

# 電気的特性による Mo, Pt/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 and Pt/4H-SiC(0001) Contacts by Electrical Measurements

Satoshi SHINDO\* and Kiyomitsu ASANO

(平成23年11月25日受理)

Metal/SiC interfaces play very important roles in many high-performance devices in optoelectronic, high-temperature, high-frequency, and power applications. The formation of conventional Ohmic contacts is required to have lower resistance and stable interface at high temperature, but it is difficult to gain such contact on the SiC surface. Therefore, Mo/4H-SiC(0001) and Pt/4H-SiC(0001) interfaces annealed up to 500°C have been studied by barrier-height and ideal-factor measurements using forward I-V characteristics. We calculated ideal barrier heights by extrapolation from these ideal factors and these barrier heights. These ideal barrier heights varied with annealing temperature, but the behavior for Mo interfaces was quite different from Pt interfaces. These results indicated that Mo/4H-SiC(0001) interfaces annealed up to 500°C were mainly native Mo oxides and Pt/4H-SiC(0001) interfaces were mainly Pt silicides; this is attributed to the difference between refractory metals (Mo) and near-noble metals (Pt).

### 1. 緒 言

現在、ハイブリッド車・電気自動車、電車、家電、産業用機器、変電所等において多くの電力変換装置が使われており、それを構成するパワーデバイスには幾つもの要求がある。変換における高効率率は当然ながら、高温動作時の安定性、広い電圧領域での安定動作、高絶縁耐圧性、長期信頼性が求められている<sup>1)</sup>。例えば、ハイブリッド車に用いられる半導体デバイスは、自動車環境下で長期安定に動作する必要がある。インバータの小型化や低コスト化のための冷却装置の改善により、デバイス動作温度は200°C以上が必要とされ、デバイス特性として温度変動が少ない事が望まれている<sup>2)</sup>。しかし、従来のパワーデバイス材料Siは、最高動作温度が150~200°Cに制限されており、その物性に起因する性能限界が見え始め、今後の飛躍的な発展は容易ではない。そこで新規パワー半導体材料SiCが注目されている。

SiCはパワーデバイス材料として注目されてお

り、Cu並みの高い熱伝導率、従来のSiに比較して10倍の絶縁破壊電界、2倍の電子の飽和ドリフト速度を持つ。さらに、広禁制帯幅半導体では例外的にp, n両伝導型の広範囲価電子制御が容易で、Siと同様の熱酸化により良質の絶縁膜(SiO<sub>2</sub>)を形成でき、導電性ウエハ、絶縁性ウエハが市販されている<sup>1,3)</sup>。SiCには数多くのポリタイプが存在し、最もデバイス応用に適しているのは、六方晶で単位格子が4層のSi-C層からなる4H型(4H-SiC)である。この理由として、電子移動度、禁制帯幅や絶縁破壊強度が大きいこと、電気伝導の異方性が小さいことドナーやアクセプタ準位が比較的浅いこと、良質の単結晶ウエハが入手できることなどが挙げられる。

SiCデバイスは、理論的には800°C以上の温度でもデバイス動作は可能であり、実際、650°CでSiC MOS FETの動作を確認した報告や、300°C~350°C動作のSiC MOS集積回路実現の報告もある<sup>3)</sup>。しかし、デバイスそのものは高温環境でも動作することが実証されているが、絶縁膜、金属、保護膜といったデバイス構成材料に対しても高温状態での長期安定性を保証する必要がある。そのような中で、半導体の電極技術、つまり金属/半導体接触の問題は、

\* 秋田高専専攻科学生

本質的なものである。

## 2. パワー半導体における電極の問題

パワー半導体の電極は、高温環境においても、安定で再現性のある電気的性質を発揮しなければならない。しかし、多くの金属/半導体接触界面では、金属、半導体の融点より遙かに低い室温～400℃での温度で、界面形成物を伴う反応や原子拡散現象を起こすので、容易にその電気的特性は変化する。金属/Si界面で、この現象は多く調べられている。そのSiとの界面反応はMoのような高融点金属とPtのような準貴金属では大きく異なる。高融点金属に比べ、準貴金属は比較的低い温度で界面反応を生じ、2種類以上の形成物を作る。一方、高融点金属では、界面形成物の反応は500～700℃で1種類だけ生じる事が知られている<sup>4)</sup>。

