

平成 22 年 5 月 26 日現在

研究種目：基盤研究 A

研究期間：2007～2009

課題番号：19206035

研究課題名（和文） ネオシリコンの集積配列制御と量子情報デバイスの試作

研究課題名（英文） Integrated Assembly of NeoSilicon towards Quantum Information Devices

研究代表者

小田 俊理 (ODA SHUNRI)

東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス研究センター・教授

研究者番号：50126314

研究成果の概要（和文）：ネオシリコンの集積化技術を検討した。シランカップリング剤による表面修飾条件を最適化し、均一分散溶液を作製するとともに、基板表面に段差を設けることにより、空乏ストライプ構造の発生を抑えたディップコーティングによる 2 次元配列構造の形成に成功した。シリコン量子情報素子の作製と電子輸送評価に関しては、電子ビーム直接描画により SOI 基板上に多重結合量子ドットと制御用サイドゲートを作製し、極低温下における電子輸送特性の測定を行った。

研究成果の概要（英文）：Integrated assembly of NeoSilicon materials has been investigated. Nano Si ink has been prepared using optimized surface modification of Si nanocrystals and two dimensional arrays of NeoSilicon have been realized. Electron transport characteristics have been measured from multiple coupled quantum dot devices based on Electron beam lithography of silicon-on insulator substrates.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	19,700,000	5,910,000	25,610,000
2008年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2009年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
年度			
年度			
総計	37,700,000	11,310,000	49,010,000

研究分野：電子デバイス

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子・電気材料工学

キーワード：ナノ結晶シリコン、ナノシリコンインク、ディップコーティング、量子情報デバイス、多重結合量子ドット、スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

半導体集積回路の進展は微細加工技術に負ってきたが、リソグラフィ技術などのトップダウン法だけでは限界があり、ボトムアップ技術との融合が必要とされている。

一方、量子計算を目指した研究では、多重

量子ビットの実現に繋がる技術の開発が待望されている。シリコンを用いた電荷型量子ビットは、CMOS回路との整合性が良く、結合量子ドットの電子輸送に関する研究が必要とされていた。

研究代表者らは、シリコン量子ドットの集

積配列と相互作用に着目したネオシリコン技術の研究を進めてきており、この材料系が将来の量子情報素子の実現に有望であることを見いだしていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ネオシリコンドットに最適な配列制御技術を確立するとともに、形成された2次元規則配列ドット構造を利用して、ドット間の静電相互作用に基づくナノ量子情報処理デバイスを設計・試作・評価することである

3. 研究の方法

(1) 均一粒径ナノ結晶シリコンの作製

VHFプラズマセルを用いてアルゴンプラズマ中にシランガスパルスを導入する方法により、粒径の揃ったナノ結晶シリコンを作製する。

(2) 溶液プロセスによるネオシリコン2次元集積化

ネオシリコン均一分散溶液を作製し、LB膜法で2次元集積構造を作製する。

(3) 多重結合量子ドットの試作と電気特性評価

電子ビーム露光技術を用いて、多重結合量子ドットを作製し、電気特性を評価することにより量子ドット間のトンネル結合を制御できる可能性を検討した。

4. 研究成果

(1) LB膜ネオシリコン集積化技術

VHFプラズマセルで形成した均一粒径ナノ結晶シリコンドットを溶液中に分散させ、LB膜法により2次元集積配列構造を作製した。(図1)水面上に2次元膜を展開するため、クロロホルム溶液中にナノシリコンドットを分散させた。この条件では、2次元最密構造の形成は最大5 μ m角程度であった。

