

電気的特性による Y, Cu, Ni ナノ薄膜/SiC 接触界面の研究

齊 藤 晃 一*・浅 野 清 光

Interface Properties of Y, Cu, Ni Thin Films/SiC Contacts by Electrical Measurements

Koichi SAITO* and Kiyomitsu ASANO

(平成21年11月10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 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. In this study, to develop the ohmic electrodes with low contact resistance, the I-V properties have been measured for the metal thin films (Y, Cu, Ni)/SiC interfaces formed by RF magnetron sputtering method. The I-V properties of the Y/SiC contacts showed to be difficult to flow the current through a high reverse voltage. And, the Cu/SiC and Ni/SiC interfaces showed the varistor properties with the almost all heating conditions. We found the better ohmic properties for the Ni/SiC contacts after 70~150°C heating for 30 minutes as a result of the ideal factor and Schottky barrier heights calculations.

1. 緒言

ワイドギャップ半導体は高出力スイッチングデバイス、耐環境デバイスなどをはじめとした、応用デバイスとしての可能性を多く秘めており、エネルギー問題、環境問題、資源問題の面において重要な材料である¹⁾。

SiCは広いバンドギャップ、高い絶縁破壊電界などの優れた物性を有する化合物半導体であり、Siの限界を打破する高耐圧・低損失・高速パワーデバイス実現に有望な材料である²⁾。SiCには数多くのポリタイプがあるが、特に4H-SiCはSiに比べてバンドギャップが3倍広い、絶縁破壊電界強度が10倍大きい、熱伝導率が3倍高いなどの特徴を持ち、SiCのポリタイプの中では最もデバイス应用到していると考えられている³⁾。表1.1にSiと4H-SiCの物性値を、図1.1に4H-SiCの結晶構造を示す。

SiCの優れた物性の物理的原因は主にその強固な原子間結合力にあり、この強い結合力はSiCデバイス作製プロセスに大きな影響を与える。よって、す

でに確立されたSiプロセスの延長ではなく、SiC固有の問題を解決するための新しいプロセス技術の開発が重要となる²⁾。

4H-SiCの電子親和力は約3.6eV、バンドギャップは3.26eV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、ショットキー障壁となる。つまり、Siに比べてSiCではショットキー障壁の作製は容易であり、オーム性接触を得るのが困難であるといえる²⁾。

本研究では、低接触抵抗のオーミック電極開発を目的とし、金属ナノ薄膜/SiC接触試料をRFマグネトロンスパッタ法により作製した。そして、その電気的特性を測定し、比較検討した。また、オージェ電子分光法により試料加熱前後の金属薄膜表面のオージェスペクトルを測定し、比較検討したので報告する。

2. 金属/半導体接触

今日、半導体デバイスの基本接触である金属薄膜/半導体接触は、その界面の特性を生かして、半導体集積回路中にショットキー接触やオーム性接触とし

* 秋田高専専攻科学生

て必ず用いられている⁵⁾。ここではショットキーモデルにおける金属/半導体接触の障壁の形成について示す。

2.1 金属/n形半導体接触

2.1.1 ショットキー接触の場合

図2.1は接触前のエネルギーバンド図である。 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_F はフェルミ準位である。

$\phi_m > \chi_s$ の関係が成り立つとき、金属に比べて半導体のフェルミ準位が高く、半導体中の伝導電子が金属中の伝導電子よりも高いエネルギーを持つ。これ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、後にはイオン化したドナーが残される。よって、図2.2のように空乏層が形成され、整流性が現れる。ここで、 q は電荷である。半導体表面の空乏層に形成された電位差 V_D を拡散電位という⁶⁾。

図2.3, 図2.4はショットキー接触に電圧 V を印加した場合のエネルギーバンド図である。順方向電圧を印加した場合、図2.3のように半導体のフェルミ準位は qV だけ上がり、半導体から金属に向かう伝導障壁が低くなる。逆方向電圧を印加した場合、図2.4のように半導体のフェルミ準位は qV だけ下がり、半導体から金属に向かう伝導障壁が高くなる⁶⁾。

2.1.2 オーム性接触の場合

図2.5は接触前のエネルギーバンド図である。 $\phi_m < \chi_s$ の関係が成り立つときに接触させると、ショットキー接触とは逆に、伝導電子は金属から半導体へと移動し、図2.6のようになる。この場合、フェルミ準位が一致するようにキャリアが移動しても空乏層は形成されず、電流-電圧特性が直線となるオーム性接触となる⁶⁾。

