

博士論文（要約）

4H-SiC/SiO<sub>2</sub> 熱酸化界面構造の理解と  
そのプロセス制御による  
MOSFET 高性能化の研究

平井 悠久

持続可能な発展のために、社会全体での電気エネルギーマネジメントが求められており、電力制御のための技術体系であるパワーエレクトロニクスの革新が望まれている。本研究では、次世代パワーエレクトロニクス材料 4H-SiC を用いたパワーMOS デバイスの高品質化のために必要不可欠な、熱酸化による MOS 界面形成プロセス開発に関する知見を得るため、4H-SiC の熱酸化によって界面に形成される構造を解明した上で、そのプロセス制御を達成し、熱酸化プロセス条件の選択による MOSFET チャネル性能の向上を実証、およびそのメカニズムを評価した。

4H-SiC/SiO<sub>2</sub> 界面に熱酸化により導入される界面構造を評価するため、材料学の立場から、界面を酸化膜側と基板 SiC 側の二つの側面に分け、それぞれに対して独立に解析を行った。

まず酸化膜側に形成される構造として、Si 酸化物の観点から、熱酸化膜の骨格をなす SiO<sub>2</sub> に着目して解析を行った。SiO<sub>2</sub> の構造解析ツールとして有効である FTIR を用いて、エピタキシャル基板が一般的で透過法の適用が困難な 4H-SiC に対して全反射減衰法の測定を高い精度で行い、熱酸化膜に対する評価手法を確立した。4H-SiC 上の熱酸化 SiO<sub>2</sub> の微視的構造は、界面近傍<2 nm の領域で圧縮歪みによる高密度化と、有効電荷減少で説明される化学状態変化を伴っていると考えられる。熱酸化膜を成長させる際の、酸化温度、酸素分圧、および基板面方位が界面近傍の SiO<sub>2</sub> の歪みに与える影響を評価し、基板表面の原子配列が最も支配的に歪みを決定していることを示し、熱酸化界面の最大の特徴である界面整合の駆動力が 4H-SiC 熱酸化界面においても作用することを明らかにした。ここに、歪んだ SiO<sub>2</sub> の構造緩和作用を持つ H<sub>2</sub>O を用いた熱酸化を適用することで、熱酸化界面における SiO<sub>2</sub> の歪み低減が起こることを明らかにし、熱酸化プロセスによる SiO<sub>2</sub> の微視的構造の制御を達成した。

一方、同じく酸化膜側に形成される構造として、C 酸化物の観点から、界面から脱離する C≡O 構造を含む酸化副生成物について FTIR を用いて解析を行った。4H-SiC の熱酸化において界面に C≡O 構造が形成されることを実験的に観測したのは本研究が初めてであり、極薄の熱酸化膜を高い精度で解析する FTIR 実験技術および、従来着目されていなかった C≡O 結合に着目することで、C 由来副生成物を正確に捉えることを可能にした。4H-SiC 熱酸化に伴い C は C≡O となり、熱的エネルギーの供給によって界面から CO として脱離し、SiO<sub>2</sub> 中の拡散を経て気相中へ放出されるという理解に基づいて、高温のドライ酸化では界面における C≡O 副生成物の形成が抑制されることを示した。また、H<sub>2</sub>O を用いた熱酸化では、低温の酸化でも C≡O 副生成物の形成が抑制されることを発見し、界面からの CO の脱離に対しても熱酸化プロセスによる制御手法を確立した。

酸化膜側に形成される構造として微視的構造変化を伴う SiO<sub>2</sub> と C≡O の両方に着目して、酸化プロセス条件および基板面方位が与える影響を詳細に検討した結果、C≡O

構造の除去に対して、SiC による束縛と、SiO<sub>2</sub> の歪みによる束縛が障壁として作用していると考えられる。H<sub>2</sub>O による酸化で SiO<sub>2</sub> の歪みを緩和した場合の C≡O 副生成物の残存量を比較することで、C 面では歪んだ SiO<sub>2</sub> による SiO<sub>2</sub> 中の拡散に関する束縛が、Si 面では SiC 基板表面からの脱離に関する束縛がそれぞれ支配的であり、H<sub>2</sub>O による酸化ではこの両者が緩和されるために、両極性面で C≡O が低温でも脱離することが可能になると考えられる。このような酸化に伴う C の除去機構の面方位による大きな相違は、4H-SiC において特徴的な、面方位による極端な界面特性の相違に対する理解の重要な一步となると期待される。SiO<sub>2</sub> の歪みと C≡O 構造の除去を同時に達成可能なウェット酸化によって NIT 密度の急激な減少が見られたことから、SiO<sub>2</sub> の歪みと C 由来副生成物の同時除去が重要であるというモデルを提案した。シリコン上と異なり、4H-SiC 上では C の効率的な除去のために界面近傍での SiO<sub>2</sub> の歪みの制御が重要であると考えられる。

次に、基板側に形成される構造として、SiC の熱酸化により SiC 基板表面<10 nm 領域に熱酸化によって侵入する酸素に着目して解析を行った。同位体酸素を用いた熱酸化実験を行い、TDS により高温における CO 脱離ピークとして 4H-SiC 基板中に熱酸化により侵入した酸素の脱離を観測した。定量的な解析から、侵入した酸素の量は SiC 中の固溶度を大きく超えていることから、MOSFET 性能に与える影響に関して、4H-SiC 中で欠陥準位を形成する効果と、4H-SiC の物性そのものが変化する効果の 2 点を考察する必要があることに着目した。このうち後者について、一軸歪みによる 10% 程度のチャネル移動度の変調を観測した。欠陥準位とは独立に、4H-SiC の物性を制御することでも MOSFET の性能を向上する余地があることを実験的に示した。

