



PRESS RELEASE

2020 年 2 月 14 日 理化学研究所 東京工業大学

シリコンスピン量子ビットの高速読み出しに成功

Tokyo Tech

ーシリコンスピン量子コンピュータの試料設計に指針ー

理化学研究所(理研)創発物性科学研究センター量子機能システム研究グルー プの野入亮人特別研究員、武田健太研究員、樽茶清悟グループディレクター、東 京工業大学の小寺哲夫准教授の共同研究チームは、シリコン量子ドット^[1]デバイ ス中の電子スピン^[2]の高速読み出しに成功しました。

本研究成果は、高精度制御と将来的な集積性の観点から近年注目を集めている「シリコンスピン量子コンピュータ^[3]」の実現において、重要な課題となっている、「高速量子ビット^[4]読み出しが可能な試料設計」に指針を与えるもので、 今後の研究開発をより一層加速させると期待できます。

通常、シリコンスピン量子コンピュータでは、スピンの情報を電荷状態の情報 に変換し、電荷検出測定を行うことで量子ビットを読み出しています。この際重 要となる電荷検出の性能は、「高周波反射測定法^[5]」の適用によって向上できる と考えられます。しかしながら、従来、シリコン量子ドットと高周波反射測定法 には互換性がなく、試料設計において重要な問題となっていました。

今回、共同研究チームは、高周波反射測定法が適用可能なシリコン量子ドット 試料の設計を明らかにし、この技術を用いて電子スピン量子ビットの読み出し 時間を従来の10分の1に低減することに成功しました。

本研究は、科学雑誌『*Nano Letters*』オンライン版(1月16日付:日本時間1月17日)に掲載されました。



シリコン量子ドット試料と高周波反射測定セットアップ





※研究支援

本研究は、科学技術振興機構(JST)戦略的創造研究推進事業 CREST「量子状態の高 度な制御に基づく革新的量子技術基盤の創出(研究総括:荒川泰彦)」の研究課題「ス ピン量子計算の基盤技術開発(研究代表者:樽茶清悟)」、文部科学省光・量子飛躍フラ ッグシッププログラム(Q-LEAP)技術領域「量子情報処理(主に量子シミュレータ・ 量子コンピュータ)(研究総括:伊藤公平)」の研究課題「シリコン量子ビットによる量 子計算機向け大規模集積回路の実現(研究代表者:森貴洋)」、日本学術振興会(JSPS) 科学研究費補助金若手研究「シリコン量子ドット中の電子スピンを用いた量子計算基盤 技術の高性能化に関する研究(研究代表者:野入亮人)」による支援を受けて行われま した。

1. 背景

近年、半導体デバイスの微細化による情報処理能力の向上が限界を迎えつつ あり、新しい動作原理に基づく次世代型コンピュータの実現が切望されていま す。特に有望視されているのが、量子力学の原理に基づき、複数の情報を同時に 符号化することで超並列計算を実行する量子コンピュータであり、その実用化 に向けた研究開発が世界的に活発化しています。

さまざまな物理系を用いた研究が進められていますが、なかでもシリコン量 子ドット中の電子スピンを用いた「シリコンスピン量子コンピュータ」は、高精 度制御に優れることに加えて^{注1)}、既存産業の集積回路技術と相性が良いことか ら、大規模量子コンピュータの実装に適していると考えられています。

シリコンスピン量子コンピュータ実現に向けて解決すべき課題の一つとして、 量子ビットの高速かつ高精度な読み出しが挙げられます。通常、単一電子スピン の向きの直接的な測定は困難なため、量子ビットの読み出しは、量子ビットの情 報をスピン電荷変換^[6]によって測定が容易な電荷状態に変換し、電荷検出するこ とで達成しています。これまでの研究により、スピン電荷変換を高速かつ高精度 に実行する技術は確立しており、高性能な電荷検出技術の開発が急務となって いました。