表1.1 Siと4H-SiCの物性値の比較⁴⁾

	Si	4H-SiC
バンドギャップ [eV]	1.12	3.26
バンド構造	間接	間接
結晶構造	ダイヤモンド型	六方晶
絶縁破壊電界強度 [MV/cm]	0.3	3.5
電子移動度 [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$]	1500	1000
飽和電子速度 [cm/s]	1.0×10^7	2.7×10^7
熱伝導率 [W/cm·K]	1.5	4.9

2.2 ショットキー接触のI-V特性による評価法

ショットキー接触の順方向電流密度 J は、

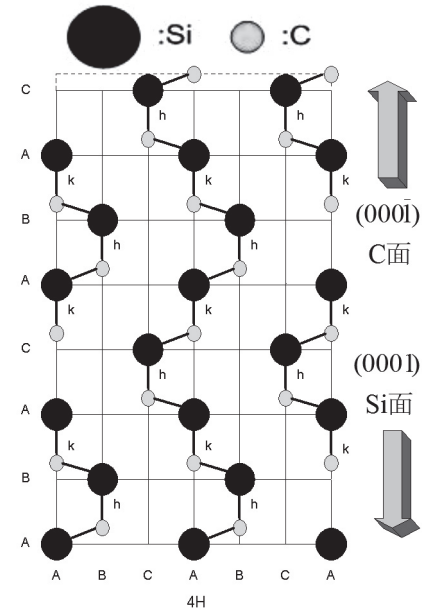


図1.1 4H-SiCの(1120)面から見た原子配置⁴⁾

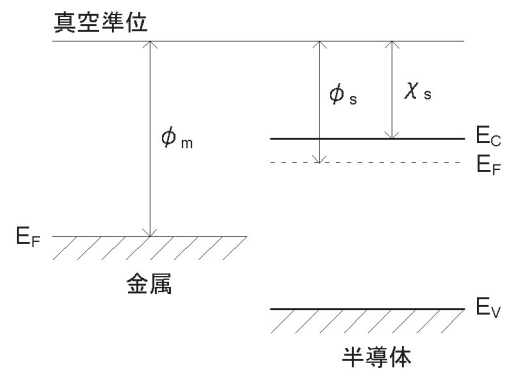


図2.1 $\phi_m > \chi_s$ における金属/n形半導体接触 (接触前)

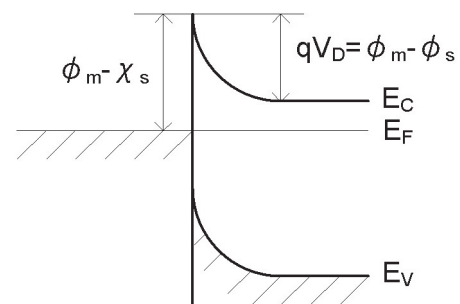


図2.2 $\phi_m > \chi_s$ における金属/n形半導体接触 (接触後)

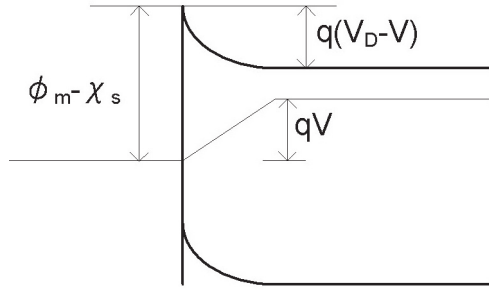


図2.3 電圧を印加した場合のエネルギーバンド図
(順方向 $V > 0$)

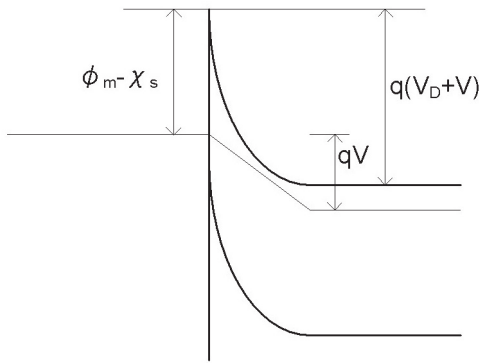


図2.4 電圧を印加した場合のエネルギーバンド図
(逆方向 $V < 0$)

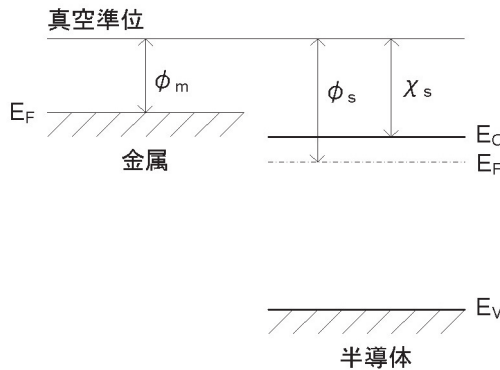


図2.5 $\phi_m < \chi_s$ における金属/n形半導体接触
(接触前)