この界面反応は、比誘電率が8以上もしくは禁制帯幅が2.5eV以下の半導体で生じると言われている<sup>5)</sup>。この条件は、障壁高さ(SBH: Schottky barrier height)が金属の仕事関数に依らないBardeen limitになりやすい半導体(共有結合性半導体)の条件と一致している。つまり、金属と低温で界面反応する半導体は、Bardeen limitに近づきやすい<sup>5)</sup>。4H-SiCは12%のイオン結合を有する共有結合性半導体であり、比誘電率<sup>3)</sup>は9.7( $\perp c$ )、10.2( $//c$ )であるため、先に述べた条件にも一致することから、低温での界面反応を考慮する必要がある。4H-SiCはパワーデバイスとして高温動作を念頭に置かれているので、200℃以上温度雰囲気での界面反応による電気的特性の変化の動向を探る事は、信頼性を確保するためにも重要である。

また、もう1つのSiC電極形成の問題として、オーミックコンタクト形成がある。4H-SiCの電子親和力は約3.6eV、禁制帯幅は3.26eVであるので、高濃度ドーピングを加えない限り、整流性コンタクトとなる。つまり、Siに比べSiCはオーミックコンタクトを得るのが困難である。実用的な低接触抵抗率のオーミックコンタクトの作成は、高濃度ドーピング後に900℃～1000℃の高温熱処理が施される。しかし、熱処理による界面でのシリサイド形成や、界面ラフネスの増大とオーム性接触との微視的なメカニズムは明らかになっていない<sup>6)</sup>。

## 3. オーミックコンタクト形成技術

半導体素子への低抵抗オーミックコンタクトを

形成する手法として、広く用いられているのが Post Deposition Annealing(PDA)法である。この手法では、図1<sup>7)</sup>に示すように、コンタクト領域上に蒸着法やスパッタ法で金属層を蒸着し、熱処理を加えることによって、金属と半導体基板に前述した界面反応を促し、界面反応層を形成する。PDA処理で形成されたコンタクトは、低いSBH層、不純物の偏析効果を利用して半導体側に高キャリア濃度層が形成可能、熱的に安定なコンタクトが形成可能、化学反応によって自然酸化膜等の高抵抗な界面誘電体層を除去できる等の長所がある。一方で、SiCデバイスへのPDA処理の問題点として、化学的に安定なSiCとの反応促進に高温の熱処理が必要、金属元素に対するSi及びCの化学反応性の差異によって、高抵抗の要因となるCが析出する可能性がある、低抵抗コンタクト形成には材料の選定が重要、界面反応層の膜厚制御が困難等の問題がある<sup>7)</sup>。

本研究では、4H-SiCへの金属電極として高融点金属Moと準貴金属Ptを選択し、PDA処理を施した。これは低温での界面反応を利用して、低いSBHを得る事で、低接触抵抗率のオーミックコンタクトを低温プロセスで実現する事を目的としている。

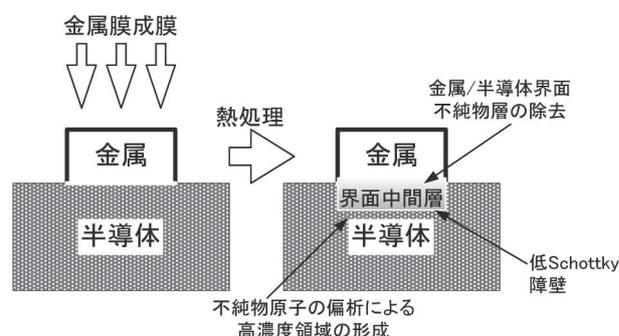


図1 PDA法によるオーミックコンタクト作成工程<sup>7)</sup>

## 4. 金属/半導体接触

オーミックコンタクトの特性を左右する障壁高さ $\phi_B$ はSchottkyによると<sup>8)</sup>、

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

と表わされる。ここで、 $\phi_M$ は金属の仕事関数、 $\chi_S$ は半導体の電子親和力であり、この(1)式はn型半導体の場合である。この式から、半導体が同一であるなら、SBHは金属の仕事関数に依存する事

