

平成22年5月26日現在

研究種目： 特定領域研究  
 研究期間： 2006～2009  
 課題番号： 18063010  
 研究課題名（和文） ナノ多重接合系の輸送制御と新機能デバイスの研究  
 研究課題名（英文） Nanoscale-multiple-junctions: Transport control 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（和文）：個々のドナーポテンシャルを利用した多重トンネル接合をチャンネルとする単電子 SOI-MOSFET をデバイスの基本構造とし、フォトン吸収に対応したランダムテレグラフシグナルの観測、およびランダムポテンシャル系における単電子転送を実証した。また低温ケルビンプローブフォース顕微鏡によるチャンネル中の単ドーパントの観察に成功した。

研究成果の概要（英文）： We have fabricated and studied multi-tunnel junctions SOI-MOSFETs by using donor potentials as quantum dots. As a result, 1) photons are detected as current level switching in random telegraph signal, 2) single-electron transfer in random potential landscape is realized, and 3) single dopant potentials in channel are detected by low-temperature Kelvin Probe Force Microscope.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	11,900,000	0	11,900,000
2007年度	11,900,000	0	11,900,000
2008年度	11,900,000	0	11,900,000
2009年度	11,900,000	0	11,900,000
年度			
総計	47,600,000	0	47,600,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、薄膜・表面界面物性

キーワード：電子デバイス・機器、電子・電気材料、トンネル現象、シリコンナノデバイス

## 1. 研究開始当初の背景

ポストスケールリングにおいては、旧来のシリコンテクノロジーに、その延長線から外れた新しい視点を導入する必要がある。本研究は、「単電子デバイス」、「フォトニクス」、「ナノランダム系」などこれまでにない新技術の導入に挑戦するものである。Si 単電子トランジスタの研究は日・米・欧を中心に、様々な原理確認実験や CMOS との融合の試みがある。

しかし、その多くは従来型の VLSI 概念の枠内にあり、ポストスケールリングに向けた研究は少ない。本研究で取り上げる多重接合型の単電子デバイスは、光・電子の融合や量子セルオートマトン型動作に適しており、新機能デバイスの開拓につながる魅力をもっている独自のものである。

## 2. 研究の目的

本研究では、単電子（単正孔）の輸送過程を制御した新機能デバイスを開拓し、ポストスケーリングへの展開を図ることを目的とする。具体的には、2次元シリコン多重ドット構造（ナノ多重トンネル接合）をチャンネルとする SOI-FET を作製し、研究期間内に以下の検討を行う。

(1) フォトン吸収がドット SOI-FET の単電子電流やトンネル経路に与える効果を解明し、少数フォトンと少数電子との相互作用を利用したポストスケーリングデバイスへの応用を探る。

(2) ゲート電極に高周波電圧を印加することにより、ランダム多重接合系で単電子転送という秩序機能を開拓する。

(3) 多重ドットの新しい作製法として、ドーパントポテンシャルを用いる方法以外に、シリコン貼り合わせ界面に形成される「人工転位網」の可能性を探る。

(4) 極低温ケルビンプローブ顕微鏡 (KFM) を用いて動作状態でチャンネルの電荷配置の観測の直接観測を試みる。

## 3. 研究の方法

### (1) フォトン吸収効果

2次元ドット FET に対し、分光照射によるランダムテレグラフシグナルの発生など単電子輸送変調の評価を進める。

### (2) ランダムポテンシャル系の単電子転送

これまでに P をドーピングした 1次元チャンネルナノワイヤ FET において、高い確率で単電子転送が可能であることを示した。しかし、これを実際の集積回路に適用していくには、チャンネル形状を工夫して、ランダムネスがもつ不確かさを形状効果で補う方法を進めていく。

### (3) 転位網利用周期ポテンシャル FET

転位周辺の応力場とバンド変調の関連を実験的・定量的に明らかにし、デバイスへの応用の可能性を探る。

### (4) KFM によるチャンネル表面電位の観測

極低温 KFM により、SOIFET のポテンシャル分布測定を行い、まず、フリーズアウトしているドーパント原子がイオン化する様子を観測することを第 1 の目標とする。次の段階として単電子電流経路の観測へと進める。

