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

少数ドーパントのポテンシャル揺らぎを利用したシリコン単電子転送デバイス

メタデータ	言語: ja 出版者: 静岡大学 公開日: 2013-01-08 キーワード (Ja): 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/10297/6947

様式Ｃ－１９

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成２４年５月１５日現在

機関番号：１３８０１
研究種目：基盤研究(A)
研究期間：2008～2010
課題番号：２０２４６０６０
研究課題名（和文）　少数ドーパントのポテンシャル揺らぎを利用したシリコン単電子転送デバイス
研究課題名（英文）　Si single-electron transfer devices using potential fluctuation by a few dopants
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(和文):本研究において、これまでに得た主な研究成果は以下のとおりである。（１）Si チャネル中にＰドナーが多数存在する状態でも、単一ドナー原子が電流の立ち上がり特性を決めることを発見した。（２）Ｐドナー原子３個が立ち上がり特性を決めているデバイスを選別し、単電子転送機能を実証した。（３）極低温 KFM により、正帯電Ｐドナーおよび負帯電Ｂアクセプターの原子レベルの検出に引き続き、Ｐドナーへの電子注入も観測した。

研究成果の概要（英文）：In this work, the following results have been obtained. (1) Even under existence of many phosphorous donors, a single donor determines sub-threshold characteristics. (2) In a device, where three phosphorous atoms determine the sub-threshold characteristics, single-electron transfer has been demonstrated. (3) By low-temperature Kelvin probe force microscopy, individual charged donors and acceptors were observed, and then potential change due to electron injection into the dopant was observed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
２００８年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000
２００９年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
２０１０年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
年度			
年度			
総　計	28,800,000	8,640,000	37,440,000

研究分野：工学
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、電子デバイス・機器、半導体超微細化、シリコン

１．研究開始当初の背景

シリコン MOSFET の微細化が進展しナノメータの領域に入ると、個々のドーパントイオンの配置に依存してポテンシャル場が揺らぎ、デバイス特性が大きくばらつくことが理論予測されていた。2007 年に入って、我々のグループを含めて、1 個のドーパントがデバイス特性に与える効果が相次いで報告され始めた。　我々は、10 年以上にわたってシリコン単電子デバイスの研究を行ってきた。その中で、少数個のドーパントが作るランダムなポテンシャル場を利用した新しい原理の単電子転送デバイスを模索してきた。チャネル中のポテンシャルは、ドーパントのランダムな空間配置に依存して大きな揺らぎを持つが、もしこれを利用して単電子転送ができれば、工学的応用が可能となる。我々は、シミュレーションと併せて予備的実験を行い、

P が作る不規則なポテンシャル場を電子が順次トンネル移動し単電子転送が可能であることを示した（D. Moraru et al., Phys. Rev. B, 76, 075332 (2007)）。これは、本研究提案の基礎となるものであるが、さらに本格的な研究が俟たれる状況であった。

２．研究の目的

ナノメータ領域のシリコンデバイスは、ドーパントの個数や配置のばらつきがデバイス特性を左右するため、これを克服するデバイス原理の提案が必要である。本研究は、我々のシリコン単電子デバイスに関する成果を基に提案するものであり、ランダムに配置された少数個のドーパントのポテンシャル場を利用することにより、１ゲートパルスあたり１個の電子を転送する単電子転送デバイスの開発を目指す。すなわち、ナノ領域で顕在化するドーパントのポテンシャル揺らぎを積極的に利用したシリコンナノデバイスの開発を目的とする。

３．研究の方法

以下の４つの項目について系統立てて研究を進め、最終段階でこれらをまとめあげて少数ドーパント系の単電子転送デバイスの実現を目指す。

（１）単電子転送を実現するチャネル中ドーパント個数とチャネル形状の効果

（２）動作温度の高温化に向けたＰとＢの同時ドーピングの効果

（３）単電子転送に対するSi中のＢイオン化の効果

（４）低温KFMによる個々のドーパントポテンシャルの直接観測

このうち、（１）～（３）はいずれもドーパントが作る微細なポテンシャル凹凸をある程度制御しようとするものであり、単電子転送という機能を満足させるポテンシャル形状制御の条件を理論と実験の両面で把握する。

