

## 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：挑戦的萌芽

研究期間：2010～2011

課題番号：22656082

研究課題名（和文） P と B の同時ドーピングによる Si シングルドーパントデバイスの室温動作化

研究課題名（英文） Toward room temperature operation of Si single-dopant devices by P and B codoping techniques

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。Si SOI-MOSFET においてチャネル部をナノメートル寸法にすると、ドーピングされた P ドナーは、単独で量子サイズ効果と誘電閉じ込め効果のためにバルク Si の値の数倍以上のイオン化エネルギーをもつことを実験的に明らかにした。また、B と P の配置によっては、電子に対する量子井戸をさらに深くすることが可能であることを示した。

研究成果の概要(英文): In this work, the following results have been obtained. When the size of Si channel is within the order of nanometers, P donor has larger ionization energy than its value in Si bulk. Then, it is shown that the energy depth of quantum well for electrons can be further deepened, as a result of appropriate configuration of B and P atoms.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	0	1,700,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	450,000	3,650,000

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：電子デバイス・機器、スピンドバイス、ドーパント複合体

## 1. 研究開始当初の背景

Si テクノロジーでは、最近ドーパントの個数や位置の揺らぎがデバイス特性ばらつきとして顕在化することが問題視されている。我々は、逆にシングルドーパントのポテンシャル井戸を究極の極小量子ドットとして積極的に利用するという、世界的に見てもほとんど例がない独創的な構想を掲げて、**シングルドーパントエレクトロニクス**を提唱し研

究を進めている。しかし、Si 中のドーパントのポテンシャル深さは、典型的な B や P では 44-45meV と浅く、室温の  $kT$  (23meV) と比べてマージンが少ないため、ドーパント量子ドットを利用するトンネルデバイスの動作は 10K 程度に限られている。このような状況下にあつて、研究代表者は、マクロにはお互いに補償し合って打ち消されてしまう同時ドーピングが、ボーア半径オーダーの微

視的なスケールで見ると、プラス電荷 (P) とマイナス電荷 (B) が近接することにより 100meV に迫る大きなポテンシャル凹凸を形成することに注目し、これによって、実効的なポテンシャル井戸深さを増大させて、室温動作が実現できると考えた。かつ、文献(例えば F. Iori et al., PRB 76, 085302(2007))によれば B と P はお互いに近接して安定化する可能性があり、本研究計画を提案するに至った。

## 2. 研究の目的

我々は、“シリコン系原子デバイス”を追究するため、シリコンテクノロジーにおいてドーパント分布を連続体として扱ってきた従来のデバイス概念を一新し、個々のドーパントが形成するポテンシャルを積極的に利用した**シングルドーパントエレクトロニクス**の構築を目指している。これまで、研究代表者のグループを含め、ドナー単体のポテンシャル井戸を量子ドットとして利用するトンネルデバイスの特性が報告されているが、井戸が浅く極低温動作に限られていた。この中であって、本研究の目的は、ドナー原子 (P) とアクセプタ原子 (B) を同時にドーピングすることによって、P-B のペアリングの可能性を実験・理論の両面で追究し、電子に対するポテンシャル深さを深めて、室温に迫る高温動作を実現することを目指すものである。

## 3. 研究の方法

シングルドーパントデバイスの室温動作を目指して、ドナー/アクセプタ複合系によるポテンシャル凹凸の増大を図り、

- (1) デバイス作製と特性解析
  - (2) 安定配置の理論的検討
  - (3) LT-KFM による複合ドーパントの検出
- の3つの柱で研究を進める。

## 4. 研究成果

### (1) ドナーレベルのディープ化

Si SOI-MOSFET においてチャンネル部をナノメートル寸法にすると、ドーピングされた P ドナーは、単独で量子サイズ効果と誘電閉じ込め効果のためにバルク Si の値の 5 倍以上のイオン化エネルギーをもつことを実験的に明らかにした。これは、室温でも熱雑音に負けないエネルギー井戸を介したトンネリングが可能であることを示している。P-B 共存系で、より深いポテンシャル井戸が形成される実験的証拠はまだ得られていないが、

p n ナノダイオードで引き続き実験をしている。

### (2) 理論計算によるドナーレベルの解析

第一原理計算に基づいて安定配置の理論的検討を行った。単一リンおよびボロン原子を有する直径 1nm・長さ 2nm (<110>方向) のシリコンナノロッド (表面は水素終端) を金ナノ電極 (111) で挟んだ素子構造を用いた。単ドーパント原子の位置を、ナノロッド中心から、①ロッド側面に向かう方向 (Y 方向)、および②ロッド端に向かう方向 (Z 方向) に移動させながら構造緩和計算を行い、形成エネルギーを計算することで構造安定性を解析した。その結果、ドーパント原子を Y 方向に動かした場合は、ロッド側面からシリコン 1 原子層内側の位置で形成エネルギーが極小となることから、これが安定位置であることがわかった。一方、Z 方向に移動させた場合には、ロッド端近傍でドーパント原子に近接するシリコン・水素原子の顕著な位置の変化とともに形成エネルギーの大きな低下が見られた。