が分かる。Moの仕事関数は4.6eVであり、Ptの仕事関数は5.65eVである事から<sup>9)</sup>、各障壁高さはSchottky modelによると、Moの場合に1.0eV、Ptの場合に2.05eVになる。しかし、前に述べたように、SiCのような共有結合性半導体はSBHが金属の仕事関数に殆ど依らないBardeen障壁を形成する傾向がある。これら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<sup>10)</sup>。

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

S=1の時、(1)式に対応し、Schottky limitと呼ばれている。また、S=0なら金属の仕事関数に依存しない障壁高さであるBardeen limitと呼ばれる。

よって本研究においてMo、Pt/4H-SiC(0001)の各SBHを比較する事で、4H-SiCのS値が算出できる。このS値は金属電極材料により4H-SiCのSBHがどの程度変化するかを指標になる。

また、PDA処理後のSBHの評価は極めて重要である。例えば、Y/Si(111)において、300℃を超える加熱処理で界面にイットリウムシリサイドが形成され、障壁高さが低下するという報告がある<sup>11)</sup>。よって、Mo/4H-SiC(0001)あるいはPt/4H-SiC(0001)のPDA処理前後のSBHの変化を評価し、SBHが最も低くなる加熱温度を検討する事は、低接触抵抗率を有するオーミックコンタクトを開発する礎になり、加熱温度による電気的特性の変化を考察する事は、SiCの電極の高温雰囲気での信頼性の研究に繋がる。

そこで本研究では、SiCパワーデバイスへの応用を目的として、低接触抵抗率のオーミック電極開発のため、Mo、Pt/4H-SiC(0001)Si面接触試料をRFマグネトロンスパッタ法で作成し、PDA処理前後のI-V特性から理想因子、障壁高さを算出し、ショットキー障壁形成機構の考察を行ったので報告する。

## 5. 実験方法

厚さ約340μm、抵抗率約0.045Ω・cmで2inchφの窒素ドーピングn型4H-SiCウェハ基板、純度99.5%のMo、純度99.99%のPtターゲットを用いた。まず、4H-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30nm程度のMoナノ薄膜を形成し、Mo/4H-SiC(0001)試料を作成した。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<sup>-6</sup> Pa以下の超高真空まで排気し、高純度

Arガスを導入し、RFパワー50Wで、15分間でスパッタした。実験時のスパッタ条件を表1に示す。Pt/4H-SiC(0001)試料の作成も同様の手順で行った。なお、スパッタ前に半導体洗浄液セミコクリン23による表面洗浄を各4H-SiCウェハ基板に対して行った。

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

次に、作成した各試料を0.5~1.5cm<sup>2</sup>の大きさに分割し、幾つかの試料に対してPDA処理(試料への加熱処理)を行い、室温まで試料を炉冷した後、4H-SiC(0001)C面への電極としてInGaを塗布し、それらのI-V特性を測定した。その結果から理想因子n、障壁高さφ<sub>B</sub>の算出を行った。PDA処理は、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、炉冷する方法を取った。

次にn、φ<sub>B</sub>の算出法<sup>12)</sup>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電子放出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<sub>0</sub>は逆方向電流密度である。しかし、V ≫ 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、近似で以下のようになる。

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

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の値が大きいならば、何らかの別の電流が流れている事になる。また、J<sub>0</sub>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<sub>e</sub><sup>\*</sup> 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<sub>e</sub><sup>\*</sup> を 0.3m<sub>0</sub> (m<sub>0</sub> は電子の静止質量) とし<sup>13)</sup>、A\* を 3.60 × 10<sup>5</sup> [Am<sup>-2</sup>K<sup>-2</sup>] とする。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。

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

また、ショットキー障壁高さ φ<sub>B</sub> 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<sub>0</sub> は (8) 式のグラフを V = 0 で外挿する事で求めた。