量子ドット中の電子の電荷検出は、一般に量子ドット近傍に配置した電荷計^[7] の伝導度測定により行われます。この電荷計の性能は、電荷計を高周波共振回路 に組み込み、「高周波反射測定」を行うことで向上できることが知られています。 高周波共振回路は、インダクタ^[8]、電荷計による伝導度、配線や試料上で生じる 寄生容量^[9]で構成されています(図1右)。この回路に、50オームの特性インピ ーダンス^[10]を持つ同軸線を介して高周波信号を入射させると、高周波共振回路 のインピーダンス^[10]に応じて反射が起こります(図1左の青赤矢印)。高周波共 振回路のインピーダンスは電荷計の伝導度に強く依存するため、高周波反射信 号の測定により、電荷計の伝導度、すなわち量子ドットの電荷状態を高速かつ高 精度に測定することができます。

この技術は、以前から研究の進んでいた砒化ガリウム量子ドット試料におい ては確立されていましたが、スピン量子コンピュータにより適するシリコン量 子ドット試料に適用するのは困難でした。









図1 高周波反射測定セットアップと等価回路

- 左: シリコン量子ドット試料と測定セットアップ。半導体基板(シリコン/シリコンゲルマニウム)上に 作製した金属ゲート電極構造(黄色、赤色の領域/線)に、電圧をかけ、真ん中の黄色の丸矢印のス ピンで示した部分(量子ドット)に電子を一つずつ閉じ込める。右のオレンジ色の丸で示した部分は 電荷計として動作する。白のスケールバーは 0.2 マイクロメートル(µm、1µm は 100 万分の 1 メー トル)を表す。
- 右: 高周波共振回路の回路図。インダクタと寄生容量は固定値となっており、電荷計の伝導度に応じて全体のインピーダンス(赤枠内)が変化する。このインピーダンスと同軸線の特性インピーダンスの差が小さいほど反射も小さくなる。
- 注 1) 2017 年 12 月 19 日プレスリリース「シリコン量子ドット構造で超高精度量子ビットを実現」 https://www.jst.go.jp/pr/announce/20171219/index.html

2. 研究手法と成果

共同研究チームは、高周波反射測定法が適用可能なシリコン量子ドット試料 の設計を明らかにしました。量子ドット構造は、シリコンスピン量子コンピュー タで一般的に用いられている、シリコン/シリコンゲルマニウム量子井戸^[11]基板 上に金属微細加工を施すことで作製しました(図2下)。量子ドットは、絶縁層 を挟んで作製したトップゲート電極に正電圧を加えることで量子井戸中に電子 を誘起し、さらに微細ゲート電極に適切な電圧を加えると形成できます。

トップゲート電極で電子を誘起すると、量子井戸とトップゲート電極の間で 静電容量が生じます。この誘起された静電容量はトップゲート電極の大きさに 比例し、高周波共振回路の寄生容量に加算されるため、高周波反射測定法の動作 に影響を及ぼします。そこで、トップゲート電極の大きさが異なる二つの試料を 作製し(図2上)、比較することで高周波反射測定に適するトップゲートの設計 を明らかにしました。









図2 高周波反射測定が可能な試料設計と試料構造

- 上: 従来の形状のトップゲート電極試料(左)と新しく設計したトップゲート電極試料(右)の光学顕微 鏡写真。青枠で囲った部分にはリンイオンを注入しており、電極として動作する。緑の部分は、下図 の緑枠の構造となっており、この領域分だけ寄生容量が増加する。新しく設計した試料では、従来試 料と比べて緑の部分の面積が100分の1程度となっている。
- 下: 試料構造の断面。トップゲート電極に正電圧を加えることで、リンイオン注入領域から量子井戸に電 子を誘起することができる。

一般に電荷計が量子ドットの電荷状態に対して感度を持つのは、伝導度が ℓ²/h(eは電荷素量、hはプランク定数)以下程度であることが知られています。 さらに、高周波反射測定を適用するには、反射率が伝導度に高い感度を持つとい う条件を満たす必要があります。反射率が感度を持つ伝導度はインダクタと寄 生容量の大きさで決まるので、上記の条件を満たすためには、寄生容量を 1 ピ コファラド(pF、1pF は 1 兆分の 1 ファラド)以下程度に抑える必要がありま す。

