

論文内容の要旨

博士論文題目 SiO_2/SiC 界面における窒素局所構造に関する研究
氏名 森 大輔

(論文内容の要旨)

電力の変換・制御における省エネ実現はパワー半導体デバイスの高性能化がカギとなるが、従来の Si パワー半導体デバイスの高性能化は、耐圧と低損失化のトレードオフの関係から物性的限界に近づいている。SiC は Si に比べバンドギャップが大きく、高い降伏電界強度を有することから Si の物性的限界を超えた高耐圧・高温動作可能なパワー半導体デバイスを実現できる材料である。SiC パワー半導体デバイスの中でも鉄道、自動車などの産業への適用が期待されているのが SiC MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) である。SiC には、従来の Si と同じように熱酸化を用いてゲート絶縁膜を形成できる利点がある。しかし、SiC MOSFET のゲート界面(SiO_2/SiC 界面)は SiO_2/Si 界面に比べ界面欠陥が多く、期待される SiC のポテンシャルを十分に発揮できていない。界面欠陥低減のために産業界で最も用いられているプロセスが SiO_2/SiC 界面への窒素導入である。トレンチ構造を用いる低抵抗 MOS においては窒素効果の面方位依存性の制御が課題である。しかし、界面における窒素の化学状態や原子配置が面方位によってどう異なるのか未解明であり、面方位依存性について本質的な原子レベルの観点からは理解されていない。そこで本研究では、未だ解明されていない SiC(000-1)面(C 面)、SiC(1-100)面(m 面)の界面における窒素の局所構造を X 線光電子分光(XPS)及び光電子回折(XPD)を用いて明らかにし、窒素局所構造の各面方位における差異を明らかにすることを目的とした。

本論文の第 1 章は序論としてパワーデバイスに求められる性能と現状の課題、それに対し 4H-SiC を用いることでその課題がどのように解決されるのか説明すると共に、SiC MOSFET と界面窒化プロセスの現状と課題、及び SiO_2/SiC 界面の原子レベル解析の必要性について説明した。第 2 章では、本研究に用いた分析手法である XPS と XPD の原理、用いた解析方法、実験系について説明した。

第 3、第 4 章では C 面界面における窒素の局所構造を明らかにし、窒素によって界面に導入される歪についても定量的に検証した。Dry 酸化または N_2O 酸化で形成された Si 面、C 面それぞれの SiO_2/SiC 界面におけるサブオキサイドと窒素の化学状態を XPS で評価した。その結果は、C 面界面の窒素も Si 面と同様に、導入した窒素の 9 割以上が 3 配位 Si_3N の結合状態で SiC 基板の最上層で 1/3 原子層の極薄い層を形成していることを示した。XPD による窒素原子配列の直接観察では、窒素原子が 4H-SiC 基板の最上層の炭素サイトに位置することを示した。これらの結果から C 面界面の窒素も Si 面と同様に、界面欠陥の原因となる Si 原子のダングリングボンドを末端し不活性化する効果があることが明らかとなった。窒素と第 3 近接の Si 原子との位置関係から、元の炭素サイトと窒素の原子位置の変位を定量的に評価した。この結果は窒素が元の炭素サイト位置よりも 5 pm 沈んだ位置に存在することを示した。この構造モデルから窒素は SiC 界面水平方向に約 2%の歪を与えることが示唆された。この結果から、窒素は Si ダングリングボンドを末端することによって界面欠陥を低減すると同時に、MOS 移動度を低下させる界面歪みの原因となることが明らかとなった。これは界面欠陥を最小化するのに最適な窒素の量と末端構造がある可能性を示している。この最適な末端構造としてダングリングボンドの無い $\text{Si}_2\text{O}_3/\text{N}(1/3\text{ML})/\text{SiC}(000-1)$ を提案した。

第 5 章ではトレンチ MOS で界面として利用される m 面界面における窒素の局所構造を

XPS、XPD で明らかにした。XPS は、窒素原子が約 5/6 ML の被覆率で、Si 原子に結合していることを示した。窒素の XPD パターンは、SiC バルクの Si と炭素のパターンと大きく異なり、窒素が SiC 基板最上層の炭素サイトに存在していることを示した。XPD パターンのシミュレーションに基づいて、m 面界面の窒素は、C-facet と Si-facet それぞれの面に存在する炭素サイトを置換した構造であり、これは C 面と Si 面の局所原子配列のハイブリッド構造であることを明らかにした。この結果は、m 面を利用するトレンチ MOS 界面を改善には、Si 面と C 面の両方の観点での窒化プロセスの最適化が有効であることを示している。

