

機関番号：12608

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21710137

研究課題名 (和文) シリコン量子ドットを用いた電子スピン量子ビット開発

研究課題名 (英文) Development of electron spin qubits using silicon quantum dots

研究代表者

小寺 哲夫 (KODERA TETSUO)

東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・助教

研究者番号：00466856

研究成果の概要 (和文)：

シリコン量子ドット中の電子スピンを量子ビットとして用いる量子情報デバイスの物理の解明、ハードウェアのための基本技術の実現を目的として研究を行ってきた。素子作製においては、エッチング条件とトップゲートのゲート絶縁膜形成条件の最適化を行い、制御性に優れたシリコン2重量子ドットの作製に成功した。本素子を用いて極低温における測定を行い、電子スピン状態に依存するトンネル現象の観測に成功した。

研究成果の概要 (英文)：

The purpose of this work is to study physics and develop elemental technologies for realizing quantum information devices using electron spins in silicon quantum dots as qubits. We propose a novel device structure and its fabrication techniques for lithographically-defined silicon QDs. We successfully fabricated coupled QDs utilizing electron beam lithography, reactive ion etching, and oxidation, in a metal-oxide-semiconductor structure on a non-doped silicon-on-insulator substrate. We then succeeded in observing a single-electron regime in the QD and spin-related tunneling phenomena.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：量子ドット、シリコン量子ドット、量子コンピュータ、少数電子素子

## 1. 研究開始当初の背景

シリコン量子ドット中の電子スピンを量子ビットに応用した実現例はなく、その物理や基本技術に関しても、国内外で大きな注目を集めつつあるものの、未開拓な学問分野となっていた。

シリコン量子ドットにおいて電子スピン量子ビットが実現されれば、核スピン結合が小さいため長いコヒーレンス時間が期待できる。さらに既存のシリコンテクノロジーとの相性もよいため、量子情報デバイス実現には非常に有力な候補であると考えられる。シリコン量子ドットの量子ビットへの応用に

に向けた研究は、国内では東京工業大学、NTT物性科学基礎研究所等、国外では英国Cambridge 大学等で進められているが、電子スピン量子ビットの実現には至っていないかった。

## 2. 研究の目的

シリコン量子ドット中の電子スピンを量子ビットとして用いる量子情報デバイスの物理の解明、ハードウェアのための基本技術の実現を目的として研究を行った。

単一電子スピン制御可能な量子ドット等の半導体ナノ構造素子は量子情報処理素子として有望である。本研究の目的は、将来的に量子情報処理と既存シリコンテクノロジーとの融合を目指し、シリコンナノ構造素子中の電子スピンコヒーレンスの物理の解明及び関連技術開発を行うことにある。対象とする物理は、デコヒーレンス要因決定、量子スピン系と外界との結合によるダイナミクスである。基本技術としては、電子状態制御可能なシリコン量子ドットの作製、個々の電子スピンのアクセスするための技術開発を目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究にはスピン状態実現可能なシリコン量子ドットの作製が必要であるが、シリコン中の電子は有効質量が重いため、量子閉じ込め効果を得るためにはGaAs系よりも小さな量子ドットを作製する必要があり、高度な作製技術を要する。本研究で用いた素子は、エッチングにより量子ドット構造とサイドゲートを作製し、その上部にポリシリコンのトップゲート(TG)を形成した構造となっている。ソース-ドレイン間のワイヤ領域に3箇所の狭窄領域をパターンニングすることで2重量子ドットを形成した。TGにより誘起した2次元反転キャリアを用いることで面内有効質量の軽い2重縮退谷を有効利用でき、構造及び電圧による量子閉じ込めが効果的に働くという利点が本構造にはある。また、電子線リソグラフィ条件、酸化条件、エッチング条件、酸化膜堆積条件等の最適化を行い、偶発的な量子ドットの排除とサイドゲート効果の向上を図り、制御性に優れた小さな量子ドット素子を実現している。極低温において作製した本素子の電子輸送特性を測定した。

## 4. 研究成果

### (1) シリコン2重量子ドットのドット間静電結合変調効果

本研究で用いた素子は、電子線露光により

量子ドット構造及びサイドゲート(G1, G2)をパターンニングし、その上部にポリシリコンのトップゲート(TG)を形成した構造となっている。量子サイズ効果によりトンネル障壁を形成させるため、ソース(S)-ドレイン(D)間のワイヤ領域に2箇所の狭窄領域をパターンニングし量子ドットを形成した。

このデバイスではG2と量子ドット間に形状揺らぎに起因する付加量子ドットが形成され2重量子ドット構造となっており、低温( $T = 4.5$  K)における電荷安定状態図は直列2重結合量子ドットに特有の電流ピークを示した。実験から求めたゲート容量を理論計算と比較することで、くびれにより量子ドットが形成されていることを確認した。また、2重量子ドットのドット間静電結合をサイドゲートで明瞭に制御することに成功した。これは、サイドゲートによる量子ドット間の電子スピン交換相互作用変調の可能性を示唆している

### (2) シリコン2重量子ドットにおけるスピンプロケード現象

制御された2重量子ドット形成へ向けて、付加量子ドット排除とサイドゲート効果の向上を目的とし、エッチング条件とトップゲートのゲート絶縁膜形成条件の最適化を行った。塩素ガスを用いたエッチングを行うことで垂直性を向上させ、CVD酸化膜を用いることによりサイドゲートと量子ドット間の間隙を埋めた。用いた素子は、くびれを3つ持った2重量子ドット構造となっている。

