

# 電気的特性による InGa/4H-SiC 接触界面に関する研究

進 藤 怜 史\*・佐久間 涼\*・宇 瀬 尚 平\*\*・浅 野 清 光

## Interface Properties of InGa/4H-SiC Contacts by Electrical Measurements

Satoshi SHINDO\*, Ryo SAKUMA\*, Shohei USE\*\* and Kiyomitsu ASANO

(平成24年11月29日受理)

We have studied metal-semiconductor contacts, particularly metal/4H-SiC contacts. In the study, electrical characteristics of InGa/4H-SiC were investigated. InGa alloys are used as low Ohmic contacts between alloy and semiconductivity of ceramics. The purpose of this paper is to clear whether InGa/4H-SiC contacts have Ohmic property. As a result, 4H-SiC coated with InGa alloy showed the varistor characteristics. This means that it has no Ohmic property. And, the varistor property was asymmetry. This may be probably associated with plane-direction dependence. These results are useful for understanding these metal-semiconductor contacts.

### 1. 緒言

InGa合金は半導体セラミックス等の低接触抵抗率のオーミックコンタクトとして使われている<sup>1)</sup>。過去の研究では<sup>2,3)</sup>、金属/4H-SiC(0001)Si面の電気的特性の測定のために、その裏面である4H-SiC(000-1)C面のオーミック電極としてInGaを塗布していた。その後の研究で、Y/4H-SiC(0001)Si面の電気的特性の測定の際、(000-1)C面にInGa塗布後に加熱した試料は、塗布前に加熱した試料に比べて高い電気伝導性を示した<sup>4)</sup>。これは、InGa/4H-SiC(000-1)C面にはショットキー障壁が存在し、加熱処理によってその障壁が変化する事で電気的特性が変化した事が原因と考えられる。よって、この障壁により、InGa合金は4H-SiC(000-1)C面に対して完全なオーミック性を有していない可能性がある。

したがって、InGa合金が実際にオーミックコンタクトとして機能しているかを調べるためには、InGa/4H-SiCの電気的特性を明らかにする必要がある。本研究では、InGa/4H-SiCの電気的特性を明らかにする事を目的として、InGa/4H-SiC(0001)Si面、InGa/4H-SiC(000-1)C面のI-V特性を測定し、その

結果を考察した。

### 2. 実験方法

厚さ345 $\mu$ m、抵抗率0.1 $\Omega$ ·cm以下の2inch $\phi$ の窒素ドープn型4H-SiCウェハ基板を用いた。まず、半導体洗浄液セミコクリーン23による超音波洗浄を4H-SiCウェハ基板に対して行った。その後、ウェハを0.5~1.5cm<sup>2</sup>の大きさに分割した。次に表1のような条件で3つの試料の電気的特性を測定した。

表1 InGa/4H-SiCの測定条件

	4H-SiC(0001)Si面	4H-SiC(000-1)C面
I	InGa塗布	塗布無し
II	塗布無し	InGa塗布
III	InGa塗布	InGa塗布

電気的特性は図1のようにCu板に挟んで測定している。条件Iは4H-SiC(0001)Si面にInGaを塗布し、そのInGa/4H-SiC(0001)の両面にCu板を挟んでいる。つまり、(0001)Si面の方向では、Cu板とInGaの接触、(000-1)C面の方向では、Cu板と4H-SiC(000-1)C面の接触となっている。条件IIでは、条件Iの逆になっている。条件IIIは(0001)、(000-1)の両面にInGaを塗布した後、Cu板に挟んで測定を

\* 秋田高専専攻科学生

\*\* 秋田高専学生

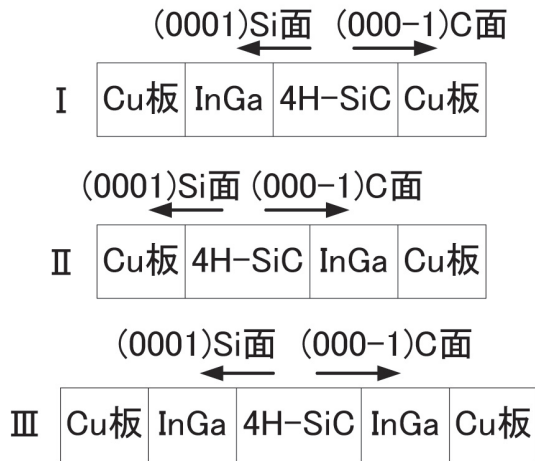


図1 InGa/4H-SiCの測定条件

行っている。

なお、4H-SiCの積層構造は図2のようになっており、4H-SiC[0001]方向の第一層はSi面、4H-SiC[000-1]方向の第一層はC面となっている<sup>5)</sup>。

