{1}$)C面に電極としてInGaを塗布し、(1)と同様の測定した。また、銀ペーストも同様に(000 $\bar{1}$)C面の電極として処理し、測定を行った。図9にその結果を示す。

図9から分かる事は、(000 $\bar{1}$)C面に電極処理を施す事で、順方向電流、逆方向電流がより流れるようになるという事である。これは、Cu/(000 $\bar{1}$)C面の点接触から、銀ペーストやInGa塗布処理をする事で、金属/半導体間の接触面積が増し、接触抵抗が低下したためだと考えられる。

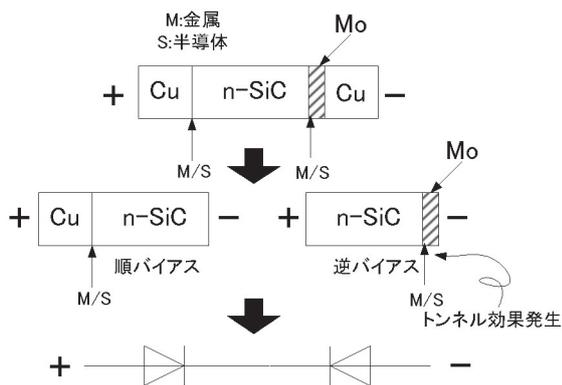


図8 Mo/4H-SiCの逆バイアス時のモデル

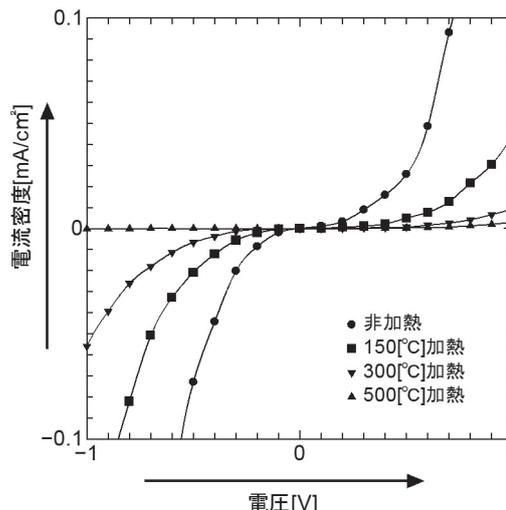


図10 加熱と非加熱の場合を比較したMo/4H-SiC-電圧-電流密度特性。(0001)C面にはInGa塗布)

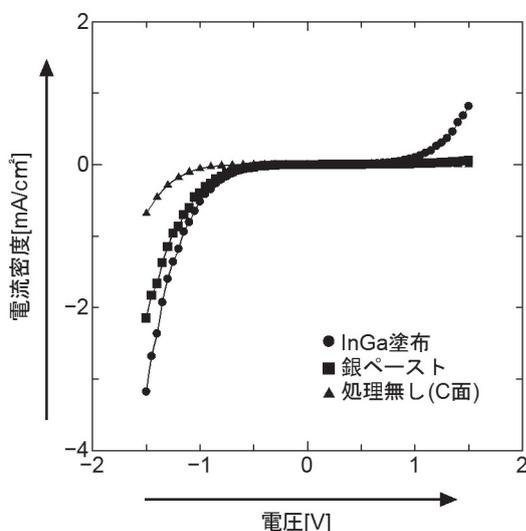


図9 非加熱Mo/4H-SiC-電圧-電流密度特性. SiC(0001)C面への電極処理の違いを示す

また、銀ペーストとInGaを比較すると、InGa塗布時の方が両方向に良く流れ、整流性とオーム性の中間の性質であるバリスタ特性になってきている。これらの事実から、(0001)C面への良好な電極を作成する事でオーミック性に近づくと考えられる。

(3). 半導体へ電極を作成後に、加熱処理を施す事で低温固相反応が進み、接触界面が良好になり、特性が改善される場合がある。また、逆に特性が劣化する場合もある。

そこで、試料を電気炉で150, 300, 500[°C]加熱し、(2)のようにInGaをC面に塗布して、I-V測定を行った。その結果を図10に示す。

図10を見てみると、加熱温度が高くなるにつれて、電流が流れにくくなっているのが分かる。このことから、何らかの原因で試料の電气的抵抗が大きくなっているという事が考えられる。この原因として

は、まず試料を空気雰囲気中で加熱したためにMoに酸化膜が生じて、Mo/Cuにおける接触抵抗が増加した事が要因の一つとして考えられる。この問題点はAr雰囲気中で加熱をするかあるいはMo薄膜上にPtのような金属をスパッタして金属の酸化を防ぐ事で解決できる。

次なる要因としては、金属/半導体接触界面が低温固相反応により、合金化し、障壁の大きさが変化した可能性がある。よって、I-V法より得られた各データからn値、障壁 ϕ_B を算出し¹³⁾、その関係を図11に示す。

