

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 14049 号
------	---------------

氏 名 土井 拓馬

論 文 題 目

4H-SiC 金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタのためのゲートスタックおよびコンタクトの界面物性制御

(Studies on control of interfacial properties of gate stacks and cotancts for 4H-SiC metal-oxide-semiconductor field-effect transistors)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	工学研究科	教授	中塚 理
委員	名古屋大学	未来材料・システム研究所	教授	白石 賢二
委員	名古屋大学	工学研究科	講師	黒澤 昌志
委員	名古屋大学	工学研究科	教授	須田 淳

論文審査の結果の要旨

土井拓馬君提出の博士論文「4H-SiC 金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタのためのゲートスタックおよびコンタクトの界面物性制御」は、高パワー密度な4Hシリコンカーバイド（4H-SiC）パワー集積回路（IC）実現に向けた、酸化膜/4H-SiCおよび金属/4H-SiC界面の物性制御に関する研究をまとめたものである。本論文は、全6章より構成される。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的について述べている。

第2章では、酸化膜/半導体界面の電氣的物性および界面構造の評価手法について記述している。

第3章では、4H-SiC金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ（MOSFET）のチャネル抵抗低減に向け、 Al_2O_3 /4H-SiC界面の欠陥準位密度（ D_{it} ）の低減を試みた。 Al_2O_3 絶縁膜形成の新技术として金属薄膜酸化（MLO）法を提案し、その物性を解明した。本手法によって、既存の原子層堆積法により形成した Al_2O_3 層に比べて基板SiCの酸化が抑制され、60%程度の界面準位密度（ D_{it} ）低減が実証された。更に、意図的に酸化したSiC基板を用いて、 Al_2O_3 /4H-SiC界面における酸化副生成物の存在が D_{it} に与える影響を調査した。その結果、1原子層以下にまで酸化副生成物を抑制することで、 D_{it} を低減できることが示された。以上より、MLO法による酸化副生成物形成の抑制が D_{it} 低減に寄与することが解明された。

第4章では、SiCトランジスタの界面設計・制御に関する指針確立に向け、カウンタードープMOSFETの作製と特性評価を行った。第3章で確立したMLO法を含む、3種類の酸化膜形成手法を用いて D_{it} の異なるMOSFETを試作した。その結果、 D_{it} の低い試料ほど高い電界効果移動度（ μ_{FE} ）が得られた。カウンタードープMOSFETの μ_{FE} を決定づける物理量として自由電子移動度（ μ_{free} ）と自由電子密度の増加率（ dN_{free}/dV_G ）を独立に評価した結果、 D_{it} の影響は主に dN_{free}/dV_G 低下に現れることが示された。加えて、 D_{it} が dN_{free}/dV_G に与える影響を評価する物理量として、SiC表面ポテンシャルに対する自由電子増加率（ $dN_{free}/d\phi_S$ ）を導入した。 $dN_{free}/d\phi_S$ は D_{it} と同じ次元を持ち、両者の比較から表面ポテンシャル変化に対する自由電子密度と捕獲電子密度の増加量の比を議論している。実験的に求められた D_{it} と数値シミュレーションから求められた $dN_{free}/d\phi_S$ の比較の結果、高 μ_{FE} 試料では $D_{it} \ll dN_{free}/d\phi_S$ の関係が明らかになった。以上より、 D_{it} の低いエネルギー領域に $dN_{free}/d\phi_S$ が位置するようなSiCのカウンタードープ条件の設計が、 μ_{FE} 向上の鍵となることを実証した。

第5章では、平坦界面を有する低抵抗金属/SiCオーミックコンタクトの低温形成手法の開発に取り組んだ。低仕事関数金属であるY、Mg、Hf/4H-SiC界面のショットキー障壁高さ（SBH）は、高仕事関数金属の場合とは異なり、ショットキー極限から外れ、0.5eV以上となることが示された。低仕事関数金属/4H-SiC界面におけるダイポールの存在が示唆され、これを除去するため、界面への極薄 SiN_x 層の挿入および低温熱処理を試みた。その結果、Mg/4H-SiC界面における0.36eVの低SBHが実証された。これは極薄 SiN_x 層挿入による金属誘起ギャップ準位の抑制によると議論、推測された。また、Mg/4H-SiC構造に対する熱処理を試みた結果からは、200℃、1時間以内の熱処理により更に低い0.28eVのSBHが示された。二次イオン質量分析法による元素分布分析からは、低温熱処理時の H_2O の動きがSBH低減に寄与している可能性が示唆された。また、200℃熱処理後の界面粗さは、清浄化基板とほぼ同等と示され、低SBHコンタクトと平坦界面の両立が実証された。コンタクト抵抗率を評価したところ、ドープ濃度 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ の基板上で $6.5 \times 10^{-5} \Omega \text{cm}^2$ が得られた。これは一般的なNiを用いた950℃以上の高温熱処理後の金属/4H-SiCコンタクトと同程度であり、200℃熱処理での実現は大きな進歩である。本結果は、4H-SiCコンタクトにおける平坦界面と低コンタクト低抵抗率が本質的に両立可能であることを示した点で、重要な成果である。

第6章は本研究の総括であり、本研究で得られた結論および今後の展望が述べられている。

本研究は、酸化膜および金属/4H-SiC界面の物性制御、およびそれらの技術を用いた電子デバイス特性について詳細に調べた報告である。その成果として、高パワー密度な4H-SiCパワーIC実現に向けた界面構造およびデバイス設計指針を提示しており、工業上・学術上寄与するところが極めて大きい。よって、本論文の提出者である土井拓馬君は、博士（工学）の学位を受けるに十分な資格があるものと判定した。