４．研究成果

これまでに得た主な研究成果は、以下のとおりである。

（１）　Si チャネル中に P ドナーが多数存在する状態でも、チャネル形状を最適化すれば、単一ドナー原子が電流の立ち上がり特性を決めることを発見した（図１、*PRL (2010)*）。すなわち、チャネルパターンをワイヤ状とディスク形状に加工し、多数のリンドナーが作るポテンシャルとデバイス特性の関連を調べた結果、チャネル長が短くディスク型であると１個のドナーで特性が決まることを統計的に見出した。

（２）　Siチャネル中のPドナー原子３個が

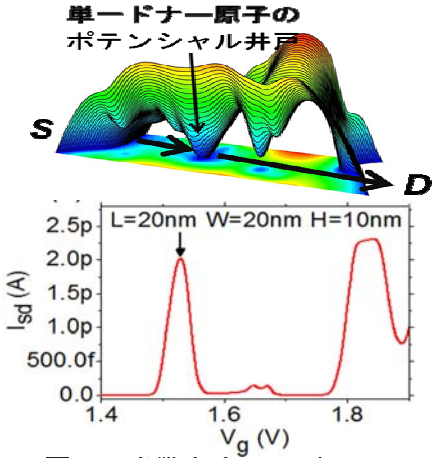


図１．多数ドナーの下での単一ドナー電流ピーク

立ち上がり特性を決めているデバイスを選別し、バックゲートバイアスを最適化することにより、単電子転送機能を実証した（図２、*APEX (2009)*）。さらに、この研究の過程で、ドナー原子２個によると思われるメモリ効果を発見した（図３、*APL (2010)*）。

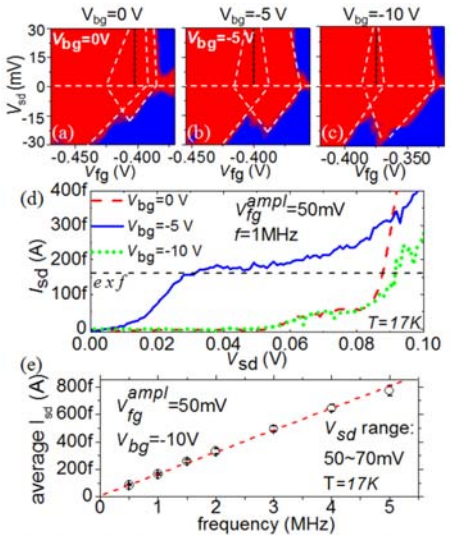


図２．バックゲートによるドット間結合の調整と単電子転送

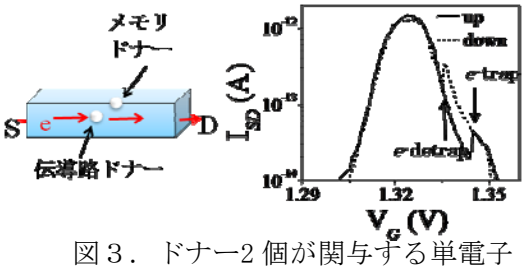


図３．ドナー2個が関与する単電子捕獲メモリ効果とヒステリシス

（３）　低温KFMによるチャネル中のドー

パントポテンシャル測定は、予定以上に進展し、単一ドーパントの観測に成功した。さらに本研究目的のためには、実際にチャネル中の個々のドーパントと電子トラップ状態を測定する手法を確立する必要がある。我々は、チャネルに電流を流し、P ドナーに電子がトラップされた状態を観測することができた。さらに、バックゲートバイアスを正に印加するにつれてドナーポテンシャル井戸が 1 個 1 個の電子によってステップ関数的に埋まっていくようすを統計的に明らかにした。（*PRL(2010)*）。