## 6. 実験結果

### 6.1 Pt/4H-SiC(0001) 試料

Pt/4H-SiC(0001) 試料の各処理温度での J-V 特性を図 2 に示す。図より、非加熱、150℃、300℃、500℃ 加熱試料の J-V 特性はバリスタ特性となり、加熱温度の変化と共に特性が複雑に変化していることが分かる。順バイアスでは 500℃ 加熱試料、逆バイアスでは 150℃ 加熱試料の電気伝導性が良くなっている。

図 3 に図 2 の J-V 特性より求めた Pt/4H-SiC(0001) 接触試料の n-φ<sub>B</sub> の相関関係を示す。図 3 では各点が直線あるいは曲線上に分布していることから、n = 1 で外挿した値が熱電子放出機構に従った理想障壁高さとなる<sup>14)</sup>。図 3 において n = 1 で外挿した各処理温度における理想障壁高さを表 2 に示

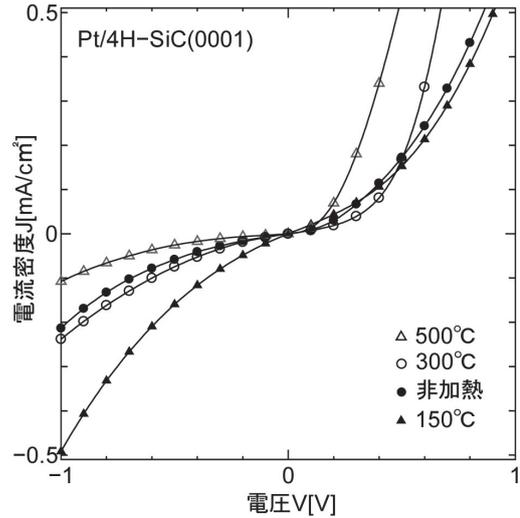


図 2 Pt/4H-SiC(0001) の PDA 処理前後の J-V 特性

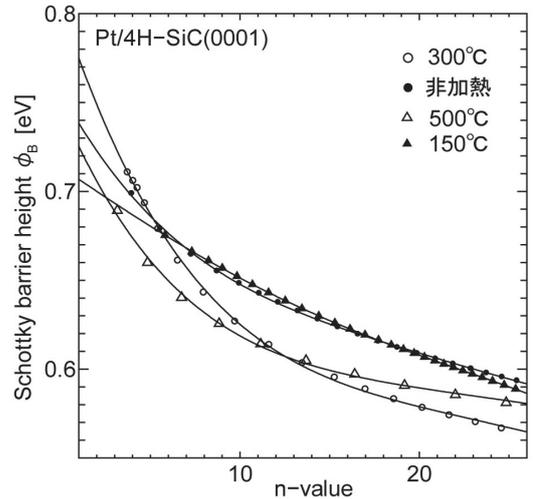


図 3 Pt/4H-SiC(0001) の PDA 処理前後の n-φ<sub>B</sub>

す。表 2 から、加熱処理によって理想障壁高さが変化している事が分かる。また、150℃ と 300℃ では n-φ<sub>B</sub> 関数の大きな変化が見られた。

### 6.2 Mo/4H-SiC(0001) 試料

Mo/4H-SiC(0001) 試料の各処理温度での J-V 特性を図 4 に示す。図より、非加熱時に最も電気伝導性が良く、加熱温度の増加と共に悪くなっている事が分かる。また 500℃ 加熱試料においては、測定箇所によって、測定値が変動し再現性のあるデータが得られなかったが、概ね、図 4 のように非加熱 ~ 300℃ と比較して電流が流れにくい結果となった。また、試料表面は加熱温度の増加と共に変化し、300℃ で金色、500℃ で透明となった。

