

論文の要旨

氏名 WIJEMUNI MILANTHA DE SILVA

論文題目 Low Resistance Ohmic Contact Formation for Silicon Carbide Power Devices

(シリコンカーバイドパワーデバイスのための低抵抗オーミックコンタクトの研究)

半導体パワーデバイスは、数百ボルト以上かつ数アンペア以上の大電力の直接制御を行うデバイスであり、ハイブリッド自動車、電気自動車、送電設備などで用いられる。従来シリコン (Si) 半導体を用いて作製されてきたが、Si 半導体パワーデバイスでは Si の物性値から予測される理論限界に近付いている。パワーデバイスの重要な役割は低損失であることで、そのためには低オン抵抗と高スイッチング速度が求められている。ワイドバンドギャップ半導体であるシリコンカーバイド (SiC) 半導体は高絶縁破壊電界、高電子飽和ドリフト速度、高熱電導度などに関して優れた物性値をもっており、高耐圧、高温デバイスとして注目されている。SiC 半導体は Si 半導体に比べてバンドギャップが約 3 倍大きく、絶縁破壊電界は約 10 倍大きい。そのため SiC 半導体を用いると、半導体デバイスのオン抵抗を百分の一程度にすることができる。そのことから電力損失が極めて低く、省エネルギー化を行うことができるため研究の推進が強く望まれている。SiC 半導体で高い効率で電力制御を行うには、金属電極と SiC 半導体を合金化し、その間の接触抵抗を極限まで低減させる必要がある。一般的にはニッケル (Ni) 金属が n 型 4H-SiC オーミックコンタクト材料として用いられている。更に、低抵抗オーミックコンタクトの形成にはアニール方法とその条件も重要な要因である。従来のニッケルシリサイド (NiSi) オーミックコンタクトの形成には Ni/SiC コンタクトが温度 900°C ぐらいのアニール処理を行う必要がある。アニール処理を行うことによって Ni が SiC と反応し、NiSi が形成し、オーミック性を示す。しかし、SiC 半導体は炭素 (C) を含むため、アニール処理を行う際、界面に炭素凝集が発生し接触抵抗が下がらないという問題が発生する。更に、NiSi オーミック電極が SiC 界面から剥がれやすくなり、デバイスの信頼性の低下にもつながる。その問題点を解決するために、本研究の目的は SiC 上のシリサイド中の炭素原子の位置を制御することで SiC パワーデバイスのための低抵抗オーミックコンタクトを実現することとする。目標としては、オーミック接触抵抗 $\rho_c = 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ を目指す。

本研究ではオーミックコンタクトの低抵抗化の方法として次の 3 つの方法を導入した; (1) SiC 表面の部分的アモルファス化、(2) 炭素浸入型金属の導入、(3) SiC 表面の不純物の高濃度化。(1)の部分的アモルファス化においては SiC 表面をライン・アンド・スペースパターンで部分的にアモルファス化することで、金属と SiC の合金化時の原子拡散を制御することで炭素凝集位置を物理的に制御し、低抵抗

化を行う方法である。(2)の炭素浸入型金属の導入では炭素と反応し、合金形成可能な Mo (モリブデン)、Nb (ニオブ)、Ti (チタン) などの金属を導入し、数 10 ナノ秒レーザアニールにより、非平衡状態アニール処理を行うことで炭素凝集を抑制して低抵抗化を行う方法である。(3)の不純物高濃度化は SiC 側の界面バリア幅を狭めて、低抵抗化を行う方法であり最終的には(2)、(3)の方法とあわせて実施する。

第 1 章ではワイドバンドギャップ半導体である SiC の特徴について説明し、本研究の背景、目的、目標について述べる。また SiC 上でのオーミックコンタクト形成における問題点を整理して述べる。

第 2 章ではオーミックコンタクトに関する基本的な原理について説明し、n 型 4H-SiC のオーミックコンタクト形成メカニズムについて説明する。更に現在にあたるオーミックコンタクトの状況について述べる。

第 3~6 章において本研究成果を記載する。第 3 章では部分的なアモルファス化によって 4H-SiC C 面でのオーミックコンタクトの低抵抗化について述べる。4H-SiC 表面の一部分をアモルファス化することにより、シリサイド化時の金属-SiC 反応を制御することにより、炭素位置制御を試みたものである。4H-SiC C 面の表面をライン幅 100, 200 nm のパターンを形成し、Si イオン注入することによって SiC 基板表面を部分的にアモルファス化した。電極材料として Ni を成膜し、成膜後の試料を RTA (Rapid Thermal Annealing) によりシリサイド化を行った。オーミック接合評価としては TLM (Transmission Line Model) による電氣的評価と TEM (Transmission Electron Microscopy) により断面評価を行った。さらにこれを用いたショットキーバリアダイオード(SBD)を作製した。部分的アモルファス化していない場合オーミック性を示さず、部分的アモルファス化した場合はオーミック性を示した。TLM 特性によりオーミック抵抗を求めたところ、アモルファス化領域 100, 200 nm においてそれぞれ 1.9×10^{-3} , $4.4 \times 10^{-3} \Omega\text{cm}^2$ となった。部分的アモルファス化を行うことにより、オーミックコンタクトの低抵抗化を行った。作製した SBD の順方向特性により、アモルファス化領域 100 nm の時にオン抵抗 $1.27 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ の特性が得られた。TEM 断面図により、NiSi/SiC 界面での炭素凝集がなくなり、アモルファス化領域 100 nm のときカーボン層が 2 層になっており 200 nm のとき 1 層に分かれていて表面凹凸が大きいことが確認できた。(公表論文[1])