引き続き、第一原理計算によって、ナノ Si チャンネル中の P ドナー単独の電子状態を調べた結果、Si の伝導帯下端から測ったドナーレベルはバルク Si 中の値の 10 倍近くもあり、また、B アクセプタとの共存系では互いに逆極性のポテンシャルが電子状態に影響しあうことが明らかとなった。これにより、B と P の配置によっては、電子に対する量子井戸をさらに深くすることが可能であることを示した。

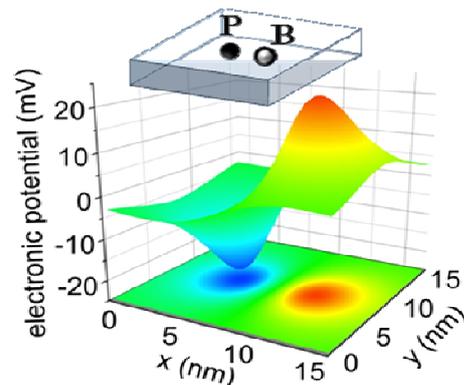


図1. P-B 複合体の例

### (3) ナノワイヤ p n ダイオードの接合部の KFM 観察

p n 接合部を KFM で観察したところ、概ね、p n 接合独特のポテンシャル形状が得られた。さらに、これに光を照射することによって、期待通りの光起電力を観測することができた。原子 1 個単位でのポテンシャルの観測は、p n 接合領域ではまだ成功していない

が、P、B単独ではすでにFET構造のチャネル部で観測できた。

#### 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 15 件)

- ① D. Moraru, E. Hamid, A. Udhiarto, T. Mizuno, and M. Tabe, “Temperature evolution of electron transport in single-donor transistors”, J. Adv. Res. Phys., 査読有, 2, 2011, pp. 011112-1-3.
- ② M. Tabe, D. Moraru, E. Hamid, M. Anwar, R. Nowak, Y. Kuzuya, and T. Mizuno, “Effect of Donor-level Deepening in nm-scale Si SOI-MOSFETs”, J. Adv. Res. Phys., 査読有, 2, 2011, pp. 011111-1-3.
- ③ M. Anwar, R. Nowak, D. Moraru, A. Udhiarto, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, “Effect of electron injection into phosphorus donors in silicon-on-insulator channel observed by Kelvin probe force microscope”, Appl. Phys. Lett., 査読有, 99, 2011, pp. 213101-1-3.
- ④ A. Udhiarto, D. Moraru, T. Mizuno, and M. Tabe, “Trapping of a photoexcited electron by a donor in nanometer-scale phosphorus-doped silicon-on-insulator field-effect transistors”, Appl. Phys. Lett., 査読有, 99, 2011, pp. 113108-1-3.
- ⑤ M. Anwar, Y. Kawai, D. Moraru, R. Nowak, R. Jablonski, T. Mizuno, and M. Tabe, “Single-electron charging in phosphorous donors in silicon observed by low-temperature Kelvin probe force microscope”, Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 50, 2011, pp. 08LB10-1-4.
- ⑥ D. Moraru, A. Udhiarto, M. Anwar, R. Nowak, R. Jablonski, E. Hamid, J. C. Tarido, T. Mizuno, and M. Tabe, “Atom devices based on single dopants in silicon nanostructures”, Nanoscale Research Letters, 査読有, 6, 2011, pp. 479-1-9.
- ⑦ M. Ligowski, M. Tabe and R. Jablonski, “Kelvin Probe Force Microscope measurement uncertainty”, Advanced Materials Research, 査読有, 222, 2011, pp. 114-117.
- ⑧ 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.

- ⑨ 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.
- ⑩ 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.
- ⑪ 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.
- ⑫ 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.
- ⑬ 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.
- ⑭ 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.
- ⑮ 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.