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

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、理論的には以下のようになる。

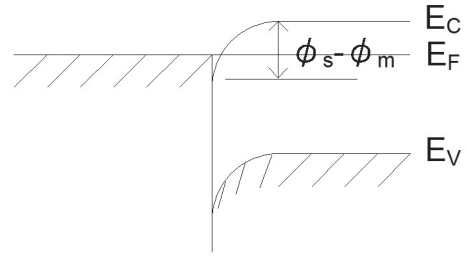


図2.6 $\phi_m < \chi_s$ における金属/n形半導体接触
(接触後)

$$J = J_0 e^{\frac{qV}{kT}} \quad (2)$$

また、実際の特徴では印加電圧に対する電流密度の増加の割合は(2)式よりも小さい場合が多いので、

$$J = J_0 e^{\frac{qV}{nkT}} \quad (3)$$

と書き直す。ここで n は理想係数である。 $n=1$ ならば、(3)式は(2)式と一致し、ほぼ理論通りの電流が流れることになる。また、 J_0 は、

$$J_0 = A^* T^2 e^{-\frac{\phi_B}{kT}} \quad (4)$$

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。

$$A^* = \frac{4\pi q m_e^* k^2}{h^3} \quad (5)$$

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 $3.60 \times 10^5 [\text{Am}^{-2}\text{K}^{-2}]$ とする⁷⁾。電流密度 J に試料の面積を掛けて電流 I に書き直すと、

$$I = I_0 e^{\frac{qV}{nkT}} \quad (6)$$

となる。両辺の常用対数をとると、

$$\log_{10} I = \frac{q \log_{10} e}{nkT} V + \log_{10} I_0 \quad (7)$$

と書き表せる。この式は V の一次関数で、 $q \log_{10} e / nkT$ は図2.7で示される直線部分の傾きを表す。

$$\frac{q \log_{10} e}{nkT} = \frac{\Delta \log_{10} I}{\Delta V} \quad (8)$$

(8)式から n 値が求められる。

$$n = \frac{q \log_{10} e}{kT \frac{\Delta \log_{10} I}{\Delta V}} \quad (9)$$

また, ショットキー障壁高さ ϕ_B は, (4)式より,

$$\phi_B = kT \ln \frac{A^* T^2}{J_0} \quad (10)$$

と求められる⁶⁾。

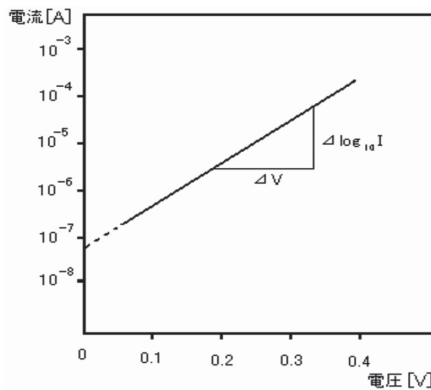


図2.7 $\log_{10}I$ -V 特性の例

2.3 金属の仕事関数とショットキー障壁高さの関係について

図2.8にRFマグネトロンスパッタ法で作製した金属ナノ薄膜/Si接触, 図2.9に金属ナノ薄膜/GaAs接触に対する金属の仕事関数とショットキー障壁高さの関係を示す。ショットキーモデルではショットキー障壁高さ ϕ_B は金属の仕事関数 ϕ_m に依存する式,

$$\phi_B = \phi_m - \chi_s \quad (11)$$

で表される。しかし, SiやGaAsに対する金属/半導体接触の ϕ_B は金属の仕事関数 ϕ_m に依存しないバーディーンモデルに従う結果となることが図2.8, 図2.9からわかる⁸⁾。SiCについてどうなるのかは未だ解明されていない。