従来の設計の試料(図2左上)では、トップゲート電極により誘起される寄 生容量が数pFにもなり、これが高周波反射測定を適用できない理由であると考 えられます。実際にこの試料で高周波反射測定を行ったところ、トップゲート電 極により量子井戸に電子を誘起すると、2.7 pFの寄生容量が生じることが分か りました(図3左上)。またこの試料では、高周波の反射率は、電荷計の伝導度 の変化に対して感度がないことも分かりました(図3左下)。一方で、新しく設 計した試料(図2右上)で同様の測定を行ったところ、トップゲート電極によ り生じる寄生容量を0.01 pFに低減することができ、また反射信号は伝導度に対 して高い感度を持つことが分かりました(図3右)。

これらの結果から、従来のシリコン試料で高周波反射測定が適用できない理由と、この問題を解決する試料設計を明らかにしました。









図3 従来および新しく設計した試料における高周波反射測定結果の比較

- 左: 従来の設計の試料における高周波反射測定結果。上図は量子井戸に電子を誘起していない状態(青) と誘起した状態(赤)における反射信号の周波数特性。それぞれの色の矢印で示した反射信号の谷が 共振条件となっており、この条件から寄生容量を計算できる。トップゲート電極により誘起した寄生 容量は 2.7 pF であった。下図は電荷計の伝導度(青)と同時に測定した反射信号(赤)。周波数は共 振条件に固定してある。電荷計として動作する e²/h 以下の伝導度において、反射信号が伝導度の変 化に感度を持っていないことが分かる。
- 右: 左図と同様の測定を新しく設計した試料で行った結果。上図から、トップゲート電極により誘起した 寄生容量は 0.01 pF であった。下図では、センサーゲート電圧 -0.55V 付近で、反射信号が伝導度の 変化に高い感度を持つことが分かる。

最後に、高周波反射測定法を用いて、スピン量子ビットの読み出しが高速かつ 高精度であるかを調べました。今回新しく設計した試料を用いてランダムな状 態に用意した量子ビットの読み出しを多数回繰り返し、ヒストグラムにすると、 量子ビットの状態に応じた二つのピークが観測されました(図4左)。この測定 では積算時間が0.8 マイクロ秒(µs、1µsは100万分の1秒)であり、従来 (12.5µs)の10分の1以下の時間で量子ビットの読み出しを実証しました。 また、この測定における二つのピークの間隔(信号:約210mV)とピークの広 がり(雑音:約35 mV)の比である信号雑音比は6.0 となっており、99%以上 の精度で読み出しが可能であることが分かりました。

さらに、信号雑音比は測定の積算時間が長くなるほど良くなり(図4右)、1.8 μs では信号雑音比が 7.9 となり、99.99%以上の精度で読み出しが可能である ことを実証しました。





図4 高速スピン量子ビット読み出しと性能評価

- 左: ランダムな状態に用意した量子ビットの読み出し結果。二つのピークは、それぞれ量子ビットが0(左) と1(右)の状態に対応する。黒い点線で示した値(-586 mV)に対して、高周波反射信号が小さい か大きいかで量子ビットの状態が0か1か判別できる。二つのピークの間隔(信号)は約210 mV、 ピークを正規分布とした場合の標準偏差にあたる広がり(雑音)は約35 mV である。それらの比であ る信号雑音比は 6.0 となり、99%以上の精度で読み出しが可能である。
- 右: 信号雑音比が積算時間に対して増大する様子。1.8μs では、信号雑音比が 7.9 となり、99.99%の読 み出しが可能である。

3. 今後の期待

本研究では、シリコンスピン量子コンピュータの主要な課題の一つとなって いる高速量子ビット読み出しが可能な試料設計を明らかにし、実際に 99%以上 の精度を維持したうえで読み出し時間を 10 分の 1 に改善することに成功しま した。

この成果は、近年進展が著しいシリコンスピン量子コンピュータの今後の試 料設計に指針を与え、基本原理検証を超えた大規模化に向けた研究開発をより 一層加速させるものと期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Radio-Frequency-Detected Fast Charge Sensing in Undoped Silicon Quantum Dots <著者名>

Akito Noiri, Kenta Takeda, Jun Yoneda, Takashi Nakajima, Tetsuo Kodera, and Seigo Tarucha

