

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630144

研究課題名(和文) Siナノpn接合を用いたドーパント原子型トンネルダイオード

研究課題名(英文) Dopant-atom-controlled tunnel diodes using Si nano-pn junctions

## 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、Siナノpn接合の特徴を生かした新原理デバイスとして、深いレベルをもつドナー・アクセプター準位間の共鳴トンネリングを用いた原子型トンネルダイオードを世界に先駆けて実現することを目標とした。H25年度は低温域で拡散電流にランダムテレグラフシグナル(RTS)が現れることを確認し、これがpn接合部の個別ドーパントの充放電効果であることを明らかにした(APL(2014))。H26年度は、接合部でのドーパントを介した共鳴型トンネリングを観測することが出来、これにより当初の目標を達成することができた(Si Nanoelectron. WS(2015)にて発表予定)。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research was to realize dopant-atom-based tunneling diodes using deep level donor-acceptor resonance as a new functional pn diode. In 2014 FY, we found that diffusion current of nano-pn-diodes showed random telegraph signal (RTS), which is ascribed to dopant charging and discharging phenomena (APL(2014)). In 2015 FY, we found sharp current peaks due to resonance via dopant atoms. This finding successfully satisfies the goal of this research plan (to be presented in Si Nanoelectronics Workshop 2015).

研究分野：工学

キーワード：電子デバイス・機器 シリコンナノpn接合 ドーパント原子 トンネルダイオード 高濃度ドーピング

### 1. 研究開始当初の背景

近年、集積回路、太陽電池、センサーなどの幅広い分野で、極薄 Si や Si ナノワイヤを利用する試みが盛んである。そのナノ Si 中で用いられるドーパントは、個数が少なく統計平均的な取り扱いができないということに加えて、Si による遮蔽効果が小さいためにポテンシャル井戸が深くなる（ドーパントレベルが深くなる）という特徴が報告されている。言い換えれば、ナノ Si 中ではドーパント原子の個性が顕在化することになる。しかし、このような特徴を生かした新しい原理のデバイスは、提案されるに至っていない。

### 2. 研究の目的

本研究計画は、接合部が狭小の Si ナノ p n 接合の特徴を生かした新原理デバイスを提案し、その実験的検証を目指すものである。ナノ p n 接合はマクロな p n 接合とは質的に異なり、ドーパントの個数が少なくなるとともにドーパントのエネルギーレベルが深くなるという特筆すべき特徴がある。すなわち、ナノ p n 接合においては、個々のドーパント原子の個性が優勢となる。本計画では、これを利用して p n 接合界面に位置する深いドナー・アクセプター準位間の共鳴トンネリングを用いた原子型トンネルダイオードを世界に先駆けて実現する。これにより、従来のトンネルダイオードにおいて強い制約であったドーピング濃度に対する高濃度縮退条件を大幅に緩和でき、原子型デバイス物理とその応用へ向けた基盤を構築する。

より具体的には、次の項目を実施するという目標を掲げた。

- (1) 極薄 SOI 基板を用いて、接合部が 10nm 角程度の Si ナノ p n ダイオードを電子ビーム露光で作製し、特性を評価するとともに、
- (2) 極低温ケルビンプローブフォース顕微鏡 (LT-KFM) で、接合部のポテンシャル形状をドーパント原子分解能で観測する。さらに、
- (3) ナノ p n 接合界面で向かい合うリンとボロンの電子状態を第一原理計算によって明らかにする。これらをもとに深いドナー・アクセプター準位間の共鳴トンネリングを用いた全く新しい原子型トンネルダイオードを非縮退濃度領域で実現する。

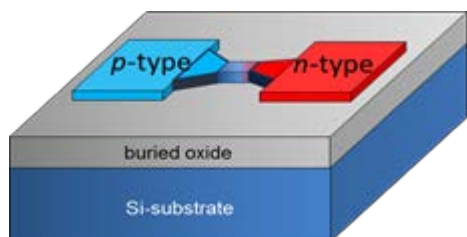


図1. SOI 基板を用いた Si ナノ p n ダイオードの模式図。p n 接合部の厚さ  $t \approx 10$  nm、幅  $W \approx 10$  nm、長さ  $L = 50-100$  nm 程度とする。

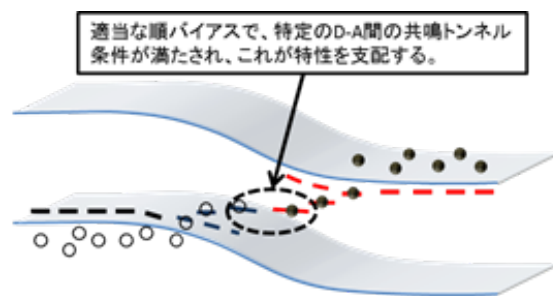


図2. Si ナノ p n ダイオードにおける接合部フロントのドナー・アクセプター間共鳴電子トンネルを示す概念的バンド図。

### 3. 研究の方法

本研究計画では、新しい原理で動作するドーパント原子型トンネルダイオードの提案・実証を 2 年間で行うことを目指し、(1) Si ナノ p n ダイオードの作製と特性評価、(2) 極低温ケルビンプローブフォース顕微鏡 (LT-KFM) による個々のドーパント原子の分解能を持つポテンシャル形状の観測、および(3) ナノ p n 接合部の電子状態の第一原理計算による理論的解析、の3つの項目を互いに関連付けながら進める。このうち、(1)と(2)は研究代表者(田部)が担当し、(3)の第一原理計算については研究分担者(水田)が主として担当する。

