

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008~2011

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. 研究計画の概要

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、シリコン単電子デバイスに関する我々の最近の成果(基盤研究Sによる)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。

### 2. 研究の進捗状況

H20~22年度の間、上記目的に向けて以下の成果を得た。

#### (1)チャンネル形状と単電子転送機能

Pドープ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以前に報告した。今回、少数個のPドナーによる3ドット系FETに対して、 $V_{bg}$ により接合容量のばらつき(クーロンダイヤモンドの重なりに対応)を調節して単電子転送機能を実現した。さらに、シミュレーションにより、回路パラメータのばらつきの効果を詳しく調べた。

また、チャン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。その結果、チャン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。(PRL(2010))

#### (2)PとB同時ドーピング

個々のドーパントのポテンシャル井戸は40meV前後と浅いため、PとBの同時ドーピングによって井戸深さを実効的に高める方法を提案している。これまでに、PとBのドーピング順序に依存してチャンネル深さ方向の分布が大きく変わることを見出した。これは、PとBの複合体の可能性を示している。

また、BとPの共存系の予備実験としてナノワイヤ状pn接合を作製し、ワイヤ径が小さいと室温でもBとPの共存系であるpn接合領域の性質によりランダムテレグラフノイズが現れることを見出し、デバイス動作温度の高温化へのワンステップとなった。

#### (3)低温KFMによるドーパントの観測

低温KFMによるチャン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、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。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。

### 3. 現在までの達成度

#### ①当初の計画以上に進展している。

上記の研究成果の中で、特に多数のドナーの下でも、単一ドナーが特性を決めることの発見、および低温KFMによる単一ドーパントの観測と電子充填の観測は、大きな研究上のブレークスルーだと考える。

#### 4. 今後の研究の推進方策

以上の結果を発展させて、今後は

- (1) リンドナーを介した単電子輸送特性を、100K から室温に至る高温領域で観察することを目標とする。これは、ナノサイズのチャンネルでは、ドナー準位が誘電体閉じ込め効果のために 100meV を超えて深くなる、という最近の文献や我々の低温での実験結果からの知見を基にしたものである。これを用いて、高温領域での単電子転送動作へと展開する。
- (2) p n ナノワイヤの電気的特性をさらに詳しく調べて、B と P の共存系がもつポテンシャル分布の揺らぎ（すなわち大きなポテンシャル凹凸の有無）について明らかにする。これは、以下の(3)に示す KFM 観測によるポテンシャル形状の結果により、確認する。
- (3) KFM により、p n 接合領域近辺のポテンシャル分布を詳しく調べ、リンとボロン共存系のドーパントポテンシャルの観測を行う。さらに、以上を総合して、ドーパントポテンシャルを用いた単電子転送デバイスの総合的な設計指針を得る。

#### 5. 代表的な研究成果

(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 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. 97, pp.262101-1-3 (2010) 査読有.
- ② 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. 108, pp.053710-1-5 (2010) 査読有.
- ③ 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., Vol.105, pp.016803-1-4 (2010) 査読有.
- 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., Vol.2, no.7, pp.071201 (2009) 査読有.
- ⑤ 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., Vol. 93, pp.142101 (2008) 査読有.

[学会発表] (計 9 4 件)

- ① (Invited) M. Tabe, "Si Single Dopant Devices", The Int. Symp. on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2011), Atsugi (2011.1.12).
- ② (Invited) M. Tabe, "Observation of individual dopants in Si channel by Low-Temperature KFM", 18th Int. Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM18), Atagawa (2010.12.11).
- ③ (Invited) M. Tabe, "Single dopant devices: Single-electron transport through single-dopants", ITRS Deterministic Doping Workshop 2, USA (2010.11.12).
- ④ (Invited) M. Tabe, "Si single-dopant devices and their characterization", 2010 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2010), Tokyo (2010.7.1).
- ⑤ (Invited) M. Tabe, "Single-photon detection by Si single-electron FETs", European MRS (E-MRS) Symp. J: Silicon-based nanophotonics, France (2010.6.8).

[図書] (計 2 件)

- ① 田部道晴, D. Moraru, 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, 分担執筆.
- ② 田部道晴, オーム社, 電子情報通信学会「知識ベース」, S2 群 ナノ・量子・バイオ-2 編ナノエレクトロニクス-第 1 章「シリコンナノエレクトロニクス」(2010), 分担執筆.

[その他]

新聞掲載

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)

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/>