3. 実験方法

3.1 RFマグネトロンスパッタ法による試料作製

2inch ϕ の n 形 4H-SiC ウェハ基板の Si 面に Y, Cu, Ni ナノ薄膜を RF マグネトロンスパッタ法によりスパッタした。

真空中で Ar ガスなどを導入し, グロー放電に

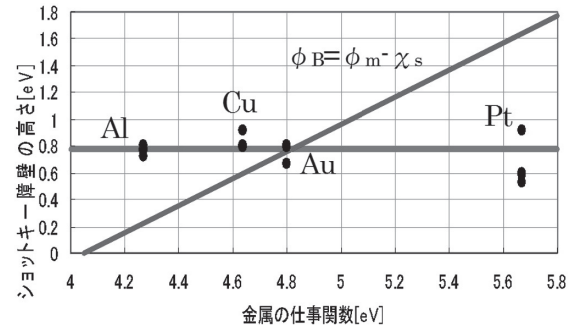


図2.8 金属薄膜/Si接触における金属の仕事関数とショットキー障壁高さの関係⁸⁾

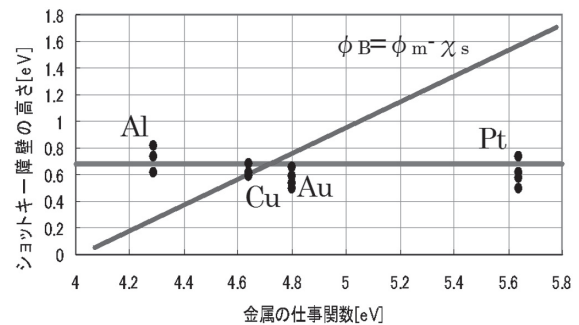


図2.9 金属薄膜/GaAs接触における金属の仕事関数とショットキー障壁高さの関係⁸⁾

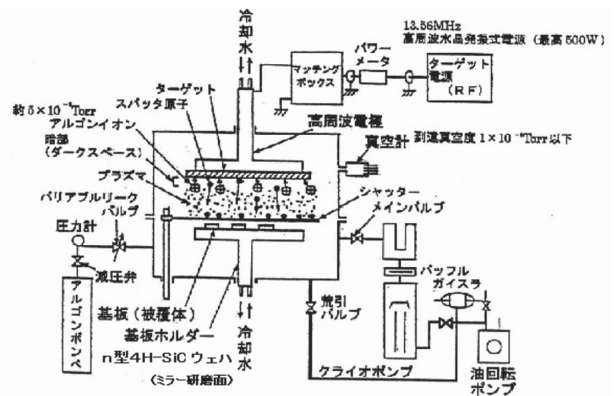


図3.1 RFマグネトロンスパッタ装置の概略図

よってプラズマを形成し, 正イオンをターゲット材料につけて, そこからたたき出された原子をセットした基板に付着させて薄膜を形成する方法をスパッタ法という。RFマグネトロンスパッタ法はターゲット裏面に永久磁石を配置してターゲット表面と平行に磁界を発生させたものである。この磁界により, Arのイオン化効率を高めることができる。また, 高周波電源を用いることにより, 正イオンは常にプラズマ中に停留し, 連続的にスパッタが行える⁹⁾。

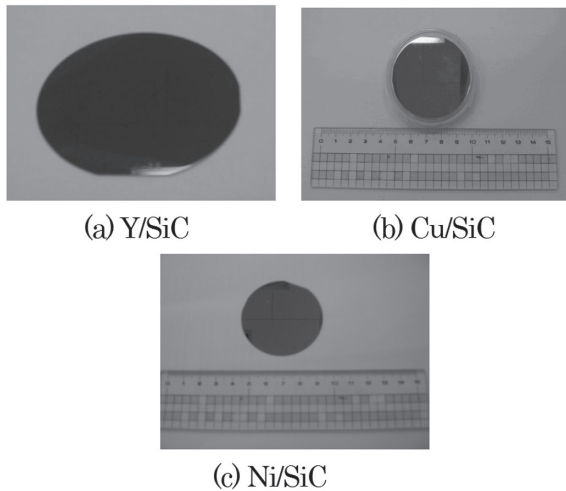


図3.2 金属ナノ薄膜/SiC接触試料

図3.1にRFマグネトロンスパッタ装置の概略図を示す。チャンバー内を 1.33×10^{-6} Pa以下の高真空まで排気し、約0.665 Paの高純度Arガス（純度99.999%）を導入した。スパッタリングには13.56 MHzの高周波水晶発振式電源を用い、投入パワー 50W で約15分間スパッタし、金属薄膜膜厚が約30 nmの試料を作製した。作製した試料を図3.2に示す。

3.2 試料の加熱

作製した試料は数十～数百 mm²の大きさに分割し、加熱前後のI-V特性を測定した。加熱は電気炉で行い、測定時には電極としてInGa合金をSiCのC面に塗布した。

試料は図3.3のように60分かけて炉内の温度を加熱温度まで上昇させ、それを維持する。表3.1に試料の加熱温度および加熱時間を示す。加熱後は炉冷した後、I-V特性を測定した。測定した結果は加熱温度、加熱時間、金属薄膜の違いについてそれぞれ比較、検討した。ここで、I-V特性を定量的に評価するために理想係数nを算出した。また、ショット

表3.1 試料の加熱温度と加熱時間

	Y/SiC	Cu/SiC	Ni/SiC
加熱温度 [°C]	250	70	70
	300	100	150
	350	150	250
	400	200	500
	500	300	
加熱時間	60分	30分, 60分	30分, 90分