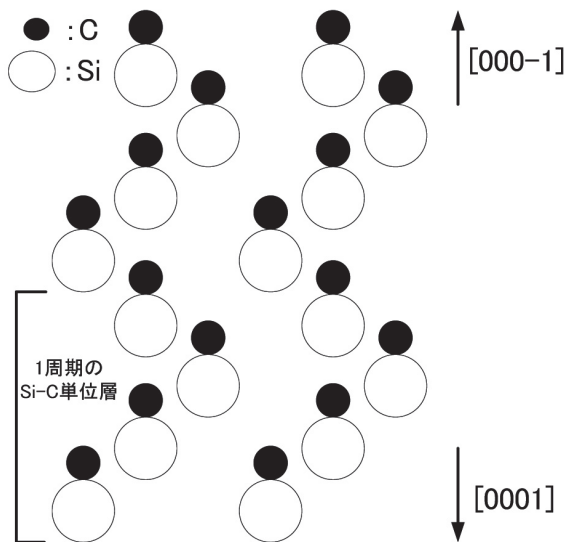


図2 4H-SiCの積層構造の模式図<sup>5)</sup>

### 3. 実験結果と考察

図3に測定結果の順バイアスの定義を示す。[0001]方向に正に電圧を印加した場合を順バイアスと呼ぶ。

図4に各測定条件におけるInGa/4H-SiCのJ-V特性を示す。条件Iでは、順方向には電流は流れず、逆方向のみ電流が流れる結果になった。条件IIは、逆方向電流が殆ど流れず、順方向電流は流れる結果になった。条件IIIは順、逆両方向に電流が流れる結果となった。この結果を表2に示す。

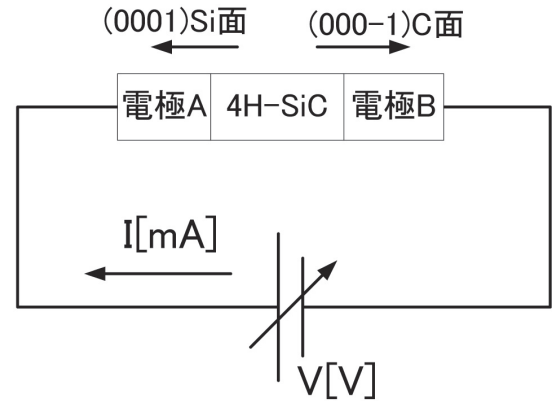


図3 順バイアスの定義

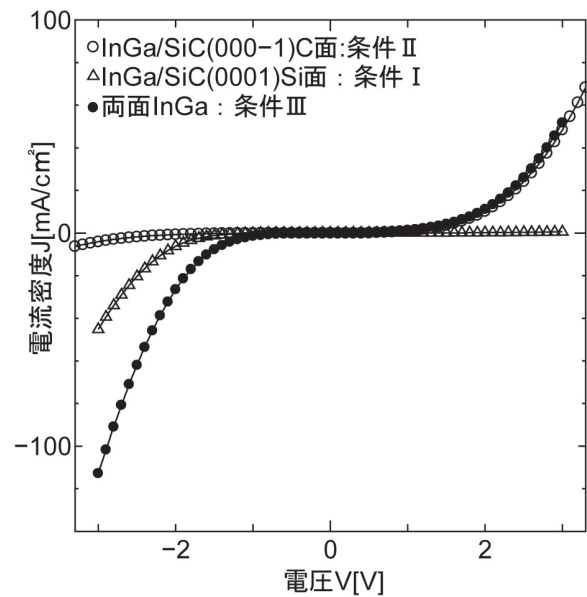


図4 各測定条件でのInGa/4H-SiCのJ-V特性

表2 InGa/4H-SiCの電気的特性

	順バイアス	逆バイアス
条件I	流れない	流れる
条件II	流れる	流れない
条件III	流れる	流れる

条件Iの結果については、順バイアス時の4H-SiC試料は図5のように、2つの金属/半導体接触に対して電圧が印加されていると考えられる。4H-SiC(000-1)C面とCu板の接触では、金属/半導体接触における逆バイアスになっており、この接触の高抵抗が原因となり、条件Iでの順バイアスは電流が流れない結果となったと考えられる。