## 4. 研究成果

### (1) フォトン照射効果

上部ゲートをもたず基板バックゲートで動作する P ドープ FET に、可視光を分光照射した。 $\lambda = 525 \text{ nm}$  を異なるフォトンフラックスで照射したところ、ランダムテレグラフ特性が得られた。電流レベルの切り替わり頻度は、概ねフォトン数に比例しており、ドーパント FET がフォトン感度をもつことが明らかとなった。

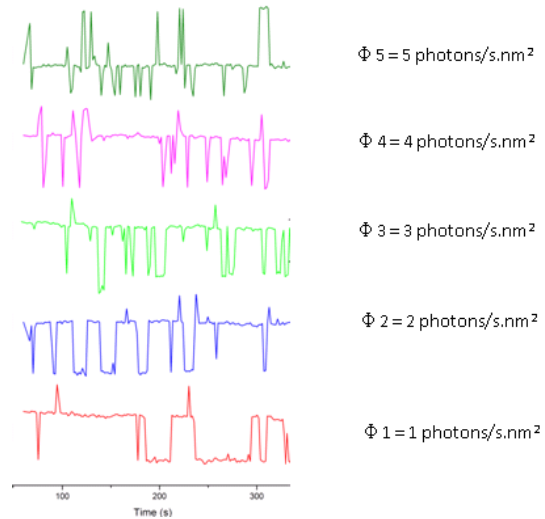


図 1. ドーパント FET へ異なった強度での分光フォトン照射結果 ( $\lambda = 525 \text{ nm}$ )。横軸は時間、縦軸はオフセットをかけた電流値である。(未発表)

### (2) ランダム系の単電子転送機能

これまで、P をドーピングした SOI-MOSFET はランダムな配置にも関わらず、単電子転送機能をもつことを示してきた。最近、dc 特性から少数個の P ドナーが特性を決めている 3 ドット系 FET を抽出し、V<sub>bg</sub> によりクーロンダイヤモンド (CD) の重なりを調節して単電子転送機能を実現した (図 2)。

この結果は、V<sub>bg</sub> でドット間容量を変化させていることに相当する。図 3 は、3 ドット系の CD の重なり (転送の必要条件) を明暗で表示した計算結果である。縦軸、横軸は、それぞれ中央ドットが最大という条件下でドット間容量、ドットゲート間容量の不均一度を表している。原点は、完全均一系に相当している。図は、第 1 象限 (中央部容量が最大の系) では、必ず単電子転送が可能となることを示しているが、ドット間容量よりドットゲート間容量が支配的であることを示している。実験 (図 2) と計算 (図 3) は整合しているが、詳細な対応付けは今後の課題である。

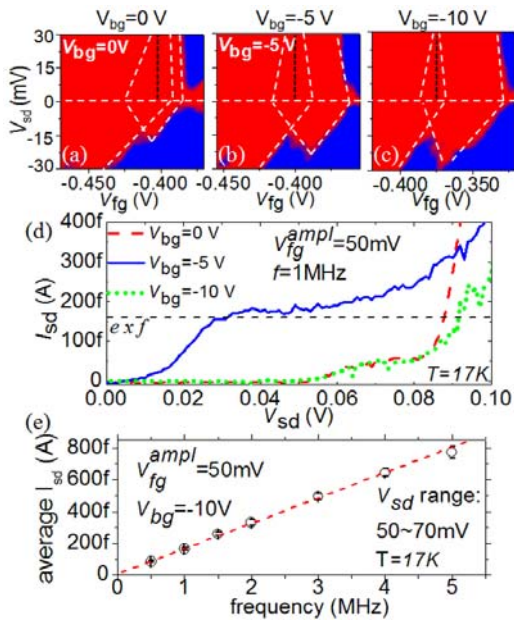


図2.  $V_{bg}$ を-5VとするとCDの重なりが適度となり、 $I_{sd} = e f$  にプラトーが現れる。この電流値がゲート周波数  $f$  に比例することも確認できた。