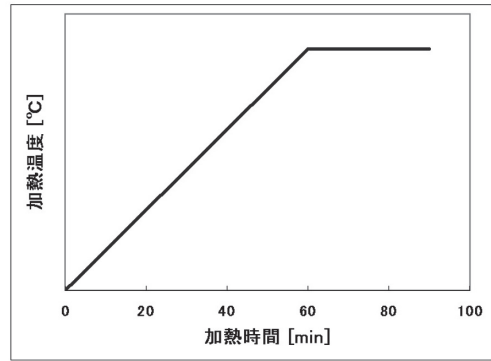


図3.3 試料の加熱方法

キー障壁高さ ϕ_B を算出した。

3.3 InGaの塗布について

図3.4はNi/SiC接触（非加熱）のI-V特性である。SiCのC面にInGaを塗布した場合、順方向電流がより多く流れるようになった。これはInGaを塗布しない場合に半導体とマイナス電極との接触抵抗が大きいため、電子が流れにくくなり、順方向電流が落ちたものと考えられる。

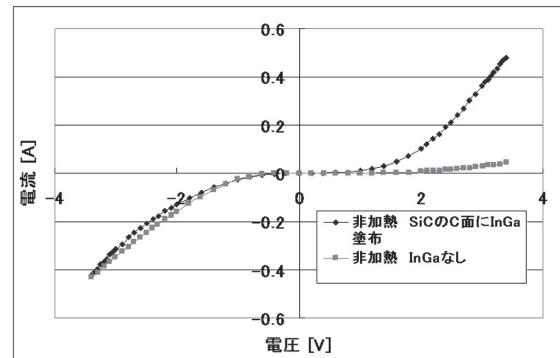


図3.4 Ni/SiC接触試料のI-V特性に対するInGa塗布の影響

3.4 実験データの再現性について

図3.5, 図3.6はNi/SiC接触のI-V特性である。図3.5は同一の試料を2度測定したものの、図3.6は同一の試料における電圧の印加の方法による違いを比較したものである。どちらも特性に差がほとんど見られないことがわかる。

図3.7はNi/SiC接触（非加熱）のI-V特性である。分割された試料のうちの4つについて比較をしたところ、図3.7のような誤差があることがわかったが、これはSiCのC面に塗布したInGaの濡れ性によるものと考えられる。