大面積に渡って2次元集積膜を形成するためには、ナノシリコンドットが凝

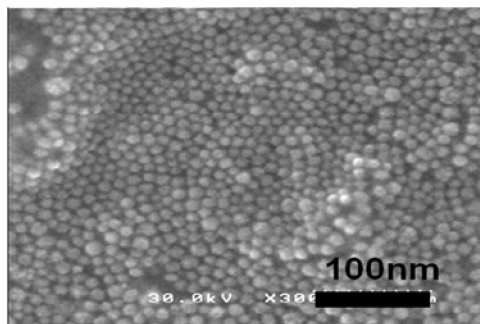


図1：LB膜法によるネオシリコン2次元配列構造

集してクラスターを形成しないように、表面修飾が重要であることに気づいて、ナノシリコンドットの表面ポテンシャル測定(ゼータ電位)、レーザ散乱法による粒径分布測定を行いながら、表面修飾条件を最適化した結果、HMDSを2%添加する方法で、均一分散ナノシリコンインクを形成できることを見つけた。これを用いてLB膜を形成したところ、1cm角のチップ全面に渡って2次元集積膜を形成できることが分かった。

(2) ディップコーティング法

LB膜法では水面上に展開した2次元膜を基板に転写する必要があるが、これが必要ない別の方法も検討した。ディップコーティング法は、粒径数百nmのポリスチレン粒子の規則配列に成功した例はあるが、10nm径のナノシリコンドットに適用した例はない。均一分散のナノシリコンインクを用いて、ディップコーティング法による2次元配列を試みた。ナノシリコンの空乏化によるストライプ構造の形成という問題が発生したが、基板に凹凸パターンを設けることにより解決できることが分かった。(図2)

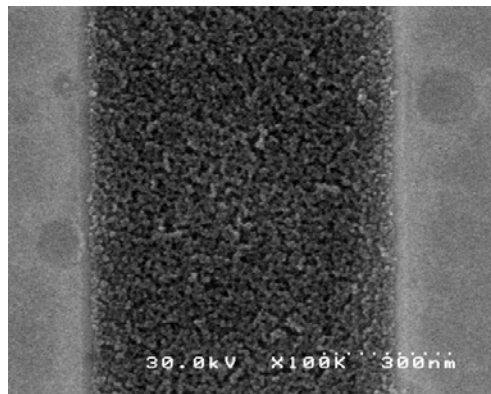


図2：ディップコーティング法によるネオシリコン2次元配列構造

(3) 多重結合量子ドットの電子輸送特性

電子ビームリソグラフィ法によりSOI基板上に多重結合量子ドットと、それを制御する電極パターンを形成した。(図3)種々の電極のポテンシャルを制御して、電流を系統的に測定して電荷安定図を画いたところ、多重量子ドット間の相互作用に特有なハニカム構造が観測された。実験結果はシミュレーションで良く再現することができ、詳細な解析が可能であった。(図4、5)その結果、3重量子ドットの相互作用に特有な共鳴トンネル効果などをシリコン量子ドット

