

丸文研究奨励賞 小寺 哲夫 東京工業大学 工学院電気電子系 准教授

量子ドット中のスピンを用いた 量子情報素子の研究

量子情報応用に向けたスピンの精密な制御と測定

■ 研究の背景

量子情報素子の研究は様々な物理系で 精力的に行われている。半導体量子ドット 中のスピンも有望な系の1つとして期待され ている。半導体加工技術による将来的な素 子の集積化が可能であり、また情報の保持 時間に相当するコヒーレンス時間が長いと いう利点がある。スピンは電荷が持つ磁石 のような量子力学的性質で、量子情報の基 本単位である「量子ビット」として利用する ことができる。スピン量子ビットの実現には、 1つの電荷のスピンの向きをコヒーレンス時 間内に操作して、任意の重ね合わせ状態を 作る必要がある。このためには、多くの要素 技術が必要となる。具体的には、安定的に 1つの電荷を保持できる半導体量子ドットを 作製すること、量子ドット内部の1つの電荷 数変化を検出できること、スピン状態に依 存したトンネル現象を発現させること、スピン 共鳴を利用したスピンの回転操作を実現す ることなどである(図1)。また、将来的な量子 ビットの集積には、2次元配列構造の検討 が重要であり、量子ビットの性能向上には、 コヒーレンスが乱される物理的要因や操作 に必要なスピン間相互作用の理解が求め られる。

■ 研究の成果

上述のような背景の下、本研究では、量 子ドット中のスピンを用いた量子情報素子 に関わる要素技術の開発、量子状態制御 や相互作用に関する物理の解明を進めた。

1. スピン間交換相互作用の定量的見積もり 本研究では、2量子ビット操作や量子も つれ状態生成に用いられる重要な相互作

図1 半導体量子ドットを用いた電荷スピン量子ビットに向けた要素技術開発と関連物理解明

受賞者



用である交換相互作用の定量的な見積も りを行った^[1,2]。GaAs量子ドットを2つ直列 に並べた構造を作製し、各量子ドットに1つ ずつ電子が入っている状態を用意した。2 つの量子ドット間の準位差を電圧と磁場に より制御することで、各量子ドットに1つず つ入った電子スピンの三重項状態と一重 項状態のエネルギー差を見積もることがで きた。また、ハバードモデルによる計算によ り、実験データを高精度に再現することに 成功した。

2.集積に適したMOS型シリコン量子ドット の作製と電荷検出技術の実証

電荷のスピンを情報の担い手として用い る量子ビットの動作には、電荷のスピンのコ ヒーレンスが安定的に保持される必要があ る。コヒーレンスを乱す(デコヒーレンス)要因 になる原子核スピンがシリコンではほとんど 存在しないため、電荷のスピンの情報が長 く保持されるという利点がある。また、素子の 作製において、現在のコンピュータを作るシ リコン集積回路の加工技術を利用できる利 点もある。これらのシリコンの優位性に着目 し、研究を進めた。

シリコン集積素子で用いられるMOS構 造を利用した、独自の物理形成シリコン量 子ドット構造を提案、作製し、量子情報素 子に関連する物理や技術について研究 を行った。例えば、量子ドットが複数結合し た系において、電子を1つ1つ安定的に閉 じ込め、内部の電子数が1つだけ異なる状 態を近くに配置した電荷センサにより高感 度に検出する技術の開発に成功した[3]。 また、量子ビットの2次元配列構造を検討 するため、3つの量子ドットを三角形状に配 置した素子を作製し、シリコン系で初めて 動作実証した(図2)[4]。



 MOS型シリコン量子ドットにおけるスピン 依存トンネルの観測

2つ並んだ量子ドットのそれぞれに電子 スピンを1つずつ閉じ込め、この状態に電 圧を加えることで、スピンの向きにより電流 が流れなくなる「スピン依存トンネル」を実 現し、量子情報素子の論理演算の結果を 読みだすために必要な要素技術を開発し た[5]。コヒーレンスが乱される物理的要因 にも着目し、スピン依存トンネル現象の磁 場応答の解析から、スピン軌道相互作用 やコトンネリングによって電子スピン緩和が 起きることを明らかにした。また、電子スピン のみならず正孔スピンによるスピン依存ト ンネル現象も観測した[6]。シリコン中の正 孔は電子と比較して強いスピン軌道相互 作用を有するため、電界のみで高速なスピ ン操作が可能である。スピン共鳴のための マイクロ磁石が不要であり、シンプルで集 積に有利なデバイス構造となるため、注目 を集めている[7]。

