

表面ラフネス散乱の非線形モデルにおける移動度と実効電界の 関係とユニバーサリティを説明する係数 η の解釈

Interpretation of universality of mobility against effective electric field and coefficient η based on nonlinear model of surface roughness scattering

○隅田 圭, トープラサートポン カシディット, 竹中 充, 高木 信一 (東大院工)

○K. Sumita, K. Toprasertpong, M. Takenaka, S. Takagi (U. Tokyo, School of Eng.)

E-mail: sumita@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

【背景】異なる基板濃度を有する Si nMOSFET の電子移動度が、実効電界に対してユニバーサルになることは実験的に、かつ表面ラフネス(SR)散乱の線形モデルによって理論的にもよく知られている[1], [2]. 一方で、実際の SR 散乱はラフネスに対して強く非線形的な散乱現象であり、線形モデルは物理的描像とかけ離れていること、及び非線形性を考慮したモデルを我々は提案した[3]. しかしながら、SR 散乱の非線形モデルの散乱描像では移動度の実効電界に対するユニバーサリティは保証されていない。そこで本研究では、Si nMOSFET の SR 散乱移動度のユニバーサリティが成立する起源を明らかにした。

【理論】SR 散乱の描像と各サブバンドにおける実効電界 E_{eff} の定義を Fig. 1 に示す。線形モデルの摂動では、静電ポテンシャルの摂動項が実効電界に対応しているため、移動度と E_{eff} の関係は明白であった。一方で非線形モデルでは、絶縁膜のポテンシャルに電子が衝突する摂動項が支配的であるため、移動度の E_{eff} に対する依存性は自明ではない。【結果】(100) Si nMOSFET における各谷の基底サブバンドの移動度を、各サブバンドの実効電界 $E_{eff,i}$ 及びトータルの実効電界 $E_{eff,total}$ を横軸に Figs. 2(a), (b) にそれぞれ示す。 $E_{eff,i}$ によって各谷の電子の感じる三角ポテンシャル、及び波動関数の形状が決定する為、移動度は $E_{eff,i}$ に対してユニバーサリティが成立する。一方、 $E_{eff,total}$ に対しては各谷の移動度は基板濃度に依存してしまう。ここで各谷の実効電界と N_s の関係を Fig. 3 に、 Δ_2 谷と Δ_4 谷の移動度が近い理由を Fig. 4 に示す。波動関数の形状を反映した Δ_2 谷と Δ_4 谷の係数 η はそれぞれ 0.6, 0.37 であり、垂直電界の遮蔽によって各谷の実効電界は変わりうる。従って、実効電界、電子占有率(Fig. 5), 移動度は全て基板濃度に対して変化する為、SR 散乱移動度が実効電界に対してユニバーサルになる保証は原理的には存在しない。一方 Fig. 6 に示す通り、SR 散乱移動度は $\eta = 1/2$ とした時の実効電界でよく記述される。これは Figs. 2(b), 4 に示すように、 Δ_2 谷の電子による垂直電界の遮蔽により、 Δ_4 谷の移動度が Δ_2 谷に近づくことが、ユニバーサリティが偶然成立した理由であると考えられる。【謝辞】本研究は、科学研究費補助金 (21J10272 及び 22H00208) の支援により実施した。【参考文献】[1] S. Takagi et al., IEEE TED 41, 2357 (1994). [2] T. Ando et al., Rev. Mod. Phys. 54, 437 (1982). [3] K. Sumita et al., IEDM, 406, 2021.

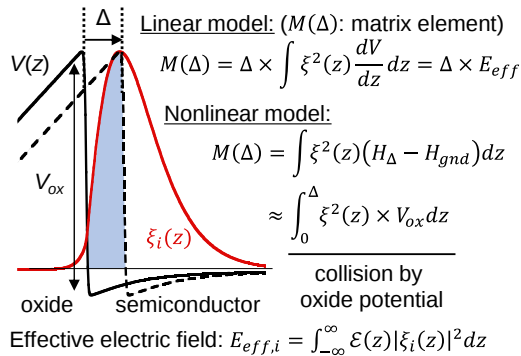


Fig. 1 Schematic view of SR scattering and its models.

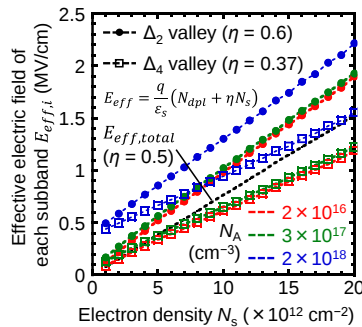


Fig. 3 Effective electric field of (a) Δ_2 and (b) Δ_4 valleys.

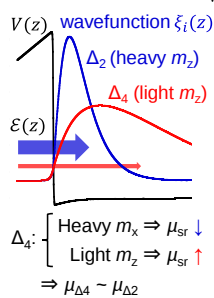


Fig. 4 Mechanism of high mobility at Δ_4 valley.

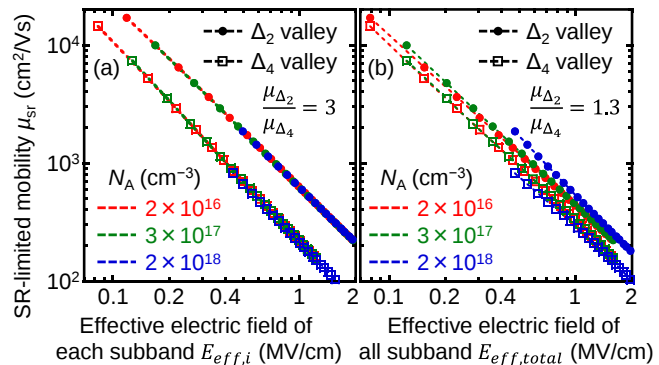


Fig. 2 SR-limited mobility of (100) Si nMOSFETs with various N_A as a function of (a) $E_{eff,i}$ and (b) $E_{eff,total}$.

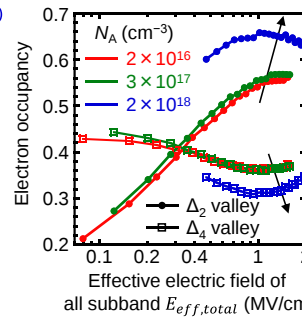


Fig. 5 Electron occupancy of Δ_2 and Δ_4 valleys.

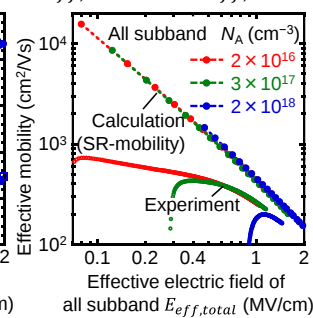


Fig. 6 Total SR-limited mobility for different N_A .