

半導体量子ドットの量子ビット操作

Qubit operations in semiconductor quantum dots

筑波大数理物質, NTT 物性科学基礎研究所 都倉康弘

Univ. Tsukuba, NTT Basic Research Laboratories Yasuhiro Tokura

E-mail: tokura.yasuhiro.ft@u.tsukuba.ac.jp

大規模な量子情報デバイスの実現の為に半導体素子や超伝導回路などの高い制御性を持つシステムに将来性があると考えられる。固体中に実現する量子情報の担体「量子ビット」には大きく分けて飛行量子ビットと固定量子ビットがある。前者は光子の様に空間を移動し、離れた地点の間に量子力学的相関を形成する事を可能とする。例えば強磁場下二次元電子ガスの量子ホール状態や Graphene ナノリボン等で実現する「端状態」、GaAs などの圧電効果を持つ半導体の表面弾性波等を用いた飛行量子ビットが提案され、活発に研究が進められている。また超伝導平面導波路共振器を用いたマイクロ波光子も固体中の飛行量子ビットと考えて良いだろう。本講演では、後者の代表例である半導体量子ドットを用いた量子情報デバイスに関して最近の研究を紹介する。

電子が持つスピン $1/2$ の自由度を量子ビットとして利用するのは自然な着想である。微細加工技術の進展により少数電子状態が制御された半導体量子ドットが実現した頃の Loss & DiVincenzo の半導体量子ドットを用いた電子スピンデバイスの提案 [1] は、その後現在に至る活発な研究分野のきっかけとなった。最初の課題は一つの電子スピンの状態を如何にして検出するか、である。強磁場を加え大きく Zeeman 分離したスピンの状態は、トンネルのエネルギー依存性を利用して検出された。また弱 (零) 磁場でスピンの一重項状態と三重項状態を極めて明瞭に識別可能な Pauli スピン閉塞という現象が確認され [2]、スピン状態の高感度の観測手段として活用されている。「普遍的な量子操作」の実現には、電子スピン間の交換相互作用に基づく $\sqrt{\text{SWAP}}$ 操作と一つの電子スピンの自由な回転操作が必要である [1]。前者は二重量子ドットに一つずつ束縛された電子スピンの 2 次のトンネル過程から導かれる有効交換相互作用 J により実現可能であり、この J はゲート電圧により高速にまた高精度に制御可能である事が確認された。一方単一スピンの操作は遥かに実現が困難である。巨視的な数のスピン操作に用いられている電子スピン共鳴 (ESR) 技術はスケラブルな量子ドットスピン系には向いていないため、代わりに電場によるスピン共鳴 (電気双極子スピン共鳴:EDSR) が提案され、まずスピン・軌道相互作用を用いて [3,4]、次に微小磁石を近接させる事による傾斜磁場を用いて [5,6,7] GaAs 量子ドットにおいて実現されて来ている。またスピン軌道相互作用の大きな InAs 量子ドットにおいては、ゲート電圧による高い制御性が確認されている。[8,9] 現状では 2 量子ビット操作が確認されている [7] 段階であるが、これを多量子ビット化する方向と、交換相互作用のみを用いて実現する方向 [10] の両面で研究が進められている。

この研究は東京大学樽茶清悟教授のグループ、筑波大学久保敏弘氏との共同研究の成果である。また研究の一部は、内閣府最先端研究開発支援プログラム (量子情報処理: 中心研究者山本喜久) 科研費新学術領域研究「量子サイバネティクス」の支援を受けている。

[1] D. Loss and D.P. DiVincenzo, Phys. Rev. A **57**, 120 (1998). [2] K. Ono, *et al.*, Science, **297**, 1313 (2002). [3] V. N. Golovach, M. Borhani, and D. Loss, Phys. Rev. B **74**, 165319 (2006). [4] K. C. Nowack, *et al.*, Science **318**, 1430 (2007). [5] Y. Tokura, *et al.*, Phys. Rev. Lett., **96** 047202 (2006). [6] M. Pioro-Ladriere, *et al.*, Nature Physics **4**, 776 (2008). [7] R. Brunner, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 107, 146801 (2011). [8] Y. Kanai, *et al.*, Nature Nanotechnology **6** 511, (2011). [9] R. S. Deacon, *et al.*, Phys. Rev. B **84**, 041302(R) (2011). [10] J. M. Taylor, V. Srinivasa, J. Medford, arXiv: 1304.3407.