表 2 各処理温度におけるPt/4H-SiC(0001)界面の理想障壁高さ

処理温度 [°C]	理想障壁高さ $\phi_B$ [eV]
非加熱	0.74
150	0.71
300	0.77
500	0.72

表 3 各処理温度におけるMo/4H-SiC(0001)界面の理想障壁高さ

処理温度 [°C]	理想障壁高さ $\phi_B$ [eV]
非加熱	0.69
150	0.73
300	0.75
500	0.87

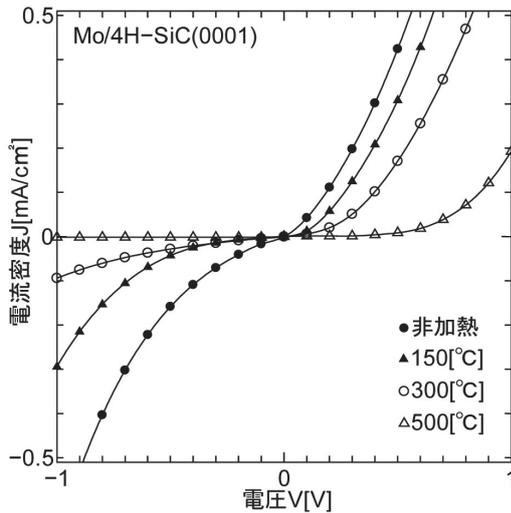


図 4 Mo/4H-SiC(0001)のPDA処理前後のJ-V特性

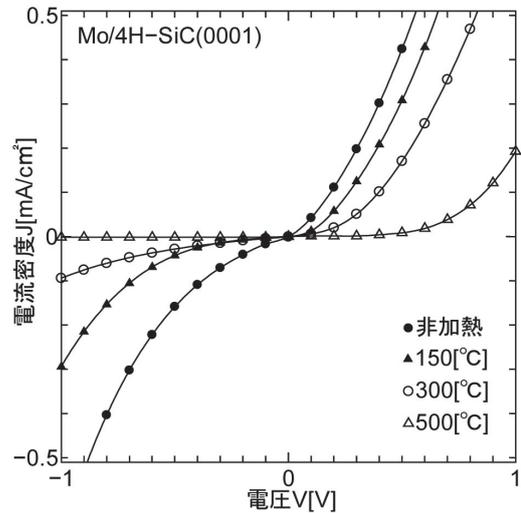


図 5 Mo/4H-SiC(0001)のPDA処理前後のn- $\phi_B$

図5に図4のJ-V特性より求めたMo/4H-SiC(0001)接触試料の $n\text{-}\phi_B$ の相関関係を示す。また、Ptの場合と同様に、各処理温度における理想障壁高さを表3に示す。

表3より、Mo/4H-SiC(0001)界面の理想障壁高さは、処理温度と共に増加する事が分かる。Pt/4H-SiC(0001)試料のように、150°Cと300°Cで $n\text{-}\phi_B$ 関数の大きな変化が見られなかった。また、500°C加熱試料の理想障壁高さでばらつきが見られた(図中のMo/4H-SiC(0001)試料の理想障壁高さは、ばらつきの中で最も低い値にした)。

## 7. 考察

### 7.1 Pt/Mo/4H-SiC(0001)試料

Mo/4H-SiC(0001)の500°C加熱による再現性の問題を解決するため、Pt/Mo/4H-SiC(0001)試料を作成した。Mo/4H-SiC(0001)試料を同様の方法で作成した後、Ptも同様のスパッタ条件で製膜した。その後、PDA処理を行い、炉冷後、500°C加熱時の電気的特性を評価した。Pt/Mo/4H-SiC(0001)500°C加熱試料とMo/4H-SiC(0001)500°C加熱試料のJ-V特性を図6に、 $n\text{-}\phi_B$ の相関関係を図7に示す。

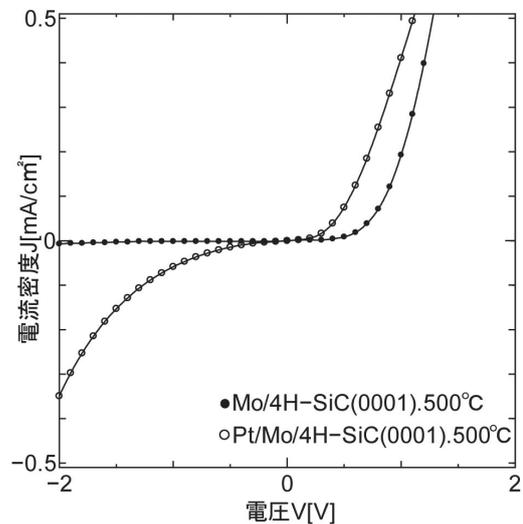


図 6 Pt/Mo/4H-SiC(0001)とMo/4H-SiC(0001)のPDA処理温度500°C時のJ-V特性の比較

まず、500°C加熱時のPt/Mo/4H-SiC(0001)試料において、I-V特性の再現性が得られた。また、図6から、Mo/4H-SiC(0001)試料の整流特性から、Pt/Mo/4H-SiC(0001)試料のバリスタ特性に変化している事が分かる。さらに、図7より、理想障壁高

