

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） Control of transport in nano-multi-junctions and new functional devices

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：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. 研究計画の概要

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、ポストスケールリングへの展開を図ることを目的とする。特に多重トンネル接合をチャンネルとする SOI-FET をデバイスの基本構造として、

- (1) フォトンによる単電子電流の制御、
- (2) ランダム多重接合系の単電子転送と極低温 KFM によるデバイス動作状態の可視化、
- (3) 人工転位網を用いたナノドット形成法の確立

を目指すものである。

2. 研究の進捗状況

(1) フォトンによる単電子電流の制御

SOI 基板の上層に形成された多重トンネル接合型単正孔トランジスタ (SHT) の電流をモニターしていると、下地基板の素電荷程度の帯電に感受性があることを見出した (APL2007)。このことは、下地基板で吸収される光に対してもフォトン感度で検出できる可能性を示している。実際、光を照射すると、p-Si 基板中で生成された光励起電子の影響で、SHT 電流の増加が見られ、やがて飽和状態に達するが、この飽和状態では、SHT 電流はランダムテレグラフ状の時間変動をする (MRS2008 Proceedings)。これは基板で吸収された光に対してフォトン感受性があることを示すものである。

(2) ランダム系の単電子転送と KFM 観察

個々のドーパント原子を量子ドットとするランダム配置型多重トンネル接合においても、ゲートに高周波バイアスを印加すると

ゲートバイアス 1 サイクルあたり電子が 1 個転送できる場合が極めて高い確率で存在することを実証した (PRB2007)。さらに詳しく解析したところ、3 ドット FET で中央ドットが最大であれば、構造揺らぎによらず必ず単電子転送が実現できることを発見した (JJAP2009)。今後のデバイス設計に重要な指針を与えるものである。

また、上記のようなドーパントポテンシャルを利用した多重接合単電子（単正孔）FET の研究を実験的に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の配置とそのポテンシャル形状を測定することが必要となる。チャンネル中の個々のドーパントポテンシャルの観測を目的として極低温ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KFM) を立ち上げ、個々の P および B のポテンシャル測定に成功した。Si 中の個々のドーパントイオンの検出は、これまでも STM によって実現されているが、STM は針と試料表面との間のトンネル電流測定であるため、最表面近傍に限定され、チャンネル内部のドーパントを検出することやデバイス動作時の測定は原理的に困難であった。一方、KFM は原理的にクーロン力を遠隔状態で測定できるため、その適用範囲は極めて大きい。

(3) 人工転位網を用いたナノドット形成法

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。このため、転位網をチャンネル部とする FET の基本

特性の評価を行った。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 (APL2006)。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。
(理由)

上述のように、3 つの項目に対して、それぞれ一定の成果が得られた。極低温 KFM によるデバイス動作状態での単一ドープメントの観測は世界的に見ても初めての報告であり、次の段階である「単電子輸送過程の可視化」に向けて大きなステップとなるものである。細部では、やや遅れているものと進んでいるものが混在しているため、上記の自己評価とした。

4. 今後の研究の推進方策

今後は、特に以下の諸点を中心に研究を行う。

(1) フォトンによる単電子電流の制御
予想以上に進展している極低温 KFM を用いて、光照射による単電子輸送過程の変化を捉える試みを行う。

(2) ランダム系の単電子転送と KFM 観察
ランダム系の中でも、特に 3 ドット系に焦点を当てて、ドープメントポテンシャルを利用したデバイスの作製を行う。また極低温 KFM で、単電子輸送過程の観測を試みる。

(3) 人工転位網を用いたナノドット形成法
今後、デバイス特性をポテンシャルなどの物性測定と併せて解明していく。

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 13 件)

- ① 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).
- ② Z. A. Burhanudin, R. Nuryadi and M. Tabe, "Detection of field-induced single-acceptor ionization in Si by single-hole tunneling transistor", Appl. Phys. Lett. Vol.91, 査読有, No.4, pp.042103-1-3 (2007).
- ③ D. Moraru, Y. Ono, H. Inokawa and M. Tabe, "Quantized electron transfer

through random multiple tunnel junctions in phosphorous-doped silicon nanowires", Phys. Rev. B, 査読有, Vol.76, no.7, pp. 075332-1-5 (2007).

[学会発表] (計 93 件)

- ① (Invited) M. Tabe, Zainal A. Burhanudin, Ratno Nuryadi, Daniel Moraru, Maciej Ligowski, Ryszard Jablonski and Takeshi Mizuno, "Si Single-Electron SOI-MOSFETs: Interplay with Individual Dopants and Photons", MRS fall meeting 2008, Boston·MA, December 1-5, 2008.

[図書] (計 2 件)

- ① 田部道晴: シリコンフォトニクスー先端光テクノロジーの新展開ー: 金光義彦・深津 晋 [共編]、第 4 章「受光素子」 pp.119-154、オーム社 (2007).
- ② M. Tabe, H. Ikeda and Y. Ishikawa, "Resonant tunneling in Si nanodevices", Silicon Nanoelectronics, pp. 133-154, Eds: D. Ferry and S. Oda, CRC Press (2006).

[その他]

新聞掲載

- ① 田部道晴: 集積回路 原子の「ムラ」検査ー静岡大、微細化促す新技術 日経産業新聞 (2008. 10. 2)
- ② 田部道晴: 第 20 回 (平成 18 年度)「高柳記念賞」受賞が新聞に掲載される。中日新聞、静岡新聞 (2006. 12. 10)

ホームページ

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>