SURE 静岡大学学術リポジトリ
Shizuoka University REpository

シリコン単電子デバイスの時空間輸送制御と新機能の開発

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 静岡大学 公開日: 2010-02-08 キーワード (Ja): 少数電子素子, マイクロ・ナノデバイス, 量子ドット, トンネル現象 キーワード (En): 作成者: 田部, 道晴 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10297/4526

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成２１年６月２日現在

研究種目：基盤研究（S）
研究期間：2004～2007
課題番号：16106006
研究課題名（和文）　シリコン単電子デバイスの時空間輸送制御と新機能の開発

研究課題名（英文）　Silicon single-electron devices: Time-space control of transport and development of new functions

研究代表者
田部　道晴（TABE MICHIHARU）
静岡大学・電子工学研究所・教授
研究者番号：80262799

研究成果の概要：本研究においては、これまで（１）ランダム多重トンネル接合系における単電子転送の実証とそのシミュレーション解析、（２）マルチドット型単電子 FET 特性の可視域光子との相互作用解明、（３）極低温 KFM によるチャネル内の単一リン・ボロンドーパントの検出、（４）転位網利用周期ポテンシャルを利用した単電子特性の実現、を行った。これらを総合することにより、ランダム系シリコン多重ドット単電子デバイスの輸送制御に見通しが得られた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００４年度	21,000,000	6,300,000	27,300,000
２００５年度	38,600,000	11,580,000	50,180,000
２００６年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
２００７年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
年度			
総　計	74,300,000	22,290,000	96,590,000

研究分野：シリコンナノデバイス
科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器
キーワード：少数電子素子、マイクロ・ナノデバイス、量子ドット、トンネル現象

１．研究開始当初の背景

（１）Si-MOSFET の微細化限界が到来しつつあり、超低消費電力と揺らぎ耐性のあるデバイス開発が待たれる。

（２）Si 多重ドット単電子デバイスは、単電子輸送制御の大きな発展が期待でき、消費電力や揺らぎ耐性の点でも有利である。

２．研究の目的

（１）Si 多重ドット単電子デバイスを対象とし、高周波ゲート印加やフォトン照射による単電子輸送制御の可能性を追究する。

（２）新しい多重ドット・多重トンネル接合形成法を開発する。

（３）チャネル中の素電荷（シングル・ドーパントや単電子）の位置と電位を直接検出し、デバイス研究に資する。

以上を総合し、揺らぎに強く、低消費電力のシリコンナノデバイスの開拓を目指す。

３．研究の方法

（１）選択酸化による凹凸型多重ドット、ド

ーパントポテンシャルによる多重ドット、転位網による多重ドットを対象とする。

（２）高周波ゲートによるランダム多重ドット系の単電子転送可能性を、実験とシミュレーションで調べる。

（３）極低温 KFM を購入し、チャネル中のドーパントのポテンシャル分布や単電子の移動過程を観測し、単電子輸送過程の研究における主要なツールとして利用する。

４．研究成果

（１）ランダム多重トンネル接合系における単電子転送の実験的検証

Pをドーピングした Si ナノワイヤ FET を作製して Id－Vg 特性を測定したところ、P 原子を量子ドットとする単電子特性が得られ、かつ高周波ゲート印加時に単子転送を示す電流プラトーが見られることを実証した（PRB(2007)（図 1））。

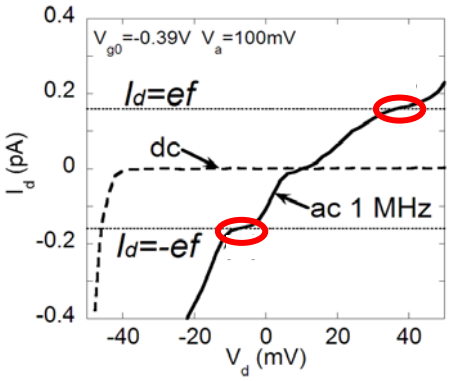

図１．ランダム接合系における単電子転送の観測。Id=ef でのプラトーが単電子転送に対応。

並行してシミュレーションを行い、マルチドット系につきドットサイズの揺らぎに強い耐性をもって単電子転送を可能とする条件（ドット数、揺らぎ幅など）を求めた。ドットの大きさは、ゲート容量 Cgi に反映されているため｛Cgi｝にばらつきをもたせて単電子転送の条件が見つかる統計的確率を調べた。その結果、ばらつき（｛Cgi｝の標準偏差）を大きくしていくと転送成功確率がまず増加し、次第に飽和して減少に転ずることを見出した。これは、ランダムなドーパント配置において、高い確率で単電子転送が実現できるという実験結果を説明するものであるが、集積化を目指すには１００％の成功率を保証するデバイス構造を提示する必要がある。ここで、注目すべきはドット数が３の場合である。３ドット系でかつ中央のドットサイズが最大であれば、｛Cgi｝の標準偏差によらず必ず単電子転送が実現できることを見出した(JJAP(2009))。これは、中央のドット