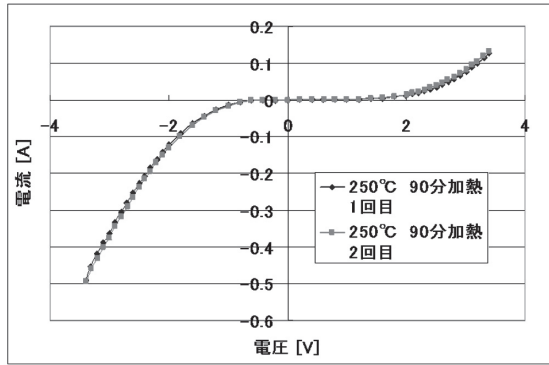


図3.5 Ni/SiC接触試料のI-V特性の再現性

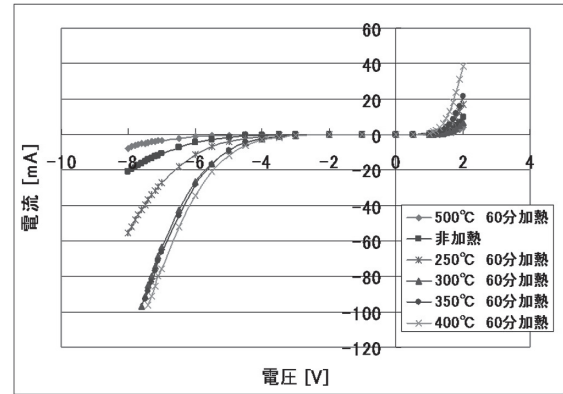


図4.1 Y/SiC (60分加熱) のI-V特性

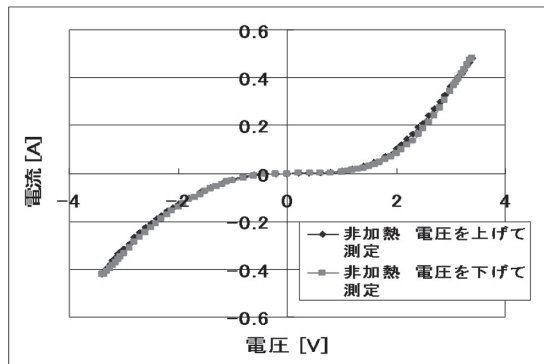


図3.6 Ni/SiC接触試料のI-V特性における電圧の印加方法の影響

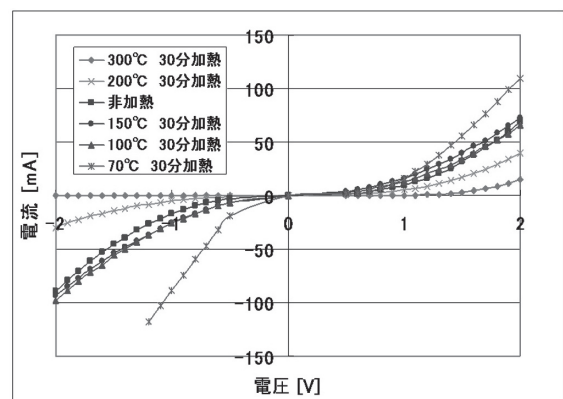


図4.2 Cu/SiC (30分加熱) のI-V特性

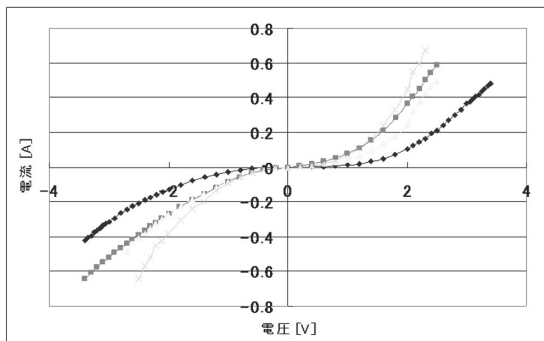


図3.7 Ni/SiC (非加熱) のI-V特性に対する測定試料の影響

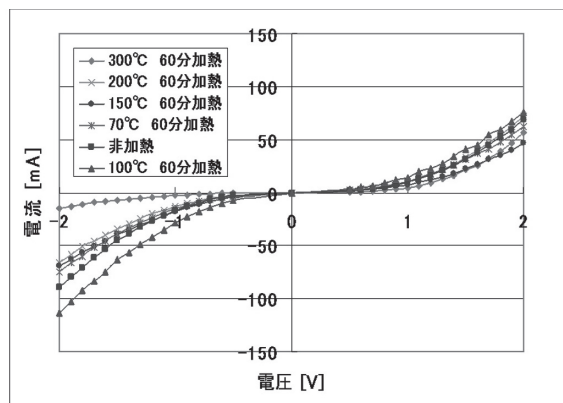


図4.3 Cu/SiC (60分加熱) のI-V特性

4. 実験結果および考察

4.1 金属ナノ薄膜/SiC接触試料の加熱前後のI-V特性

図4.1にY/SiC接触60分加熱のI-V特性, 図4.2にCu/SiC接触30分加熱のI-V特性, 図4.3にCu/SiC接触60分加熱のI-V特性, 図4.4にNi/SiC接触30分加熱のI-V特性, 図4.5にNi/SiC接触90分加熱のI-V特性をそれぞれ示す。Y/SiCは高い逆方向電圧まで電流が流れにくくなっていることがわかる。Cu/SiC, Ni/SiCはほぼ全ての加熱条件でバリスタ特性

を示したが, Ni/SiCは500°C90分加熱で, Cu/SiCは300°C加熱で整流性を示した。これは高温の加熱を施したことにより, 金属表面の酸化が起こり, 酸化層が形成されたために, 逆方向電流が流れにくくなったものと考えられる。

金属の仕事関数は, Niは5.1eV, Cuは4.65eV, Yは3.1eVである。また4H-SiCの電子親和力は3.6eVである²⁾。よって, 一般にショットキーモデルに従