4. ゲート定義型シリコン量子ドットにおける 高精度なスピン操作

本研究では、電圧によるトンネルレートの 制御性が高い、ゲート定義型シリコン量子 ドットを用いて、スピン状態の操作と単発読 み出しを行った。ゲート定義型シリコン量子 ドットに関する研究は、東京大学・理化学 研究所の樽茶清悟教授らとの共同研究 によって進めた[8-10]。その結果、電子スピ ンのコヒーレンス時間がGaAs系の100倍 程度(T₂*が2ms程度)であることを実証し た。単一量子ビットゲート操作の忠実度として99.6%を実現し、量子エラー訂正のしきい値(99%)よりも高い値を実現した^[8]。さらに、原子核スピンを持たない²⁸Siのみに同位体制御したシリコンを用いることで、原子核スピンによるデコヒーレンスをさらに抑制した系においては、単一量子ビットゲート操作の忠実度として99.9%以上を実現し、世界最高記録を達成した^[9]。

■ 将来の展望

今後の課題は、量子ビットの集積であ る。3次元配線も含めて集積に向けた本 格的な設計を行う必要がある。また、量子 状態の高速で正確な制御のためには、量 子ビットと制御回路を近づける方が望まし いと考えられる。比較的高温で動作する量 子ビットの開発や、低温動作する量子ビット制御用のエレクトロニクスが必要となる。 量子コンピュータの実現に向けて、量子技 術の高度化を進めながら、既存の半導体 技術も活用し、デバイス、回路、システムを 連携させて、研究開発を推進したい。

謝辞

本研究成果は、東京大学の樽茶清悟教 授(現理化学研究所)、荒川泰彦教授、東 京工業大学の小田俊理教授などの様々 な先生方の多大なご支援・ご協力を頂きな がら、日立ケンブリッジ研究所、理化学研究 所、産業技術総合研究所などの共同研究 者や、多くの学生と共に、研究を推進するこ とで得られたものです。この場を借りて、本 研究に関わる全ての皆様に深く御礼申し 上げます。

References(参考文献)

- [1] T. Kodera, K. Ono, Y. Kitamura, Y. Tokura, Y. Arakawa, S. Tarucha Phys. Rev. Lett. 102, 146802 (2009).
- [2] T. Kodera, K. Ono, S. Amaha, Y. Tokura, Y. Arakawa, and S. Tarucha, Physica E 40 (5), 1139, (2008).
- [3] K. Horibe, T. Kodera, and S. Oda, Appl. Phys. Lett. 106, 083111 (2015).
- [4] R. Mizokuchi, S. Oda, T. Kodera, Appl. Phys. Lett. 114, 073104 (2019).
- [5] G. Yamahata, T. Kodera, H. O. H. Churchill, K. Uchida, C. M. Marcus, and S. Oda, Phys. Rev. B 86, 115322 (2012).
- [6] Y. Yamaoka, K. Iwasaki, S. Oda and T. Kodera, Jpn. J. Appl. Phys. 56, 04CK07 (2017).
- [7] Y. Yamaoka, S. Oda, and T. Kodera, Appl. Phys. Lett. 109, 113109 (2016).
- [8] K. Takeda, J. Kamioka, T. Otsuka, J. Yoneda, T. Nakajima, M. R. Delbecq, S. Amaha, G. Allison, T. Kodera, S. Oda, S. Tarucha, Science Advanced, 2, 8, e1600694 (2016).
- [9] J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, T. Honda, T. Kodera, S. Oda, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, and S. Tarucha, Nature Nanotechnology, 13, 102 (2018).
- [10] K. Takeda, J. Yoneda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, Y. Hoshi, N. Usami, K. M. Itoh, S. Oda, T. Kodera and S. Tarucha, npj Quantum Information, 4, 54 (2018).