トでは初めて観測することに成功した。これは、将来のシリコンベース量子情報処理デバイスの実現にとって重要な一歩である。

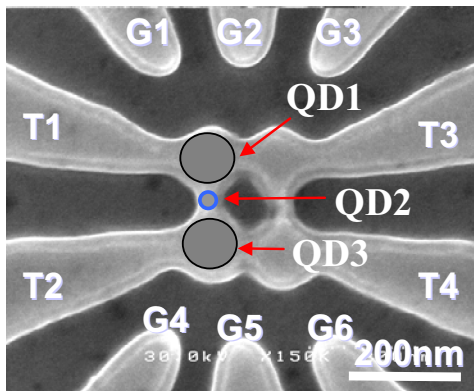


図3：多重量子ドットデバイス

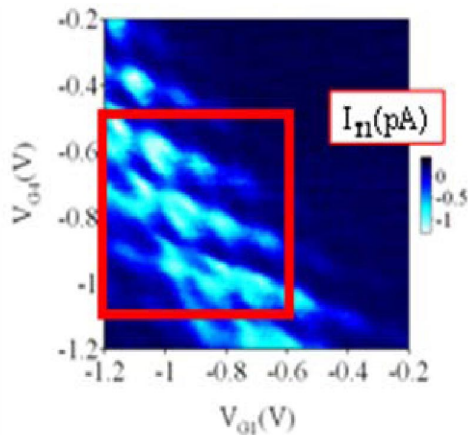


図4：電荷安定図の実験結果

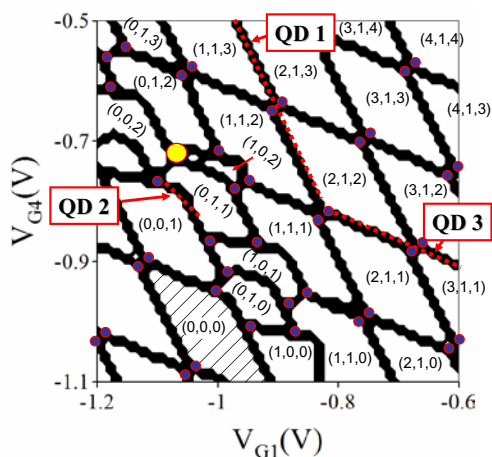


図5：電荷安定図のシミュレーション結果

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 47件)

- ① Xin Zhou, Ken Uchida, and Shunri Oda, "Current fluctuations in three-dimensionally stacked Si nanocrystals thin films", Applied Physics Letters, 96, 092112 (3 pages), (March 2010)
- ② G. Yamahata, T. Kodera, H. Mizuta, K. Uchida and S. Oda, "Control of Inter-dot Electrostatic Coupling in an Asymmetric Silicon Double Quantum Dot Operating at 4.5 K", Appl. Phys. Express 2, 095002 (2009)
- ③ G. Yamahata, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, K. Uchida and S. Oda, "Electron transport through silicon serial triple quantum dots", Solid State Electron, 53, 779-785 (2009)
- ④ X. Zhou, K. Uchida, H. Mizuta, and S. Oda, Carrier transport by field enhanced thermal detrapping in Si nanocrystals thin films, Journal of Applied Physics, 105, 124518 (5 pages) (2009)
- ⑤ X. Zhou, K. Uchida, H. Mizuta, and S. Oda, Electron transport in surface oxidized Si nanocrystal ensembles with thin film transistor structure, Journal of Applied Physics, 106, 044511 (6 pages) (2009)
- ⑥ M. Manoharan, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Silicon-on-Insulator-Based Radio Frequency Single-Electron Transistors Operating at Temperatures above 4.2 K", Nano Letters, 8 (12), 4648-4652, 2008, December
- ⑦ M. A. Rafiq, Z. A. K. Durrani, H. Mizuta, A. Colli, P. Servati, A. C. Ferrari, W. I. Milne, and S. Oda, "Field-dependant hopping conduction in silicon nanocrystal films," Journal of Applied Physics, 104, 123710 (3 pages), 2008, December
- ⑧ Y. Kawata, Y. Tsuchiya, S. Oda, H. Mizuta, "Study of Single-Charge Polarization on a Pair of Charge Qubits Integrated onto Silicon Double Single-Electron Transistor Readout," IEEE Transactions on Nanotechnology, 7 (5), 617-623, 2008, September
- ⑨ M. Manoharan, S. Oda and H. Mizuta, "Impact of channel constrictions on the formation of multiple tunnel junctions in heavily doped silicon single electron transistors," Applied Physics

