様々なゲート酸化膜を有する SiC MOSFET における Hall 移動度の実効垂直電界依存性 Effective Vertical Field Dependence of Hall Mobility for SiC MOSFETs with Various Gate Oxides 京大院工¹, 阪大院工², 名大院工³ ^O伊藤 滉二¹, 田中 一^{1,2}, 堀田 昌宏^{1,3}, 須田 淳^{1,3}, 木本 恒暢¹ Kyoto Univ.¹, Osaka Univ.², Nagoya Univ.³, °K. Ito¹, H. Tanaka^{1,2}, M. Horita^{1,3}, J. Suda^{1,3}, T. Kimoto¹ E-mail: ito@semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp

背景・目的:SiC MOS 界面を走行する電子は高密度界面準位に捕獲されるため、MOSFET のゲー ト特性の結果から散乱機構の議論を行うのは困難である。可動電子移動度を評価するためには、 Hall 効果測定を行う必要がある。近年、幅広いボディ層濃度 (NA) を有する窒化 MOSFET に対し て Hall 効果測定が実施され、高実効垂直電界 (E_{eff}) 下において Hall 移動度 (µ_{Hall}) が急激に低下 する現象が報告された[1]。高濃度ボディ層を有する SiC MOSFET の知見はパワー応用上極めて重 要であり、上記の移動度低下現象の原因究明は急務である。我々は、界面処理法に着目し、酸化 のみ、窒化、およびリン処理[2]を施した SiC MOSFET を作製した。Hall 効果測定を実施した結果、 高 E_{eff}領域における μ_{Hall}が、リン処理では大幅に向上することが判明したので報告する。 試料作製: MOSFET のゲート酸化膜は、p型 4H-SiC (0001) 面試料に熱酸化 (1300℃, 30分) のみ あるいは酸化後の窒化処理 (NO/N2雰囲気 1250℃, 70分)、あるいはリン処理 (POCl₃/O2/N2雰囲気 1000°C, 10 分 + N₂雰囲気 1000°C, 30 分)を施し作製した (酸化膜厚は 42–58 nm)。ボディ層濃度は Al イオン注入を施すことで $N_A = 3 \times 10^{14}$ -3×10¹⁸ cm⁻³の広範囲で系統的に変化させた。 結果・考察: Figure 1 に、酸化のみ (As-Ox.)、窒化 (NO)、およびリン処理 (POCl₃)を施した SiC MOSFET における $\mu_{\text{Hall}} \mathcal{O} E_{\text{eff}}$ 依存性を示す。As-Ox.試料と NO 試料を比べると、 $\mu_{\text{Hall}} \mathcal{O}$ 値はほぼ 同じである (報告[3]と整合)。一方で、NO 試料と POCl₃試料を比べると、いずれのボディ層濃度 を有する試料においても、 $\mu_{\text{Hall}}(\text{NO}) < \mu_{\text{Hall}}(\text{POCl}_3)$ という関係が成立している。例えば、 $N_A = 3 \times 10^{14}$ cm⁻³の試料において、Hall 移動度の最大値は、NO 試料の場合は 277 cm²V⁻¹s⁻¹、POCl₃試料の場合 は 578 cm²V⁻¹s⁻¹ である。また、As-Ox.および NO 試料の場合、高 E_{eff} 領域において急激に μ_{Hall} が 低下するが、POCl₃試料の場合、 μ_{Hall} は比較的緩やかに低下している。本結果は、高 E_{eff} 領域にお ける μ_{Hall} の急激な低下について、基板不純物によるクーロン散乱のみが制限要因ではないことを 示唆しており、報告[4]と整合する。Hall 効果測定の結果より、界面準位密度 (D_{it}) のエネルギー 分布の抽出も行った[5]。得られた可動電子密度 (nfree) に対応するフェルミ準位のエネルギー (E_F) 二次元電子系におけるシュレーディンガー・ポアソン方程式を自己無撞着に計算 を得るために、 した。Split C-V 測定を行うことで全電子密度 (ntotal) を定量し、捕獲電子密度 (ntrap) を ntrap = ntotal - $n_{\text{free}} \ge して計算した。 <math>D_{\text{it}}$ は dn_{trap}/dE_F と近似して決定した。その結果、As-Ox.および NO 試料の 場合、二次元状態密度 (2D-DOS) 下端を基準とした Dit分布は、ボディ層濃度に依らず一致した。 これは、過去に報告した結果[6]と整合する。またリン処理の場合、幅広いボディ層濃度の試料で、 ntrapは定量下限を下回るほど小さく、伝導帯端極近傍においてもDit が極めて低いことが判明した。 n_{trap} は定量下限を下回るほど小さく、伝導帯端極近傍においても D_{it} が極めて低いことが判明した。 ここで、高 E_{eff} 領域における窒化およびリン処理の μ_{Hall} の違いとして、捕獲電子によるクーロン 散乱の有無が原因として挙げられる。この影響を検証するため、窒化 MOSFET の Hall 移動度 ($\mu_{Hall}(NO)$)に対して、捕獲電子によるクーロン散乱で決まる移動度 ($\mu_{trap}(NO)$)を理論的に計算し [7]、マティーセン則を基に差し引くことにより、リン処理 MOSFET の Hall 移動度 ($\mu_{Hall}(POCl_3)$)と の比較を行った。 $\mu_{trap}(NO)$ を計算する際、 D_{it} 分布は全ての窒化試料について平均化した D_{it} 分布関 数を用いた。また、2D-DOS 下端に D_{it} 分布が追従する効果も考慮した。 $\mu_{Hall}(NO)$ から $\mu_{trap}(NO)$ を 差し引いた移動度の E_{eff} 依存性は、 $\mu_{Hall}(NO)$ の E_{eff} 依存性とほぼ同じであり、 $\mu_{trap}(NO)$ の影響は比較的小さいことがわかった。ここで、As-Ox.および NO 試料では、界面に高密度の炭素が存在す るが、POCl₃ 試料では非常に少ないことを我々は過去に報告した[8]。本研究は、界面に存在する 高密度炭素が、高 E_{eff} 領域において支配的な散乱源である可能性を示唆する[7]。 高密度炭素が、高 E_{eff} 領域において支配的な散乱源である可能性を示唆する[7]。 [1] M. Noguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 031004 (2019). [5] T. Hatakeyama et al., Appl. Phys. Lett. **115**, 132102 (2019). [5] T. Hatakeyama et al., Appl. Phys. Express **10**, 046601 (2017). [7] H. Tanaka and N. Mori, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 031006 (2020). [7] H. Tanaka and N. Mori, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 031006 (2020). [7] H. Tanaka and N. Mori, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 031006 (2020). [8] T. Kobayashi and T. Kimoto, Appl. Phys. Lett. **111**, 062101 (2017).