[学会発表] (計 67 件)

- ① (招待講演) M. Tabe, “Single Dopant Electronics”, JAIST Int. Seminar on Emerging Nanotechnologies for ‘More-than-Moore’ and ‘Beyond CMOS’ era (ISEN2012), 2012.3.26, しいのき迎賓館(金沢市).
- ② R. Nowak, “Electronic potential of lateral nanoscale Si pn junctions

- observed by KFM technique”, 2012 年春季 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012. 3. 17, 早稲田大学 (東京都) .
- ③ A. Udhiarto, “Observation of the photovoltaic effect in pn-junction silicon-on-insulator nanowires”, 2012 年春季 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012. 3. 17, 早稲田大学 (東京都) .
- ④ 葛屋陽平, “第一原理計算によるシリコンナノロッドトランジスタ中の単一リン不純物の電子状態解析”, 電子情報通信学会 SDM/ED 合同研究会, 2012. 2. 7, 北海道大学 (札幌市) .
- ⑤ R. Nowak, “KFM observation of individual dopant potentials and electron charging”, 電子情報通信学会 SDM/ED 合同研究会, 2012. 2. 7, 北海道大学 (札幌市) .
- ⑥ D. Moraru, “Single-dopant/interface interaction effects on transport characteristics of silicon nano-transistors”, 2012 Int. Workshop on Advanced Nanovision Science, 2012. 1. 24, Shizuoka Univ., Hamamatsu campus (浜松市) .
- ⑦ (招待講演) 田部道晴, “シリコンナノ構造を用いたドーパント原子デバイスとフォトン検出”, 東北大学電気通信研究所 組織連携型共同プロジェクト研究 研究会, 2011. 12. 19, Shizuoka Univ., Hamamatsu campus (浜松市) .
- ⑧ R. Nowak, “KFM measurements of surface potential induced by donor and acceptor dopants in hydrogen-passivated SOI-FETs”, The 13th Takayanagi Kenjiro Memorial Symp., 2011. 11. 17, Shizuoka Univ., Hamamatsu campus (浜松市) .
- ⑨ A. Udhiarto, “Single-dopant Based Silicon Photonic Devices”, The 13th Takayanagi Kenjiro Memorial Symp., 2011. 11. 17, Shizuoka Univ., Hamamatsu campus (浜松市) .
- ⑩ (招待講演) M. Tabe, “Single dopant devices: Toward diversity and high temperature operation”, Italia week at Waseda, Int. Workshop (Nanoelectronics Workshop), 2011. 11. 1, Waseda Univ. (東京都) .
- ⑪ Y. Kuzuya, “Theoretical Analysis of Single Dopants in Silicon Nanowire Transistors”, 2011 Korean-Japanese-Student Workshop (KJS Workshop), 2011. 11. 4, Shizuoka Univ., Hamamatsu campus (浜松市) .
- ⑫ (招待講演) 田部道晴, “シリコン系シングルドーパントデバイスとフォトン検出”, 日本学術振興会光電相互変換第 125 委員会 第 214 回研究会, 2011. 10. 14, 静岡大学 (浜松市) .
- ⑬ 葛屋陽平, “少数ドーパントを有するシリコンナノロッドの状態解析”, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 2011. 9. 1, 山形大学 (山形市) .
- ⑭ (招待講演) 田部道晴, “単一ドーパントデバイス: 多様性と高温動作に向けて”, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学学会学術講演会 シンポジウム講演 (, 2011. 8. 29, 山形大学 (山形市) .
- ⑮ (招待講演) 田部道晴, “シリコン系シングルドーパントデバイスと KFM による局所電位評価”, 国際高等研究所研究会『単分子エレクトロニクスの現状認識と近未来実現へ向けての中核体制構築』, 2011. 7. 22, 国際高等研究所 (京都市) .
- ⑯ (招待講演) M. Tabe, “Atom devices based on single-dopants in silicon nanostructures”, Villa Conf. on Interactions Among Nanostructures (VCIAN 2011), 2011. 4. 21, Red Rock Casino, Resort and Spa., Las Vegas, USA.
- ⑰ 葛屋 陽平, “単一不純物を有するシリコンナノロッドトランジスタの第一原理解析”, 2011 年春季 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 9, (東日本大震災の為、講演予稿集の発行のみ) .
- ⑱ D. Moraru, “Si ナノワイヤ p-n ダイオードにおけるランダムテレグラフシグナルの観察”, 2011 年春季 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 2011. 3. 9, (東日本大震災の為、講演予稿集の発行のみ) .
- ⑲ M. Tabe, “Single dopant devices: Single-electron transport through single-dopants”, ITRS Deterministic Doping Workshop 2, 2010. 11. 12, UC Berkeley (USA).
- ⑳ 三木 早樹人, “Si ナノワイヤ p-n ダイオードの作製と評価”, 2010 年秋季 第 71 回応用物理学学会学術講演会, 2010. 9. 17, 長崎大学 (長崎市) .

[図書] (計 2 件)

- ① M. Tabe, D. Moraru, and A. Udhiarto, Pan Stanford Publishing, Single Atom Nanoelectronics, Chapter 13: Silicon-based single dopant devices and integration with photons, 2012, to be published.
- ② 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.

[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

水田 博 (MIZUTA HIROSHI)

北陸先端科学技術大学院大学・マテリアル

サイエンス研究科・教授

研究者番号：90372458