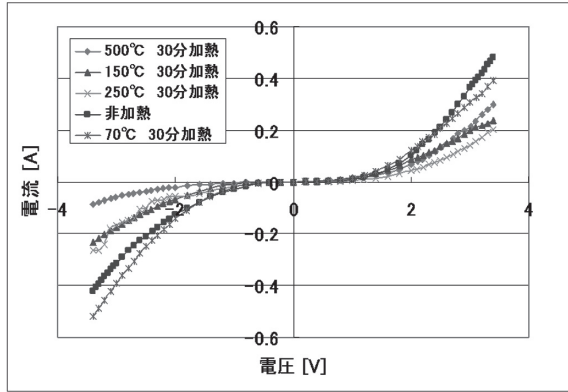


図4.4 Ni/SiC (30分加熱) のI-V特性

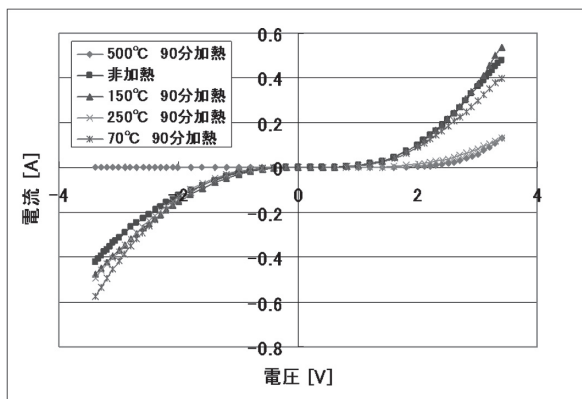


図4.5 Ni/SiC (90分加熱) のI-V特性

う場合、n形4H-SiCに対してNi, Cuとの接触では整流性、Yとの接触ではオーム性を示す。しかし、本研究での条件で得られたI-V特性はバリスタ特性を示した。SiやGaAsはバーディーンモデルに従う実験結果が出たが、SiCについては今後の検討課題になると考えられる。

4.2 理想係数nの結果と比較

表4.1にY/SiC接触60分加熱、表4.2にCu/SiC接触30分加熱、表4.3にCu/SiC接触60分加熱、表4.4にNi/SiC接触30分加熱、表4.5にNi/SiC接触90分加熱のn値の計算結果をそれぞれ示す。Y/SiCはほぼ全ての加熱条件において、1.5~2.0Vの電圧範囲で10程度のn値が得られた。Cu/SiCは70~150°Cで30分または60分加熱した試料において、1.5~2.0Vの電圧範囲で30程度のn値が得られた。Ni/SiCは70~150°Cで30分加熱した試料において、2.0~3.0Vの電圧範囲で40程度の高いn値が得られた。I-V特性はn値が1に近いほど理論的なショットキー接触(指数関数曲線)に近づき、n値が大きいくほど直線に近づく。本研究ではオーム性接触を得ることを目的とし

ているため、n値はより大きい値を得ることが要求される。

4.3 ショットキー障壁高さの結果と比較

表4.6にショットキー障壁高さ ϕ_B の計算結果を示す。これより、Ni/SiCが最も低い範囲をとることがわかる。Ni/SiCの ϕ_B は900~1000°Cの高温加熱により、1.7eVと報告²⁾されているが、この結果は500°C以下の比較的低温で1/2以下の ϕ_B が得られたことを示している。

表4.1 Y/SiC (60分加熱) のn値

加熱温度	電圧範囲 [V]		
	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
	n 値		
非加熱	4.20	7.51	9.83
250°C	9.05	7.88	11.23
300°C	6.44	8.14	10.70
350°C	5.61	7.61	11.11
400°C	5.34	7.98	13.71
500°C	3.95	7.82	10.62

表4.2 Cu/SiC (30分加熱) のn値

加熱温度	電圧範囲 [V]		
	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
	n 値		
非加熱	10.63	16.55	25.22
70°C	8.42	15.45	28.70
100°C	12.32	20.25	29.52
150°C	13.51	21.55	31.78
200°C	11.73	16.48	22.52
300°C	5.85	8.12	11.02

表4.3 Cu/SiC (60分加熱) のn値

加熱温度	電圧範囲 [V]		
	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0
	n 値		
非加熱	10.63	16.55	25.22
70°C	11.69	17.21	27.95
100°C	13.45	18.60	31.26
150°C	12.08	17.97	26.46
200°C	12.46	16.82	25.02
300°C	9.54	12.43	20.60

表4.4 Ni/SiC (30分加熱) のn値

加熱温度	電圧範囲 [V]		
	0.2~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0
	n 値		
非加熱	7.10	16.93	30.41
70°C	8.43	17.76	41.69
150°C	12.69	22.76	46.74
250°C	7.62	17.48	32.04
500°C	11.59	21.47	33.64

表4.5 Ni/SiC (90分加熱) のn値

加熱温度	電圧範囲 [V]		
	0.2~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0
	n 値		
非加熱	7.10	16.93	30.41
70℃	8.47	16.64	32.63
150℃	7.10	16.24	29.64
250℃	11.18	13.06	22.47
500℃	19.49	13.50	14.59