第 6 章では結論と今後の展望について述べた。SiO₂/SiC 界面の界面欠陥低減には各面方位対しに最適な窒化プロセスを適用していく必要がある。本研究によって C 面、m 面における窒素の局所構造が明らかにされた。さらに、その局所構造の特性から C 面、m 面それぞれにおける窒化プロセスの改善指針を提示した。これらの知見は SiC MOSFET 高効率化の開発に寄与することが期待される。

(論文審査結果の要旨)

電力の変換・制御における省エネ実現はパワー半導体デバイスの高性能化がカギとなるが、従来の Si パワー半導体デバイスの高性能化は、耐圧と低損失化のトレードオフの関係から物性的限界に近づいている。SiC は Si に比べバンドギャップが大きく、高い降伏電界強度を有することから Si の物性的限界を超えた高耐圧・高温動作可能なパワー半導体デバイスを実現できる材料で、SiC MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) は鉄道、自動車などの産業への適用が期待されている。SiC には、従来の Si と同じように熱酸化を用いてゲート絶縁膜を形成できる利点があるが、SiC MOSFET のゲート界面(SiO₂/SiC 界面)は SiO₂/Si 界面に比べ界面欠陥が多く、期待される SiC のポテンシャルを十分に発揮できていない。界面欠陥低減のために産業界で最も用いられているプロセスが SiO₂/SiC 界面への窒素導入である。トレンチ構造を用いる低抵抗 MOS においては窒素効果の面方位依存性の制御が課題である。しかし、界面における窒素の化学状態や原子配置が面方位によってどう異なるのか未解明であり、面方位依存性について本質的な原子レベルの観点からは理解されていない。本研究では、未だ解明されていない SiC(000-1)面(C 面)、SiC(1-100)面(m 面)の界面における窒素の局所構造を X 線光電子分光 (XPS) 及び光電子回折 (XPD) を用いて明らかにし、窒素局所構造の各面方位における差異を明らかにした。

まず C 面界面における窒素の局所構造を明らかにし、窒素によって界面に導入される歪についても定量的に検証した。Dry 酸化または N₂O 酸化で形成された Si 面、C 面それぞれの SiO₂/SiC 界面におけるサブオキサイドと窒素の化学状態を XPS で評価した。その結果は、C 面界面の窒素も Si 面と同様に、導入した窒素の 9 割以上が 3 配位 Si₃N の結合状態で SiC 基板の最上層で 1/3 原子層の極薄い層を形成していることを示した。XPD による窒素原子配列の直接観察では、窒素原子が 4H-SiC 基板の最上層の炭素サイトに位置することを示した。これらの結果から C 面界面の窒素も Si 面と同様に、界面欠陥の原因となる Si 原子のダングリングボンドを終端し不活性化する効果があることが明らかとなった。窒素と第 3 近接の Si 原子との位置関係から、元の炭素サイトと窒素の原子位置の変位を定量的に評価し、窒素が元の炭素サイト位置よりも 5 pm 沈んだ位置に存在することを示した。つまり、窒素は Si ダングリングボンドを終端することによって界面欠陥を低減すると同時に、SiC 界面水平方向に約 2%の歪を与え、MOS 移動度を低下させる界面歪みの原因となる。そこで界面欠陥を最小化するのに最適な終端構造としてダングリングボンドの無い Si₂O₃/N(1/3ML)/SiC(000-1)を提案した。

またトレンチ MOS で界面として利用される m 面界面における窒素の局所構造を XPS、XPD で明らかにした。XPS は、窒素原子が約 5/6 ML の被覆率で、Si 原子に結合していることを示した。窒素の XPD パターンとシミュレーションから m 面界面の窒素は、SiC 基板最上層の C-facet と Si-facet それぞれの面に存在する炭素サイトを置換した構造であり、これは C 面と Si 面の局所原子配列のハイブリッド構造であることを明らかにした。この結果は、m 面を利用するトレンチ MOS 界面を改善するには、Si 面と C 面の両方の観点での窒化プロセスの最適化が有効であることを示している。

SiO₂/SiC 界面の界面欠陥低減には各面方位対しに最適な窒化プロセスを適用していく必要がある。本研究によって C 面、m 面における窒素の局所構造が明らかにされた。さらに、その局所構造の特性から C 面、m 面それぞれにおける窒化プロセスの改善指針を提示した。これらの知見は SiC MOSFET 高効率化の開発に寄与することが期待される。この研究で

得られた結果は、産業的な観点からのみならず科学的、学術的にも非常に重要である。
よって審査員一同は本論文が博士（工学）の学位論文として価値あるものと認めた。