

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2012

課題番号：24656201

研究課題名（和文） DNAオリガミ技術によるナノスケールデバイス・回路の作製

研究課題名（英文） Fabrication of Nanoscale Devices and Circuits using DNA Origami Technology

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）：DNA 技術を利用したボトムアップ技術は、自己組織的に極微細構造を形成できるばかりでなく、電極や配線も含めた回路機能をナノスケールで形成できる可能性がある。シリコン基板上に DNA オリガミを形成し、基板表面の状態が DNA パターン形成に重要な影響を与えること、UV オゾン処理が有効であることを明らかにした。また、2 重結合量子ドットと単電子トランジスタを集積化したナノデバイスの電極配置と評価法について検討を行った。

研究成果の概要（英文）：DNA Origami technology is promising for the fabrication of nanoscale integrated devices, in which conventional lithography methods would face limitation. We studied formation of DNA Origami pattern on Si substrate and clarified that surface condition of Si substrate played a very important role. We found UV ozone treatment was effective to form DNA Origami pattern as designed. We also fabricated and characterized an integrated device of coupled quantum dots and an single electron transistor.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

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：薄膜・量子構造

1. 研究開始当初の背景

CMOS 集積回路は微細加工技術に基づいて着実にスケールアップが進んできたが、設計寸法が 30nm になった現在、さらなる 20nm 台のリソグラフィ技術は技術的には可能であっても経済的には相当困難になると言われている。そこで、従来のトップダウン技術に代わり、ボトムアップ技術の利用が不可欠になる。しかし、ボトムアップ技術は、配列制御が困難であることが問題であった。DNA は生命体の設計図の情報を持っている。DNA 技術を利用したボトムアップ技術は、自己組織的に極微細構造を形成できるばかりでなく、電極や配線も含めた回路機能をナノスケール

で形成できる可能性がある。

2006 年にカリフォルニア工科大学の Paul Rothemund は、DNA を折りたたむことにより任意の構造を形成できることを示し、DNA オリガミ技術と名付けた。この研究が引き金となって、多くの研究者が DNA を利用したナノ構造を形成し、アルファベットの文字を形成などの発表が続いた。しかし、これらの研究は表面が平滑なマイカ基板上が多く、シリコン基板上への DNA オリガミ構造の研究は少ないが 2009 年には IBM から発表があり、半導体微細パターン形成技術として期待が高まっていた。しかし、DNA オリガミ構造をマイカ上ではなくシリコン基板上に形成する

研究は少なく、基板表面の状態やパターン転写技術についてはほとんど知られていなかった。さらに単なる図形ではなくトランジスタと配線を集積した回路を形成し、デバイス機能を実証する研究は類例がなかった。

2. 研究の目的

シリコン基板上への DNA オリガミ構造の形成に当たって基板表面状態の影響を明確にすること、10nm スケール量子情報デバイス回路の DNA オリガミによる設計法を検討すること、また、ナノデバイスの電気特性の評価法を検討することを目的とした。

3. 研究の方法

CaltechのRothmundが開発したCADプログラムcaDNanoを用いてDNAオリガミの設計を行う。Si基板の表面は状態はDNAオリガミ形成の重要な因子であるので、種々の酸化条件、酸素プラズマ処理条件を変化させたものを用意する。DFM(非接触AFM)により構造の評価を行う。DNAオリガミで形成したパターンをSi基板に転写する方法として、無水HF蒸気でSiO₂のエッチングを行う方法と金ナノ粒子を配置させて、プラズマエッチングマスクおよびCVD成長触媒として用いる方法を検討する。量子ドットの両端にくびれと大きな電極パターンを有する単電子トランジスタを作製し、クーロン振動などの電気特性を評価することにより、DNAオリガミ技術で形成したナノ構造のデバイス機能を実証する。

4. 研究成果

- (1) Rothmund 教授(Caltech)が開発した CAD プログラム caDNano を用いて DNA オリガミの設計を行った。約 7000 塩基長の DNA オリガミを単位ブロックとして、その端部に設けた情報により 2 次元集積配列構造を形成した。