極低温( $T = 250$  mK)において測定した電子輸送特性は、2重量子ドットに特有の蜂の巣型電荷安定状態図を示した。このことは、3つのくびれの間には2重量子ドットが形成され、付加量子ドットの形成を抑えることが達成されたことを示している。サイドゲートの効果も最適化前に比べ飛躍的に改善されている。

また、トンネル電流が流れる領域である電荷3重点の電子輸送を詳細に調べることにより、電子スピンの量子状態に依存して電流が抑制されるスピンプロケードを観測することに成功した。さらに、スピンプロケード領域における磁場スイープを行うことで、リーク電流が磁場ゼロを極小値としたディップを持つ特性を観測した。これはスピン軌道相互作用による電子スピンの緩和が起こることによりリーク電流が増大している現象である。制御されたシリコン2量子ドットでのスピンプロケード特性評価はこれまでなく、この結果はシリコン系における電子スピンのコヒーレント操作への可能性を強く示している。

### (3) 宙づりシリコン量子ドットの電子フォノン相互作用

量子ドットをナノスケールの宙づり橋構造内に埋め込むことにより、寄生容量の低減や、電子フォノン相互作用の制御が可能になり、量子情報デバイスの性能向上が見込まれている。本研究ではこの宙づり構造埋め込み量子ドットを作製し、その電子フォノン相互作用を調べた。

高濃度にドーピングしたシリコンを電子ビームリソグラフィによりパターンニングすることにより、宙づり量子ドットとサイドにゲートを作製した。サイドゲートにより量子ドットの静電ポテンシャルを変化させたときに量子ドットを流れる電流を調べると、4.5K でクーロンダイヤモンドを観測できた。このダイヤモンド特性から寄生容量を求めると、理論計算により示されるものと一致し、寄生容量の低減を確認することに成功した。

シリコン2重量子ドットを宙づり橋構造内に作製し、電気伝導特性を120mKで調べた結果である。ドット間の準位差に対する電流をプロットし、数個のピークでフィッティングした。この結果、ポテンシャル差が260 $\mu$ eVのところ大きなピークが見られることが確認された。ドット間の準位にエネルギー差があると、電子はそのエネルギー差に対応するフォノンを励起して伝導する。観測された大きなピークは、260 $\mu$ eVのエネルギーのフォノンと電子の相互作用が大きくなっていることを示しており、宙づり構造に特有な電子フォノン相互作用の増大を示す結果である。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

① T. Kambara, T. Kodera, T. Takahashi, G. Yamahata, K. Uchida, S. Oda., Simulation Study of Charge Modulation in Coupled Quantum Dots in Silicon, Jpn. J. Appl. Phys., 50, 04DJ05-1-04DJ05-4, 2011, 査読有

② J. Ogi, M. A. Ghiass, T. Kodera, Y. Tsuchiya, K. Uchida, S. Oda, and H. Mizuta, Suspended quantum dot fabrication on a heavily-doped silicon nanowire by suppressing unintentional quantum dot formation, Jpn. J. Appl. Phys., 49, 044001-1-044001-5, 2010, 査読有

③ Ogi, T. Ferrus, T. Kodera, Y. Tsuch

iya, K. Uchida, D. A. Williams, S. Oda, and H. Mizuta, Experimental observation of enhanced electron-phonon interaction in suspended Si double quantum dots, Jpn. J. Appl. Phys., 49, 045203-1-045203-5, 2010, 査読有

④ G. Yamahata, T. Kodera, H. Mizuta, K. Uchida, S. Oda, Control of Inter-dot Electrostatic Coupling by a Side Gate in a Silicon Double Quantum Dot Operating at 4.5 K, Appl. Phys. Express, 2, 095002, 2009, 査読有

他。

[学会発表] (計18件)

① 小寺哲夫, 堀部浩介, 蒲原知宏, 山端元音, 内田 建, 荒川泰彦, 小田俊理, 電子スピ量子ビットに向けた少数電子シリコン量子ドットの実現, 第58回応用物理学会関係連合講演会, 2011.3.25, 神奈川工科大学, 厚木, 招待講演

② Tetsuo Kodera, Gento Yamahata, Tomohiro Kambara, Kousuke Horibe, Thierry Ferrus, David Williams, Yasuhiko Arakawa, and Shunri Oda, Realization of Lithographically-Defined Silicon Quantum Dots without Unintentional Localized Potentials, 30th International Conference on Physics of Semiconductors (ICPS-30), 2010.7.27, Seoul, Korea

③ T. Kodera, G. Yamahata, T. Kambara, K. Horibe, K. Uchida, C. M. Marcus and S. Oda, Spin-related tunneling in lithographically-defined silicon quantum dots, 2010 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, 2010.6.14, Honolulu, USA

他。

[図書] (計1件)

① 小寺哲夫, 小田俊理, 株式会社エヌ・ティー・エス, 量子ドットエレクトロニクスの最前線, 2011, 85-93

[その他]

ホームページ等

<http://diana.pe.titech.ac.jp/qubit/index.html>

### 6. 研究組織

(1)研究代表者

小寺 哲夫 (KODERA TETSUO )

東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研  
究センター・助教

研究者番号：00466856