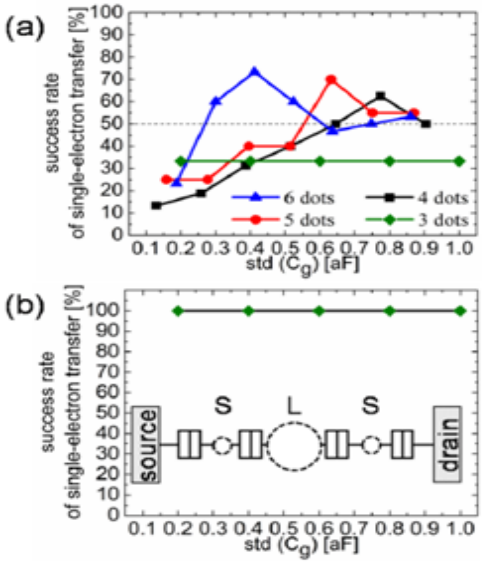

図２．(a)多重ドットデバイスで、ゲート容量 Cgi の標準偏差に対して、単電子転送の成功率をプロットしたもの。(b)特に３ドット系でかつ中央ドットが最大である場合（SLS)の計算結果。

サイズを最大にするプロセス加工精度は必要とするが、それ以上の過剰な精度を要求することなく単電子転送が可能であることを意味している（JJAP(2009)（図 2））。

リンドーパントポテンシャルによる多重ドットの形成を単電子転送に適用しようとする場合、ドット間の電子のトンネル容易さを制御することが重要となる。我々は、ごく最近、バックゲート電圧を変化させることによりドット間の結合の強さを制御して、単電子転送動作を引き起こすことに成功した（APEX(2009 in press)（図 3）)。

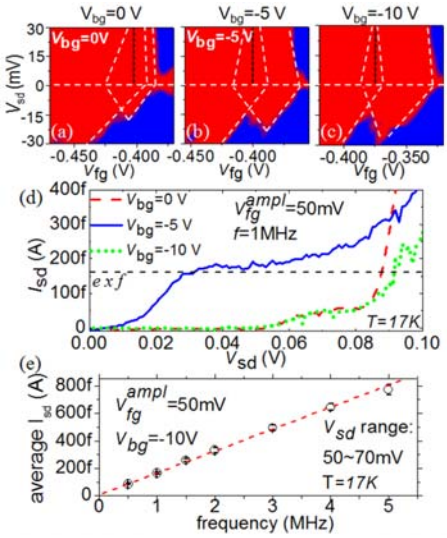

図３．バックゲートによるドット間結合の調整と単電子転送

（２）マルチドット型単電子 FET による可視域光子の検出

マルチドット型単電子 FET に対する光照射効果は、期待以上の大きな進展があり、単光子の検出に成功した。本来、単電子 FET は現在考えうる最高の感度を持つ超高感度電位計であるため、電流経路の近傍に発生した、たった１個の光誘起電荷によってすらソース・ドレイン間電流が変調を受ける。Si で単光子吸収の効果を明瞭に示したのは本報告が初めてである((PRB (2006))（図４）)。

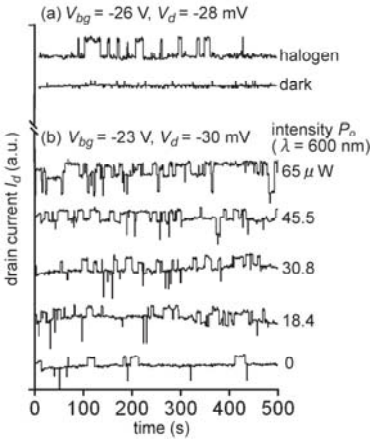

図４．多重ドットランダム接合 FET に波長 600nm の光を照射したときの、光子吸収に対応する電流変動。

（３）単一リン・ボロンドーパントの検出

Si チャネル中のリンは通常電子を放出して正に帯電する。基板裏面に負バイアスをかけてチャネルを空乏化した状態で極低温で表面電位分布を測定したところ、個々のリンドーパントが作る電位分布を測定することに成功した。一方、ボロンについても測定に成功し、ドナー、アクセプター両者について検出することができた。これは、実デバイス中のドーパント電位を１個レベルで検出した初めての実験である (APL (2008))。

