

丸文研究奨励賞 受賞者



米田 淳
東京工業大学 超スマート社会卓越教育院
特任准教授

超高忠実度シリコン電子スピン 量子ビットの実現と高機能化

集積化が期待されるシリコン量子コンピュータの構成単位

研究の背景

量子コンピュータは、従来コンピュータで現実的な時間内に処理できない計算を行う量子超越性が示されるなど、近年ますます注目を集めている。広義の量子コンピュータは、すでに高度情報処理への適用が進んできているが、現状では計算エラーに対する耐性がなく、応用先も限られる。このため、エラー耐性を獲得した万能デジタル量子コンピュータの実現が望まれている。

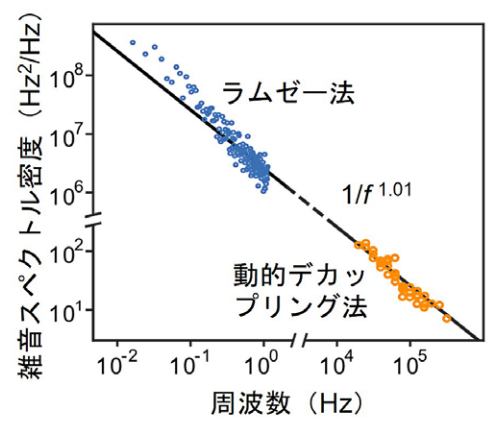
万能デジタル量子コンピュータを構成するための量子ビットには、数々の厳しい条件が課される。まず、高い忠実度*1が必要であり、その目標は99.9%程度である。さらには、数百万個以上の量子ビットを集積化し、古典回路を作り込む必要があると考えられるため、シリコン技術との親和性が極めて重要である。そこで、本研究では超高忠実度シリコン電子スピン量子ビットを実現し、その高機能化に取り組んだ。

研究の成果

量子ドット中の電子スピン(図1(a))は、半導体微細加工技術との相性がよい量子ビットの候補として知られる。固体中の量子系としては良好なコヒーレンス特性を示す一方で、操作性が悪いことが、量子ビット応用に向けた大きな技術的課題であった。操作性とコヒーレンスのトレードオフ関係は、量子ビット開発における普遍的な課題である。

これを解決するためのスピン操作法として、ここでは微小磁石を利用する方法に着目し、操作性の向上に必要な磁場分布特性を解明、その具体的な試料設計手法を確立した[1]。これにより、ガリウムヒ素量子ドットにおいて100MHzを超える操作速度を達成、コヒーレントに振る舞う量子ビットに期待される振る舞いを観測した[2]。

図2 超高忠実度シリコン電子スピン量子ビットの雑音スペクトル密度



さらに超高忠実度の量子操作を実現するべく、量子ドット材料を、ガリウムヒ素に比べて核スピンによる磁氣的雑音が小さいシリコン、さらには核スピンを排除した同位体制御シリコンへと変更した。雑音低減と適切な設計の組み合わせで、高速なスピン操作と、長いスピン位相コヒーレンスを両立させ、99.9%の操作忠実度を実現した(図1(b)) [3]。

超高忠実度操作が可能な電子スピンの感じる雑音を解析したところ、その位相コヒーレンスが電荷雑音によって制限されていること突き止めた(図2)。従来は磁氣的雑音が支配的であったため、このことは電子スピン量子ビットの研究開発方針を定める上で、重要な知見となった。

シリコン電子スピン量子ビットの次のステップとして、測定結果に基づく量子情報プロトコルの実行に必要な、量子非破壊測定*2の実現に取り組んだ。図3に示したように、量子非破壊測定では、測定前後のスピンの状態が相関をもつ(非破壊性)。このことから、量子ビット状態を読み出す機能