Letters, 93, 112107 (3 pages), 2008, September

- ⑩ X. Zhou, K. Usami, M. A. Rafiq, H. Mizuta, Y. Tsuchiya, and S. Oda, "Influence of nanocrystal size on conduction mechanism across silicon nanocrystals," Journal of Applied Physics, 104,024518 (4 pages), 2008, July
- ⑪ Gento Yamahata, Yoshishige Tsuchiya, Shunri Oda, Z. A. K. Durrani, Hiroshi Mizuta, "Control of Electrostatic Coupling Observed for Silicon Double Quantum Dot Structures," Japanese Journal of Applied Physics, 47 (6), 4820-4826, 2008, June
- ⑫ A. Tanaka, Y. Tsuchiya, K. Usami, S. Saito, T. Arai, H. Mizuta, S. Oda, "Synthesis of Assembled Nanocrystalline Si Dots Film by the Langmuir-Blodgett Technique," Japanese Journal of Applied Physics, 47 (5), 3731-3734, 2008, May
- ⑬ M. Manoharan, B. Pruvost, CH. Mizuta S. Oda, "Impact of key circuit parameters on signal-to-noise ratio characteristics for the radio-frequency single electron transistors," IEEE Transactions on Nanotechnology, 7 (3), 266-272, 2008, May
- ⑭ Y. Kawata, Tomohiro Yamaguchi, Koji Ishibashi, Yoshishige Tsuchiya, Shunri Oda, Hiroshi Mizuta, "Observation of Quantum Level Spectrum for Silicon Double Single-Electron Transistors," Applied Physics Express, 1 (5), 051401 (3 pages), 2008, May
- ⑮ M. Manoharan, B. Pruvost, H. Mizuta, S. Oda, "Impact of key circuit parameters on signal-to-noise ratio characteristics for the radio-frequency single electron transistors", IEEE Transactions on Nanotechnology, Vol. 7(3), pp.266-272, May 2008
- ⑯ M. A. Rafiq, Z. A. K. Durrani, H. Mizuta, A. Colli, P. Servati, A. C. Ferrari, W. I. Milne, and S. Oda, "Room temperature single electron charging in single silicon nanochains", Journal of Applied Physics, Vol. 103, pp. 053705 (4 pages), 2008, March.
- ⑰ M. Manoharan, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Stochastic Coulomb blockade in coupled asymmetric silicon dots formed by pattern-dependent oxidation", Applied Physics Letters, Vol. 92, pp. 092110 (3 pages), 2008, March.
- ⑱ M. Manoharan, Y. Kawata, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Strongly coupled multiple-dot characteristics in dual recess structured silicon channel", Journal of Applied

Physics, Vol. 103, pp.043719 (6 pages), 2008, February.

- ⑲ Y. Kawata, M. Khalafalla, K. Usami, Y. Tsuchiya, H. Mizuta and S. Oda, "Integration of tunnel-coupled double nanocrystalline silicon quantum dots with a multiple gate single-electron transistor Japanese ", Journal of Applied Physics, Vol. 46 (7A), pp. 4386-4389, 2007, July.

[学会発表] (計 139 件)

- ① G. Yamahata, T. Kodera, T. Kambara, K. Uchida, C. M. Marcus, and S. Oda, "Pauli Spin Blockade in a Lithographically-defined Silicon Double Quantum Dot", QNSP2010, Tokyo, (March 2010).
- ② Y. Nakamine, T. Kodera, K. Uchida, and S. Oda, "Removal of Surface Oxide Layer from Silicon Nanocrystals by HF Vapor Etching", 22nd Int. Microprocess and Nanotechnology Conference (MNC 2009), Sapporo, (November 2009).
- ③ T. Ishikawa, H. Nikaido, K. Usami, K. Uchida, S. Oda, "Fabrication of nano Si ink and two-dimensionally assembled Si nanocrystals", 35th International Conference on Micro and Nano Engineering (MNE2009), Ghent, (September 2009).
- ④ X. Zhou, K. Uchida, H. Mizuta and S. Oda, "Current oscillations observed for sparse Si nanocrystal thin films", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto, (June 2009).
- ⑤ *S. Oda, NeoSilicon Materials, Materials Research Society Spring Meeting, San Francisco (April 2009)
- ⑥ *S. Oda, "Electron transport and photonic properties of Si nanocrystals prepared by VHF plasma processes," 2nd International Workshop on Semiconducting Nanoparticles, Duisburg, (December 2008)
- ⑦ G. Yamahata, K. Uchida, S. Oda, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, "Enhanced tunnel conductance due to QCA cotunneling processes observed for silicon serial triple quantum dots," ESSDERC, Edinburgh (September 2008)
- ⑧ Y. Kawata, S. Oda, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, "Detection of Single-Charge Polarisation in Silicon Double Quantum Dots by Using Serially-Connected Multiple Single-Electron Transistors," ESSDERC, Edinburgh (September

2008)