第 4 章では炭素の位置を原子レベルから制御するために炭化物を形成可能な金属、炭素侵入型金属を導入し、更に非平衡加熱を実現するためにレーザアニールを導入した。電極材料としては炭素侵入形である Nb, Mo を使用し、さらに Ni との組み合わせによりサンプル作製を行った。シリサイド化は波長 355 nm のパルスレーザを使用した。レーザパワーは $1.5 \sim 3.0 \text{ J/cm}^2$ まで変化させて実験を行った。レーザパワー 2.25 J/cm^2 の当たりで一番低いオーミック抵抗が得られた。オーミック電極 Ni/Mo/SiC の場合と NbNi/SiC の場合それぞれ $\rho_c = 8.0 \times 10^{-4}$, $5.3 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}^2$ が得られた。NbNi/SiC の場合ショットキーバリアハイトを求めたところ 0.19 eV となった。TEM 断面図により、Ni/Nb/SiC 構造においては 10 nm 程度の Ni-Si, NbC, NbO のシリサイド微結晶形成されていた。一方、NbNi/SiC 構造においては明確な結晶構造が形成されておらず、アモルファス Ni-Si-Nb-C 合金が形成されていた。In plane XRD 解析でも、Ni/Nb/SiC 構造においては Nb_6C_5 と Ni_2Si の結晶が形成さ

れており、NbNi/SiC 構造においては結晶ピークが確認されなかった。Nb と Ni とを同時に導入することで炭素原子をシリサイド膜中に分散させ、アモルファス Ni-Si-Nb-C 合金を形成し、 $10^{-4} \Omega\text{cm}^2$ オーダの低抵抗オーミックコンタクトを形成することができた。(公表論文[2])

第4章では4H-SiC C面でのオーミックコンタクトの低抵抗化には炭素侵入型金属と Ni との組み合わせが有効であることが分かった。第5章では、炭素侵入型金属の中で Si とともに C とも反応する Ti に注目し、研究を行った。SiC 基板の C 面に Ti を 75 nm, 100 nm 成膜した。成膜後の試料に RTA とレーザーアニールによりシリサイド化を行った。レーザーパワーを $1.9\sim 2.8 \text{ J/cm}^2$ まで変化させてシリサイド化を行った。RTA の場合オーミック性を示さず、レーザーアニールの場合はオーミック性を示した。Ti (75 nm)/SiC において、レーザーパワーが 2.5 J/cm^2 の時一番低いオーミック抵抗が得られた。そのときのオーミック抵抗は $\rho_c=4.0\times 10^{-4} \Omega\text{cm}^2$ となった。Ti (75 nm)/SiC の場合ショットキーバリアハイトを求めたところ 0.18 eV となった。In plane XRD 解析より、Ti (75 nm)/SiC において Ti_5Si_3 と TiC 結晶が確認でき、レーザーパワー増により TiC の形成促進が確認できた。2D-XRD 解析より、その Ti_5Si_3 と TiC 結晶が SiC 上エピタキシャル成長されていることが確認できた。TEM 断面図より、Ni(75 nm)/SiC 構造では、結晶子サイズが数 100 程度の大きな結晶で構成されており、その結晶の中に炭素が粒状に偏析している構造となっている。Ti(75 nm)/SiC 構造では数 10 nm 程度の微粒子で構成される Ti-Si-C の混相である薄膜構造が形成されており、炭素はそれらの結晶粒の粒界に偏析していた。(公表論文[3])

第6章では更なる低抵抗化を目指し、SiC 表面の不純物を高濃度化し、パルスレーザーアニールによる n^+ 4H-SiC C面での Ti-Si-C オーミックコンタクトの形成について述べる。 500°C と室温より P (リン) 不純物イオン注入を行い、活性化アニールは電気炉より行った。オーミック電極材料としては Ti を利用し、パルスレーザーアニールによりシリサイド化を行った。室温でのイオン注入、活性化アニール行っていないサンプルでは他のサンプルと違い、レーザーパワーが高出力側に変化し、 2.8 J/cm^2 の時オーミック抵抗は $\rho_c=4.7\times 10^{-4} \Omega\text{cm}^2$ となった。一方、 500°C イオン注入、活性化アニール行ったサンプルにおいて、レーザーパワーが 2.2 J/cm^2 の時、オーミック抵抗は目標値に近い $\rho_c=7.9\times 10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ を達成した。

以上の研究より、4H-SiC 上のシリサイドオーミックコンタクトにおいて 4H-SiC 起因の炭素原子の位置を、原子レベルから制御し、低抵抗化を実現した。