## SiC MOSFET における界面準位密度分布のボディ層濃度依存性

Dependence of interface-state-density distribution on doping concentration of p-body in SiC MOSFETs

京大院工<sup>1</sup>,名大院工<sup>2</sup><sup>0</sup>伊藤 滉二<sup>1</sup>,小林 拓真<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>,

°Koji Ito<sup>1</sup>, Takuma Kobayashi<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、高密度界面準位がチャネル移動度を制限しており、界面準位密 度(D<sub>it</sub>)とデバイス特性との間の定量的な議論が不十分であることが課題となっている。高濃度 ボディ層を有する MOSFET においては、チャネル移動度が低濃度の場合と比べて大きく低下する 現象[1]が生じるため、チャネル移動度を制限する D<sub>it</sub>のボディ層アクセプタ密度(N<sub>A</sub>) 依存性の 知見は重要である。本研究では、ボディ層アクセプタ密度を系統的に変化させた SiC n チャネル MOSFET を作製し、反転層電子に対する伝導帯サブバンドのエネルギー準位を自己無撞着計算に より決定することで[2]、ゲート特性から伝導帯端(Ec)近傍のDit分布の評価を行った[3]。

試料・計算モデルの概要: MOSFET のゲート酸化膜は、p型 SiC (0001) 面試料に熱酸化 (1300℃, 30分)、もしくは熱酸化+NO処理(1250℃,70分)を施し作製した。酸化膜厚は約42 nm である。  $N_A$ は Al イオン注入を施すことで  $3 \times 10^{15}$  -  $1 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup>の広範囲で変化させた。ゲート特性から D<sub>it</sub> 分布を評価する際、反転層電子は全て一定のドリフト移動度(µ<sub>drift</sub>)を有して伝導に寄与し、 界面準位捕獲電子は一切伝導に寄与しないと仮定して、ドレイン電流 (I<sub>D</sub>) およびゲート電圧 (V<sub>G</sub>) を理論的に計算し、実験 Ib-VG 特性を再現するように Dit 分布を決定した。表面フェルミ準位およ び表面ポテンシャル、サブバンドのエネルギー準位は、反転層電子密度および NA を初期値とし て、Schrödinger 方程式と Poisson 方程式とを自己無撞着に計算することで決定した。なお、計算に は M 点から L 点までの有効質量の異なる 2 つのバンドの量子閉じ込め効果を考慮した。 界面準位 捕獲電子密度は、D<sub>it</sub>と Fermi-Dirac 分布関数との積をエネルギーで積分して求めた。µ<sub>drift</sub>は Hall 効 果測定の報告[4]を参考に、N<sub>A</sub>=3×10<sup>15</sup>,3×10<sup>16</sup>,1×10<sup>17</sup>,3×10<sup>17</sup>,1×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>の条件の素子に対し てそれぞれ  $\mu_{drift} = 100, 35, 25, 15, 5 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ とした。定数項および 2 つの指数関数項を有する  $D_{it}$ 分布関数および固定電荷密度をパラメータとし、計算 I<sub>D</sub>-V<sub>G</sub>特性が実験 I<sub>D</sub>-V<sub>G</sub>特性を再現するよう に D<sub>it</sub>分布を決定した。また、Hall 効果測定の実測値から抽出した D<sub>it</sub>分布とも比較した。

結果・考察: Fig. 1(a)および(b)にそれぞれ三次元状態密度および二次元状態密度下端 (Ec(3D-DOS),  $E_{\rm C}(2D-{\rm DOS}))$ を基準とした  $D_{\rm it}$ 分布を示す。Fig. 1(a)において、 $D_{\rm it}$ 分布は  $N_{\rm A}$ に依存して大きく変 化することがわかる。一方で、Fig.1(b)においては、それぞれの酸化膜形成条件において、Dit分布 が NAによらずほぼ一意に決まることがわかる。これは、Ditが、2D-DOS の第一サブバンドのエネ ルギー準位に依存することを示しており、Ec(2D-DOS)のゆらぎに起因するバンドテイルの一部が D<sub>it</sub>である可能性がある[5]。Fig.2に Hall 効果測定の実験結果より抽出した D<sub>it</sub>分布を示す。NO 処 理を施した MOSFET の Hall 効果測定結果は、Fig. 1 の Dit 分布と概ね整合しており、これは一定 のドリフト移動度という仮定の妥当性を示す。一方、熱酸化+POCl3処理[6]([6]と同じ熱処理条件) を施した MOSFET では、Ditを大幅に低減できるが、依然として Ec(2D-DOS)に向けて増加傾向で あることがわかる。以上の結果より、SiC MOSFET では、ゆらぎを持つ Ec(2D-DOS)が、非局在準 位の電子の理想的な伝導を妨げることによって、チャネル移動度を制限している可能性がある。

[1] S. Nakazawa et al., IEEE Trans. Electron Devices 62, 309 (2015). [3] M. Hauck et al., Ext. Abstr. of ICSCRM 2017, TU.B1.3 (2017). [5] H. Yoshioka et al., AIP Advances 8, 045217 (2018).

[2] G. Pennington et al., J. Appl. Phys. 95, 4223 (2004). [4] M. Noguchi et al., in IEDM Tech. Dig., 219 (2017). [6] D. Okamoto et al., IEEE Trans. Electron Devices 31, 710 (2010)



10<sup>15</sup>

**10**<sup>14</sup>

10<sup>13</sup>

 $10^{12}$ 

-0.2

%-

2D-DOS

Ox.+NO

Fig. 2 Energy distributions of interface state density obtained by ID-VG fitting results and results of Hall effect measurement

0

 $N_{\rm A} = 3 \times 10^{15} {\rm ~cm^{-3}}$ 

Ox.+POCl<sub>2</sub>

 $E_{\rm C}(2\text{D-DOS}) - E_{\rm T} / \text{eV}$ 

0.2

ID-VG Fitting

As-Ox

0.4

--Hall Effect

Fig. 1 Energy distributions of interface state density extracted from as-oxidized and NO-annealed MOSFETs with various doping concentration of p-bodies on the basis of the bottom edge of (a) 3D-DOS and (b) 2D-DOS.