

MERIT インターンシップ 報告書

電子スピン量子ビットと結合するノイズのラムゼー干渉測定

著者

小嶋洋平

工学系研究科物理工学専攻 中村・宇佐見研究室

インターンシップ概要

場所: 理化学研究所 量子システム理論研究チーム

期間: 2021年10月11日から2021年11月11日

要旨

Si/SiGe 上に形成した量子ドット中の電子スピン量子ビットにおけるノイズをラムゼー干渉測定によって調べた。複数の手法を組み合わせることで 10^{-3} Hzから 10^6 Hzまでの広範囲におけるノイズの周波数特性を測定した。得られたノイズスペクトルから核スピンの支配的であることがわかったが、拡散モデルから予測される特性とは異なる特性を示した。

背景

近年古典計算機においてムーアの法則の限界が予言されており、新たな計算手法として量子計算機が注目されている。量子計算では量子力学特有の状態の重ね合わせや量子もつれにより大規模な並列計算処理が実現できるため古典計算機では計算できない問題を扱うことができる。量子計算機において情報の最小単位を担う素子は量子ビットと呼ばれ、疑似的な二準位系を 0 および 1 と見立てて実装される。半導体量子ドット中に閉じ込めた単一電子スピンは上向きスピンと下向きスピンの自由度を持ち、外部磁場下においてゼーマン分裂により二準位系を形成するため、量子ビットを実装する良い候補として研究されてきた。

量子ビットの位相緩和時間 (コヒーレンス時間) は情報保持時間を示す重要な指標である。Si/SiGe のヘテロ接合半導体上に作成した量子ドット中の電子スピン量子ビットのコヒーレンス時間は、天然に存在する Si の場合に $2 \mu\text{s}$ [1]、同位体制御をした Si の場合に $20 \mu\text{s}$ [2] になったと報告されている。これらのコヒーレンス時間は量子ビットが環境から受けるノイズにより制限されており、ノイズの研究は量子ビットの性能向上に役立つ。そこで本研究ではノイズによって量子ビットが獲得する位相を調べることで、量子ビットと結合するノイズの周波数特性を調べた。

実験手法

測定には天然の Si を用いた Si/SiGe ヘテロ接合の半導体を用いた。測定試料の構造を図 1a

に示す。トップゲートに正の電圧を印加して Si/SiGe の界面に二次元電子ガスを誘起し、ファインゲートに負の電圧を印加することで電子ガスを空乏化して単一電子スピンを閉じ込めた量子ドットを形成する。最上段に配置された微小磁石は空間的に非均一な磁場を形成し、マイクロ波 (MW) によって電子スピンを空間的に振動させることで電子スピン共鳴によりスピン反転操作を可能にする[3]。

