2層ゲート構造ゲルマニウム量子ドットの正孔輸送特性

Hole transport properties of germanium quantum dot with two-layer gate structure

東工大 [1] °松岡 竜太郎 [1]，溝口 来成 [1]，小寺 哲夫 [1]
Tokyo Tech. [1], °Ryutaro Matsuoka[1], Raisei Mizokuchi[1], Tetsuo Kodera[1]
E-mail: matsuoka.r.ac@m.titech.ac.jp

近年，量子コンピュータの集積化に向けて，電荷スピンを用いたスピン量子ビットが注目を集めている．さらに，Ⅳ族半導体を用いた量子ドットは核スピンが少ないことからコヒーレンス時間が長く，スピン量子ビットの有力な候補と考えられている [1]．その中でも，ゲルマニウムは重い正孔の有効質量が小さいため顕著な量子効果を示すだけでなく [2]，強いスピン軌道相互作用を持ち [3]，その将来性が期待されている．強いスピン軌道相互作用は交流磁場なしでのスピン操作を可能にするため [3]，簡素な構造で量子ビットが実現できるようになる．本研究では，2 層ゲート構造のゲルマニウム量子ドットを作製し，ゲート電圧を変化させることでその正孔輸送特性を調べた．

Fig. 1 に本研究で作製した量子ドットの SEM 画像，ゲート構造の断面図を示す．各ゲートは電子線リソグラフィーの後，Al を熱蒸着させることで作製した．また，2 層のゲート間を Al の酸化膜で絶縁することで，絶縁膜を堆積を省略した簡易的なプロセスでデバイス作製を行った [4]．トップゲート(TG)によってキャリアを誘起させ，2 つのサイドゲート(SGT, SGB)と 2 つのバリア(BL, BR)によって量子ドット内を流れる電流を操作する．4.2 K の極低温下において，各ゲートに電圧を加え，ソース-ドレイン間を流れる電流値 I_{sd} を測定した(Fig. 2)．測定の結果，クーロンダイヤモンドと呼ばれる電流が抑制される現象が観測された．これはデバイス内で正孔が 0 次元に閉じ込められ，量子ドットが生じている状態を示している．ダイヤモンドの形が明瞭ではない原因として，ドット-リード間のトンネル結合の制御性が悪く，強いままの状態になっている可能性が考えられる．また，チャージングエネルギーは 8.0 meV，サイドゲートの効きを示すαファクターは 0.057 と算出された．この結果は，ゲート間に Al 絶縁膜を用いた簡易的な 2 層ゲート構造を用いてゲルマニウムでも量子ドットが作製できることを実証し，より複雑なデバイス構造の作製に貢献する．

本研究は，JST CREST (JPMJCR1675)、MEXT Q-LEAP(JPMXS0118069228)，科研費(18K18996)の助成を受けて遂行された．

1) M. Veldhorst et al., *Nat. Nanotech*. **9**, 981 (2014). 2) M.Lodari et al., *Phys. Rev. B*, **100**, 041304 (2019).
3) H. Watzinger et al., *Nat Commun*. **9**, 3902 (2018). 4) S. J. Angus et al., *Nano Lett*, **7**, 2051 (2007).

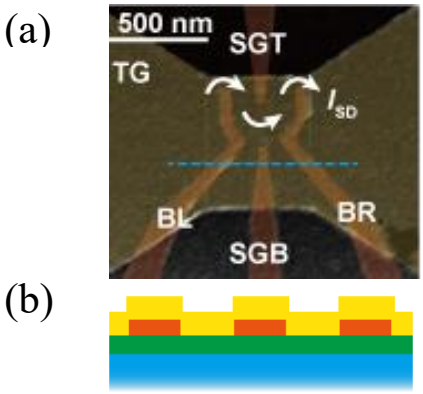

Fig. 1. Structure of quantum dot. (a) SEM image of quantum dot. Ge holes accumulated by overlying TG are controlled by four electrical gates. The source-drain current I_{SD} flows along the white arrow. (b) Schematic diagram of cross section of gate structure along the dotted line in (a), where yellow, orange, green, and blue areas indicate the second gate layer, the first gate layer, gate insulator, and Ge/SiGe heterostructure, respectively.

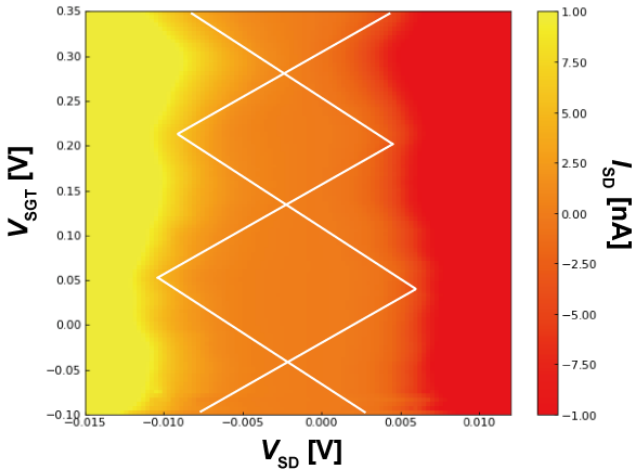

Fig. 2. I_{SD} as a function of source-drain bias V_{SD} and voltage applied to the SGT V_{SGT}. In diamond-shaped areas current blockade is observed as expected for single quantum dot device.