条件Iの逆バイアスについては、図6のような状態になっていると考えられる。InGa/4H-SiC(0001)Si面において逆バイアスとなるが、そこでは、トンネル電流が流れ、高抵抗にならなかったと考えられ

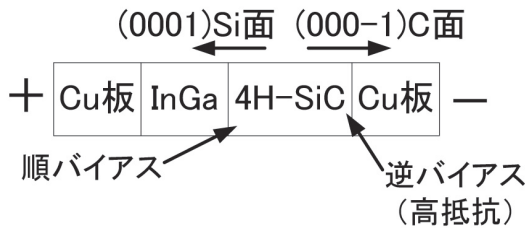


図5 条件Iでの順バイアス

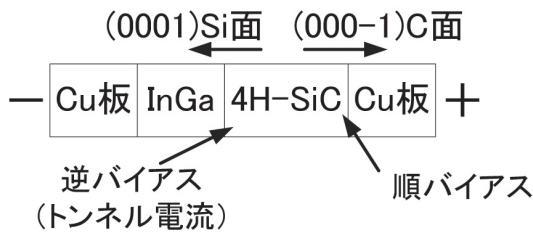


図6 条件Iでの逆バイアス

る。トンネル電流が生ずるかどうかは、おそらく金属/4H-SiCの接触に関係している。InGaと4H-SiCの接触に比べCu板と4H-SiCの接触は僅かな面積しか接触していない。よってInGaと4H-SiC間には、Cu板と比べて、多くの原子レベルでの接触が存在するため、トンネル現象が起こる確率もそれだけ多いと考えられる。よってInGa/4H-SiCの接触でのみトンネル電流が流れると考えられる。同様の結果はMo/4H-SiC(0001)Si面の電気的特性の研究において4H-SiC(000-1)C面のInGaの有無について検討した際にも見られている<sup>2)</sup>。

同様に、条件IIの順バイアス、逆バイアスの結果も説明できる。図7、図8に説明図を示す。順

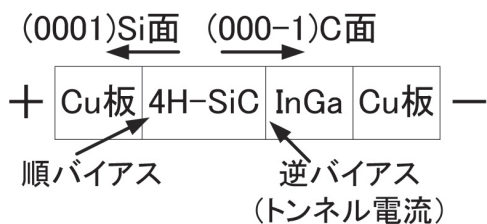


図7 条件IIでの順バイアス

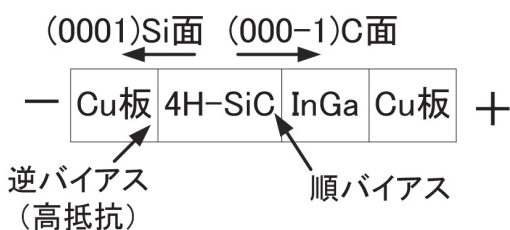


図8 条件IIでの逆バイアス

バイアスでは、図7のようにInGa/4H-SiC(000-1)C面でトンネル電流が流れると考えられるので、高抵抗とならない。逆バイアスでは図8のように、Cu板と4H-SiC(0001)Si面において金属半導体接触における逆バイアスとなり、高抵抗となる。よって結果として、条件IIでは順バイアスで電流が流れ、逆バイアスで電流が流れなくなる。

条件IIIも同様である。その説明図を図9、図10に示す。順バイアス時は、図9のようにInGa/4H-SiC(000-1)C面で逆バイアスとなるが、トンネル電流が流れると考えられるので、高抵抗にならない。逆バイアス時はInGa/4H-SiC(0001)Si面で逆バイアスとなるが、ここでもトンネル電流は流れると考えられるので、高抵抗にならない。よって条件IIIの場合、図4のようなバリスタ特性を示す。

