

動的量子ドットを利用した単電子転送の精度最適点

Optimal point of accuracy of single-electron transfer using a dynamic quantum dot

NTT 物性基礎研 ○山端 元音、Nathan Johnson、藤原 聡

NTT Basic Research Labs., ○Gento Yamahata, Nathan Johnson, and Akira Fujiwara

E-mail: gento.yamahata.eu@hco.ntt.co.jp

位置とエネルギーが時間的に変化する動的量子ドットを用いた単電子転送はギガヘルツ領域での高精度動作が報告されており [1]、電流標準 [2] や量子情報素子 [3] への応用が期待できる。これらの応用へ向け、高精度動作可能な素子構造探索は重要であるが、その系統的な報告はない。今回、非平衡電子捕獲の計算により高精度動作の最適点を見出したので報告する。

典型的な単電子転送素子は半導体細線上に 2 つのゲート電極を持った構造である。ゲート電圧印加によりゲート間に量子ドット (QD) を形成すると共に、AC 電圧 $V_{ac}(t)$ により量子ドットを形成するポテンシャルを変化させ、単電子 (SE) を転送する (Fig. 1a)。転送精度を決定する量子ドット上昇中の電子捕獲 (Capture) の非平衡ダイナミクスでは、量子ドットのエネルギー変化率と、量子ドットから見た入口障壁高さの変化率が重要となるため、 $g = \alpha_I/(\alpha_B - \alpha_I)$ が重要なパラメータとなる [4]。 $\alpha_{I(B)}$ は入口ゲート電圧変化に対する量子ドットのエネルギー変化 (入口障壁高さ変化) を変換するファクターである。そこで、マスター方程式を数値的に解き非平衡定常状態における電子捕獲確率を求めることで、転送精度の g 依存性を調べた。

計算した n 電子捕獲確率 (P_n) の V_{dc} (量子ドットエネルギーを変化させる DC 電圧) 依存性の 1 例を Fig. 1b に示す。 P_0 、 P_2 の交点で 1 電子転送の最低転送エラー率 ϵ が得られる。 Fig. 1c が $\log(\epsilon)$ の g 依存性であり、 $g \sim 0.2$ で ϵ が最小値を取り精度が最も良い。詳細な検討により、この点は量子ドット上昇中の瞬間的な熱平衡状態が凍結する電子捕獲機構から、電子の左リード電極への逃避レートが電子捕獲を決める機構への変化点に対応することが分かった。また、この点は $\alpha_I \sim 0.2\alpha_B$ に対応し、入口ゲートによる量子ドットエネルギー変化が小さい領域である。これを実現するには、例えば付加的なゲート電極を量子ドット上に配置するなどの素子構造最適化が考えられる。今回の結果は、高精度動作可能な単電子転送素子の作製指針を与える重要な知見と言える。

参考文献:[1] S. P. Giblin *et al.*, *Metrologia* **56**, 044004 (2019). [2] J. P. Pekola *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 1421 (2013). [3] C. Bäuerle *et al.*, *Rep. Prog. Phys.* **81**, 056503 (2018), G. Yamahata *et al.*, *Nat. Nanotechnol.* **14**, 1019 (2019). [4] G. Yamahata *et al.*, *Phys. Rev. B* **89**, 165302 (2014).

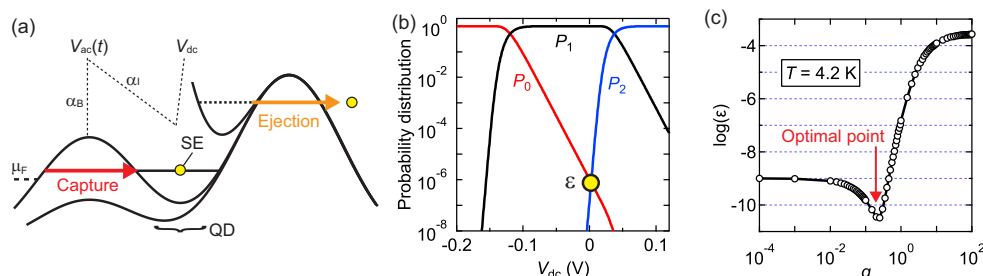


Fig. 1: (a) Schematic potential diagram during the single-electron (SE) transfer. μ_F is the Fermi level of the left lead. (b) Calculated probability distribution as a function of V_{dc} . (c) $\log(\epsilon)$ as a function of g , where a charging energy of the QD is 15 meV and a characteristic temperature of tunneling is 17K.