等電子トラップ援用トンネル FET の量子ドット動作における ゲート長依存性の発現機構

Mechanism of Gate-Length Dependence of Quantum Dot Operation

in Isoelectronic-Trap-Assisted Tunnel FETs

産総研 ⁰飯塚 将太, 浅井 栄大, 加藤 公彦, 服部 淳一, 福田 浩一, 森 貴洋

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), °Shota Iizuka, Hidehiro Asai,

Kimihiko Kato, Junichi Hattori, Koichi Fukuda, and Takahiro Mori

E-mail: s-iizuka@aist.go.jp

昨今量子計算機に高い注目が集まっており、その基本素子候補の1つとして、高温動作や大規模集積性 などの利点をもつシリコン量子ビット素子の開発が進められている。等電子トラップ援用トンネルトラン ジスタ(IET-TFET)[1]は量子ドット素子としても動作し、室温での単一電子輸送、および10Kまでの高温量 子ビット動作が近年確認されている[2]。

実験において、量子ドットを介した量子輸送現象であるクーロン振動は 100 nm 以上のゲート長(L_G)をもつ IET-TFET では観測されていない[2]。TFET のトランジスタ動作においては、トンネルがソース端で発生するため特性が L_G にほとんど依存しないという特徴をもつ。直感的には IET-TFET におけるクーロン振動も L_G に依存しないと予想される。しかし、実験結果はこの予想に反している。そこで本研究では、IET-TFET 型量子ドット素子の L_G 依存性をシミュレーションによって解析し、長 L_G 素子が量子ドットとして機能しない機構を明らかにしたのでこれを報告する。

電流特性の計算には、クーロン閉塞輸送を実装した Impulse TCAD[3,4]を用い、印加電圧による半導体中 のキャリア再分配と、それに伴うトンネル距離の変化を考慮した。最初に、図 1(a)に、いくつかのゲート 長に対する電流特性を示す。チャネル内に導入された量子ドットによるクーロン振動はゲート電圧 VG= 0.2V 付近に観測される。この電流強度は、L_Gが長くなるほど小さくなり、一定以上のL_Gではクーロン振 動が観測されない。これは、トンネルがソース端とドレイン端の間で発生し、トンネル電流強度を決める トンネル距離が L_G で決定されているためである。この時、L_G 減少に伴うポテンシャル変調はトンネル距 離に影響しないため、電流強度の L_G 依存性はポテンシャル変調を伴う短チャネル効果によるものではな い。次に、長い LG の素子において、ソース端でのトンネルによるクーロン振動が観測されるかを検討し た。クーロン振動が発生するには、トンネル距離が短く、量子ドットのエネルギー準位がトンネル窓に入 っている必要があるため、トンネル距離の VG 依存性(図 1(b))、およびチャネル表面付近の様々な位置にあ る量子ドットのエネルギー準位の V_{G} 依存性(図 1(c))を調べた。 $V_{G} = 0 V$ 付近ではトンネル距離はゲート長 とほぼ等しくなるため、長いLGではクーロン振動を観測できないが、様々な位置の量子ドットのエネルギ ー準位がトンネル窓に入ることができる。一方、VG=-0.7V付近では、キャリアの再分配により、LGに依 らず十分短いトンネル距離を実現できるが、ソース端のごく限られた範囲に位置する量子ドットのエネル ギー準位しかトンネル窓に入ることができない。すなわち、長いLGをもつ素子ではクーロン振動を観測す ることは確率的に困難になっている。この結果は、高温動作可能な IET-TFET 型量子ドット素子の重要な 動作原理の1つを明らかにし、TFETをベースとした量子ドット素子の設計指針を与えるものである。

【謝辞】本研究は、JST-CREST(JPMJCR1871)および文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118069228 の助成を受けて行われた。【参考文献】[1] T. Mori, S. Iizuka, T. Nakayama, MRS Commun. 7, 541 (2017). [2] K. Ono *et al.*, Sci. Rep. 9, 469 (2019). [3] T. Ikegami *et al.*, J. Comp. Elec. 18, 534 (2019). [4] S. Iizuka *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 59, SIIE02 (2020).



Figure1 (a) Drain current (I_D)- V_G characteristics for several L_G . (b) V_G dependence of tunneling distance. (c) V_G dependence of the energy level of a quantum dot at various location in the channel region. The dot-intermediated tunneling occurs when the red line lies within the tunnel window.