

修士学位論文要約（令和 4 年 3 月）

金属/SiO₂/SiC 構造への Si 窒化膜界面制御層導入プロセスに関する研究

渋谷 凱政

指導教員：佐藤 茂雄， 研究指導教員：櫻庭 政夫

Study on The Introduction Process of Si Nitride Interface Control Layer into Metal/SiO₂/SiC Structure

Kaisei SHIBUYA

Supervisor: Shigeo SATO, Research Advisor: Masao SAKURABA

SiC power devices are expected to be used in the industrial and automotive fields due to the higher operation voltage with the smaller chip size than Si. One of the problems is that the gate insulator film is generally obtained by direct oxidation of SiC substrate, which may cause interfacial defects due to C precipitation at the SiO₂/SiC interface, resulting in deterioration of electrical characteristics. The purpose of this study is to improve the performance of SiC power devices by introducing a Si nitride film at the SiO₂/SiC interface to suppress the C precipitation. It was found that plasma chemical vapor deposition (CVD) with appropriate conditions enabled successful formation of Si nitride (Si₃N₄) films whose physical properties such as BHF etching rate, refractive index, and binding energy were close to the values for stoichiometric composition. It was also clarified that the Si nitride film effectively prevent thermal oxidation of the substrate, and the effect was maintained even at the thickness of 1 nm. Capacitance-voltage characteristics were also evaluated for Metal/Si oxide/Si nitride/semiconductors (p-Si or n-SiC).

1. はじめに

近年、高温で安定動作する高耐圧・低損失のパワー半導体デバイスの材料として SiC 半導体に注目が集まっている¹⁾。しかし、SiC は Si 酸化膜/SiC 界面に C 偏析に由来する欠陥が生じデバイス特性に悪影響を及ぼすことが問題となっている²⁾。Si 酸化膜形成後の高温窒化処理手法が報告されている³⁾が、生産性向上の観点で改善の余地があると考えられる。本研究では、Si 酸化膜/SiC 界面に SiC の熱酸化を阻止する極薄 Si 窒化膜を導入することで C 偏析の問題を排除し、より高性能なゲート絶縁膜を実現することを目的とする。

2. 界面制御のためのプラズマ Si 窒化膜の形成

SiC 基板の熱酸化阻止層として期待している Si 窒化膜層を、低エネルギープラズマ CVD の Ar プラズマ照射下での SiH₄ と N₂ の分解反応を用いて成膜した⁴⁾。その後、Si 窒化膜の上に再びプラズマ CVD を用いて非晶質 Si 層を成膜し、高真空熱処理炉の酸素雰囲気にて

900 °C のドライ酸化を行って Si 酸化膜を形成した。その後、分光エリプソメトリーを用いて Si 窒化膜の屈折率と膜厚や Si 熱酸化膜の膜厚を測定するとともに、X 線光電子分光法 (XPS) を用いた Si 2p スペクトルの測定、バッファード HF (BHF; HF (50%) : NH₄F (40%) = 1:10) を用いたエッチング速度の測定を行った。その結果、適切な SiH₄ 分圧 (3×10^{-4} Pa) において BHF エッチング速度、屈折率、結合エネルギーといった各物性値が、800 °C の熱 CVD で堆積した化学量論比組成に近い Si 窒化膜 (Si₃N₄) の値⁵⁻⁷⁾に近くなることがわかった。

3. 窒化膜上のゲート絶縁膜の形成と評価

次に、非晶質 Si (10 nm) / Si 窒化膜 / Si (100) の試料を 900 °C で熱酸化した場合の SiO₂ 膜厚の熱酸化時間依存性を図 1 に示す⁷⁾。Si 窒化膜のない非晶質 Si (10 nm) / Si (100) の試料においては、SiO₂ 膜厚は 35 nm を超える厚さまで時間とともに増加していった。一方、Si 窒化膜がある試料においては、22 nm 付近で SiO₂ 膜厚は飽和し