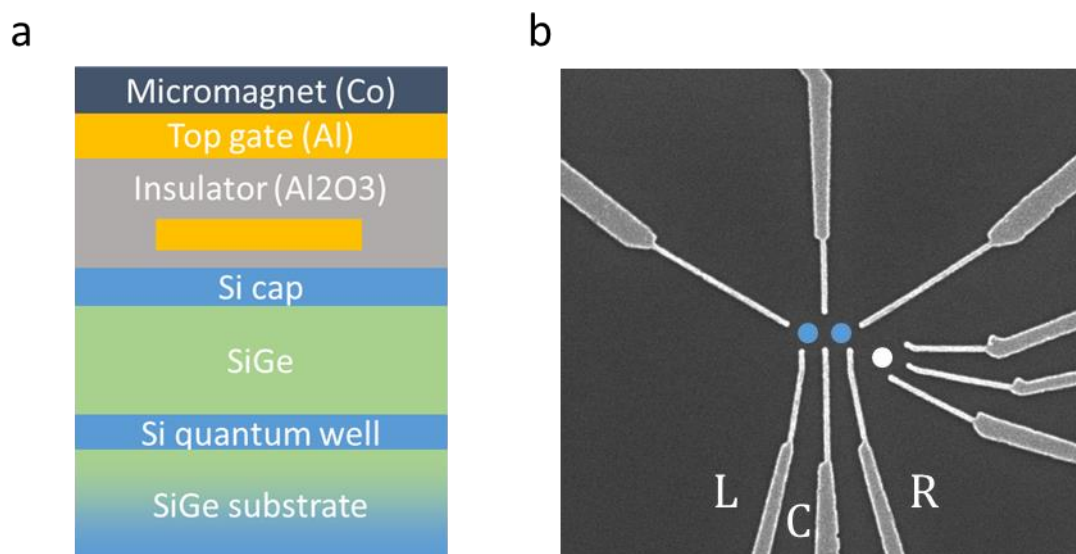


図 1 測定試料の構造。a 縦方向の構造。Si quantum well と SiGe の界面に二次元電子ガスが誘起される。b ファインゲートの上面図。誘起した二次元電子ガスの一部をファインゲートに負の電圧を印加することで空乏化し、中央に二重量子ドットを形成する (青丸)。近傍に配置した SET センサー (白丸) によって量子ドット内の電子数および電子スピン状態を読み出す。

ファインゲートの構造を図 1b に示す。中央に二つの量子ドットを形成し、C ゲートにマイクロ波を印加してスピン反転操作を行う。量子ドット近傍に作製した SET は電荷センサーとして用いられ量子ビットの状態の読み出しに使用する。

量子ビットの位相はラムゼー干渉測定によって調べる (図 2)。まず下向きスピン状態の量子ビットを $\pi/2$ だけ回転させ、量子ビットを外部磁場に対して垂直な方向に初期化する。次に時間 t だけ自由時間発展させた後、再度 $\pi/2$ だけ回転させる。これらの操作により時間 t の間に量子ビットが獲得した位相成分が最終的に量子ビットの上向きスピン確率に反映されるので、スピン状態を読み出すことで量子ビットの位相を測定できる。

量子ビットのノイズの低周波成分は、ラムゼー干渉測定における位相の t 依存性から量子ビットの共鳴周波数を推定し、時間変動をフーリエ変換することで得られる。これにより得られるノイズの最大周波数は、位相の単発測定に要する時間として典型的な値である 1 ms、 t 依存性を調べるために 100 種類の t に対して 10 回繰り返して確率分布を取得すると仮定す

ると、 10^0 Hzとなる。一方でノイズの高周波成分は、デカップリングパルスを複数回適用し高周波領域のノイズのみを通す疑似的なフィルターを構築する方法[4]によって取得できる。この手法により得られるノイズの最低周波数は、量子ビットの緩和時間やデカップリングパルスの精度で制限され、典型的な最低周波数は 10^4 Hz程度となる。そのため中間領域である $10^0 \sim 10^3$ Hzのノイズが取得できないという問題があった。そこで我々は、一つの t に対してラムゼー干渉測定を繰り返し行い得られた単発測定間の相関からノイズの周波数特性を計算する方法[5]を適用することで、これらの領域におけるノイズを取得した。

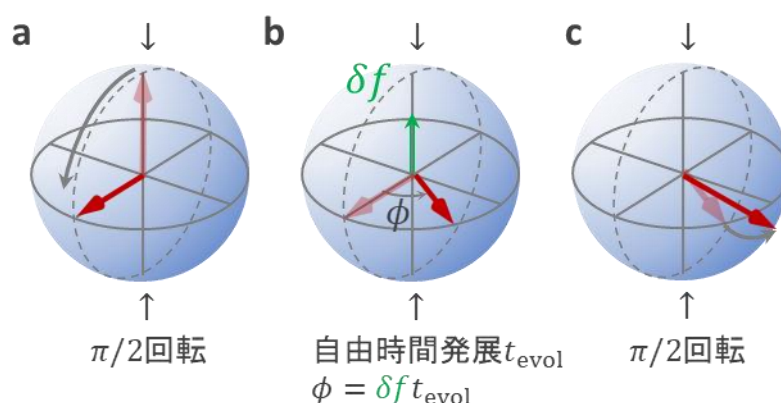


図 2 ブロツホ球上におけるラムゼー測定概念図。ブロツホ球とは量子ビットの状態を単位球上の点として表す記法で、上図では球面上の極が下向きスピ状態と上向きスピ状態を表す。共鳴周波数からのずれ (δf) が推定できる。
a, スピンを外部磁場と直交方向に初期化する。 **b**, 自由時間発展させることで量子ビットが位相を獲得する。 **c**, 90 度回転させることで位相を上向きスピ確率に転写する。

