Development of spin measurement method for scaling up of spin qubits



木山 治樹(Haruki KIYAMA, Ph. D.)
九州大学大学院システム情報科学研究院 I&E ビジョナリ
一特別部門 准教授

(Associate professor, Department of I&E visionaries, Graduate School and Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University)

日本物理学会 応用物理学会

受賞:科学技術分野の文部科学大臣表彰・若手科学者賞 (2022 年)、船井 研究奨励賞 (2016 年) 研究専門分野:半導体低次元系

あらまし

半導体量子ドット中のスピン量子ビットは大規模集 積化に適した量子ビットとして期待されている。将来 の量子コンピュータでは、大規模な二次元量子ドット アレイにおけるスピン測定の実行が必要である。とこ ろが、大規模2次元アレイでは電荷計をアレイ外縁部 に設置することになり、大部分の量子ビットに対して スピン測定の忠実度が低下してしまう。本研究ではこ の問題を解決する、集積量子ドットに適したスピン測 定法の開発に取り組んだ。

本研究では従来のスピン測定法を改良し、「更なる測 定精度の向上」と「集積量子ドットでの実行可能性」 の2点の両立を目指した。新規測定法について、GaAs 2重量子ドットを用いて原理実証実験を行った。さら に、量子ドットのパラメータを最適化することにより、 スピン測定忠実度 99.94%を示唆する結果が得られた。 本新規測定法は、状態緩和エラーを低減しつつ、様々 なスケーラブル電荷測定技術と組み合わせることで、 集積量子ドットにおいても高忠実度のスピン測定を実 現できると期待される。

### 1. 研究の背景・目的

量子ビットの測定は量子情報処理の要素技術であり、 量子コンピュータ\*1の実現には高忠実度の測定が必要 である。 半導体量子ドット\*2 中のスピン\*3 量子ビッ ト[1]は大規模量子コンピュータに有望な量子ビット として期待されている。その測定については、少数量 子ビット系ではすでに様々な測定法が実現されている。 単一電子スピンを直接測定することは困難であるため、 スピン依存伝導を用いてスピン情報を電荷情報に変換 し、その電荷情報を測定することで、単一スピン量子 ビットの測定が可能となっている。

スピン測定忠実度の向上に関して、スピン情報を長 寿命かつ電荷検出信号強度の大きな準安定電荷状態に 変換する手法(ラッチング法)が提案され、シリコン 量子ビットで 99%を超える高忠実度が報告されてい る[2]。しかし、この従来のラッチング法では軌道混成 による緩和を抑制するために大きな励起エネルギーが 必要であり、更なる改善の余地が残されている。

二次元量子ドットアレイ構造は、半導体量子ビット の集積化において有用と期待される。このとき、大規 模量子ドットアレイで有用なスピン測定法が必要であ る。しかし、電荷計を用いる場合、電荷計は2次元量 子ドットアレイの外縁部に設置することになる。その 場合、アレイ中の量子ドットの大部分が電荷計から離 れた位置に置かれ、その結果、単一電荷検出およびス ピン測定の忠実度が低下してしまうと予想される。こ の問題を回避する方法として、ゲート電極を用いた分 散型電荷測定、スピン輸送、SWAP ゲート鎖、および カスケード型スピン電荷変換などが報告されている。 しかし、これらの方法は低い電荷測定感度やスピン輸 送中の緩和エラーなどの課題が予想される。

本研究では集積量子ドットに適したスピン測定法の 開発を目的とする。従来のラッチング法を発展させ、 「更なる測定精度の向上」と「集積量子ドットでの実

「更なる側に相及の向上」と「果槓重ナトットでの美 行可能性」の2点を両立する新規スピン測定法の開発 を目指した。

### 2. 研究の方法

本研究では、従来のラッチング法を改良し、既存の 電荷測定法と組み合わせてスピン測定を行った。改良

### Development of spin measurement method for scaling up of spin qubits

ラッチング法では、従来ラッチング法の直後に追加の 電圧パルスを印加することにより、スピン緩和やドッ ト間混成に起因したスピン電荷変換エラーを最小化さ せることを図った。改良したラッチング法を2重ラッ チング法と呼ぶ。



図1 本研究で使用した2重量子ドットの電子顕微 鏡写真

2重ラッチング測定を実行条件として、従来のラッ チング法の場合と同様に、2重量子ドット(図1)の一 方のドット(ドット1と呼ぶ)と電子溜めとのトンネル 結合を大きく、他方のドット(ドット2と呼ぶ)と電子 溜めとのトンネル結合を小さく調整する。本スピン測 定は5つのステージ、(1)初期化、(2)パウリスピンブ ロッケード(PSB)[3]、(3)1段目のラッチング、(4)2 段目のラッチング、(5)電荷測定で構成される。(2)~ (4)の模式図を図2に示す。