- ⑨ *S. Oda, "Silicon quantum dots: the future of electronics and photonics?", Nano Korea 2008, Seoul (August 2008)
- ⑩ M. A. Rafiq, Z. A. K. Durran, H. Mizuta, A. Colli, P. Servati, A. C. Ferrari, W. I. Milne, and S. Oda, "Silicon nanochains: Electron transport properties and applications," International Conference on Physics of Semiconductors, Rio de Janeiro (August 2008)
- ⑪ G. Yamahata, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, and S. Oda, "Electron transport through silicon multiple quantum dot array devices," IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Honolulu, 2-6 (June 2008)
- ⑫ X. Zhou, M. A. Rafiq, H. Mizuta, and S. Oda, "P-type Si nanocrystal thin-film transistor," IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Honolulu, P1-23 (June 2008)
- ⑬ Y. Kawata, T. Yamaguchi, K. Ishibashi, Y. Tsuchiya, S. Oda, and H. Mizuta, "Observation of quantum level spectrum for silicon double single-electron transistors," IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, Honolulu, 2-2 (June 2008)
- ⑭ Gento Yamahata, Yoshiyuki Kawata, Manoharan Muruganathan, and Shunri Oda, Yoshishige Tsuchiya, and Hiroshi Mizuta, "Silicon-based Quantum Information Devices," The forth International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC-4), Tokyo (April 2008)
- ⑮ T. Ishikawa, A. Tanaka, N. Inaba, S. Nishimoto, K. Usami and S. Oda, Y. Tsuchiya, H. Mizuta, "Integration, Assembly and Doping of Nanocrystalline Silicon Quantum Dots," The forth International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation (INC-4), Tokyo (April 2008)
- ⑯ G. Yamahata, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Control of electrostatic coupling observed for Si double quantum dot structures", Solid State Devices and Materials Conference, Extended Abstracts (September 2007)
- ⑰ Y. Kawata, S. Nishimoto, Y. Tsuchiya, S. Oda and H. Mizuta, "Study of Single-Charge Polarization on two Charge Qubits Integrated onto a Double Single-Electron Transistor Readout", Solid State Devices and Materials Conference, Extended Abstracts (September 2007)

- ⑱ *S. Oda, "NeoSilicon Devices", 22nd International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors (ICANS 22) (August 2007)
- ⑲ *S. Oda, "State of the Art and the Future of Nanoelectronics", International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI2007) (June 2007)
- ⑳ Y. Kawata, M. Manoharan, Y. Tsuchiya, H. Mizuta and S. Oda, "Fabrication and Characterization of Double Single-Electron Transistors as a Readout for Charge Qubits", IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop, 4-46 (June 2007)

[図書] (計3件)

- ① 小田俊理, プラズマ技術によるナノシリコンドットの作製, ナノシリコンの最新技術と応用展開 (越田信義監修、シーエムシー出版), 205-213, 2010
- ② 小田俊理, "量子化構造とデバイス," 現代界面コロイド化学の基礎 第3版 (日本化学会編、丸善), pp.215-219, January, 2009
- ③ H. Mizuta, S. Uno, N. Mori, S. Oda and N. Koshida, "Electron transport in nanocrystalline silicon," Device Applications of Silicon Nanocrystals and Nanostructures, Nanostructure Science and Technology, N. Koshida ed, Springer, pp. 197-222, January 2008

[産業財産権]

○取得状況 (計1件)

名称: Si単結晶微粒子積層方法
発明者: 小田俊理、西口克彦、趙新為
権利者: 科学技術振興機構
種類: 特許
番号: 4337123
取得年月日: 2009/07/10
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等
<http://odalab.pe.titech.ac.jp/>

6. 研究組織
(1) 研究代表者
小田 俊理 (ODA SHUNRI)

東京工業大学・量子ナノエレクトロニクス
研究センター・教授
研究者番号：50126314

(2) 研究分担者

水田 博 (MIZUTA HIROSHI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・
連携教授
研究者番号：90372458

内田 建 (UCHIDA KEN)
東京工業大学・大学院理工学研究科・
准教授
研究者番号：30446900

(3) 連携研究者

土屋 良重 (TSUCHIYA YOSHISHIGE)
サザンプトン大学・電子情報研究科・講師
研究者番号：80334506