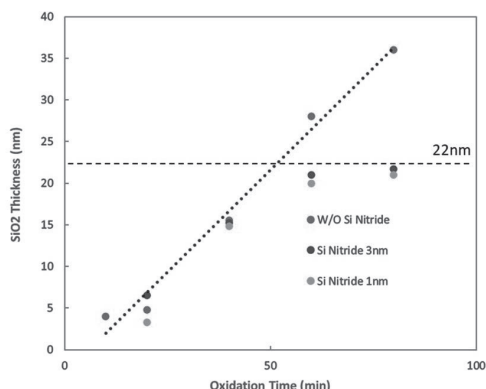


図1. 非晶質 Si (10 nm) / Si 窒化膜 / Si(100)を 900 °C でドライ熱酸化して形成された SiO₂ 膜厚の酸化時間依存性

て熱酸化が進行しなくなることがわかった。10 nm 厚の非晶質 Si 薄膜が全て熱酸化された場合に形成される SiO₂ 膜厚は 22 nm 程度になると計算されることから、プラズマ CVD で堆積した 1 nm 厚程度の極薄 Si 窒化膜が酸素原子の浸透を阻止することにより、Si(100)基板の熱酸化が進行しなかったものと考えられる。このことを利用すると、SiC 基板上への Si 酸化膜形成プロセスにおける SiO₂ / SiC 界面への C 偏析の問題を根本的に排除できる可能性があると考えられ、SiC 電界効果トランジスタの高性能化に貢献できるものと期待される。

900 °C で 60 分間熱のドライ熱酸化を行った Si (10 nm) / Si 窒化膜 (3 nm) / Si(100)において SiO₂ を BHF エッチングした後の XPS Si 2p スペクトルを図 2 に示す。エッチング時間が 22 秒の場合には 102.5 eV 付近の Si 窒化膜由来の成分が支配的となっており、Si 窒化膜下部には SiO₂ (105 eV 付近) が形成されていないが、エッチング時間が 10~20 秒では、すでに SiO₂ がエッチングされて除去されているものと予想される。また、102.5 eV より高エネルギーの成分が存在することから、Si 窒化膜表面の一部が熱酸化され、エッチング速度の遅い Si 酸化窒化膜 (SiON) が形成されていることが考えられる。

4. 窒化膜を導入した金属-絶縁体-半導体構造の形成と評価

金属 / 絶縁膜 / p-Si 構造を形成し、Si 窒化膜や Si 酸化膜の絶縁膜としての電気特性評価を行った結果、良質な Si 窒化膜は良好な絶縁膜として機能することが確認できたが、同時に、膜質低下や膜厚増加が電圧-容量特性に悪影響

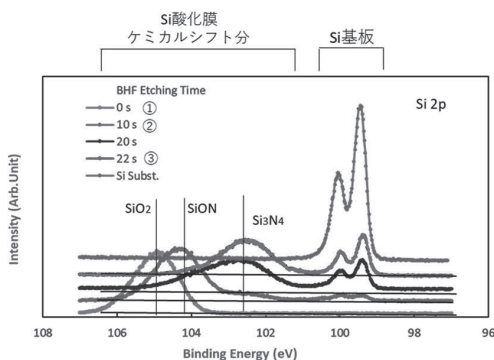


図2. 900 °C で 60 分間のドライ熱酸化を行った非晶質 Si (10 nm) / Si 窒化膜 (3 nm) / Si(100) において SiO₂ を BHF エッチングした後の XPS Si 2p スペクトル

を与えることがわかった。一方、基板を変えた金属 / 絶縁膜 / n-SiC 構造においては p-Si(100) 基板の場合とは異なり、リーク電流が増大してしまい、電圧-容量特性の測定が困難であることがわかった。原因としては Si 窒化膜中に高濃度の固定電荷が存在することによる局所的内部電界増大の可能性が考えられる。

5. まとめ

低エネルギープラズマ CVD で堆積した Si 窒化膜の品質は SiH₄ の分圧から影響を受けるが、適切な堆積条件では、1~3 nm の Si 窒化膜が Si 基板表面の熱酸化を阻止する役割を果たすことがわかった。

文献

- 1) S. Dimitrijevic et al. Proc. of 29th MIEL (May 12-14, 2014, Belgrade, Serbia), pp.43-46,
- 2) H. Watanabe et al., Appl. Phys. Lett., 99 (2011) 021907.
- 3) Y. Iwasaki et al., Appl. Phys. Exp., 3 (2010) 026201.
- 4) M. Sakuraba et al., Thin Solid Films, 517 (2008) 10.
- 5) S. Matsuo and K. Kiuchi, Jpn. J. Appl. Phys., 22 (1983) L210.
- 6) M. Saito et al., Abs. of ACSIN-7 (Nov. 16-20, 2003, Nara, Japan), Abs.No.20C59, p.212.
- 7) 「電界効果トランジスタ高性能化のためのプラズマ窒化絶縁膜形成に関する研究」 渋谷凱政, 櫻庭政夫, 佐藤茂雄, 2021 年応用物理学会東北支部第 76 回学術講演会, Abs.No.3a-A-5-3, pp.64-65, 2021 年 12 月 2 日~3 日 (オンライン開催) .