<雑誌>

Nano Letters

< DOI >

10.1021/acs.nanolett.9b03847

5. 補足説明

[1] 量子ドット

電子を空間的に3次元全ての方向に閉じ込めることで運動を制限し、0次元構造とし





たもの。その性質から人工原子とも呼ばれ、電子を一つずつ出し入れすることができ る。

Tokvo Tech

[2] 電子スピン

電子が右回りまたは左回りに自転する回転の内部自由度のこと。この回転の向きに応じて、通常上向きまたは下向きの矢印で表される。

[3] 量子コンピュータ

量子力学における重ね合わせを利用して、超並列計算を実現するコンピュータ。従来 のコンピュータでは天文学的な時間のかかる因数分解の問題などを、数時間で解くこ とができる量子アルゴリズムが開発されており、超高速計算が可能になると考えられ ている。

[4] 量子ビット

電子スピンの向きなどに符号化された量子情報の最小単位のこと。通常のデジタル回路では「0もしくは1」の2状態に情報が保持されるのに対し、量子ビットでは「0でありかつ1でもある」状態を任意の割合で組み合わせて表現することができ、これを量子力学的な重ね合わせ状態と呼ぶ。このことを表現するために、通常量子ビットの状態は任意の向きの矢印によって表される。

[5] 高周波反射測定法

ある系に高周波を加え、その反射信号を測定することで、対象の系のインピーダンス を測定する方法。本研究では、高周波共振回路のインピーダンスを測定することで、 電荷計の伝導度を高速かつ高精度に測定できる。

[6] スピン電荷変換

スピン状態に応じて電荷遷移の有無が生じる現象を利用して、スピンの情報を電荷状 態に変換する方法。例えば、二重量子ドットにおいて各ドットに一つずつ電子が入っ ている場合、これらのスピンが反並行であれば、一つのドットにもう片方のドットか ら電子が移れるものの、並行の場合はパウリの排他律によって電子の移動が抑制され る現象などがある。

[7] 電荷計

電荷状態を測定したい対象の量子ドットの近傍に配置した、量子ドットもしくは量子 ポイントコンタクトと呼ばれる一次元伝導チャネルなどのこと。電荷計は対象の量子 ドットと静電結合しており、その伝導度は周囲の静電環境に敏感となっている。電荷 計の伝導度測定によって、対象の量子ドットの単一電子レベルの電荷状態の変化を検 出可能。

[8] インダクタ

ー般に電線を巻いたコイルによってできており、流れる電流によって形成される磁場 にエネルギーを蓄えることができる素子のこと。インダクタのインピーダンスは周波 数に比例して大きくなり、静電容量と共に電子回路の基本構成要素となっている。

[9] 寄生容量

電子回路において、配線など向かい合う導体に電位差が生じた場合などに発生する、 設計者が意図しない静電容量のこと。

[10] インピーダンス、特性インピーダンス 交流回路の電圧と電流の比のことをインピーダンスと呼ぶ。直流回路の場合の抵抗に







対応し、単位もオームである。交流回路の基本構成要素である、インダクタや静電容量のインピーダンスは周波数に対して依存性を持つ。また、交流信号を伝送する配線のインピーダンスは50オームに設計されていることが多く、このインピーダンスを特性インピーダンスと呼ぶ。

[11] 量子井戸構造

ある方向の電子の運動を束縛した構造のこと。電子は束縛されていない2次元方向に のみ運動が可能。通常数ナノメートル程度の薄膜を異なる材料で挟むことで構成する。

6. 発表者·機関窓口

<発表者>
理化学研究所

ᅸᇈᆍᄢᅸᇭ				
創発物性科学研究センター	量子機	能シス	、テム研究	グループ
特別研究員	野入	亮人	(のいり	あきと)
研究員	武田	健太	(たけだ	けんた)
グループディレクター	樽茶	清悟	(たるちゃ	» せいご)
東京工業大学 工学院 電気	電子系			
准教授	小寺	哲夫	(こでら	てつお)



野入 亮人

樽茶 清悟

<機関窓口> 理化学研究所 広報室 報道担当 TEL:048-467-9272 FAX:048-462-4715 E-mail:ex-press[at]riken.jp

東京工業大学 広報・社会連携本部 広報・地域連携部門 TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661 E-mail: media[at]jim.titech.ac.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。