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 17 件）

① M. Ligowski, M. Tabe and R. Jablonski, “Kelvin Probe Force Microscope measurement uncertainty”, Advanced Materials Research, 査読有, 222, 2011, pp. 114-117.
② D. Moraru, E. Hamid, J. C. Tarido, S. Miki, T. Mizuno and M. Tabe, “Memory effects based on dopant atoms in nano-FETs”, Advanced Materials Research, 査読有, 222, 2011, pp. 122-125.
③ M. Tabe, D. Moraru, A. Udhiarto, S. Miki, M. Anwar, Y. Kawai and T. Mizuno, “Si-based single-dopant atom devices, Advanced Materials Research”, 査読有, 222, 2011, pp. 205-208.
④ M. Tabe, A. Udhiarto, D. Moraru and T. Mizuno, “Single-photon detection by Si single-electron FETs”, Phys. Status Solidi A, 査読有, 208, 2011, pp. 646-651.
⑤ M. Anwar, D. Moraru, Y. Kawai, M. Ligowski, T. Mizuno, R. Jablonski, M. Tabe, “KFM Observation of Electron Charging and Discharging in Phosphorus- Doped SOI Channel, Key Engineering Materials”, 査読有, 470, 2011, pp. 33-38.
⑥ D. Moraru, K. Yokoi, R. Nakamura, S. Miki, T. Mizuno and M. Tabe, “Tunable Single-Electron Turnstile using Discrete Dopants in Nanoscale SOI-FETs”, Key Engineering Materials, 査読有, 470, 2011, pp. 27-32.
⑦ E. Hamid, D. Moraru, J. C. Tarido, S. Miki, T. Mizuno and M. Tabe, “Single-electron transfer between two donors in nanoscale thin silicon-on- insulator field-effect transistors”, Appl. Phys. Lett., 査読有, 97, 2010, pp. 262101-1-3.
⑧ K. Yokoi, D. Moraru, T. Mizuno and M. Tabe, “Electrical control of capacitance dispersion for single-electron turnstile operation in common-gated junction arrays”, J. Appl. Phys., 査読有, 108, 2010, pp. 053710-1-5.
⑨ M. Tabe, D. Moraru, M. Ligowski, M. Anwar, R. Jablonski, Y. Ono and T. Mizuno, “Single-Electron Transport through Single Dopants in a Dopant-Rich Environment”, Phys. Rev. Lett., 査読有, 105, 2010, pp. 016803-1-4.
⑩ 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”, Thin Solid Films, 査読有, 518, 2010, pp. S38-S43.
⑪ M. Ligowski, D. Moraru, M. Anwar, J. C. Tarido, T. Mizuno, M. Tabe, R. Jablonski, “Detection of individual dopants in single-electron devices- A study by KFM observation and simulation”, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, 査読有, 3, 2009, pp. 130-133.
⑫ D. Moraru, M. Ligowski, J. C. Tarido, S. Miki, R. Nakamura, K. Yokoi, T. Mizuno, M. Tabe, “Single-electron transport characteristics in quantum dot arrays due to ionized dopants”, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, 査読有, 3, 2009, pp. 52-54.
⑬ A. K. Kikombo, M. Tabe and Y. Amemiya, “A photon position sensor consisting of single-electron circuits, Nanotechinology”, 査読有 20, 2009, pp. 405209-1-7.
⑭ 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”, Appl. Phys. Express, 査読有, 2, 2009, pp. 071201-1-3.
⑮ K. Yokoi, D. Moraru, M. Ligowski and M. Tabe, “Single-Gated Single-Electron Transfer in Nonuniform Arrays of Quantum Dots”, Japan Journal Applied Physics, 査読有, 48, 2009, pp. 024503-1-7.

⑯ 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 proceedings, 2009 Materials Research Society, 査読有, 1145-MM10-01, 2009, pp.1-7.

⑰ 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”, Applied Physics Letters, 査読有, 93, 2008, pp.142101-1-3.

〔学会発表〕(計 85 件)

① A. Udhiarto, “Current Intermittency in SOI-FETs under Continuous Light Illumination”, 電子情報通信学会 SDM／ED 合同研究会, 2011.2.24, 北海道大学（札幌市）.

② D. Moraru, “Single-electron transfer between two donors in thin nanoscale silicon transistors”, 電子情報通信学会 SDM／ED 合同研究会, 2011.2.24, 北海道大学（札幌市）.

③ **(Invited)** M. Tabe, “Si Single Dopant Devices”, The Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2011), 2011.1.12, NTT 厚木 R&D センター（厚木市）.

④ **(Invited)** M. Tabe, “Observation of individual dopants in Si channel by Low-Temeperature KFM”, 18th Int. Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM18), 2010.12.11, 熱川ハイツ（東伊豆町）.

