

機械学習を用いた離散不純物による MOSFET 閾値電圧ばらつきの統計的な解析

Statistic prediction of threshold voltage variations of MOSFET caused by discrete impurities by machine learning

アイクリスタル¹, 名大院工², 名大未来研³

○関 翔太^{1,2}, 長田 圭一¹, 高石 将輝¹, 笠原 亮太郎^{1,2}, 沓掛 健太郎^{2,3}, 宇治原 徹^{1,2,3}

Aixtal¹, Nagoya Univ.², IMASS Nagoya Univ.³

○Shota Seki^{1,2}, Keiichi Osada¹, Masaki Takaishi¹, Ryotaro Kasahara^{1,2},

Kentaro Kutsukake^{2,3}, Toru Ujihara^{1,2,3}

E-mail: s.seki@unno.material.nagoya-u.ac.jp

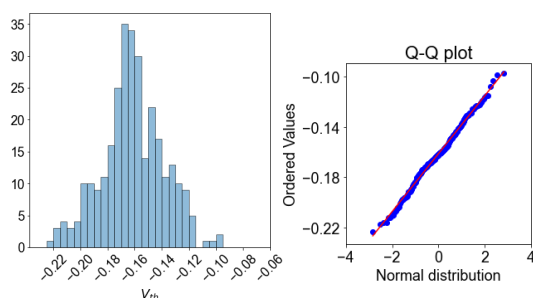
【緒言】半導体デバイスの微細化により、離散的な不純物ばらつきがデバイス特性ばらつきの要因となっている [1]。ばらつきの統計的な予測を行うには様々な離散不純物配置での計算が大量に必要となる。本研究では機械学習により MOSFET のドリフト拡散 3D シミュレーションを高速化して大量の離散不純物配置で閾値電圧を予測し、ばらつきの統計的な考察を行なった。

【方法】ゲート長 50 nm の MOSFET のチャネル領域に離散不純物をポアソン分布から 500 通りランダムに生成した。各分布でゲート電圧 V_g を 11 通り振ったドリフト拡散シミュレーションを実行し、ポテンシャル分布とドレイン電流 I_d を算出した。離散不純物モデルは Cloud-in-cell 法を用いた。それらを教師データとして、離散不純物分布と V_g を入力とし、ポテンシャル分布と I_d を予測する機械学習モデルを構築した。これにより、ある離散不純物分布における $I_d - V_g$ 曲線が求まり、閾値電圧 V_{th} を算出できる。作成した機械学習モデルを用いて、13,000 通りの離散不純物分布から V_{th} の予測を行い統計量の算出や外れ値の構造を抽出した。

【結果と考察】テストデータに対する V_{th} の予測の RMSE は 0.0078 V であり、高精度な機械学習モデルを構築できた。1 条件の計算時間はシミュレーションで約 65 s、機械学習で約 0.04 s であった。図 1 に、(a)シミュレーションによる 300 点計算と(b)機械学習による 13,000 点予測の V_{th} のヒストグラムと分布の正規性の評価のための Q-Q プロットを示す。シミュレーションによる 300 点計算では Q-Q プロットは直線に乗り正規分布で近似できる。一方、機械学習による 13,000 点の大量予測では正規分布からのズレが見られ、 V_{th} が負に大きく外れる確率の低下が確認された。確率密度推定によると、 $+4\sigma$ の $V_{th} = -0.073$ V の 0.0067 % に対し、 -4σ の $V_{th} = -0.241$ V は 2×10^{-12} % でほぼ 0 となった。Sano らにより離散不純物による V_{th} の下振れには下限が存在し、正規分布からズレることが示されており、機械学習による大量予測によってこれを再現できたといえる。また、300 点計算では得られなかった $+4\sigma$ 以上の外れ値も機械学習による 13,000 点計算では観測され、このようなこのよう大量評価によって初めて見つかる離散不純物分布やポテンシャル分布を解析することでばらつきを低減するデバイス構造やプロセス開発につながると思われる。

【謝辞】本研究はソニーセミコンダクタソリューションズの蜂谷涼太氏、趙榮貴氏、小町潤氏に多大なるご支援を頂きました。

(a) 300 points calculation by the simulation



(b) 13,000 points calculation by the ML model

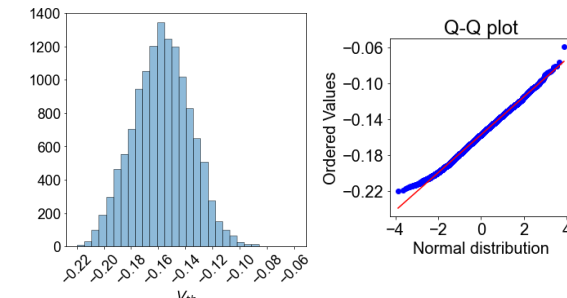


Fig.1 Histograms of V_{th} and Q-Q plot for (a) 300 different discrete impurities configurations calculated by drift-diffusion simulations and (b) 13,000 different discrete impurities configurations predicted by machine learning model.

【参考文献】 [1] N. Sano, et al. Materials 11. 12, 2559 (2018).