結果と考察

まず測定試料で二重量子ドットを形成できることを確かめ (図 3)、続いて量子ドット中の電子スピンの回転操作を試みた (図 4)。その結果、回転操作で特徴的に現れるシェブロンパターンを観測した。得られたスピン回転操作の速度は 2 MHz 程度であり、 $\pi/2$ 回転操作に要する時間は 125 ns 程度となる。これは量子ビットのコヒーレンス時間よりも十分短いため、ラムゼー干渉測定が可能であることが確かめられた。

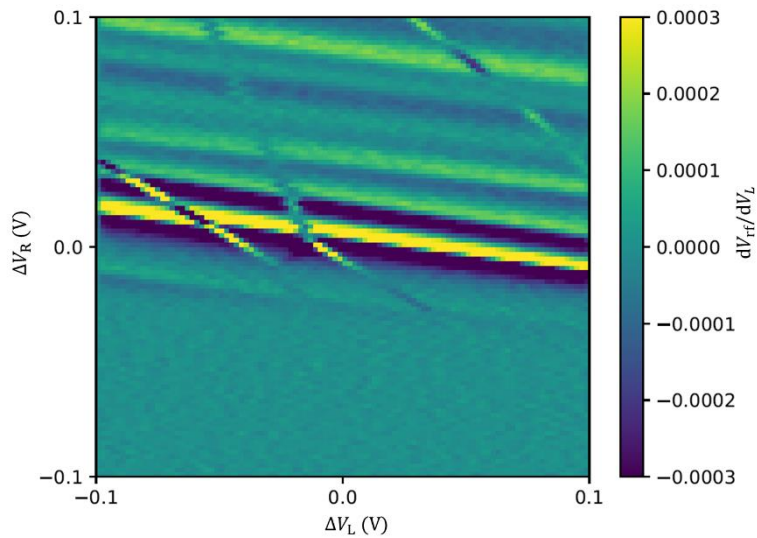


図3 電荷安定状態図。異なる傾きを持つ電荷遷移線が二種類観測できることから二重量子ドットが形成されていることがわかる

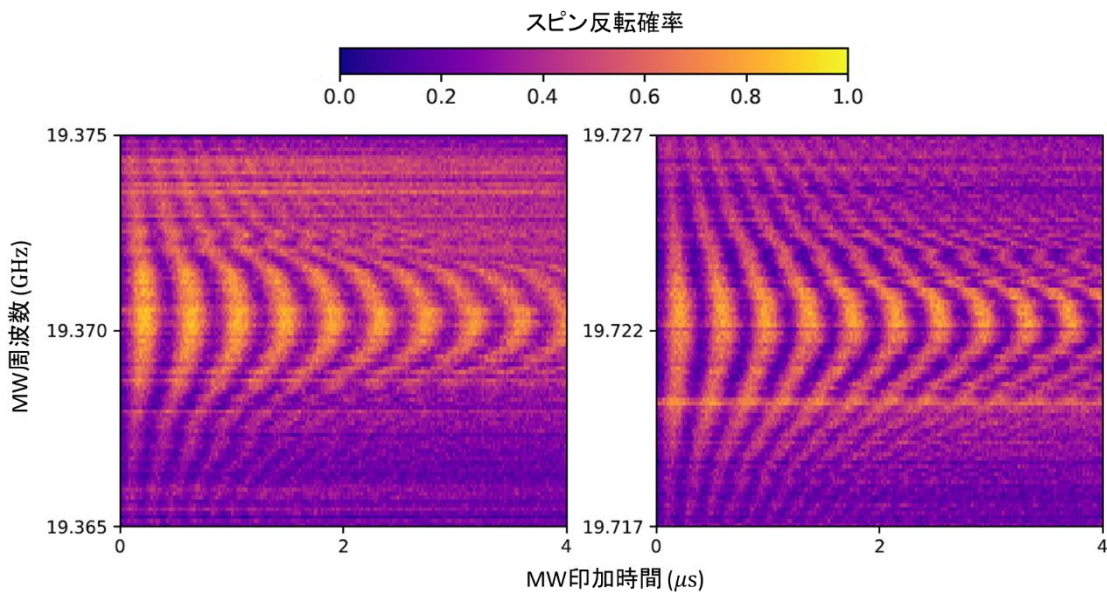


図4 シェvronパターン。左(右)図が左(右)の量子ドット中の電子スピンをスピン回転操作している様子。MW印加時間によってスピン反転確率が変化しており、MW印加時間を調整することでスピン状態を制御できることがわかる。

続いてラムゼー干渉測定を行いノイズの周波数特性を調べた(図5)。先述した三つの手法(共鳴周波数の時間変動のフーリエ変換、[4]、[5])を用いることで、Siの単一電子スピンス系において初めて 10^{-3} Hzから 10^6 Hzまでの広い範囲のノイズスペクトルを取得することに成功した。どちらの量子ビットにおいてもノイズの周波数特性は、 10^{-1} Hz以下の周波数領