図1 シリコン電子スピン量子ビット

- (a) 微小磁石を備えたシリコン量子ドット模式図
- (b) 同位体制御シリコン試料で観測されたシェブロン模様

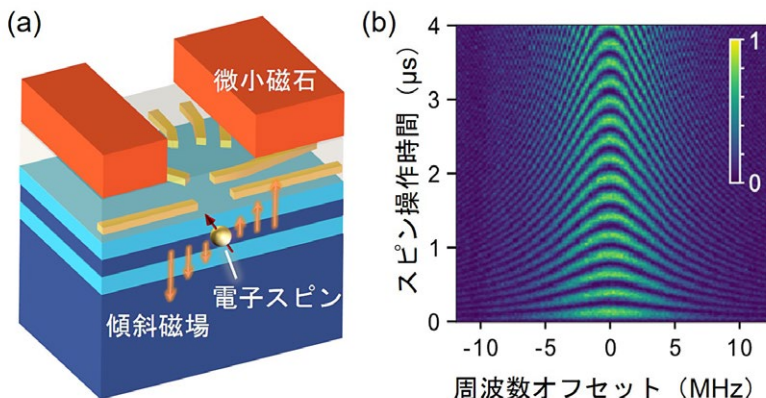


図3 量子非破壊測定における3つの要件と補助電子スピンの役割

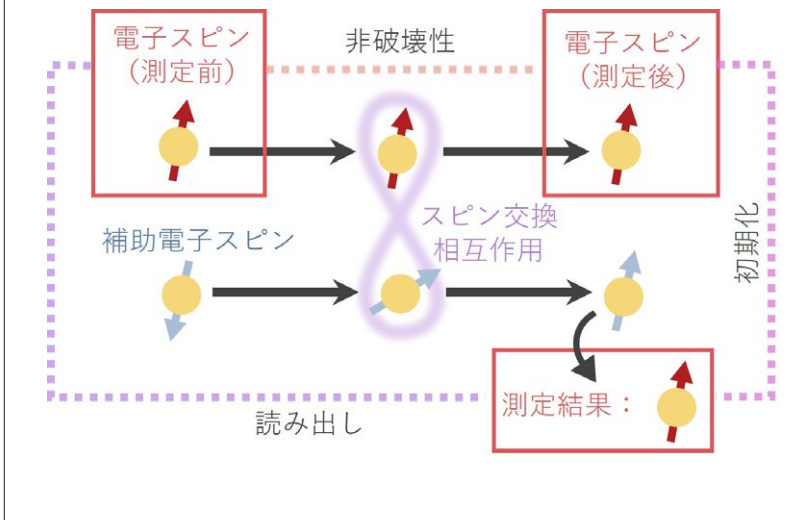
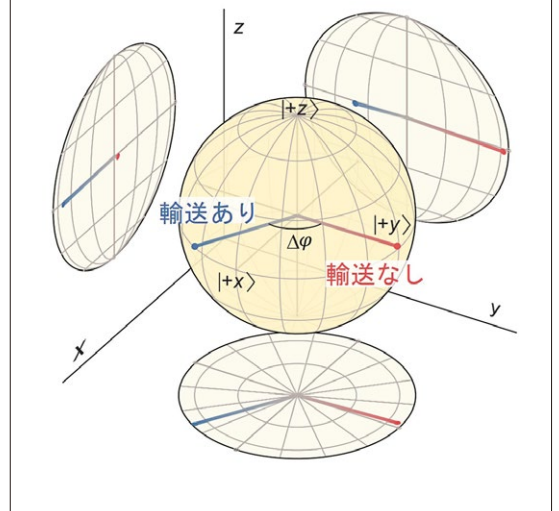


図4 輸送された電子スピンの量子状態トモグラフィー結果



(読み出し)に加えて、観測によって状態を用意する機能(初期化)を有する。電子スピン状態を電荷へと変換する従来のスピン読み出し方法では、電荷の検出過程で電子スピンの必然的に影響を受けてしまっていた。そこで、スピン情報を補助量子系に転写してから読み出し、量子非破壊測定を実現した[4]。

