

# リン処理を施した SiC(0001)/SiO<sub>2</sub> 界面における 反転層電子のユニバーサル移動度の評価

Universal mobility of electrons in SiC(0001)/SiO<sub>2</sub> systems with phosphorus treatment

京大院工<sup>1</sup>, 名大院工<sup>2</sup>, <sup>○</sup>伊藤 滉二<sup>1</sup>, 堀田 昌宏<sup>1,2</sup>, 須田 淳<sup>1,2</sup>, 木本 恒暢<sup>1</sup>

Kyoto Univ.<sup>1</sup>, Nagoya Univ.<sup>2</sup>, <sup>○</sup>Koji Ito<sup>1</sup>, Masahiro Horita<sup>1,2</sup>, Jun Suda<sup>1,2</sup>, Tsunenobu Kimoto<sup>1</sup>

E-mail: ito@semicon.kuee.kyoto-u.ac.jp

**背景・目的:** SiC MOSFET では、高密度界面準位の存在により、ゲート電圧に伴って、可動電子移動度と界面準位に捕獲された電子密度が同時に変化する複雑さから、移動度制限要因の議論が困難となっている。この問題に対し、MOS Hall 効果測定から可動電子移動度を評価する方法[1, 2]、もしくは界面準位密度 ( $D_{it}$ ) の影響を極力低減した MOSFET の  $I$ - $V$  特性からチャネル移動度を評価する方法が方策として挙げられるが、後者に関する先行研究はほとんど存在しない[3]。そこで、 $D_{it}$  を大幅に低減 ( $D_{it} < 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ) できる界面処理法であるリン処理 (POCl<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> の混合ガスアニール) [4] に着目した。本研究では、ボディ層アクセプタ密度 ( $N_A$ ) を系統的に変化させた SiC  $n$  チャネル MOSFET を、リン処理を施して作製した。296, 473, 623 K においてゲート特性を中心に測定を行い、チャネル移動度を評価することで、SiC MOSFET の移動度制限要因の議論を試みた。

**MOSFET 作製:** MOSFET のゲート酸化膜は、p 型 4H-SiC (0001) 面試料に熱酸化 (1300°C, 30 分) + リン処理 (POCl<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 雰囲気 1000°C, 10 分 + N<sub>2</sub> 雰囲気 1000°C, 30 分) を施し作製した。酸化膜厚は 58 nm であった。ボディ層アクセプタ密度 ( $N_A$ ) は Al イオン注入を施すことで  $3 \times 10^{15}$ – $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の広範囲で系統的に変化させた。

**結果・考察:** Figure 1 に、ボディ層  $N_A = 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  の MOSFET に対して MOS Hall 効果測定を行って得られた、反転層電子密度のゲート電圧依存性を示す。測定値の傾きが、酸化膜容量から得られる理論値と概ね等しいことがわかる。これは、リン処理を施した SiC MOSFET では、キャリアトラップの影響が小さいことを示唆している。Figure 2 にリン処理を施した MOSFET における実効移動度 ( $\mu_{\text{eff}}$ ) の実効垂直電界強度 ( $E_{\text{eff}}$ ) 依存性を示す。Figs. 2(a)–(c)において、測定温度  $T$  はそれぞれ  $T = 296, 473, 623 \text{ K}$  である。実効移動度は、ボディ層濃度が増加するにつれて、また高温になるにつれて低下することがわかる。特に 473, 623 K の高温では、ドーピング密度に依らないユニバーサルな移動度を確認できる。ここで、Si MOSFET におけるフォノン散乱移動度 ( $\mu_{\text{ph}}$ ) は、 $E_{\text{eff}}^{-0.33} \cdot T^{-1.75}$  に比例することが知られている[5]。Fig. 2(c)において  $0.1 \text{ MVcm}^{-1} < E_{\text{eff}} < 0.5 \text{ MVcm}^{-1}$  の範囲でユニバーサル移動度を再現するように  $\mu_{\text{ph}} / \text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1} = 2.5 \times 10^6 \cdot (E_{\text{eff}} / \text{MVcm}^{-1})^{-0.33} \cdot (T / \text{K})^{-1.75}$  (赤色の破線)と仮定すると、図中の移動度の実効垂直電界強度依存性、および温度依存性がよく再現できている。Fig. 2(a)において、先行研究[2, 3]で決定されているフォノン散乱移動度 (それぞれ紫の点線、緑の点線) よりも、リン処理を施した MOSFET の実効移動度の方が高いこともわかる。温度依存性に関して、他機関では、 $T^{-0.4}$ [2]、 $T^{-0.85}$ [3]、 $T^{-1.67}$ [6]などの報告がなされており、特に  $T^{-1.67}$ [6]の報告とは概ね整合していると言える。

