

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630151

研究課題名(和文)量子情報変換に向けたシリコン量子ドット素子の開発

研究課題名(英文)Development of silicon quantum dot devices toward quantum information transfer

研究代表者

小寺 哲夫 (Kodera, Tetsuo)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00466856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)： 将来的な量子光通信への応用を目指し、シリコン量子ドット素子の開発を行った。サイズの異なるシリコン量子ドットを2つ結合させた素子を作製し、各量子ドットにおける量子的なエネルギーの異なる状態を実現した。また、安定的に動作するシリコン量子ドットを実現した。具体的には、薄膜化したシリコンを用いて量子ドットを作製し、量子ドットの帯電エネルギーの増大を実証した。大きな帯電エネルギーは、光照射時の素子の安定性のために必要である。

これらの成果は、学術論文誌や、国際会議、国内学会において公表を行った。

研究成果の概要(英文)： We developed silicon quantum dot devices toward quantum optical communication in the future. We fabricated silicon coupled two quantum dots with different sizes and realized quantum states with different quantum energies in each quantum dot. We also realized stable silicon quantum dots using an ultrathin silicon layer. We demonstrated large charging energy of the quantum dots, which is desirable for the stability during application of photons.

We published these achievements in several journals, international conferences, and domestic conferences.

研究分野：量子技術、固体物性、電子デバイス

キーワード：量子デバイス スピンデバイス 量子情報 量子ドット

1. 研究開始当初の背景

原理的に絶対安全な通信である量子光通信の実現が望まれている。量子光通信には、電子スピンと光子という2種類の量子状態を利用することが提案されている。電子スピン・光子間の量子情報変換を目指した研究は国内外で注目を集め進められているが、未開拓であった。特に、シリコン量子ドットを用いた研究は行われていなかった。シリコン量子ドット中の電子スピンはコヒーレンス時間が長いという特徴があり、将来的な量子情報変換に適していると考え、必要となる素子の開発に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究の目的は、将来的な量子光通信への応用を目指し、ナノ構造素子における光応答の解明に向けた関連技術の開発を行うことにある。原理的に絶対安全な通信である量子光通信の基盤技術開発を行う挑戦的な研究であった。選択的に光励起が可能なシリコン2重量子ドットを実現できれば、コヒーレンス時間の長いシリコン量子ドット中の電子スピン状態を利用して、光子と電子スピン間の量子情報変換を正確に行うことができると期待される。本研究期間では、光応答の解明に必要なシリコン量子ドット素子の開発を目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、光応答の解明に必要なシリコン量子ドット素子の開発を行った。具体的には、エッチングや酸化などシリコン微細加工技術を利用してMOS構造を作製し、量子ドット部の形成には電子線リソグラフィを利用した。サイズの異なるシリコン量子ドットを2つ結合させた素子を作製し、各量子ドットにおける量子的なエネルギーの評価を電気伝導測定により行った。また、安定的に動作するシリコン量子ドットを実現するために、薄膜化したシリコンを用いて量子ドットを作製し、電気伝導測定により評価した。薄膜化したシリコンを用いることで、大きな帯電エネルギーを得られると期待される。大きな帯電エネルギーは、光照射時の素子の安定的な動作のために必要である。

4. 研究成果

本研究によって、設計通りにシリコン2重量子ドットを形成し、各量子ドットに1つずつ電子が入った状態を実現することができた。この状態は、光照射の効果について物理を詳細に調べるために必要である。ゲート電圧によって各量子ドットの電子数を制御し、各量子ドット内の電子状態を異なる状態に調整することができた。また、サイズの異なる

シリコン量子ドットを2つ結合させた素子を作製し、各量子ドットにおける量子的なエネルギーの異なる状態を実現した。さらに、安定的に動作するシリコン量子ドットを実現した。具体的には、薄膜化したシリコンを用いて量子ドットを作製し、量子ドットの帯電エネルギーの増大を実証した。