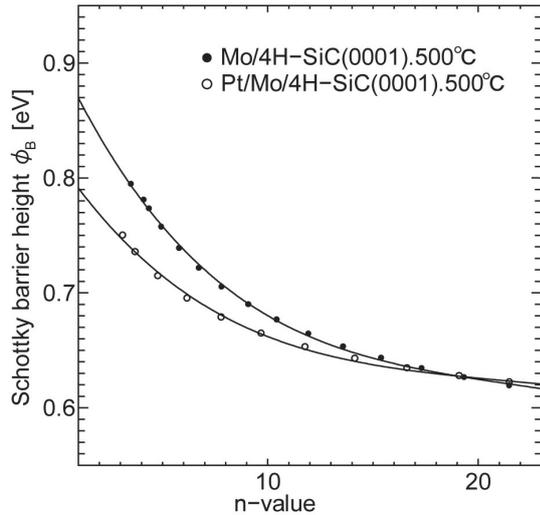


図7 Pt/Mo/4H-SiC(0001)とMo/4H-SiC(0001)のPDA処理温度500°C時のn- $\phi_B$ の比較

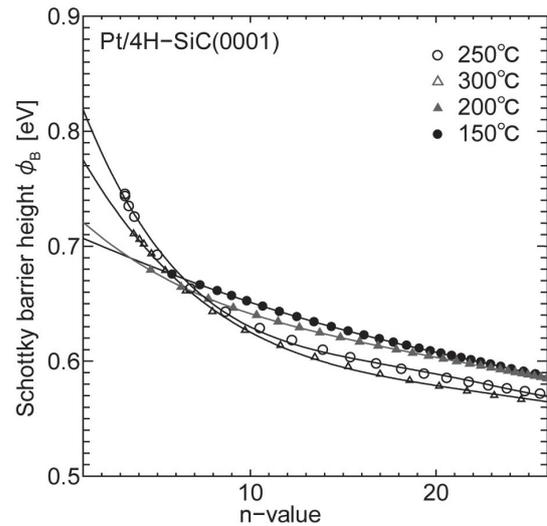


図8 PDA処理温度がPt/Si(111)でのシリサイド相変態温度付近のPt/4H-SiC(0001)のn- $\phi_B$

さの値は低い値になっている。Moは空気雰囲気中、約500°Cで、酸化が急激に進行する事から<sup>15)</sup>、Mo上のPtスパッタによってMoの酸化が妨げられたのが、この電気的特性の変化の原因と考えられる。

また、Ptの有無で障壁高さが変化した事から、界面相はPtの有無で異なると考えられる。Mo/4H-SiC(0001)試料では、500°C加熱試料が透明になり、試料表面(Mo電極形成側)から4H-SiC基板が見えていた事から、Mo薄膜は表面だけでなく、バルク中も酸化している事が推察できる。よって、500°C加熱時のMo/4H-SiC(0001)試料の界面相はMo酸化物である可能性が高く、それが原因で再現性が得られなかったと考えられる。一方、Pt/Mo/4H-SiC(0001)試料は表面のPt薄膜により、Moの酸化が妨げられるので、界面相はMoあるいは4H-SiCとの界面形成物であるシリサイドであると考えられる。

## 7.2 Pt/4H-SiC(0001)のn- $\phi_B$ の関数の変化

図3において、Pt/4H-SiC(0001)の150°Cと300°C加熱試料でn- $\phi_B$ 関数の大きな変化が見られた。そこでPt/4H-SiC(0001)の150, 200, 250, 300°C加熱試料を用意し、そのI-V特性から各n- $\phi_B$ 関数を求めた。その結果を図8に示す。図8から200°Cから250°Cの間に関数の大きな変化があるのが分かる。これはPt/Si(111)の界面相がPt<sub>2</sub>SiからPtSiへ相変態する温度付近である<sup>4,16)</sup>。そして、加熱温度によって理想障壁高さが変化している事から、界面相が相変態している事は明らかである。よって、この結果は関数の変化から界面における相変態の温度が特定