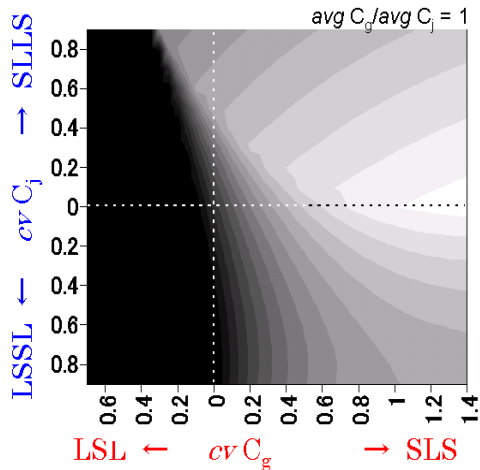


図3. 3ドット系に限定して、接合容量、ゲート容量の不均一度平面で、単電子転送能力の指標となるCDの重なりを明暗表示した。(重なりが極端に大きすぎても実際には単電子転送が困難となる。) (未発表)

### (3) 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新デバイスを探る工夫を行う。このため、転位網

をチャンネル部とする FET (図4) の基本特性の評価を行った。

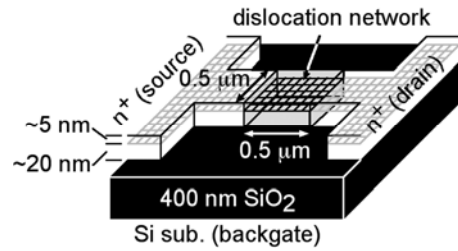


図4. バイクリスタル転位網を内包する FET

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。

### (4) 低温 KFM による単一電子の観測

上記のようなドーパントポテンシャルを利用した FET の研究を進展させるためには、実際にチャン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、これまで単一PおよびBイオンの観測に成功した。最近、チャンネルに電流を流し、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。

図5は、チャンネルにPをドーピングした SOI-MOSFET のチャンネル表面の KFM 電子電位像であり、FET に電流を流すことにより、チャンネル中央部の暗部に単一電子が捕獲されたことによると思われる電子電位の増大 (10-20 mV 程度) が観測される。今後さらに系統だった実験が必要であるが、チャンネル部の個々のドーパントと個々の電子の観測が可能であることを示しており、ナノデバイスの研究にとって極めて有効な手法と思われる。

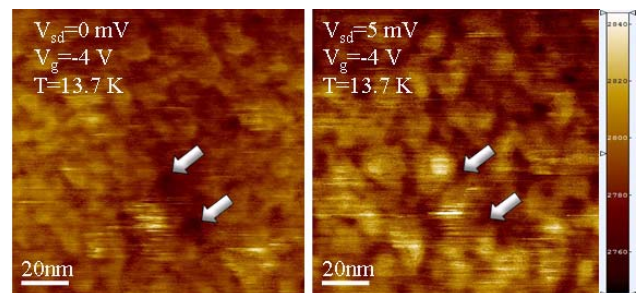


図5. SOI-FET のチャンネル部の電子電位分布の低温 KFM 測定。SD 間電流ゼロの状態 (左図) で中央部に P ドナーによると思われる暗部が見られる。電流を流すと (1 nA) 暗部が凸部に変化する。(SSDM(2009))