図５は、用いた極低温ケルビンプローブフォース顕微鏡（LT-KFM）の測定系であり、デバイスを動作状態でチャネル部の詳細な電位分布をマッピングできるところに特長がある。測定領域で、電位を遮蔽するフリーキャリア（電子、正孔）を排除するようにバイアスをかけておけば、裸のドーパントイオンポテンシャルを観測できる。図６は、単一ボロンの測定例である (APL (2008))。

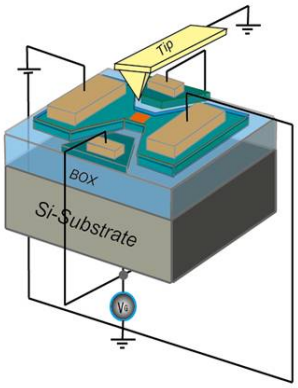

図５．LT-KFM の測定系の模式図。

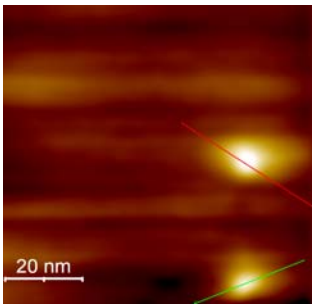

図６．Si 中の単一ボロン原子の観察（@13K）

（４）転位網利用周期ポテンシャル FET

２枚の(001)SOI ウエハを、酸化膜を介さずに直接貼り合わせる方法により、SOI ウエハの上部 Si 層中に２次元配列した転位網が形成される。さらに、貼り合わせに用いる２枚のウエハの面内結晶方位の角度ずれの大きさにより、転位間距離が制御できる。転位によるポテンシャルの空間変化を用いて多重トンネル接合を形成する検討を行った。このため、転位網をチャネル部とする FET（図７）の基本特性の評価を行った (APL (2006))。

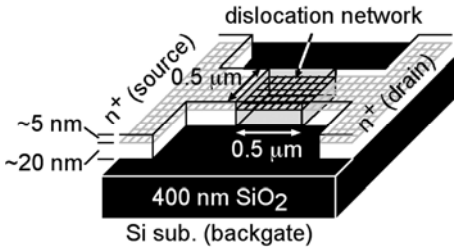

図７．バイクリスタル転位網を内包する FET

その結果、I_d-V_g特性は低温では2段の立ち上がり特性となること、単電子特性特有の電流振動が見られることがわかった。ただし、Pドーパントのチャネル部への拡散による効果と転位網の効果が明瞭に識別できておらず、今後さらに検討していく必要がある。

以上の成果は、与えられた自然の揺らぎでの下で、単電子転送を制御できることを示したもので、ランダム系利用への一歩と考える。

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８件）

① D. Moraru, M. Ligowski, K. Yokoi, T. Mizuno and M. Tabe, “Single-Electron Transfer by Inter-Dopant Coupling Tuning in Doped Nanowire Silicon-On-Insulator Field-Effect Transistors”, APEX, to be published (2009) , 査読有.

② K. Yokoi, D. Moraru, M. Ligowski and M. Tabe, “Single-Gated Single-Electron Transfer in Nonuniform Arrays of Quantum Dots”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.48, pp.024503-1-7 (2009), 査読有.

③ M. Ligowski, D. Moraru, M. Anwar, T. Mizuno, R. Jablonski and M. Tabe, ”Observation of individual dopants in a thin silicon layer by low temperture Kelvin Prove Force Microscope”, Appl. Phys. Lett. Vol.93, No.14, pp.142101-1-3 (2008), 査読有.

④ D. Moraru, Y. Ono, H. Inokawa and M. Tabe, “Quantized electron transfer through random multiple tunnel junctions in phosphorous-doped silicon nanowires”, Phys. Rev. B, Vol.76, no.7, pp. 075332-1-5 (2007), 査読有.

⑤ Z. A. Burhanudin, R. Nuryadi and M. Tabe, “Detection of field-induced single -acceptor ionization in Si by single-holetunneling transistor”, Appl. Phys. Lett. Vol.91, No.4, pp.042103-1-3 (2007), 査読有.