できる可能性を示している。

## 7.3 Mo/4H-SiC(0001)のn- $\phi_B$ の関数の変化

Mo/4H-SiC(0001)においては、理想障壁高さの変化は見られるが、Ptと比較して大きな関数の変化は無い。MoSi<sub>2</sub>の形成は525°Cである事から<sup>16)</sup>、界面相でシリサイドを形成していないと考えられる。よって、Moの場合の加熱温度による理想障壁高さの増加はシリサイド形成に依るものでないと考えられる。この理想障壁高さの増加は、Mo/4H-SiC(0001)接触界面がBardeen limitからSchottky limitである1.0eVに近づいているのが原因と考えられる。スパッタ直後のMo/4H-SiC(0001)界面には、表面洗浄後に残留しているSiO<sub>2</sub>絶縁膜が介在していると考えられるので、その影響でBardeen limitに近い障壁高さになる。そして、その後の加熱処理によって、介在層の無い理想的なMo/4H-SiC(0001)接触界面に近づいたために障壁高さは増加したと考えられる。

## 7.4 Mo, Pt/4H-SiC(0001)のS値

表4にMo, Pt/4H-SiC(0001)接触界面における理想障壁高さのSchottky limitと実験値を示す。実験値より界面挙動指数Sを算出すると、S=0.05となった。SiCのような共有結合性半導体は、金属の仕事関数に依らないBardeen limitに近いS値を示す。

また、今回、S値を算出するためにMo, Ptを用いたが、より信頼性のあるS値を算出するには、表

表 4 Mo, Pt/4H-SiC(0001)接触界面における理想障壁高さの Schottky limit と実験値

電極金属	Schottky limit[eV]	実験値[eV]
Mo	1.0	0.69
Pt	2.05	0.74

表 5 4H-SiC(0001)の金属電極の候補

電極金属	仕事関数[eV]	Schottky limit[eV]
Y	3.1	オーム性
Nb	4.3	0.7
Pd	5.55	1.95

5に示すような金属でも評価する必要がある。Yは本研究で使用したPt, Moと仕事関数が離れているため、より正確なS値を算出できると考えられる。また、Y/Siにおいて、低SBHとなるイットリウムシリサイドの加熱温度によるSBHの変化を評価する事ができる。Nb, Pdはそれぞれ高融点金属と準貴金属であるから、PDA処理温度でMo, Ptと電気的特性が同様の傾向を示すのか調べる事ができる。また、仕事関数がMo, Ptと近いため、より正確なS値算出に貢献できる。

## 8. 結言

本研究では、Mo, Pt/4H-SiC(0001)接触試料を作成し、そのPDA処理前後の理想因子、障壁高さを算出して、金属/4H-SiC(0001)のショットキー障壁形成機構の考察を行った。

まず、Mo, Pt/4H-SiC(0001)接触界面において、界面挙動指数Sを計算した結果、 $S = 0.05$ となり、Bardeen limitに近い障壁高さとなった。より妥当性のあるS値を算出するためにはY, Nb, Pdのような金属でも同様の実験を行う必要がある。

また、Mo/4H-SiC(0001)接触は500℃加熱時、電気的特性が大幅に劣化し、再現性も得られなかった。そのため、Mo/4H-SiC(0001)試料に対してPtスパッタを施したPt/Mo/4H-SiC(0001)試料を作成し、電気的特性を評価したところ、再現性を得られ、SBHも低い値となった。このような改善が見られたことから、空気雰囲気中での500℃加熱は、金属電極表面の酸化に大きく影響していると考えられ、今後のPDA処理の改善には、不活性雰囲気中での加熱が必要と考えられる。

次に、Mo/4H-SiC(0001)のSBHは加熱温度と共に増加し、Pt/4H-SiC(0001)のSBHは加熱温度の上昇で、増加あるいは減少した。Moの場合、界面相