図1(a)に薄膜化したシリコンの模式図を示す。素子の抵抗を低く抑えて低温での電気的な接触を保つためにソースドレイン部は薄膜化しない段差構造を形成した。図1(b)に薄膜化したシリコン層の透過型電子顕微鏡写真を示す。シリコンと酸化膜の明瞭な界面が得られていることがわかる。図1(c)に作製したシリコン量子ドットの走査型電子顕微鏡写真を示す。図1(c)と同様の素子を用いて、4.2 Kにおいて1つの量子ドットのクーロンダイヤモンドを測定した結果を図1(d)に示す。量子ドットの帯電エネルギーは20meV程度となっており、帯電エネルギーの増大を実証した。大きな帯電エネルギーは、光照射時の素子の安定的な動作のために必要である。

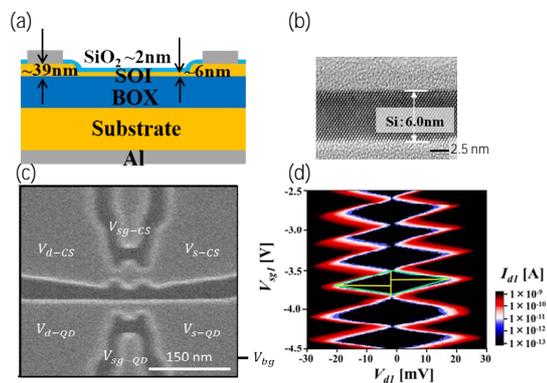


図1 (a) 薄膜化したシリコンの模式図。(b) 薄膜化したシリコンの透過型電子顕微鏡写真。(c) 作製したシリコン量子ドットの走査型電子顕微鏡写真。(d) 量子ドットの帯電エネルギーの増大を実証した測定結果。

これらの成果は、国内外で実現例がなく、インパクトが大きい。本研究で得られた、物理的に形成したMOS型のシリコン量子ドットの成果は、国際的にも注目を集めており、海外グループから論文内容や作製方法に関する問い合わせが来ている状況である。

以上の成果については、下記の通り、学術論文誌や、国際会議、国内学会において公表を行った。

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)

S. Ihara, A. Andreev, D. A. Williams, T. Kodera, and S. Oda, "Quantum dots

in single electron transistors with ultrathin silicon on insulator structures”, Appl. Phys. Lett. **107**, 013102-1-4 (2015), 査読有
DOI:10.1063/1.4926335

T. Noguchi, K. Morita, M. Simanullang, Z. Xu, K. Usami, Y. Kawano, **T. Kodera** and S. Oda, “Ge/Si core/shell nanowires with controlled low temperature grown Si shell thickness”, Phys. Status Solidi A **212**, 7, 1578-1581 (2015), 査読有
DOI:10.1002/pssa.201532340

K. Horibe, **T. Kodera**, and S. Oda, “Lithographically-defined few-electron silicon quantum dots based on a silicon-on-insulator substrate”, Appl. Phys. Lett. **106**, 083111-1-5 (2015), 査読有
DOI:10.1063/1.4913321

K. Horibe, **T. Kodera**, and S. Oda, “Back-action-induced excitation of electrons in a silicon quantum dot with a single electron transistor charge sensor”, Appl. Phys. Lett. **106**, 053119-1-4 (2015) 査読有
DOI: 10.1063/1.4907894

K. Yamada, **T. Kodera**, T. Kambara, and S. Oda “Fabrication and characterization of p-channel Si double quantum dots”, Appl. Phys. Lett. **105**, 113110 (2014) 査読有
DOI: 10.1063/1.4896142

[学会発表](計28件)

(招待講演) 堀部浩介、**小寺哲夫**、小田俊理「スピン量子デバイスに向けた少数電子シリコン量子ドットの研究」第63回応用物理学会春季学術講演会、21a-S422-3、第7回シリコンテクノロジー分科会論文賞受賞記念講演、東京工業大学、目黒区 2016-03-21

(招待講演) **小寺哲夫**「スピン量子情報デバイスに向けたシリコン量子ドットの研究」第76回応用物理学会秋季学術講演会、シンポジウム 量子情報へ向けたシリコンテクノロジーからの挑戦、15p-2M-9、名古屋国際会議場 2015-09-15

Y. Yamaoka, S. Oda and **T. Kodera**, “Characterization of physically

defined double quantum dots on highly-doped silicon substrate” Silicon Quantum Electronics Workshop 2015, P-19, Takamatsu, Japan, 4 August 2015