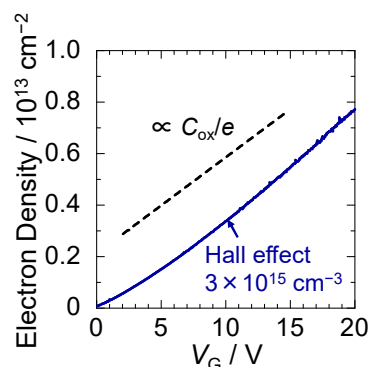


Fig. 1: Gate voltage dependence of electron density at room temperature for a lightly-doped ( $N_A = 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) POCl<sub>3</sub>-annealed SiC MOSFET obtained by Hall effect measurement.

[1] T. Hatakeyama et al., *Appl. Phys. Express* **10**, 046601 (2017).  
[3] T. Ohashi et al., *IEEE Trans. Electron Devices* **65**, 2707 (2018).  
[5] S. Takagi et al., *IEEE Trans. Electron Devices* **41**, 2357 (1994).

[2] M. Noguchi et al., *IEDM Tech. Dig.* (2017), p. 219.  
[4] D. Okamoto et al., *IEEE Trans. Electron Devices* **31**, 710 (2010).  
[6] M. Sometani et al., *Appl. Phys. Lett.* **115**, 132102 (2019).

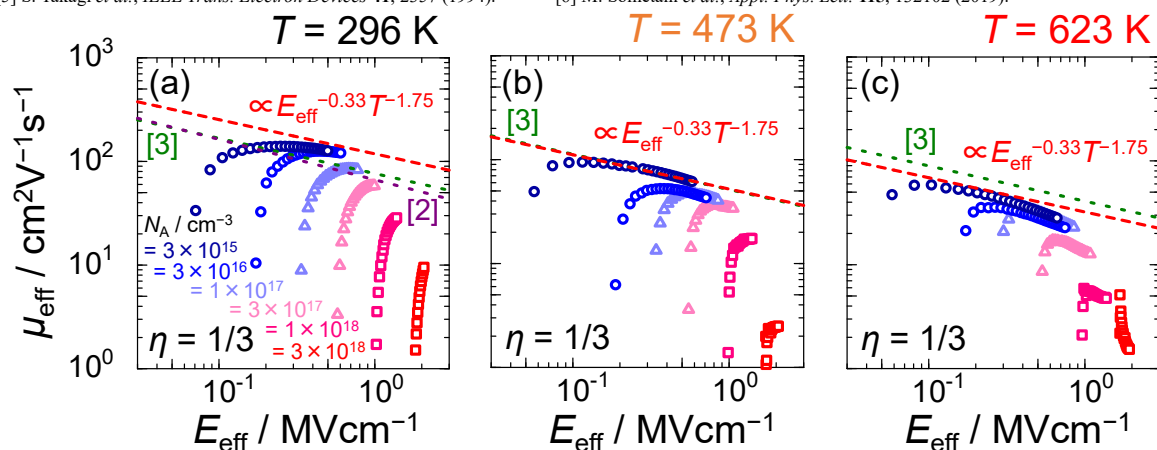


Fig. 2: Effective vertical field dependence of effective channel mobility at (a) 296 K, (b) 473 K, and (c) 623 K for POCl<sub>3</sub>-annealed SiC MOSFETs with various doping concentrations of the p-body.