⑥ H. Ikeda and M. Tabe, “Numerical study of turnstile operation in random-multidot-channel field-effect transistor”, Journal of Applied Physics 99, pp.073705-1-6 (2006), 査読有.

⑦ Y. Ishikawa, C. Yamamoto and M. Tabe, “Single-electron tunneling in a silicon-on-insulator layer embedding an artificial dislocation network”, Appl. Phys. Lett. Vol.88, pp.073112-1-3 (2006), 査読有.

⑧ R. Nuryadi, Y. Ishikawa and M. Tabe, “Single-photon-induced random telegraph signal in a two-dimensional multiple-tunnel-junction array”, Phys. Rev. B 73, pp.045310-1-7 (2006), 査読有.

〔学会発表〕（計６件）

① M. Tabe, D. Moraru, M. Ligowski, M. Anwar, K. Yokoi, R. Jablonski and T. Mizuno, “Observation of discrete dopant potential and its application to Si single-electron devices”, ICSI-6: 6th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, Los Angeles, California, USA (2009.5.17-22).

② M. Tabe, D. Moraru, M. Ligowski, M. Anwar, R. Jablonski and T. Mizuno, “Application and Observation of Discrete Dopant Potential for Si Single-Electron Devices”, IUMRS International Conference in Asia 2008 (IUMRS-ICA 2008), Nagoya (2008.12.9-13).

③ M. Tabe, Z. A. Burhanudin, R. Nuryadi, D. Moraru, M. Ligowski, R. Jablonski and T. Mizuno, “Si Single-Electron SOI-MOSFETs: Interplay with Individual Dopants and Photons”, MRS fall meeting 2008, Boston・MA (2008.12.1-5).

④ M. Tabe, “Si single-electron devices: manipulation of individual dopants”, The 5th International Workshop on Nanoscale Semiconductor Devices (IWNSD), Seoul, Korea (2008.5.16).

⑤ M. Tabe, R. Nuryadi, D. Moraru, Z. A. Burhanudin, H. Ikeda, “Si Single-Electron Devices: Interaction with Individual Dopants and Photons”, Fifth International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-V), pp.11-12, Tokyo (2007.11.12-14).

⑥ 田部道晴「シリコン単電子デバイス　―ランダムドット系での単電子操作と光応用―」応用物理学会 第 20 回上田記念講演会および東海支部 40 周年記念会 名古屋ガーデンパレス（2007.1.6）

〔図書〕（計２件）

① 田部道晴、“シリコンフォトニクス－先端光テクノロジーの新展開－、第４章「受光素子」”、pp.119-154、オーム社、金光義彦・深津 晋［共編］(2007)

② M. Tabe, H. Ikeda and Y. Ishikawa, “Silicon Nanoelectronics, chapter 6 Resonant tunneling in Si nanodevices”, pp. 133-154 Eds: D. Ferry and S. Oda, CRC Press (2006)

〔その他〕

新聞掲載

① 田部 道晴：集積回路 原子の「ムラ」検査－静岡大、微細化促す新技術
日経産業新聞（2008.10.2）

② 田部 道晴：第20回（平成18年度）「高柳記念賞」受賞が新聞に掲載される。
中日新聞、静岡新聞（2006.12.10）

③ 田部 道晴：「コンピューター光で動かせる？ 光子を検出 微小シリコン開発」朝日新聞（2005.10.22）

ホームページ
電子工学研究所
http://www.rie.shizuoka.ac.jp/index.html
田部研究室
http://www.rie.shizuoka.ac.jp/~nanohome

６．研究組織

(1)研究代表者

田部　道晴（TABE MICHIHARU）
静岡大学・電子工学研究所・教授
研究者番号：80262799

(2)研究分担者

池田　浩也（IKEDA HIROYA）
静岡大学・電子工学研究所・准教授
研究者番号：00262882

小野　行徳（ONO YUKINORI）
NTT・物性科学基礎研究所・主任研究員
研究者番号：80374073

雨宮　好仁（AMEMIYA YOSHIHITO）
北海道大学・工学研究科・教授
研究者番号：80250489

石川　靖彦（ISHIKAWA YASUHIKO）
静岡大学・電子工学研究所・助手
研究者番号：60303541
（平成16年度～平成17年度）

ラトノ　ヌルヤディ（RATNO NURYADI）
静岡大学・創造科学技術大学院・助教
研究者番号：70402245
（平成17年度～平成19年度）