

氏 名	矢 野 裕 司
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2044 号
学位授与の日付	平 成 13 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 電 子 物 性 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Control of Electronic Characteristics at SiO ₂ /SiC Interface for SiC Power Metal-Oxide-Semiconductor Devices (SiC パワー-MOS デバイスに向けた SiO ₂ /SiC 界面電子物性の制御)
論文調査委員	(主 査) 教 授 松 波 弘 之 教 授 鈴 木 実 教 授 野 田 進

論 文 内 容 の 要 旨

半導体シリコンカーバイド (SiC) は、広い禁制帯幅、高い絶縁破壊電界強度、大きな飽和ドリフト速度、高い熱伝導度をもつので、次世代のパワーデバイス用材料として注目されている。すでに SiC の理論限界に近い高性能ショットキーダイオードが実現されている。しかしながら、高速スイッチングが期待されるパワー-MOS (金属-酸化膜-半導体) FET (電界効果トランジスタ) では、SiO₂/SiC 界面でのチャネル移動度が小さいためにチャネル抵抗が大きくなり、SiC のもつ優れた物性が活かされていない。本論文は、超低損失 SiC パワー-MOSFET の実現に向けて、その基礎となる SiO₂/SiC 界面電子物性を、酸化・アニール雰囲気やポリタイプ、面方位を変えることで精密に制御し、チャネル移動度を大きく改善した結果をまとめたもので、7 章からなる。

第 1 章は序論で、SiC の Si に対する優位性を述べ、SiO₂/SiC 界面特性、SiC パワー-MOSFET の現状、問題点を挙げ、本論文の位置づけと目的を論じている。

第 2 章では、4H-、6H-SiC を用いた SiO₂/SiC (0001) 界面で、酸化・アニール雰囲気が深い界面準位に与える影響を調べている。光照射によって深い界面準位からキャリアを放出させ、そのときの高周波容量 (C) - 電圧 (V) 特性を測定して評価している。ドライ酸化の場合、p 型 SiC MOS キャパシタの大きな負のフラットバンドシフトがドナー型の深い界面準位に捕獲された正孔によることを示し、ウェット酸化の場合、ドナー型の深い界面準位が減少し、フラットバンドシフトが小さくなることを見出している。酸化時より低温での再酸化アニール (ウェット雰囲気) で、フラットバンドシフトはさらに小さくなるが、負の固定電荷が発生する。n 型 SiC では、フラットバンドシフトは小さく、ウェット雰囲気をを用いると正にシフトし、アクセプタ型の深い界面準位や負の固定電荷が発生することを示している。

第 3 章では、6H-SiC 上の p 型 MOS キャパシタと反転型 n チャネル MOSFET 特性の相関を調べている。MOS キャパシタの特性は酸化・アニール雰囲気によって大きく異なるが、MOSFET のチャネル移動度はほぼ一定であり、しきい値電圧は再酸化アニールを行うと大きくなる。多数の MOSFET 特性から、しきい値電圧が大きいほどチャネル移動度が低下することを見出し、界面における負の電荷 (負の固定電荷またはアクセプタ型界面準位) によって抑制されているためであるとしている。

第 4 章では、異なるポリタイプの (0001) Si 面上に作製した MOSFET 特性を比較している。4H-SiC はバルク中の電子移動度が最も大きい (800cm²/Vs) にもかかわらず、チャネル移動度は極めて小さい (5cm²/Vs)。しきい値電圧も高い (8V)。15R-SiC と 6H-SiC は同じしきい値電圧を示し (1.5V)、界面特性も類似している。チャネル移動度は 15R-SiC の方が大きく (15R: 60cm²/Vs, 6H: 45cm²/Vs)、バルクの電子移動度を反映している (15R: 600cm²/Vs, 6H: 400cm²/Vs)。これらを基に、界面準位の分布と禁制帯幅の関係について説明し、15R-SiC がパワー-MOSFET 用材料として有望であることを示している。