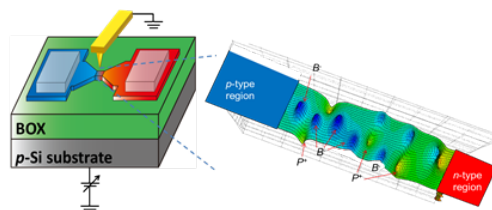


図3. LT-KFM によるナノ p n 接合部のポテンシャル分布測定系と測定例のイメージ。これまでに、個別のドーパントポテンシャルの測定実績が豊富にある。

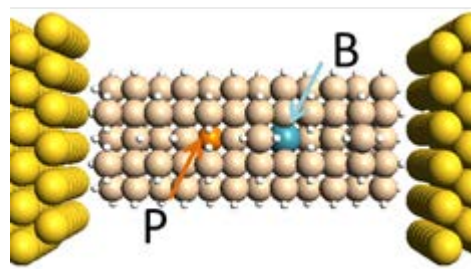


図4. 第一原理計算で用いる Si ナノワイヤとドナー (P) およびアクセプター (B) の最も単純化した場合の配置例。

#### 4. 研究成果

本研究は、Si ナノ pn 接合の特徴を生かした新原理デバイスとして、深いレベルをもつドナー・アクセプター準位間の共鳴トンネリングを用いた原子型トンネルダイオードを世界に先駆けて実現することを目指した。主な研究成果は以下のとおりである。

(1) 低温でナノ pn 接合ダイオードの順方向電流を測定すると、接合部空乏層端付近のドーパント原子の充放電に起因するランダムテレグラフシグナル (RTS) が観測されることを見出した。ドーパント原子 1 個が pn 接合特性に影響を与える初めての報告である (APL (2014))。

(2) これまで報告例のない 2 次元極薄 Sipn ダイオードの表面電位分布を極低温ケルビンプローブフォース顕微鏡で測定した。その結果、pn 接合部の空乏層領域では、キャリアの捕獲・放出に伴う電位レベルの揺らぎが観測されるとともに、表面電位分布の光照射による変化から、pn 接合部が光起電力によってフラットバンド化するようすを初めて直接的に観測した。同時に pn 接合の空間位置が光強度によって変動することから、理論予測のとおり、ドーパントがディープレベル化していると結論付けた (Thin Solid Films (2014) 論文番号①)。

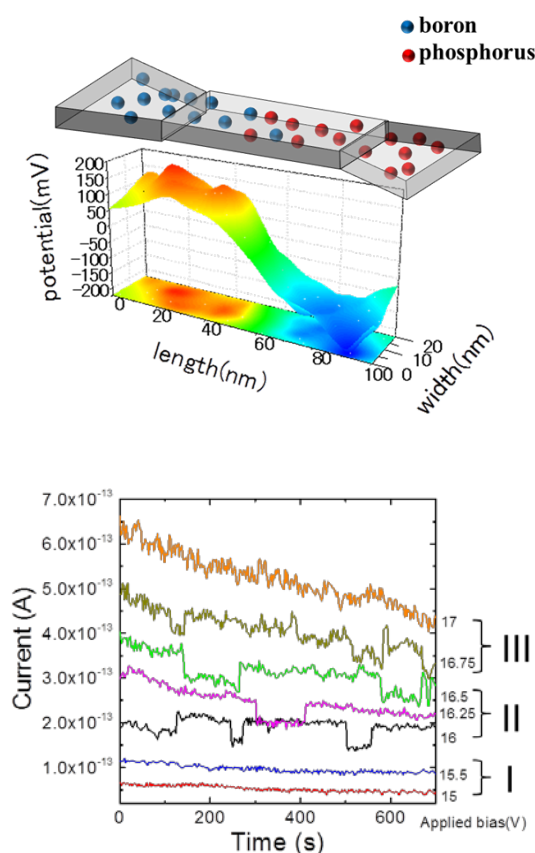


図 5. ナノ pn 接合のポテンシャル模式図 (上図) と順方向バイアス下におけるランダムテレグラフシグナル (下図) (APL (2013) 論文

番号④)。

(3) SOI 基板を用いて作製したナノエサキダイオードの順方向電流を測定すると、半導体の教科書通りの負性微分コンダクタンスが観測された。しかし、同時にいくつかのダイオードで突起状の電流ピークが観測され、これは pn 接合部のドーパント準位を介した共鳴トンネル電流によるものと考えられる。また、この現象は、水田グループの第一原理計算により証拠づけられた (Si Nanoelectron. Workshop (2015) にて発表予定)。