域では f^{-1} に従い、 10^{-1} Hzから 10^3 Hzの周波数領域では $f^{-1.4}$ に従った。これらのノイズの主要な原因として、試料中の核スピン揺らぎによるノイズと試料中の不純物準位に電荷が入り出して起こる電荷ノイズの二つが考えられる。今回得たノイズの周波数特性は、同基板を用いて作製された他の複数の試料においても観測されているため、試料固有の不純物準位の位置に強く依存する電荷ノイズではなく、核スピンによるノイズが支配的であると考えられる。核スピンノイズが主要なノイズ源である場合、低周波ノイズはホワイトノイズのようになることが拡散モデルで記述される GaAs 系を用いた先行研究によって報告されている[6]。しかし、今回の結果では低周波ノイズが f^{-1} に従っており、これは Si 系に拡散モデルが適用できないことを示唆している。

また今回の実験で初めて得られた中間領域である 10^3 Hz付近では、ノイズが $f^{-1.4}$ に従わなくなる様子が観測された。これはこの領域に核スピンノイズのカットオフが存在することを示唆している。つまり核スピン同士の相互作用の速度に限界があることを示唆しているがこれについては更なる研究が必要である。 10^5 Hz 以降のデカップリングパルスを用いる手法で会得した領域においてノイズがホワイトノイズに近づいていることについても追加の研究が必要である。