表4.6 ショットキー障壁高さφ_Bの計算値

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

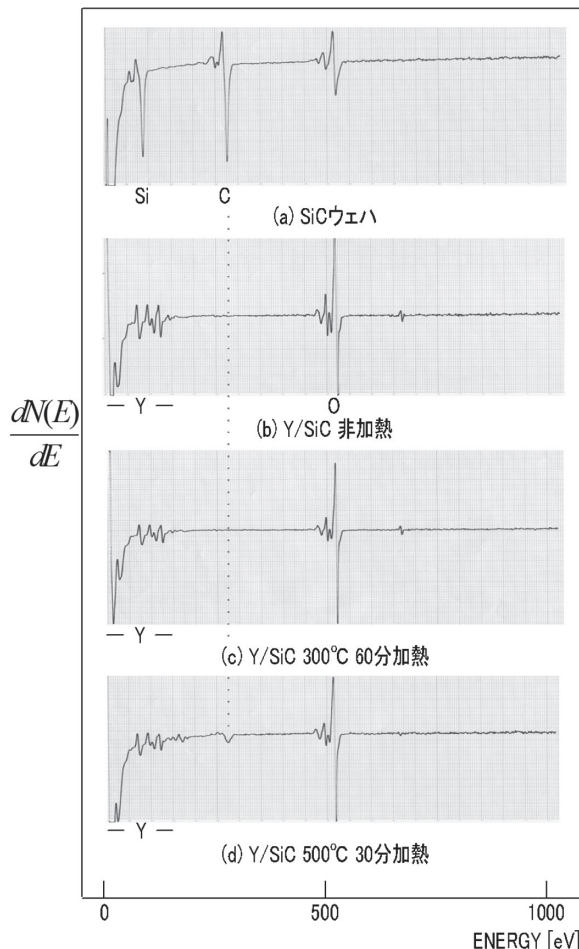
4.4 金属薄膜表面状態の考察

Y/SiCを500℃で30分加熱した試料に黒紫色の変色が見られた。そこで、オージェ電子分光法により、SiC ウェハ表面および加熱前後の試料のY表面に対してオージェスペクトルの測定を行った。図4.6に0~1000eVにおける測定結果を示す。図4.6(a)ではSiとCが検出され、図4.6(b)~図4.6(d)ではYが検出された。また、510eV付近に出ているスペクトルはOである。図4.6の各スペクトルの比較により、500℃30分加熱の試料のY表面にCが出ていることがわかった。これは500℃加熱によりSiとCの結合が切れてCがY表面に形成されたものと考えられる^{10) 11)}。

5. 結言

本研究ではSiCに対する低接触抵抗のオーミック電極開発を目的として、RFマグネトロンスパッタ法により、Y/SiC, Cu/SiC, Ni/SiCの金属ナノ薄膜/SiC接触試料を作製した。そして、加熱前後におけるI-V特性を測定した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) Ni/SiCとCu/SiCは70~150℃の低温加熱を施したときが最もオーム性に近づいた。Y/SiCは高い逆方向電圧まで電流が流れにくかった。
- 2) 理想係数nおよびショットキー障壁高さφ_Bの結果から本研究の条件では70~150℃の加熱を30分施したNi/SiCが最もオーム性に近づいた。
- 3) Ni/SiCのφ_Bは900~1000℃の高温加熱では1.7eVと報告²⁾されているが、500℃以下の比較的低温で1/2以下の低いφ_Bが得られた。この結果は比較的低温でのデバイス作製プロセスの可能性を示していると考えられる。



(a) SiCウェハ表面に対するオージェスペクトル
 (b) Y/SiC加熱前のY表面に対するオージェスペクトル
 (c) Y/SiC 300℃ 60分加熱後のY表面に対するオージェスペクトル
 (d) Y/SiC 500℃ 30分加熱後のY表面に対するオージェスペクトル
 (d)のY表面は黒紫色に変色

図4.6 SiCおよびY/SiC試料加熱前後のY表面に対するオージェスペクトル

謝辞

本研究の一部は、秋田工業高等専門学校学科横断型プロジェクト研究経費の支援のもとに行われた。

参考文献

- 1) 名西穂之, 応用物理 73, 313 (2004).
- 2) 木本恒暢, 応用物理 74, 371 (2005).
- 3) 松波弘之, 半導体SiC技術と応用 日刊工業新聞社 (2003). pp.9-12.
- 4) 荒井和雄・吉田貞史, SiC素子の基礎と応用 オーム社 (2003). p.14, 17.
- 5) B.L.Sharma, Metal-Semiconductor Schottky

- Barrier Junction and Their Applications, Plenum Press New York and London (1984).
- 6) 國岡昭夫・上村喜一, 新版基礎半導体工学 朝倉書店 (1985). pp.111-118, 121, 126-128.
 - 7) 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.
 - 8) 本間弘樹・浅野清光, 秋田工業高等専門学校研究紀要 37, 48 (2002).
 - 9) 李正中・(株)アルバック (訳), 光学薄膜と成膜技術 アグネ技術センター (2002). pp.287-291.
 - 10) 齊藤晃一・浅野清光, 平成20年度日本表面科学会東北・北海道支部講演会講演予稿集 P-03 (2009).
 - 11) 齊藤晃一・浅野清光, 日本素材物性学会平成21年度 (第19回) 年会講演要旨集 A-11, 39 (2009).