T. Kodera, K. Horibe, K. Yamada, S. Ihara, T. Kambara, A. Andreev, D. A. Williams, Y. Arakawa, and S. Oda, “Physically-defined quantum dots fabricated on silicon-on-insulator substrate”, Silicon Quantum Electronics Workshop 2015, P-15, Takamatsu, Japan, 4 August 2015 (poster)

S. Hiraoka, K. Horibe, **T. Kodera**, and S. Oda, “Physically-Defined Few-Electron Triple Quantum Dots in Metal-Oxide-Semiconductor Structures” 21th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), Mo-PE-30, Sendai, Japan 27 July 2015

S. Ihara, A. Andreev, D. A. Williams, **T. Kodera**, and S. Oda, “Integration of Quantum Dots on Ultrathin Silicon-on-Insulator Film” 21th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), Th-PE-34, Sendai, Japan 30 July 2015

K. Horibe, K. Yamada, **T. Kodera**, and S. Oda, “Few-Electron and Few-Hole Regimes in Silicon Double Quantum Dots” 21th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21), Th-PE-28, Sendai, Japan 30 July 2015

Y. Yamaoka, **T. Kodera**, S. Oda, “Fabrication and characterization of physically-defined double quantum dots without unintentional localized states on highly-doped silicon substrate” The 2015 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW2015) 5-7, Kyoto, Japan June 14, 2015

T. Honda, J. Yoneda, K. Takeda, **T. Kodera**, S. Tarucha, and S. Oda, “Fabrication of a highly controllable Si-MOS quantum dot device” The 2015 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW2015) 5-10, Kyoto, Japan June 14, 2015

K. Iwasaki, T. Koderu, and S. Oda, "Charge sensing of p-channel double quantum dots fabricated on (110) silicon substrate" The 2015 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW2015) 7-5, Kyoto, Japan June 14, 2015

T. Honda, K. Horibe, R. Mizokuchi, L. Yi, K. Iwasaki, S. Hiraoka, T. Koderu, S. Oda, "Coupled Si quantum dot devices" 11th International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC11), Fukuoka, Japan 11 May 2015

(招待講演) T. Koderu, "Few-carrier regimes in lithographically-defined Si quantum dots" 3rd International Conference and Exhibition on Materials Science & Engineering, 07 October, 2014 San Antonio, USA

(招待講演) T. Koderu, "Fabrication and Characterization of Silicon Double Quantum Dots for Quantum Information Devices" Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2014, Incheon, Korea, 26 June 2014

〔図書〕(計1件)

T. Koderu and S. Oda, Nanoscale Silicon Devices, CRC press, Chapter 10, "Coupled Si quantum dots for spin-based qubits" (2015), 288 (231-253)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ

http://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/researcherpublicationlist.cgi?q_researcher_content_number=CTT100574609

アウトリーチ活動

小寺哲夫、「半導体微細加工とその応用」開成高等学校訪問対応、「日本再生：科学と技術で未来を創造する」プロジェクト、東京工業大学、2015年3月12日

小寺哲夫、「量子技術で実現する将来の電子デバイス」作新学院高校訪問対応、東京工業大学、2014年12月20日

小寺哲夫、「電子1個やスピン1つで動作する究極の電子デバイス」オープンキャンパス 第5類 電気電子工学科 特別講演、東京工業大学、2014年8月8日

受賞

第7回応用物理学会シリコンテクノロジー分科会論文賞 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会、堀部浩介、小寺哲夫、小田俊理、2016-03-21
対象論文：“Lithographically-defined few-electron silicon quantum dots based on a silicon-on-insulator substrate” Appl. Phys. Lett. **106**, 083111 (2015)

INC11 Japan Nano Day Best Poster Award, T. Honda, K. Horibe, R. Mizokuchi, L. Yi, K. Iwasaki, S. Hiraoka, T. Koderu, S. Oda, "Coupled quantum dot devices" 2015-05-11

6. 研究組織

(1)研究代表者

小寺 哲夫 (KODERA, Tetsuo)
東京工業大学・理工学研究科・准教授
研究者番号：00466856

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

堀部 浩介 (HORIBE Kosuke) 野口 智宏 (NOGUCHI Tomohiro) ANDREEV Aleksey