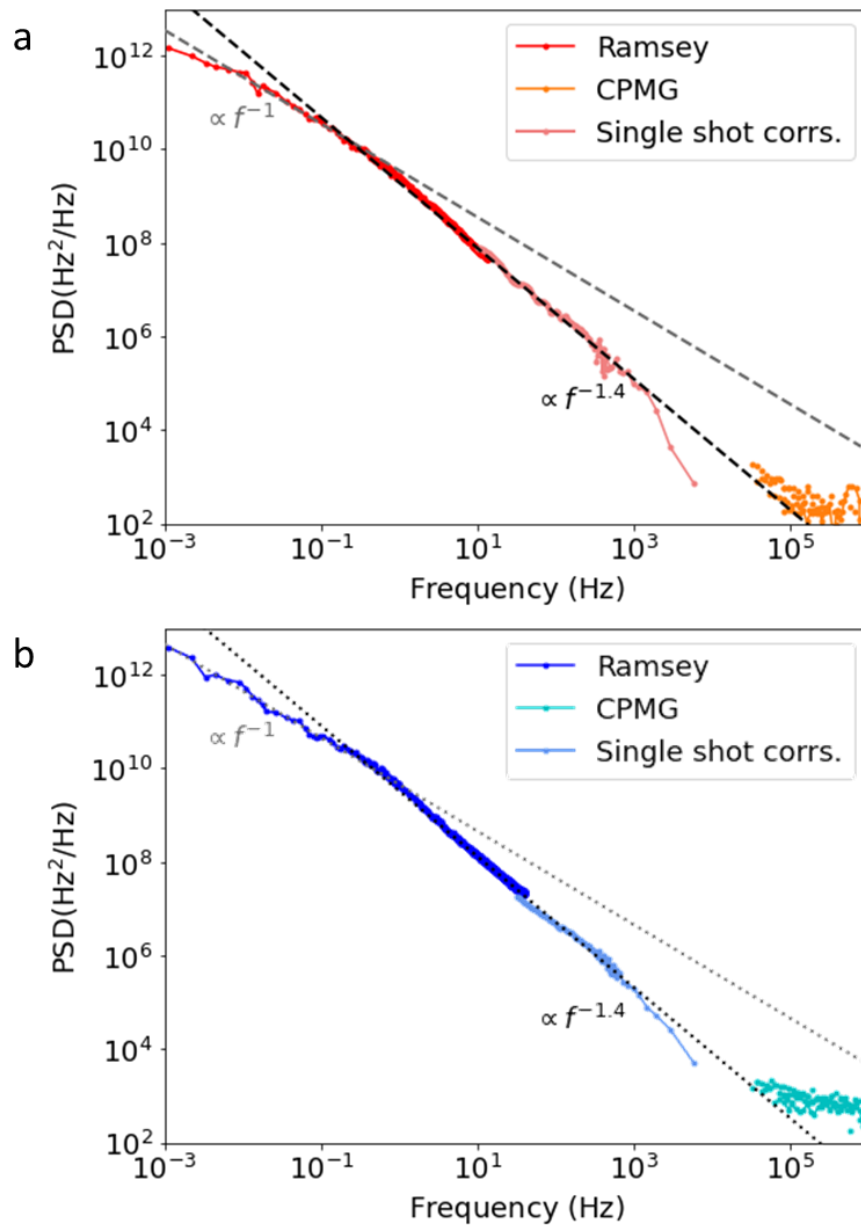


図5 量子ビットと結合するノイズの周波数特性。a (b) が左 (右) の量子ドットを用いて測定された結果。図中の Ramsey は共鳴周波数の時間変動をフーリエ変換して得たデータを表し、CPMG が[4]、Single shot corr.が[5]の手法で得たデータを表す。

結論

10^{-3} Hzから 10^6 Hzまでの広範囲におけるノイズの周波数特性を Si/SiGe 系の単一電子スピントラップ系で初めて取得した。 10^3 Hz以下の領域では核スピンノイズが支配的であるが、その特性は拡散モデルで記述される GaAs 系とは異なる特性を示した。また核スピン同士の相互作用の速度に限界があることを示すカットオフの兆候を観測した。今後、これらの理論モデル

を構築することで量子ビットのノイズ源のダイナミクスを調べることができる。

謝辞

本研究の遂行にあたり指導教官である工学系研究科物理工学専攻の中村泰信教授にご支援とご指導をいただいたことを深く感謝いたします。またインターンシップを受け入れてくださった理化学研究所の Peter Stano 上級研究員と実験装置を使用させてくださった樽茶清悟グループディレクターにも感謝いたします。実験結果の解析は Juan Rojas Arias 氏に手伝っていただきました。MERIT の副指導教員である平本俊郎教授に本研究の提案を許可していただけたことを感謝いたします。最後にインターンシップの機会を与えてくださった MERIT プログラムに心より感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Takeda *et al.*, *Sci. Adv.*, **2**, e1600694 (2016)
- [2] J. Yoneda *et al.*, *Nat. Nanotech.*, **13**, 102-106 (2018)
- [3] J. Yoneda *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **113**, 267601 (2014)
- [4] J. Medford *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 086802 (2012)
- [5] T. Fink *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **110**, 010403 (2013)
- [6] T. Struck *et al.*, *npj Quantum Inf.*, **6**, 40 (2020)