まず初期化(1)では、電子溜めからドットにランダム

なスピンの電子をトンネルさせることにより、スピン 一重項状態またはスピン三重項状態のいずれかの2電 子スピン状態にランダムに初期化される。 次に、パウ リ原理(PSB)を用いてスピン一重項とスピン三重項が それぞれ(2,0)と(1,1)の電子数分布に変換する「(N<sub>1</sub>、  $N_2$ )はドット1に $N_1$ 個、ドット2に $N_2$ 個の電子があ る状態を表す。]。次に、基底状態が(1,0)となるゲー ト電圧を印加する(ラッチング1段目、図2)。このと き、電子溜めとのトンネル結合がドット間で大きく異 なるため、(2,0)から(1,0)への遷移レートは高く、 (1,1) 状態から(1,0) 状態への遷移レートは低くなる。 その結果、スピン一重項とスピン三重項はそれぞれ (1,0)状態と(1,1)状態に変換される。(1,0)状態と (1,1)状態は、(2,0)状態と(1,1)状態の組合せに比べて 電荷検出信号のコントラストが大きいため、電荷読み 出しの忠実度が大幅に向上される。

1段目ラッチングにおいて、ドット間のトンネル結 合が大きい場合、(1,1)と(2,0)の共鳴付近で状態が混 成し、(1,1)から(1,0)への遷移が促進される。これを 電荷リークと呼ぶ。2重ラッチング法では、1段目ラ ッチング後すぐに(1,1)が基底状態となるようにゲー ト電圧を印加する(ラッチング2段目、図2)。これに より、(1,1)と(2,0)の混成を電荷リークより速く解除 することで、エラーを低減できる。

量子ドットアレイにおいて2重ラッチング法を用い ることで、電荷リークエラーやスピン緩和エラーを低 減しつつ、スピン電荷変換後の単一電荷輸送が可能に なる。従って、この新規スピン電荷変換は、電荷輸送 やゲート分散測定などの様々なスケーラブルな電荷測 定と組み合わせることで、大規模量子ドットアレイに おいて高忠実度スピン測定を実現できると期待される。

#### 3. 研究の結果

本研究では、2重ラッチングスピン測定の原理実証 実験を行った。試料には、電荷計量子ドットを備えた GaAs/AlGaAs2重量子ドットを用いた(図1)。実験は、 無冷媒希釈冷凍機を用いてベース温度 20 mK、電子温 度 160 mK で行った。

まず、従来の PSB を用いたスピン測定と比較して、 ラッチング法によって電荷測定感度が向上することを

Development of spin measurement method for scaling up of spin qubits

実験的に確認した。図3(a)は、積分時間3 $\mu$ sのPS Bスピン測定で測定された電荷測定信号強度のヒスト グラムである。破線は、電荷測定中に生じるスピン緩 和の影響を考慮したフィッティング結果を示している。 信号雑音比は約2.5である。図3(b)と図3(c)はそれ ぞれ従来ラッチング法と2重ラッチング法で観測した 電荷測定信号強度のヒストグラムである。どちらも積 分時間は1 $\mu$ sとPSB測定より短いにもかかわらず、 信号雑音比はおよそ10であり、PSB測定に比べて大 幅に改善されている。



また、各スピン測定法について状態緩和のダイナミ クスを調べた。まず PSB スピン測定において、実時間 電荷信号の指数関数的な減衰を観測し、その時定数は 18µs であった。これはスピン三重項からスピン一重 項へのスピン緩和時間である。次に従来ラッチング法 では、電荷信号は時定数 1.4µs でより急速に減衰し た。これは(1,1)と(2,0)の混成による電荷リークに起 因すると考えられる。図3(b)において(1,1)状態に 対応するピークが低いのは、この速い電荷リークのた めである。最後に2重ラッチング法では、電荷信号の 減衰時定数 2.7ms が得られ、大幅な改善に成功した。

次に、各スピン測定法の忠実度を評価した。まず PSB スピン測定については、図3(a)の電荷測定結果とスピ ン緩和時間から測定忠実度は 79.5%と見積もられた。 この忠実度には、PSB の過程においてスピン1重項が (2,0)状態に遷移しないような非断熱過程によるスピ ン電荷変換エラーを考慮している。

従来ラッチング法と2重ラッチング法に関しては、 忠実度はドットー電子溜め間のトンネルレートに大き く依存する。トンネルレートは2つのドット間のエネ ルギー差(detuning)に依存するため、スピン測定忠実 度についても detuning 依存性を考慮する。図4上図 は1段目ラッチング過程における、スピン1重項およ びスピン3重項から(1,0)状態への遷移レートの detuning 依存性である。これとスピン緩和時間および 電荷測定忠実度[図3(b)]を用いて従来ラッチング法 の忠実度を見積もった。その結果を図4下図に灰色で 示す。ここで、忠実度の計算においてはスピン緩和時 間の detuning 依存性は無視している。忠実度は最大 値 68.7% が得られ、上述の PSB スピン測定よりも低 い値が見積もられた。これは本デバイスにおける小さ なスピン1重項ースピン3重項励起エネルギーに起因 した、速い電荷リークによるものと考えられる。