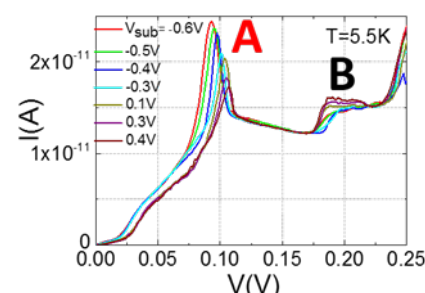


図 6. ナノ pn 接合のバンド間トンネル電流における共鳴トンネル電流ピークの観測 (Si Nanoelectron. Workshop (2015) にて発表予定)。

以上の成果は、当初の研究目標を達成していると考えられ、個別ドーパントが微細な pn ダイオードで主導的な役割を果たす事実を明らかにすることができた。

#### 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 10 件)

- ① Roland Nowak, Daniel Moraru, Takeshi Mizuno, Ryszard Jablonski, Michiharu Tabe, “Potential Profile and Photovoltaic Effect in Nanoscale Lateral pn Junction Observed by Kelvin Probe Force Microscopy”, Thin Solid Films, 査読有, 557, pp.249-253 (2014)  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2013.08.115>
- ② Le The Anh, Daniel Moraru, Muruganathan Manoharan, Michiharu Tabe, Hiroshi Mizuta “The impacts of electronic state hybridization on the binding energy of single phosphorus donor electrons in extremely downscaled silicon

nanostructures” Journal of Applied Physics, 査読有, vol. 116, pp. 063705-1-9 (2014)  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4893181>

- ③ Daniel Moraru, Arup Samanta, Le The Anh, Takeshi Mizuno, Hiroshi Mizuta, Michiharu Tabe, “Transport spectroscopy of coupled donors in silicon nano-transistors”, Scientific Reports, 査読有, vol. 4, pp. 6219-1~6219-6 (2014)  
<http://dx.doi.org/10.138/srep06219>
- ④ Sri Purwiyanti, Roland Nowak, Daniel Moraru, Takeshi Mizuno, Djoko Hartanto, Ryszard Jablonski, Michiharu Tabe, “Dopant-induced random telegraph signal in nanoscale lateral silicon pn diodes at low temperatures”, Applied Physics Letters, 査読有, vol. 103, pp. 243102-1-4 (2013)  
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4841735>

[学会発表] (計 60 件)

- ① (招待講演) 田部道晴, “少数個のドーパントを利用したSiナノデバイスドーパントのパラダイムシフト” 電子情報通信学会研究会 第1回 SNT 研究会, 2015. 2. 5, 東京大学 本郷キャンパス 武田ホール(東京都・文京区)
- ② Hoang Nhat Tan, Arup Samanta, Daniel Moraru, Yohei Kuzuya, Krzysztof Tyszk, Le The Anh, Takeshi Mizuno, Ryszard Jablonski, Hiroshi Mizuta, Michiharu Tabe, “Impact of Dopant Induced States on Interband Tunneling in Nanoscale pn Junctions”, 2014 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2014), 2014. 9. 10, つくば国際会議場 (茨城県・つくば市)
- ③ (招待講演) エルフアン ハミッド, ダニエル モラル, 葛屋陽平, 水野武志, レテアン, 水田博, 田部道晴, “ドナー原子トランジスタにおける電子トンネリングの高温動作”, 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会 第 5 回シリコンテクノロジー分科会論文賞受賞記念講演, 2014. 3. 19, 青山学院大学 相模原キャンパス (神奈川県・相模原市)
- ④ (招待講演) Michiharu Tabe, Daniel Moraru, Earfan Hamid, Arup Samanta, Le The Anh, Takeshi Mizuno, Hiroshi Mizuta, “Dopant atom devices based on Si nanostructures”,

7<sup>th</sup> International WorkShop on New Group IV Semiconductor Nanoelectronics, 2014. 1. 27, 東北大学 (宮城県・仙台市)

- ⑤ Sri Purwiyanti, Roland Nowak, Daniel Moraru, Takeshi Mizuno, Ryszard Jablonski, Djoko Hartanto, Michiharu Tabe, “Dopant-Induced Random Telegraph Signal in Nanoscale pn and pin Junctions”, The 2013 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW 2013), 2013. 6. 10, Rihga Royal Hotel (京都府・京都市)
- ⑥ (招待講演) Michiharu Tabe, “Single-dopant-atom devices: dopant observation and tunneling operation at high temperatures”, II Bilateral Italy-Japan Seminar, 2013. 4. 29, Du Lac et Du Parc Grand Resort (Riva del Garda・ITALY)

[図書] (計 1 件)

- ① Daniel Moraru, Michiharu Tabe, Springer, Toward Quantum Fin FET, Chapter 13 “Single-Electron Tunneling Transistors Utilizing Individual Dopantpotentials”, 2013, 305-324

[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/>  
静岡大学電子工学研究所  
<http://www.rie.shizuoka.ac.jp/>  
静岡大学電子工学研究所田部研究室  
<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