第三章および第四章の調査結果を改めて俯瞰すると、ウェット酸化は SiO<sub>2</sub> の圧縮方向の歪みと 4H-SiC に熱酸化により導入される引っ張りの両方が低減できることがわかる。このことは SiO<sub>2</sub>/4H-SiC 界面において熱酸化により導入される SiO<sub>2</sub> 側および 4H-SiC 側それぞれの歪みは、SiO<sub>2</sub> と 4H-SiC という材料の組み合わせだけによって決定されているというよりは、熱酸化反応によってどのように界面が形成されたかに影響を受けていると理解でき、界面近傍の微視的構造に対して熱酸化プロセスの制御が重要であることを示している。

これらのような特徴を持つ 4H-SiC の熱酸化界面を利用した MOSFET のデバイス特性および界面欠陥について調べるために、ウェット雰囲気における熱酸化を用いて作製した MOS 界面の品質について面内 MOSFET を作製し評価を行った。O<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O が異なる界面構造を形成するという理解に基づき、ウェット雰囲気にならざるに存在するこれら酸化種の分圧を制御することで、Si 面上においてチャネル移動度の向上および V<sub>th</sub> の変動抑制を同時に可能にした。ウェット雰囲気を用いることによるチャネル移動度向上の起源として、伝導帯端近傍のエネルギー準位を持つ欠陥準位の密度の低減が最も直接的な説明であることを示した。O<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>O が共存する雰囲気での酸化膜の成長速度論を

踏まえ、ウェット雰囲気における熱酸化の温度を低温化することで、バルク  $\text{SiO}_2$  に対する作用を低減し、 $\text{H}_2\text{O}$  の持つ作用を界面に選択的に作用させたことが、本プロセスの特徴であることを示した。

以上のように本研究は、MOS 界面形成プロセスにより界面構造が決定し、それがチャネル移動度や信頼性を決定し、パワーデバイスの MOS チャネルの性能を決定するという枠組みの中で、特に MOS 界面に熱酸化によって形成される界面構造について新しい知見を見出し、そのプロセス制御手法を確立し、界面構造が MOS 界面の電気特性に与える影響について考察することで、材料設計の指針を提示した。

今後の展望および課題として、界面特性の向上のために、引き続き 4H-SiC 上での反転層中でのキャリアの振る舞いに対する解析が重要である。極性結晶である 4H-SiC は本質的に Ge やシリコンと異なる散乱過程が含まれている可能性があり、面方位やチャネル方向などの系統的な理解をもって、未知の散乱成分であるか界面欠陥準位であるかを区別する必要がある。本研究では確かに wet-POA を用いてチャネル移動度の向上が観測されたが、Si 面において観測されたチャネル移動度は依然 4H-SiC 結晶の物性から期待される値よりも小さく、本研究で提案した wet-POA プロセスでの NIT 低減に加えて、界面欠陥の除去の余地があると考えられる。第四章で示した侵入酸素について、特に C 面上で酸素侵入量が小さいことと、ウェット酸化を C 面に適用した場合には Si 面よりも高いチャネル移動度が報告されていることを考慮すると、本研究では達成されなかった Si 面上での酸素侵入のプロセス制御が達成されれば、チャネル移動度の向上に寄与する可能性がある。

また、今後 4H-SiC は縦型 MOSFET でも特にチャネル部にトレンチ型を適用したものの普及が進められると考えられる。トレンチ型のチャネルを形成する場合は、チャネル構造が複雑になるため、基本的に堆積膜を用いて絶縁膜を形成することが前提となる。堆積膜を用いることで熱酸化によって発生する基板中のダメージ蓄積などの劣化要素は低減されると考えられるが、しかしながら堆積膜を用いる場合でも、堆積膜/4H-SiC 界面を高品質化するためには化学反応による界面形成が必要不可欠であり、本研究で獲得した熱酸化に対する理解が応用されることが期待される。ここにおいて確かに、本研究の提案した低温 wet-POA プロセスは、バルク品質とは独立に、界面選択的な処理によって界面品質を向上させることができることを示した。その原理は、第三章及び第四章の理解から、界面構造は  $\text{SiO}_2$  と 4H-SiC という材料の組み合わせによる部分以外に、熱酸化プロセスの選択によっても制御可能であるということによる。

4H-SiC 上の MOS 界面に形成される界面欠陥の起源を解明するための界面構造の理解について、微量の構造が原因となる”欠陥”と、マクロな構造が原因となる”物性”の影響をそれぞれ、今後も平等に解析する必要がある。これらの解明には解としての高品質な界面の実現が必要で、工業的のみならず学術的にも高品質化が必要不可欠である。

ここにおいて、4H-SiC MOS に対する界面構造の理解に基づく柔軟なプロセス開発が求められ、本研究で得られた 4H-SiC 熱酸化界面の微視的構造およびそのプロセス制御、さらに MOS チャネル特性に関する知見を、新規プロセス確立・技術進展のきっかけとして役立てていきたい。また、様々な新規材料を用いた技術革新が求められる今後のパワーエレクトロニクス発展において、材料界面における構造解析およびその制御はより柔軟性と多様性を要求されると予想され、本研究で SiC 上の熱酸化界面について得られた理解は、新規材料界面を適用した技術革新における材料選択においても貢献するものであると信じている。