2重ラッチング法の忠実度も同様に、スピン依存遷 移レートやスピン緩和時間、および電荷測定忠実度[図 3(c)]を用いて見積もった。その結果を図4下図に黒色 で示す。ここでは1段目ラッチング-2段目ラッチン グ間の待ち時間は最適化されている。忠実度は最大で 97.1%が得られ、従来ラッチング法に比べて大幅な改 善に成功した。



 図4 (上)1段目ラッチング過程における、スピン 1重項およびスピン3重項から(1,0)状態へ の遷移レートの detuning 依存性。(下)従来ラ ッチング法および2重ラッチング法の忠実度

Development of spin measurement method for scaling up of spin qubits

次に、ゲート電圧条件を調整し、スピン依存遷移レ ート差を増強することで、高忠実度の2重ラッチング スピン測定を試みた。調整後のスピン3重項およびス ピン1重項から(1,0)状態への遷移レートはそれぞれ 2.0 GHz および 109 kHz と大きなレート差が得ら れた(調整前と異なり、3重項と1重項の遷移レート の大小関係が逆転している)。この条件について見積 もったスピン電荷変換忠実度について、 1段目ラッ チング-2段目ラッチング間の待ち時間に対する依存 性を図5に示す。スピン1重項については待ち時間が 長いほど電荷リークによるエラーが増加するのに対 し、スピン3重項では1段目ラッチング時間が短すぎ ると(1.0)状態への遷移が起こらずにスピン電荷変換 に失敗してしまう。最適な1段目ラッチング時間は、 両スピン状態についての忠実度の平均値を最大化する 条件として与えられ、本研究ではおよそ5ns であっ た。2重ラッチング忠実度は99.97%と見積もられ た。この他に、PSB における非断熱遷移によるスピ ン電荷変換エラー、電荷測定の忠実度などの要因を考 慮すると、99.94%と高いスピン測定忠実度が見積も られた。これは半導体スピン量子ビットについてこれ までに報告された最高値と同程度である。



図5 2重ラッチング法によるスピン電荷変換忠実 度の1段目ラッチング-2段目ラッチング待 ち時間依存性。

### 4. 将来展望

スピン測定忠実度の正確な評価には高忠実度のスピン状態初期化が必要であり、今後の初期化技術の進展 が期待される。また、集積ドットへの応用についても 実験による実証を計画している。

### おわりに

本研究で、2次元量子ドットアレイで利用可能なス ピン測定法として2重ラッチングスピン測定法を開発 した。スピン状態と電荷状態の緩和を最小限に抑制し つつ、電荷測定信号を強化することで、高忠実度のス ピン測定が可能である。本手法は、本研究で用いた GaAs 量子ドットに限らず、現在主流となっているシリ コン量子ビットやゲルマニウム正孔量子ビットにも有 用である。

本研究では2重ラッチング法を2重量子ドットで実 証したが、電子溜めへのトンネリングの代わりに別の 量子ドットへのトンネリングを利用することで、量子 ドットアレイにおいて2重ラッチング法が実行可能と 考えられる。その後、電荷輸送やゲート分散電荷測定 などのスケーラブル電荷測定技術と組み合わせるこれ により、大規模量子ドットアレイにおいても高忠実度 スピン測定の実現が期待される。

#### 用語解説

\*1 量子コンピュータ

量子力学では、異なる状態の重ね合わせや粒子間の 複雑な絡み合い(量子もつれ)のような古典力学では 許されない状態を取り得る。このような量子力学特有 の状態をリソースとして計算に利用するのが量子コン ピュータである。従来の計算機に比べて桁違いの処理 能力を有すると期待されている。

#### \*2 量子ドット

電子をナノメートルサイズの箱のような微小空間に 閉じ込めることにより、量子力学で記述される離散的 な電子状態を持つ。原子との類似性から人工原子とも 呼ばれる。半導体中ではゲート電圧を用いて電気的に 形成することが可能である。

Development of spin measurement method for scaling up of spin qubits

\*3(電子)スピン

電子が示す、上向きと下向きに対応する磁石のよう な性質。古典力学的には電荷を持つ電子の自転運動に よって理解される。単一の電子スピンの状態は量子力 学に従うので、量子情報に応用できる。

### 参考文献

[1] R. Hanson et al., Rev. Mod. Phys. 79, 1217 (2007)

- [2] P. Harvey-Collard *et al.*, Phys. Rev. X 8, 021046 (2018)
- [3] K. Ono et al., Science 297, 1313 (2002).

この研究は、令和元年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和2~4年度に実施されたものです。