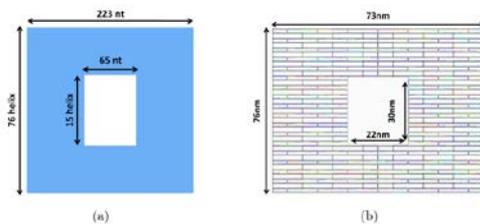


図 1 : (a)DNA オリガミ設計の模式図、
(b)caDNano による設計図

- (2) caDNanoから出力されたオリゴマーのリストを用いて長鎖DNAの合成を行い、留め金となる短いDNAと共にMgCl₂バッファ溶液に入れて、PCR装置で自己組織的な反応を行った。遠心分離器で精製した後、Si

基板上に配列させ、非接触AFM法で形状を観察したところ、ほぼ設計通りのDNAオリガミ構造を確認することが出来た。

- (3) Si 基板を UV 照射下でオゾン処理するこ

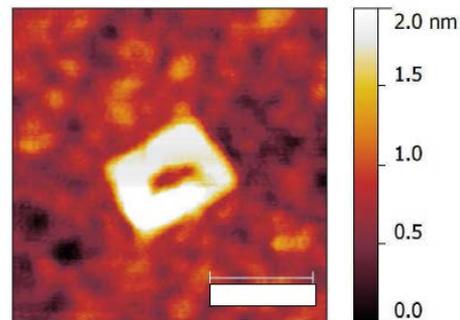


図 2 : 形成された DNA の非接触 AFM 像。

とにより、表面構造を改質し、DNA タイル密度を 1 桁向上できることを明らかにした。試料の一部に DNA が凝集して不純物を形成する問題が観測されたが、UV オゾン処理により、これらの不純物も除去できることが分かった。UV オゾン処理の効果は、Si 基板表面に OH 基を形成して表面化学反応に対して活性化されたことによると考えられる。

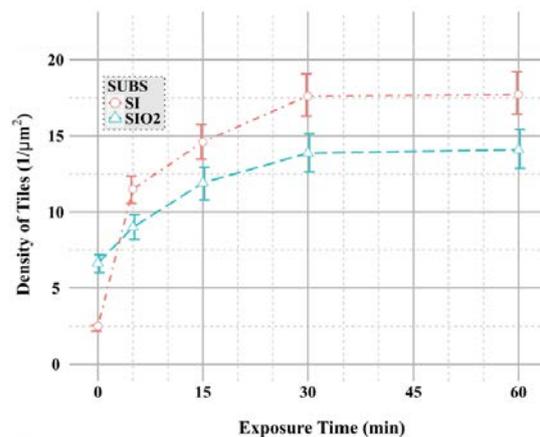


図 3 : UV オゾン処理によるオリガミタイルの密度向上効果。

- (4) DNA オリガミ構造によるナノデバイス・回路の作製の準備として、2 重結合量子ドット単電子デバイスを設計し、同様な構造を電子ビーム露光技術により作製して電気特性を測定した。サイドゲートの電位を制御することにより、量子ドット内の電子数およびドット間の結合状態を制御出来ることを明らかにした。電子ビ

ーム露光技術による量子ドットの寸法は最小 50nm 程度で有り、電気特性の測定は 4.2K の低温が必要であったが、将来 DNA オリガミ技術を用いて単電子デバイスを形成できれば、室温での動作も十分に可

Silicon on insulator

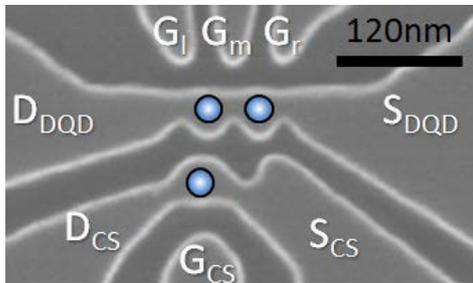


図 4 : EB 露光により作製した 2 重結合量子ドットデバイス

能であると考えられる。

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 2 件)

1. T. Kambara, T. Koderu, Y. Arakawa and Shunri Oda, Dual Function of Single Electron Transistor Coupled with Double Quantum Dot: Gating and Charge Sensing, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 52, (2013) 04CJ01 (4 pages), 査読有、DOI: 10.7567/JJAP.52.04CJ01
2. K. Horibe, T. Koderu, T. Kambara, K. Uchida, and S. Oda, Key capacitive parameters for designing single-electron transistor charge sensors, Journal of Applied Physics, 査読有、111, 2012、DOI: 10.1063/1.4711094

