

## 論文の内容の要旨

論文題目 Experimental investigation of spin qubits in Si/SiGe double quantum dot

(Si/SiGe 2 重量子ドットにおけるスピン量子ビットの実験的研究)

氏 名 武田 健太

半導体量子ドット中の単一電子スピンのコヒーレント操作を利用した、電子スピン量子ビットは、従来GaAs系半導体を用いた量子ドットにおいて研究が行われてきた [1, 2, 3, 4, 5, 6]。しかし、GaAsなどのIII-V族半導体系量子ドットをスピン量子ビットに応用する際には、電子スピンの位相コヒーレンスが電子スピンと核スピン間の相互作用（超微細相互作用）によって妨げられるという大きな問題点がある。

典型的なGaAs 2 重量子ドット中の電子スピンの集団位相緩和時間  $T_2^*$  は、およそ数十 nsec 程度と報告されている [1, 2]。一方、単一電子スピン共鳴による 1 電子スピン操作に要する時間は典型的には 10 nsec 程度 [2, 3, 4, 5] と、コヒーレンス時間と同程度の値となっている。このような状況では、単一スピン操作の忠実度は 80% 程度にとどまり、現実的な量子情報処理に必要なと計算されている値 (99.9% 程度 [7]) を達成することは非常に難しい。

そこで、本研究ではその超微細相互作用による電子スピンの位相緩和の問題を解決し、量子情報処理に必要なゲート忠実度を持つ電子スピン量子ビットを実現するための実験的試みとして、核スピンの少ない半導体である Si を用いた 2 重量子ドットの研究を行った。Si は天然存在比で 4.7% ( $^{29}\text{Si}$ ) しか核スピンを持つ同位体がなく、さらに核スピンを持たない  $^{28}\text{Si}$  の同位体濃縮により、数十から数百 ppm 程度まで核スピンを持つ同位体の割合を低減することができる [8, 9]。

本研究では、Si 系の中でも特に、従来の GaAs 半導体量子ドットで用いられている AlGaAs/GaAs 変調ドープヘテロ構造に類似した構造である Si/SiGe ヘテロ構造を用いた。

本研究が開始した当初、Si/SiGe 量子ドットで大きな問題となっていたのは、量子ドットの電荷状態の不安定性の問題であった。まず我々はその問題の解決のため、試料構造の改善を行った。まず、我々は GaAs 系でも報告のあったトップゲートを用いた構造を

作製し、GaAs系と同様にSi系においても、量子ポイントコンタクトおよび量子ドット構造のショットキーゲート雑音をトップゲートによって低減できることを示した[10]。しかし、この構造において達成できた雑音の大きさは、依然GaAs系の10倍程度となっており、さらなる構造の改善が必要であることも示唆された。

そこで、我々は更に安定な量子ドットを実現するため、アンドープSi/SiGe[12]を用いた量子ポイントコンタクトおよび量子ドット構造を作製した。本構造では、GaAs系と同程度の小さいゲート雑音の値を実現することに成功した。

次に、完成した安定な2重量子ドット試料において量子ビットの実装に不可欠な、単一スピン操作に相当する電子スピン共鳴の実験を行った。まず、2電子状態においてパウリスピンブロッケードを観測し、電子スピン状態がコヒーレンス時間( $T_1 \sim 30 \mu\text{s}$ )よりも十分短い時間( $\sim 1 \mu\text{s}$ )でシングルショット測定できることを示した。次に、ゲートパルスによる状態の初期化を行った上で、磁場および周波数を掃引することによって、2つの電子スピンの共鳴条件に相当する信号が得られることを確かめた。しかし、従来系とは異なる点として、共鳴信号に反交差構造が観測された。この反交差構造は、歪みSi中の2重縮退したバレー状態によるものである。本研究開始当時は、バレー縮退は大きな問題として考えられていなかったが、ごく最近では他の研究グループからの報告[13, 14]によっても、バレー縮退がスピン共鳴の実験に大きな影響を与えることが明らかにされている。続いて本研究では、2種類のゲートパルスによるスピンおよびバレー状態の初期化の方法を用いることによって、先行実験[13]では明らかにすることができなかった詳細なSi2重量子ドット中のスピンやバレーの状態の測定を行った。

本研究の将来的な展望としては、本研究では達成できなかった電子スピン共鳴の時間分解測定 (Rabi振動の観測) や、2ビット操作と1ビット操作を組み合わせた完全な2量子ビット操作が挙げられる。そのためには、バレー縮退の影響を完全に無視できるよう、バレーのエネルギー分離を大きく( $\sim 1\text{meV}$ 程度、本研究では50から200  $\mu\text{eV}$ 程度)制御可能な構造を作製する必要がある。そのためには、量子ドット構造を小さくすることが有力である[15]。また、それによって、量子ドット間の結合の大きい3量子ドット以上の量子ドット列を作製することも可能になり、Si系量子ドットさらなる多ビット化が可能になると考えられる。

- [1] J. R. Petta *et al.*, Science (2005)
- [2] F. H. L. Koppens *et al.*, Nature (2006)
- [3] K. C. Nowack *et al.*, Science (2007)
- [4] M. Pioro-Ladriere *et al.*, Nature Physics (2008)
- [5] R. Brunner *et al.*, Physical Review Letters (2011)
- [6] M. D. Shulman *et al.*, Science (2012)
- [7] E. Knill *et al.*, Nature (2005)

- [8] A. Wild *et al.*, Applied Physics Letters (2012)
- [9] M. Veldhorst *et al.*, Nature Nanotechnology (2014)
- [10] K. Takeda *et al.*, Applied Physics Letters (2013)
- [11] C. Buizert *et al.*, Physical Review Letters (2008)
- [12] M. G. Borselli *et al.*, Applied Physics Letters (2011)
- [13] X. Hao *et al.*, Nature Communications (2014)
- [14] E. Kawakami *et al.*, Nature Nanotechnology (2014)
- [15] N. S. Lai *et al.*, Scientific Reports (2014)