図11で各点は直線あるいは曲線上に分布しているので、各線を $n = 1$ で外挿した値が熱拡散電流輸送機構に従った理想障壁高さ ϕ_B となる¹³⁾。図11から、加熱温度が高くなると、障壁高さは大きくなり、各点の分布も直線に近づくという事が読み取れる。そして、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という報告がある¹⁴⁾。この事から、試料が加熱された事によって障壁高さが増え、コンタクト抵抗率が大きくなったために図10のような実験結果になつとも考えられる。

最後にMo/SiC界面に生じた障壁高さ ϕ_B について検討する。図11より、ショットキー障壁高さ ϕ_B は加熱温度にも依るが、1.3~1.4[eV]の範囲になっている。一方、Y/SiC, Cu/SiC, Ni/SiCに生ずる障壁高さは表2のような範囲を取ると報告されている¹⁵⁾。

表2をみると、金属/SiC界面の障壁高さは金属の種類が変えても、ある一定の範囲で固定されてい

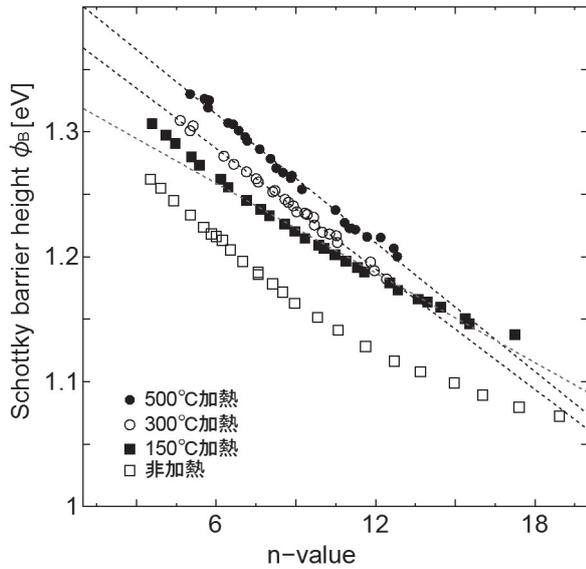


図11 加熱温度の違いによる理想因子nとショットキー障壁 ϕ_B の関係

表2 金属/SiC接触界面に生ずる障壁 ϕ_B ¹⁵⁾

試料	ショットキー障壁高さ[eV]
Y/SiC	0.58~0.85
Cu/SiC	0.48~0.74
Ni/SiC	0.48~0.69

る。そして、本研究で算出されたMo/SiC界面の障壁高さはこの範囲から大きく外れている。障壁形成機構がバーディーンモデルに従うのであれば、表面上のダングリングボンドなどの影響で金属/半導体界面のフェルミ準位が禁制帯中にピンングされ、金属の種類を変えても一定の障壁高さになるはずである。

何故このような違いが生まれたのかはSiCウエハの表面洗浄の有無にある。Y, Cu, Ni薄膜をSiCへスパッタする前には購入したSiCウエハの表面洗浄を行っていない。つまり、ウエハ表面が汚染された状態であったため、表面準位が多く形成され、フェルミ準位のピンングが起こり、バーディーンモデルのような障壁形成となった。今回の実験ではスパッタ直前に表面洗浄を行った事によって、表面がクリーンな状態となり、理想表面に洗浄前と比べて近づいたため、ピンングが弱まり、バーディーン極限からショットキー極限に近づいたと考えられる。

また、同様にn値と障壁 ϕ_B の関係から、(000 $\bar{1}$)C面への銀ペースト時、InGa塗布時の各ショットキー障壁の高さの比較を行った。その比較を図12に示

す。

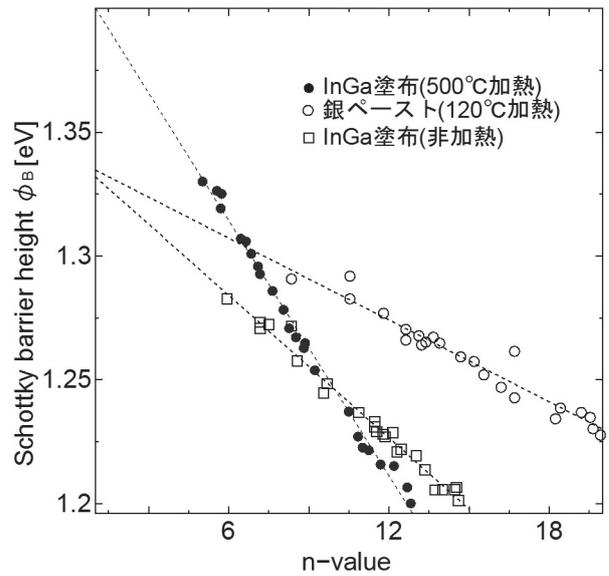


図12 C面(000 $\bar{1}$)への電極金属の違いにおける理想因子nとショットキー障壁 ϕ_B の関係

図12から、銀ペースト時とInGa塗布時では、n値が高い時つまり漏れ電流による誤差が存在する時には、異なる障壁高さとなっている。しかし、n=1の時（漏れ電流による誤差が無い時）には障壁高さ（外挿した値）は一致している。この事から分かる事は、(000 $\bar{1}$)C面への電極を変えても、Mo/SiCに形成される障壁高さは $n \cdot \phi_B$ 外挿法¹³⁾を用いる事で、同程度の値を算出できるという事である。