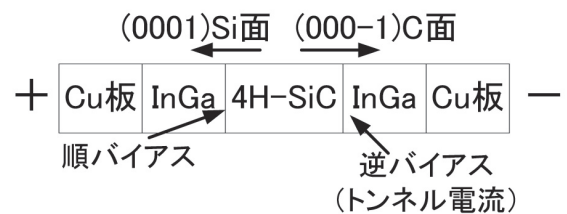


図9 条件IIIでの順バイアス

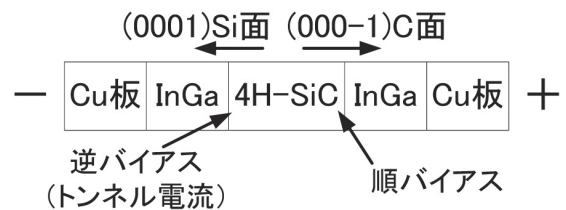


図10 条件IIIでの逆バイアス

さらに、図4において、順バイアスに比べて逆バイアスの方がより多くの電流が流れている。図11に条件IIIのみのInGa/4H-SiCのJ-V特性を示す。3Vでは順バイアスに比べ逆バイアスの電流密度は2倍以上になっている。これはInGa/4H-SiC(0001)Si面の障壁高さがInGa/4H-SiC(000-1)C面に比べ低い事が原因だと考えられる。この4H-SiCの障壁高さの結晶面方位依存性は既に報告されているが<sup>6)</sup>、その物理的機構は明らかになっていない。

これより、条件IIIの結果がバリスタ特性になっている事から、InGaは4H-SiCに対して、完全なオーミック性を示さない事が確認できた。

図12に条件IIIにおける  $n-\phi_B$  特性を示す。プロット点はベーテのダイオード理論<sup>7)</sup>から導出した(1)、(2)式から条件IIIの実験値より求めた。

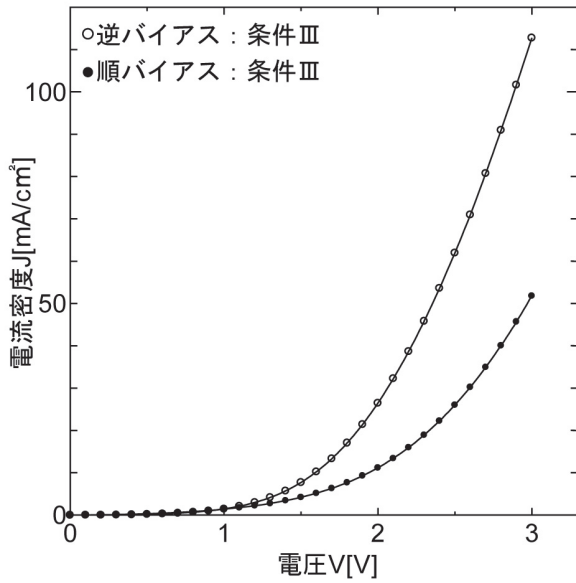


図11 条件Ⅲにおける InGa/4H-SiC の J-V 特性

$$n = \frac{q}{kT} \frac{\Delta \ln J}{\Delta V} \quad (1)$$

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

ここで、 $A^*$  はリチャードソン定数である。 $A^*$  は次式で表される。

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

$m_e^*$  は電子の有効質量、 $h$  はプランク定数である。

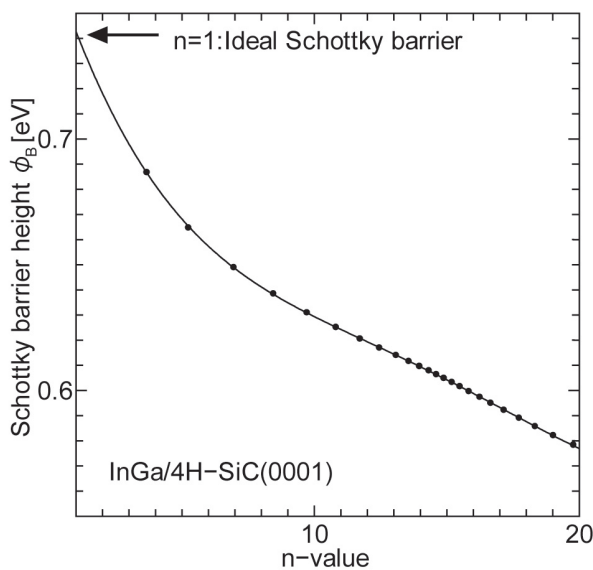


図12 InGa/4H-SiC (0001) の  $n-\phi_B$  特性 (条件Ⅲ)

本研究では、4H-SiC の  $m_e^*$  を  $0.3m_0$  ( $m_0$  は電子の静止質量) とし<sup>8)</sup>、 $A^*$  を  $3.60 \times 10^5 [\text{Am}^2\text{K}^2]$  とした。また、 $n$  は理想因子である。 $n=1$  ならば、熱電子放出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。図12では各点が曲線上に分布している事から、 $n=1$  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>9)</sup>。 $n=1$  に外挿した InGa/4H-SiC (0001) の理想障壁高さは図より  $0.74\text{eV}$  となった。