は表面処理後に残留した酸化膜で、加熱温度と共に除去され理想的なMo/4H-SiC(0001)界面、つまりSchottky limitに近づいた結果、そのSBHは増加したと考えられる。一方、Ptの場合、加熱後の界面相はPtシリサイドと考えられ、そのSBHの増減は界面相であるPt<sub>2</sub>SiからPtSiへの相変態が原因であると考えられる。

さらに、今回、調査した各PDA処理温度でのPt/4H-SiC(0001)の $n-\phi_B$ の相関関係は、その界面相変態温度で $n-\phi_B$ 関数が大きく変化する可能性を示唆している。これを裏付けるためには、Ptのような準貴金属であるPdやNiを電極とした試料を作成し、相変態温度で $n-\phi_B$ 関数が大きく変化するかを調べる必要がある。このために、Pt/Si(111)あるいはNi/4H-SiC(0001)の各PDA処理温度の $n-\phi_B$ の相関関係を調査すればよいと考えられる。

総じて、4H-SiC(0001)の電極として、高融点金属Moと準貴金属Ptでは、比較的低温(500℃以下)でのPDA処理後のそれらのSBH形成機構は異なると本研究結果から類推される。Moのような高融点金属のSBHはシリサイドの効果よりも、基板の表面処理の効果に大きく影響されると考えられる。なぜなら、低温において界面相は表面処理後に残る酸化膜であると考えられるからである。よって、加熱処理によってSBHが変化するなら、それは酸化膜の厚さに影響されると考えられる。しかし、500℃以上の高温加熱ならば、Mo/4H-SiC(0001)は界面でシリサイド相を形成すると考えられるので、酸化膜の効果は薄れると考えられる。一方でPtのような準貴金属は、200℃から500℃程度の比較的低温でシリサイドを形成するので、PDA処理後のSBHは表面処理の影響をMoと比較すると受けないと考えられる。

最後にパワーデバイス応用の観点から述べると、Mo, Pt/4H-SiC(0001)のSBHはPDA処理温度で変化する事から、その変動は電極の信頼性を欠くものになる。なぜなら、SiCは200℃以上での高温安定動作が望まれているからである。しかし、低接触抵抗率のオーミックコンタクトを実現するにはPDA処理による低SBHは必須である。低温プロセスで、上記の要求に応えるのは非常に難しい。500℃以下というPDA温度で低SBHを実現してオーミックコンタクトとし、要求される温度で安定なSBHになるような電極金属を今後、検討していく必要がある。

## 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.673-674, (2011).
- 2) 只野 博, 自動車用パワーデバイスにおけるニーズと期待, 工業材料. Vol.55, p.49, (2007).
- 3) 松波弘之, 半導体 SiC 技術と応用, 日刊工業新聞社, (2003), pp.10-12.
- 4) G. Ottaviani, K. N. Tu, and J. W. Mayer, Phys. Rev. B24, 3354 (1981).
- 5) 平木昭夫, 成沢 忠, 表面・界面の分析と評価, オーム社, (1994), p.31.
- 6) 木本恒暢, SiC プロセス技術, 応用物理 Vol.74, p.374, (2005).
- 7) 荒井和雄, 吉田貞史, SiC 素子の基礎と応用, オーム社, (2003), p.121.
- 8) B. L. Sharma, Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications, Plenum Press-New York and London, (1984).
- 9) D. E. Eastman, Phys. Rev. B2, 1 (1970).
- 10) 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).
- 11) 谷田行庸, 服部励治, 白藤純嗣, イットリウムシリサイド/シリコン接合の作成と電気的特性, 信学技報, p.29, (1994).
- 12) 國岡昭夫, 上村喜一, 新版基礎半導体工学, 朝倉書店, (1985), pp. 126-128.
- 13) 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.
- 14) T. Teraji and S. Hara, Phys. Rev. B70, 35312 (2004).
- 15) 後藤佐吉, 金属の化学, 大日本図書, (1971), pp.192-193.
- 16) 井上知泰, 薄膜のプロセッシング, 早稲田大学出版部, (1990), p.100.