

Si MOSFET の SS 値の極低温領域における温度依存性の定量的理解 Quantitative Understanding of Temperature Dependence of Sub-threshold Swing in Si MOSFETs at Cryogenic Temperatures

東大院工, 姜旼秀, トプ ラー トン カデ イット, 岡 博史, 森 貴洋, 竹中 充, °高木 信一
Univ. Tokyo, Min-Soo Kang, Kasidit Toprasertpong, Hiroshi Oka, Takahiro Mori, Mitsuru Takenaka,
°Shinichi Takagi
E-mail: takagi@ee.t.u-tokyo.ac.jp

【背景】4 K 近傍の極低温での Si MOSFET の電気特性の正確な理解は、量子コンピュータシステムの制御回路応用などの点で重要である。MOSFET の低電圧動作の観点から重要な電気特性である sub-threshold swing (SS) は、Boltzmann 極限の下では温度に比例するが、十分低温では値が飽和することが、Si nMOSFET に対して報告されており [1]、mobile tail state とバンド端にピーク値をもって Gaussian 分布する immobile state を仮定することによって、実験結果を定量的に再現できることが知られている [2-4] が、pMOSFET の SS 値の報告は少なく、nMOSFET との定量的比較にも乏しい。本研究では、基板濃度の異なる Si nMOSFET と pMOSFET の SS 値の温度依存性を系統的に評価すると共に、両者を定量的に再現できる物理モデルの構築に成功したので、報告する。

【実験手法・結果】 10^{15} から 10^{18} cm^{-3} 台までの幅広い範囲での基板不純物濃度を持つ Si nMOSFET と pMOSFET の SS 値の温度依存性を Fig. 1 と 2 に示す。nMOSFET の SS 値は温度の低下と共に飽和するが、pMOSFET の SS 値は温度の低下と共に増加する傾向が見られることが分かる。このような pMOSFET の SS の温度依存性と基板不純物濃度依存性の実験結果は、従来の DOS モデル [1] では十分説明できないことから、アモルファス半導体の DOS モデルを念頭に、Fig. 3 に示すような tail state の深いエネルギー位置にある DOS を immobile state、浅いエネルギー位置にある DOS を mobile state と見なす新しいモデルを提案する。提案モデルにより計算された SS 値の温度依存性を Fig. 1 と 2 の破線で示す。実験結果をよく説明できることが分かる。同じ物理パラメータを用いて、nMOSFET と pMOSFET の SS 値のドレイン電流依存性も定量的に説明できる。これらの実験結果を再現できる DOS のエネルギー分布を Fig. 4 に示す。pMOSFET の方が immobile state の密度が高いことから、温度の低下と共にフェルミレベルでの immobile state 量が、pMOSFET で著しく増加する。これが pMOSFET の SS 値が温度の低下と共に増加する物理的起源と考えられる。

【結論】Si pMOSFET では温度の低下と共に SS 値が増大することを実験的に見出した。nMOSFET との温度依存性の違いは、tail state の低エネルギー領域を immobile state、高エネルギー領域を mobile state とする DOS モデルにより、定量的に再現できることが明らかとなった。

【謝辞】本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP16007) の支援により実施した。

【参考文献】 [1] Beckers et al., EDL, 41, 276 (2020) [2] Beckers et al., TED, 67, 1357 (2020) [3] Kang et al., JJAP, 61, SC1032 (2022) [4] Kang et al., JJAP, 62, SC1062 (2023)

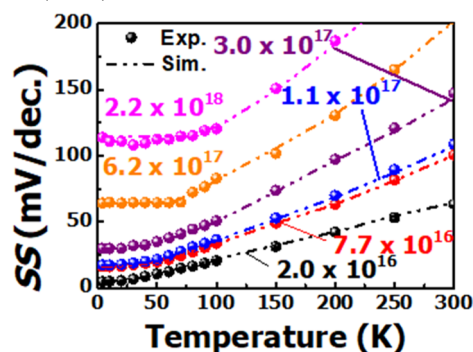


Fig. 1 Experimental and simulated temperature dependence of SS-T characteristics of nMOSFETs

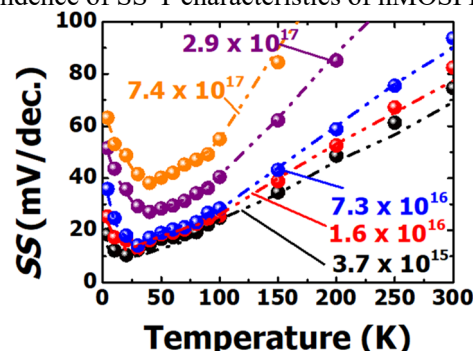


Fig. 2 Experimental and simulated temperature dependence of SS-T characteristics of pMOSFETs

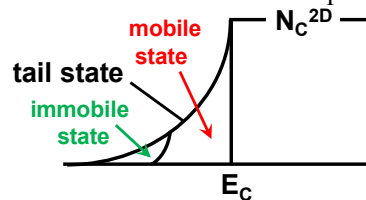


Fig. 3 Newly proposed band tail state model including mobile states and immobile states.

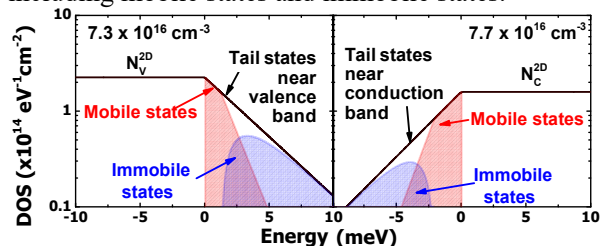


Fig. 4 Comparison in simulated DOS distributions and boundary energy between mobile and immobile states between nMOSFETs and pMOSFETs with similar N_{sub} of $(7-8) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$