もう一つ言える事は、銀ペースト時、InGa塗布時におけるn- ϕ_B の関係のデータのばらつきである。図12より、InGa塗布時に比べて銀ペースト時のデータのばらつきが大きいのが分かる。この事から、InGa塗布の方が銀ペーストに比べて(000 $\bar{1}$)C面の電極として優良であるといえる。

5. 結言

本研究では、オーミックコンタクト開発を目的として、RFマグネトロンスパッタ法により、Mo薄膜をn型4H-SiC(0001)Si面へ作成し、I-V法を用いて、理想因子n、ショットキー障壁 ϕ_B を算出し、その金属/半導体接触界面について評価及び考察を行った。その結果として次のような知見が得られた。

- 1) 本研究で作成したMo/4H-SiC(0001)Si面のショットキー障壁 ϕ_B は1.3~1.4[eV]であり、その界

面でトンネル電流等の漏れ電流が生じる事で劣化した整流性が見られた。よってこの現象を多く起こす事で、金属/半導体接触の特性がオーミック性に近づくだらうと考えられる。

2) 4H-SiC(000 $\bar{1}$)C面にInGa塗布、銀ペースト処理を行う事で、逆方向電流が良好に流れるようになった。この結果から、4H-SiC(0001)Si面、(000 $\bar{1}$)C面に対して適当な金属を選択し、蒸着する事で優良なオーミックコンタクトを作成できる可能性がある事が分かった。

3) 4H-SiC(000 $\bar{1}$)C面にInGa塗布した事で見られたバリスタ特性は、2つの金属/半導体接触による逆方向依存性とそれら界面で生ずる漏れ電流のためであると考えられる。

4) Mo/4H-SiC(0001)Si面のショットキー障壁 ϕ_B は加熱処理により、 $n-\phi_B$ のばらつきが少なくなり、その $n=1$ での外挿した障壁高さは加熱前に比べ、大きくなった。これはMoの酸化により障壁高さが増え、加熱による金属/半導体界面での安定なシリサイド形成によって、データのばらつきが小さくなったと考えられる。

5) Mo/4H-SiC(0001)Si面のショットキー障壁 ϕ_B は、4H-SiC(000 $\bar{1}$)C面の電極に依らずに、 $n-\phi_B$ 外挿法を用いる事で、算出できるという事が分かった。

6) 4H-SiC基板ウェハを表面洗浄直後に、Mo/4H-SiC(0001)Si面を作成したため、購入したウェハのままの実験に比べ、障壁形成機構がショットキー極限に近づいた。

参考文献

- 1) 松波弘之, 次世代パワー半導体, エヌ・ティー・エス, (2009), p.19.
- 2) 日刊工業新聞社, 2010年1月13日.
- 3) 日刊工業新聞社, 2010年8月11日.
- 4) 木本恒暢, SiCプロセス技術, 応用物理 Vol.74, p.374, (2005).
- 5) 青野正和, 八木克道, 他, 表面物性工学ハンドブック, 丸善, (1987), pp.334-336.
- 6) 小出康夫, 村上正紀, 金属/半導体および半導体/半導体接合界面におけるエネルギー障壁, まてりあ, Vol.35, No.5, pp.502-503, (1996).
- 7) 平木昭夫, 小林啓介, 半導体/金属・界面形成の初期過程—Si-Au, Pd, Ni系を中心として—, 固体物理, Vol.18, No.4, pp.183-185, (1983).
- 8) 松波弘之, 半導体SiC技術と応用, 日刊工業新聞社, (2003), p.10.
- 9) 岸野正剛, 半導体デバイスの物理, 丸善, (1995), pp.109-110.
- 10) 平木昭夫, 成沢 忠, 表面・界面の分析と評価, オーム社, (1994), pp.4-6.
- 11) 國岡昭夫, 上村喜一, 新版基礎半導体工学, 朝倉書店, (1985), p.111-118, 121, 126-128.
- 12) 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, (2006), p.24.
- 13) 原 史郎, 金属/6H-SiC界面で見い出されたショットキーリミットと電荷中性点, 表面科学, Vol.21, No.12, pp.791-799, (2000).
- 14) 財満鎮明, 安田幸夫, 高融点金属/Si界面の電気的特性と結晶構造, まてりあ, Vol.33, No.6, pp.691-696, (1994).
- 15) 斉藤晃一, 浅野清光, 秋田工業高等専門学校研究紀要, 45, p.71, (2010).

- 1) 松波弘之, 次世代パワー半導体, エヌ・ティー・