具体的な補助量子系として、隣接サイトの電子スピン量子ビットを利用した。同種の量子ビットを用いるこのアプローチは、試料作製、拡張性の観点で有利である一方で、転写の影響が大きくなりやすい。通常はハイゼンベルク型のスピン交換相互作用を、イジング型となるよう試料設計することでこの困難を克服し、量子非破壊測定の特有の性質である、非破壊性、読み出し、初期化の3つの機能を実証できた。

続いて、電子をスピン量子状態ごとコヒーレントに輸送する、量子ビット輸送を高い忠実度で実現した[5]。昨今の量子情報

理論の研究進展で、量子ビット間の結合性^{*3}は、量子ビットの集積性の重要な因子であることが分かってきている。スピン交換相互作用を用いる通常的方式では、スピン量子ビット間の量子的な結合は、隣接サイトに限られる。これを改善するような手法はいくつか提案されているが、実際に高忠実度で実現可能な方式の目途は立っていなかった。

量子ビットのコヒーレント輸送は、この問題の解決策となりうる。我々は、輸送を行った場合とそうでない場合の、電子スピンの量子状態トモグラフィー測定結果(図4)から、位相コヒーレンスが保たれたままの輸送が行われていることを示した。輸送過程を繰り返した際の位相成分の減衰率を詳細に解析したところ、輸送過程の忠実度は99.4%と求められた。この成果は、非隣接スピン量子ビット間での高忠実度な量子的結合を可能にするものと考えられる。

将来の展望

シリコン電子スピン量子ビットの忠実度は、超伝導量子ビットなどと比肩するようになってきた。加えて、多くの量子プロトコルにとって前提となる量子非破壊測定や、結合性を高める特有の機能である量子ビットのコヒーレント輸送など、基盤となる機能が揃ってきている。さらに、集積化への援用が期待されるシリコン技術との相性がよいシリコン量子系でもある。エラー耐性を有するような、万能デジタル量子コンピュータの実現に向け、さらなる研究の進展が期待される。

謝辞

本研究成果は、理化学研究所創発物性科学研究センターの樽茶清悟副センター長、ニューサウスウェールズ大学のDzurak教授、慶應義塾大学の伊藤公平教授(現塾長)をはじめ、国内外の多くの方々から多大なご支援とご協力を得て、実現したものです。この場を借りて、深く御礼申し上げます。

*1 量子ビット操作が、意図した操作にどれだけ近いかを表す性能指数。誤り率が小さいほど100%に近くなる。
 *2 量子状態に対する測定のうち、測定される物理量の時間発展に擾乱が及ばないもの。理想的な量子射影測定ともみなせる。
 *3 量子ビット配列において、2量子ビット操作などの量子的な結合が可能な量子ビットの組み合わせ、配置のこと。

References(参考文献)

- [1] J. Yoneda, T. Otsuka, T. Takakura, M. Pioro-Ladrière, R. Brunner, H. Lu, T. Nakajima, T. Obata, A. Noiri, C. J. Palmström, A. C. Gossard, and S. Tarucha, Appl. Phys. Express 8, 084401 (2015).
- [2] J. Yoneda, T. Otsuka, T. Nakajima, T. Takakura, T. Obata, M. Pioro-Ladrière, H. Lu, C. J. Palmström, A. C. Gossard, and S. Tarucha, Phys. Rev. Lett. 113, 267601 (2014).
- [3] 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).
- [4] J. Yoneda, K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, S. Li, J. Kamioka, T. Kodera, and S. Tarucha, Nature Communications 11, 1144 (2020).
- [5] J. Yoneda, W. Huang, M. Feng, C. H. Yang, K. W. Chan, T. Tanttu, W. Gilbert, R. C. C. Leon, F. E. Hudson, K. M. Itoh, A. Morello, S. D. Bartlett, A. Laucht, A. Saraiva, and A. S. Dzurak, Nature Communications 12, 4114 (2021).