ショットキーモデル<sup>10)</sup> によると、障壁高さは (4) 式に従う。

$$\phi_B = \phi_M - \chi_S \quad (4)$$

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る。InGa の仕事関数<sup>11)</sup> は  $4.1\text{--}4.2\text{eV}$ 、4H-SiC の電子親和力<sup>6)</sup> は  $3.6\text{eV}$  である。よって、InGa/4H-SiC (0001) 障壁高さは  $0.5\text{--}0.6\text{eV}$  となる。このショットキーモデルによる理論値と本研究での実験値、過去の研究<sup>2,3)</sup> における実験値との比較を表3に示す。表中の Schottky limit というのは、(4) 式に従った障壁高さという意味である。表3より障壁高さの実験値は約  $0.7\text{eV}$  程度になっている事が分かる。このように、金属の仕事関数に依存せず障壁高さが一定になる現象はフィルミ準位のピニング現象<sup>12)</sup> と呼ばれ、SiC のような共有結合性<sup>5)</sup> を持つ半導体によく見られる。

表3 金属/4H-SiC (0001) 接触における Schottky limit と実験値

電極金属	Schottky limit [eV]	実験値 [eV]
Mo (スパッタ)	$1.0 \pm 0.15$	0.69
Pt (スパッタ)	$2.05 \pm 0.1$	0.74
InGa (塗布)	$0.5\text{--}0.6$	0.74

本研究では4H-SiC に InGa を塗布する事で電極を形成し、障壁高さを測定したが、スパッタ法で形成した電極の障壁高さに近い値となった。金属電極の形成法で界面構造は多少異なり、障壁高さにも影響すると思われるが、結果にはその影響が現れていない。おそらく、前述のピニング効果によりその影響が小さくなったと考えられる。

この仮説を裏付けるには、まず真空蒸着法等の種々の電極形成法で金属電極を形成し、それらの障壁高さを比較しピニングを確認する。次に適切な表面処理<sup>9)</sup> を行い、Schottky limit を得られる表面を用意し、同様の実験 (各電極金属形成法の比較) を行えばよいと考えられる。

#### 4. 結論

本研究において、InGaは4H-SiCに対してオーミック性を示さない事が分かった。これまでの研究<sup>2,3)</sup>では一貫して4H-SiC(000-1)C面にInGaを塗布してオーミック性であると仮定して実験を行ってきた。よってこれまでの研究の障壁高さの値について定量性の点では問題があると考えられる。これはInGa/4H-SiC(000-1)C面でオーミック性を確保できていないと考えられるからである。ただし、以前の結果について定性的には問題は無いと考えられる。なぜなら、4H-SiC(000-1)C面には一貫してInGa塗布を行っていたので、試料同士の比較においてはその大小関係に変化は無いと考えられるからである。

今後の研究において障壁高さの定量性を確保するためには、現状のInGaに代わるオーミック性を有する電極材料を検討する必要がある。例えば、本研究で使用しているInGa合金の組成は50In-50Gaであるが、その組成比の異なるInGa合金を作製する、InGa合金に別の金属を添加する等の方法が考えられる。

また、InGa/4H-SiC(0001)の障壁高さは0.74eVとなり、スパッタ法で形成した他の金属電極に近い値となった。これはピニング現象により、電極形成法の違いの影響を受けにくくなったのが原因と考えられる。

#### 参考文献

- 1) L.Medvecký and J.Briancin, Chem.pap.58(2),93 (2004).
- 2) 進藤怜史, 浅野清光, 秋田工業高等専門学校研究紀要, 46, pp.66-73, (2011).
- 3) 進藤怜史, 浅野清光, 秋田工業高等専門学校研究紀要, 47, pp.46-53, (2012).
- 4) 進藤怜史, 浅野清光, 日本表面科学会東北・北海道支部講演会講演予稿集, pp.17-18, 2012年3月8-9日.
- 5) 松波弘之, 半導体SiC技術と応用, 日刊工業新聞社, (2003), pp.9-10.
- 6) 木本恒暢, SiCプロセス技術, 応用物理 Vol.74, (2005), p.374.
- 7) 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.
- 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, (2006), p.24.
- 9) T.Teraji and S.Hara, Phys.Rev.B70, 35312 (2004).
- 10) B.L.Sharma, Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications, Plenum Press-New York and London, p.4,(1984).
- 11) H.Haick and D.Cahen, Progress in Surface Science, 83, 232 (2008).
- 12) 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).