## 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 14 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”, *Thin Solid Films*, 査読有, Vol.518, pp.S38-S43 (2010)
- ② 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, Vol.3, No.4, pp.52-54 (2009)
- ③ A. K. Kikombo, M. Tabe and Y. Amemiya, “A photon position sensor consisting of single-electron circuits”, *Nanotechnology*, 査読有, Vol.20, pp.405209-1-7 (2009)
- ④ 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, Vol.2, pp.071201-1-3 (2009)
- ⑤ K. Yokoi, D. Moraru, M. Ligowski and M. Tabe, “Single-Gated Single-Electron Transfer in Nonuniform Arrays of Quantum Dots”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol.48, pp.024503-1-7 (2009)
- ⑥ M. Ligowski, D. Moraru, M. Anwar, T. Mizuno, R. Jablonski and M. Tabe, “Observation of individual dopants in a thin silicon layer by low temperature Kelvin Probe Force Microscope”, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, Vol.93, No.14, pp.142101-1-3 (2008)
- ⑦ Y. Fan, R. Nuryadi, Z. A. Burhanudin, M. Tabe, “Thermal agglomeration of ultrathin silicon-on-insulator layers: crystalline orientation dependence”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol.47, No.3, pp.1461-1464 (2008)
- ⑧ M. Tabe, R. Nuryadi, D. Moraru, Z. A. Burhanudin, K. Yokoi and H. Ikeda, “Si Multidot FETs for Single-Electron Transfer and Single-Photon Detection”, *ACTA PHYSICA POLONICA A*, 査読有, Vol.113, No.3, pp.811-814 (2008)
- ⑨ D. Moraru, Y. Ono, H. Inokawa and M. Tabe, “Quantized electron transfer through random multiple tunnel junctions in phosphorous-doped silicon nanowires”, *Physical Review B*, 査読有, Vol.76, no.7, pp.075332-1-5 (2007)
- ⑩ Z. A. Burhanudin, R. Nuryadi and M. Tabe, “Detection of field-induced single-acceptor ionization in Si by single-hole-tunneling transistor”, *Applied Physics Letters*, 査読有, Vol.91, No.4, pp.042103-1-3 (2007)
- ⑪ H. Ikeda and M. Tabe, “Numerical study of turnstile operation in random-multidot-channel field-effect transistor”, *J. Appl. Phys.*, 査読有, Vol.99, pp.073705-1-6 (2006)

[学会発表] (計 130 件)

- ① **(Invited)** M. Tabe, “Towards Silicon-based Single Dopant Technology”, JST Int. Sympo. on Atom-scale Silicon Hybrid Nanotechnologies for 'More-than-Moore' and 'Beyond CMOS' Era, Southampton, UK (2010.3.1-2)
- ② **(Invited)** M. Tabe, D. Moraru, M. Anwar, Y. Kawai, S. Miki, Y. Ono and T. Mizuno, “Si Single-Dopant FETs and Observation of Single-Dopant Potential by LT-KFM”, 5th Int. Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics (SiGe(C)), Sendai (2010.1.29-30)
- ③ [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、早稲田大学 (2010.1.22)
- ④ [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および IEEE 札幌支部共催講演会、北海道大学 (2009.12.11)
- ⑤ **(Invited)** M. Tabe, D. Moraru, M. Anwar, K. Yokoi, R. Nakamura, M. Ligowski, S. Miki and T. Mizuno, “Breakthrough of Advanced Nano-Silicon Devices”, 2nd Int. Conf. on Advanced Material and Practice of Nanotechnology (ICAMPN), Jakarta, Indonesia (2009.11.11-12)
- ⑥ **(Invited)** M. Tabe, “Single Dopant Electronics”, The 6th Korean-Japanese Student Workshop (KJS Workshop), Hamamatsu (2009.10.29-30)
- ⑦ D. Moraru, M. Anwar, M. Ligowski, S. Miki, R. Nakamura, T. Mizuno, R. Jablonski and M. Tabe, “Single-Electron Transport through Discrete Dopants”, 2009 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM 2009), Sendai (2009.10.7-9)
- ⑧ **(Invited)** M. Tabe, D. Moraru, M. Ligowski, M. Anwar, K. Yokoi, R. Jablonski and T. Mizuno, “Si Multi-dot FET Using Discrete Dopants”, 5th Handai Nanoscience and Nanotechnology