第 5 章では、ウェット酸化により、(1120) 面上の MOSFET でチャネル移動度の大幅な向上を得ている。(0001) Si 面

と比較して、4H-SiC では17倍大きな $96\text{cm}^2/\text{Vs}$ を得、6H-SiC でも2.5倍大きな $116\text{cm}^2/\text{Vs}$ を得ている。さらに、 $(11\bar{2}0)$ 面上チャネルの移動度にバルクと同様に異方性があることを初めて明らかにしている。温度特性から、 $(11\bar{2}0)$ 面を用いることで、4H-SiC で初めて温度上昇とともにチャネル移動度が減少する結果を得ている。また、しきい値電圧の温度依存性から、導電帯付近で $(11\bar{2}0)$ 面では (0001) Si 面より界面準位密度が小さいことを明らかにしている。

第6章では、n型 MOS キャパシタを用いて SiO_2/SiC ($11\bar{2}0$) 界面の導電帯付近の浅い界面準位を評価し、 (0001) Si 面と比較している。浅い界面準位密度は $(11\bar{2}0)$ 面の方が少なく、やや深いエネルギーでは (0001) Si 面の方が少ないことを見出している。100K の低温での高周波 C-V 測定結果からも浅い界面準位が少ないことを確認し、それが $(11\bar{2}0)$ 面において、チャネル移動度の向上につながっていることを示している。また、 $(11\bar{2}0)$ 面は (0001) Si 面よりも界面特性が酸化雰囲気敏感であることを見出している。

第7章は結論で、 SiO_2/SiC 界面特性に関する知見をまとめ、超低損失 SiC パワーMOSFET の実現に向けた課題と今後の研究指針を述べている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、広禁制帯幅半導体 SiC の超低損失パワーMOS (金属-酸化膜-半導体) FET (電界効果トランジスタ) の実現に向けて、基礎となる SiO_2/SiC 界面の電子物性を、酸化膜形成時やアニール時の雰囲気、SiC 結晶のポリタイプ (結晶多形) や面方位を変えることによって、精密に制御した結果をまとめたもので、得られた主な成果は以下のとおりである。

1. 4H-, 6H-SiC (0001) 面と SiO_2 の界面では、ドライ酸化の場合ドナー型の深い界面準位が多くつくられ、ウェット酸化の場合それが減少する。酸化時より低温での再酸化アニール (ウェット雰囲気) では、アクセプタ型の深い界面準位や負の固定電荷が発生する。

2. 6H-SiCMOS キャパシタの特性は酸化・アニール雰囲気によって大きく異なるが、MOSFET のチャネル移動度はほぼ一定であり、しきい値電圧は再酸化アニールによって大きくなる。しきい値電圧が大きいほどチャネル移動度が低下するのは、界面の負の電荷 (アクセプタ型界面準位や負の固定電荷) によって抑制されるためである。

3. 4H-SiC はバルクの電子移動度が最も大きいにもかかわらず、チャネル移動度は極めて小さく、しきい値電圧も高い。15R-, 6H-SiC は同じしきい値電圧を示し、界面特性が類似している。チャネル移動度は15R-SiC が最も大きく、パワーMOSFET 用として有望である。

4. ウェット酸化を用いて、 $(11\bar{2}0)$ 面上の4H-SiC MOSFET のチャネル移動度として (0001) Si 面より17倍大きな $96\text{cm}^2/\text{Vs}$ を得、6H-SiC でも2.5倍大きな $116\text{cm}^2/\text{Vs}$ を得た。チャネル移動度が温度上昇とともに減少すること、面内において異方性があることを初めて見出した。

5. n型 MOS キャパシタにおいて、浅い界面準位密度は $(11\bar{2}0)$ 面の方が少なく、やや深いエネルギーでは (0001) Si 面の方が少ないことを見いだした。100K の低温測定からも浅い界面準位が少ないことを確認し、それが $(11\bar{2}0)$ 面上でのチャネル移動度の向上につながっていることを示した。

以上要するに、本論文は、半導体 SiC の超低損失 MOS パワーデバイスを実現するために、 SiO_2/SiC 界面の電子物性を精密に制御し、新しい結晶面を採用することでチャネル移動度を飛躍的に大きくした結果に関するもので、得られた成果は学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成13年1月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。