⑤ **(Invited)** M. Tabe, “Single dopant devices: Single-electron transport through single-dopants”, ITRS Deterministic Doping Workshop 2, 2010.11.12, UC Berkeley (USA).

⑥ A. Udhiarto, “ Single-Photon Detection by Individual Dopants and the Effect of Channel Shape in SOI-FET”, 2010 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM 2010), 2010.9.23, 東京大学（東京都）.

⑦ M. Anwar, “ KFM Observation of Single-Electron Filling in Isolated and Clustered Dopants”, 2010 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM 2010), 2010.9.22, 東京大学（東京都）.

⑧ D. Moraru, “Memory effects based on dopant atoms in nano-FETs”, Inter-Academia 2010, 2010.8.11, Riga Technical University (Latvia).

⑨ M. Tabe, “Si-based single-dopant atom devices”, Inter-Academia 2010, 2010.8.10, Riga Technical University (Latvia).

⑩ D. Moraru, “Control of dopant-induced quantum dots by channel geometry”, 2010 Silicon Nanoelectronics Workshop, 2010.6.13, Hilton Hawaiian Village (USA).

⑪ **(Invited)** M. Tabe, “Single-photon detection by Si single-electron FETs”, European MRS (E-MRS) Symp. J: Silicon-based nanophotonics, 2010.6.8, Congress Center (France).

⑫ **(Invited)** M. Tabe, “Towards Silicon-based Single Dopant Technology”, JST Int. Sympo. on Atom-scale Silicon Hybrid Nanotechnolgies for 'More-than-Moore' and 'Beyond CMOS' Era, 2010.3.1, University of Southampton (UK).

⑬ **(Invited)** M. Tabe, “Si Single-Dopant FETs and Observation of Single-Dopant Potential by LT-KFM”, 5th Int. Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, 2010.1.29, 東北大学（仙台市）.

⑭ （招待講演）田部道晴, “シングルドーパントデバイスの現状と課題”, 応用物理学会シリコンテクノロジー分科会第 117 回研究集会, 2010.1.22, 早稲田大学（東京都）.

⑮ （招待講演）田部道晴, “シリコンドーパント原子デバイス”, 電子情報通信学会北海道支部・IEEE 札幌支部共催講演会, 2009.12.11, 北海道大学（札幌市）.

⑯ M. Ligowski, “Calibration and inaccuracy estimation of Kelvin Probe Force Microscopy technique”, Mechatronics 2009, 2009.11.18, Brno University of Technology (Czech Republic).

⑰ **(Invited)** M. Tabe, “Si Multi-dot FET Using Discrete Dopants”, 5th Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, 2009.9.3, 大阪大学（吹田市）.

⑱ **(Invited)** M. Tabe, “Observation of discrete dopant potential and its application to Si single-electron devices”, 6th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures, 2009.5.18, Ayres Hotel (USA).

⑲ **(Invited)** M. Tabe, “Application and Observation of Discrete Dopant Potential for Si Single-Electron Devices”, IUMRS International Conference in Asia 2008, 2008.12.10, Nagoya Congress Center （名古屋市）.

⑳ **(Invited)** M. Tabe, “Si Single-Electron SOI-MOSFETs: Interplay with Individual Dopants and Photons”, MRS fall meeting 2008, 2008.12.1, Hynes Convention Center, Boston･MA.

〔図書〕（計２件）

① 田部道晴, シーエムシー出版, ナノシリコンの最新技術と応用展開第 1 章 8「シリコン多重ドットFETの新機能：フォトン検出と単電子転送」, 2010, pp.56-65.

② 田部道晴, オーム社, 電子情報通信学会「知識ベース」S2 群－2 編－第 1 章「シリコンナノエレクトロニクス」, 2010, －

〔その他〕
ホームページ等
静岡大学学術リポジトリ
http://ir.lib.shizuoka.ac.jp/
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
猪川　洋（INOKAWA HIROSHI）
静岡大学・電子工学研究所・教授
研究者番号：50393757

佐藤　弘明（SATOH HIROAKI）
静岡大学・電子工学研究所・助教
研究者番号：00380113

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