- Int. Sympo., Osaka (2009.9.1-3)
- ⑨ **(Invited)** 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", 6th Int. Conf. on Silicon Epitaxy and Heterostructures (ICSI-6), California, USA (2009.5.17-22)
- ⑩ [招待講演] 田部道晴、「KFM による半導体不純物分析の最前線」、日本学術振興会第167委員会/第53回研究会、キャンパスプラザ京都 (2009.1.8-9)
- ⑪ **(Invited)** 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 Int. Conf. in Asia 2008 (IUMRS-ICA 2008), Nagoya (2008.12.9-13)
- ⑫ **(Invited)** 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, USA (2008.12.1-5)
- ⑬ **(Invited)** M. Tabe, "Si single-electron devices: manipulation of individual dopants", The 5th Int. Workshop on Nanoscale Semiconductor Devices (IWNSD), Seoul, Korea (2008.5.16)
- ⑭ **(Invited)** M. Tabe, R. Nuryadi, D. Moraru, Z. A. Burhanudin, H. Ikeda, "Si Single-Electron Devices: Interaction with Individual Dopants and Photons", Fifth Int. Sympo. on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-V), Tokyo (2007.11.12-14)
- ⑮ **(Invited)** M. Tabe, R. Nuryadi, T. Ishino, Y. Kasai, D. Nagata, K. Ebisawa and H. Ikeda, "Si Bicrystal Structures for Multijunction Single-Electron Devices", 3rd Int. Workshop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics (SiGe(C) 2007), Sendai (2007.11.8-9)
- ⑯ **(Invited)** M. Tabe, R. Nuryadi, Z. A. Burhanudin, D. Moraru, K. Yokoi and H. Ikeda, "Manipulation of single-electrons in Si nanodevices-Interplay with photons and ions-", Mechatronics 2007, Warsaw, Poland (2007.9.19-21)
- ⑰ **(Invited)** M. Tabe, R. Nuryadi, D. Moraru, Z. A. Burhanudin, K. Yokoi and H. Ikeda, "Si multidot FETs for single-electron transfer and single-photon detection", 13<sup>th</sup> Int. Sympo. on Ultrafast Phenomena in Semiconductors (13-UFPS), Vilnius, Lithuania (2007.8.26-29)
- ⑱ **(Invited)** M. Tabe, R. Nuryadi and Z. Burhanudin, "Si single-electron FETs for single-photon detection", 2007 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2007), Gyeongju, Korea (2007.6.25-27)
- ⑲ D. Moraru, Y. Ono, H. Inokawa, K. Yokoi, H. Ikeda and M. Tabe, "Effects of Parameter Randomness on Quantized-electron transfer in 1D Multiple-Tunnel-Junction Arrays", 2007 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto (2007.6.10-11)
- ⑳ Z. A. Burhanudin, R. Nuryadi and M. Tabe, "Ionization of single-acceptors in p-Si epilayer observed using single-hole-tunneling transistor", 2007 Silicon Nanoelectronics Workshop, Kyoto (2007.6.10-11)
- ㉑ [招待講演] 田部道晴、「Si 単電子デバイスとフォトン検出」、日本学術振興会第151委員会1月研究会、アストンホテル熱海 (2007.1.29)
- ㉒ [招待講演] 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)
- ㉓ [招待講演] 田部道晴、「多重接合型シリコン単電子デバイス -フォトン検出と単電子規則転送への展開-」、豊田理化学研究所主催 第299回物性談話会、名古屋大学 (2006.11.6)
- ㉔ R. Nuryadi, Z. A. Burhanudin, R. Yamano, T. Ishino, Y. Ishikawa and M. Tabe, "Photo Illumination Effect on Single-Electron-Tunneling Current Through a Thin Bicrystal SOI FET", Solid State Devices and Materials (SSDM 2006), Yokohama (2006.9.13-15)
- ㉕ D. Moraru, Y. Ono, H. Inokawa, K. Yokoi, R. Nuryadi, H. Ikeda and M. Tabe, "Observation of single-electron pump operation with one ac gate bias in phosphorous-doped Si wires", Solid State Devices and Materials (SSDM 2006), Yokohama (2006.9.13-15)
- ㉖ **(Invited)** R. Nuryadi, M. Tabe, "Nanoelectronic Devices: Silicon Single Electron Device", 1st Int. Conf. on Advanced Material and Practical Nanotechnology, Indonesia (2006.9.4-5)
- ㉗ [招待講演] 田部道晴、「シリコンマルチドット型単電子デバイスとフォトン検出への応用」、電気学会 E 準部門 フィジカルセンサ技術委員会、豊橋技術科学大学 (2006.9)
- ㉘ [招待講演] 田部道晴、ラトノスルヤディ、池田浩也、「シリコン単電子デバイスの新展開」、日本学術振興会第151委員会、仙台 (2006.7.10)