[学会発表] (計 15 件)

1. 堀部浩介, 小寺哲夫, 蒲原知宏, 河野行雄, 小田俊理、チャージセンサによるシリコン 2 重結合量子ドットの少数電子状態観測、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、2013 年 3 月 29 日、厚木市
2. 溝口来成, 小寺哲夫, 堀部浩介, 河野行雄, 小田俊理、三角形に配置したシリコン三重量子ドットの電子輸送特性、第 60 回応用物理学会春季学術講演

- 会、2013 年 3 月 29 日、厚木市
3. 蒲原知宏, 小寺哲夫, 河野行雄, 小田俊理、微小磁性体電極集積によるシリコン 2 重結合量子ドットへの 2 軸磁場印加、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、2013 年 3 月 27 日、厚木市
4. Tomohiro Kambara, Tetsuo Koderu, Yukio Kawano, Yasuhiko Arakawa and Shunri Oda, Micro magnets on lithographically-defined Si double quantum dots for electron spin resonance, IEEE EDS WIMNACT-37, 2013 年 2 月 18 日、Tokyo
5. K. Horibe, T. Koderu, T. Kambara, Y. Kawano and S. Oda, Two-electron silicon double quantum dots fabricated for spin-based qubit application, IEEE EDS WIMNACT-37, 2013 年 2 月 18 日、Tokyo
6. R. Mizokuchi, T. Koderu, K. Horibe, Y. Kawano, Y. Arakawa and S. Oda, Observation of electron transitions in triple quantum dot by using charge sensor, IEEE EDS WIMNACT-37, 2013 年 2 月 18 日、Tokyo
7. Ko Yamada, Tetsuo Koderu, Tomohiro Kambara, Yukio Kawano and Shunri Oda, charge sensing of a Si triple quantum dot system using single electron transistors, IEEE EDS WIMNACT-37, 2013 年 2 月 18 日、Tokyo
8. Satoshi Ihara, Tetsuo Koderu, Kosuke Horibe, Yukio Kawano, Ken Uchida and Shunri Oda, Demonstration of large charging energy in quantum dots fabricated on ultrathin SOI, IEEE EDS WIMNACT-37, 2013 年 2 月 18 日、Tokyo
9. Lithographically-defined silicon few-electron quantum dots fabricated on a silicon-on-insulator substrate, K. Horibe, T. Koderu, T. Kambara, Y. Kawano, K. Uchida, S. Oda, International Workshop on silicon Quantum Electronics, 2013 年 2 月 8 日、Villard-de-Lans (フランス)
10. Multifunctional lithographically-defined Si quantum dots for spin qubits, T. Kambara, T. Koderu, S. Oda, International Workshop on silicon Quantum Electronics, 2013 年 2 月 8 日、Villard-de-Lans (フランス)
11. Kambara Tomohiro, Koderu Tetsuo, Oda Shunri, Dual Function of Charge Sensor: Charge Sensing and Gating、

Solid State Devices and Materials Conference、2012年9月26日、Kyoto

12. 山田 宏, 小寺哲夫, 蒲原知宏, 河野行雄, 小田俊理、ホール輸送によるp型量子ドットの作製と特性評価、第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月14日、松山
13. 溝口来成, 小寺哲夫, 堀部浩介, 河野行雄, 小田俊理、単電子トランジスタによるSi三重量子ドットのチャージセンシング、第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月14日、松山
14. 蒲原知宏, 小寺哲夫, 小田俊理、バックゲートとソース/ドレイン電圧印加による各量子ドットの電気化学ポテンシャル制御、第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月14日、松山
15. R. Mizokuchi, T. Koderu, K. Horibe, Y. Kawano and S. Oda、Charge sensing of a Si triple quantum dot system using single electron transistors、IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop、2012年6月11日、Honolulu (USA)

[図書] (計0件)

[産業財産権]
○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]
ホームページ等

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

小寺 哲夫 (Koderu 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