

## シリコン単電子デバイスの時空間輸送制御と新機能の開発

Silicon single-electron devices: Time-space control of transport and development of new functions

田部 道晴 (TABE Michiharu)  
静岡大学・電子工学研究所・教授



### 研究の概要

本研究は、ランダム系シリコン多重ドット単電子デバイスの輸送制御を目指すものであり、これまでの「統計的電子集団のマクロ輸送制御」からナノ領域で予想される大きな揺らぎに耐性をもつ「個々の電子の時間的・空間的輸送制御」に見通しをつけることを目的とする。

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、マイクロ・ナノデバイス、量子ドット、トンネル現象

### 1. 研究開始当初の背景

(1) Si-MOSFETの微細化限界が到来しつつあり、超低消費電力と揺らぎ耐性のあるデバイス開発が待たれる。

(2) Si多重ドット単電子デバイスは、単電子輸送制御の大きな発展が期待でき、消費電力や揺らぎ耐性の点でも有利である。

### 2. 研究の目的

(1) Si多重ドット単電子デバイスを対象とし、高周波ゲート印加やフォトン照射による単電子輸送制御の可能性を追究する。

(2) 新しい多重ドット・多重トンネル接合形成法を開発する。

(3) チャンネル中の素電荷（シングル・ドーパントや単電子）の位置と電位を直接検出し、デバイス研究に資する。

以上を総合し、揺らぎに強く、低消費電力のシリコンナノデバイスの開拓を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 選択酸化による凹凸型多重ドット、ドーパントポテンシャルによる多重ドット、転位網による多重ドットを対象とする。

(2) 高周波ゲートによるランダム多重ドット系の単電子転送可能性を、実験とシミュレーションで調べる。

(3) 極低温 KFM を購入し、チャンネル中のドーパントのポテンシャル分布や単電子の移動過程を観測し、単電子輸送過程の研究における主要なツールとして利用する。

### 4. 研究の主な成果

(1) ランダム多重トンネル接合系における単電子転送の実験的検証 (PRB(2007)) (図1)

PをドーピングしたSiナノワイヤFETを製作して  $I_d-V_g$  特性を測定したところ、P原子を量子ドットとする単電子特性が得られ、かつ高周波ゲート印加時に単子転送を示す電流プラトーが見られることを実証した。

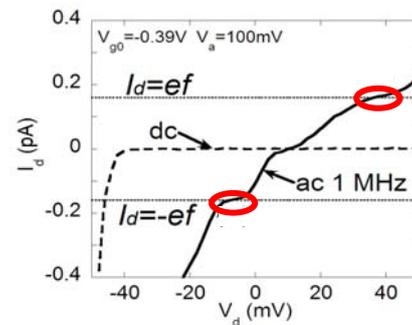


図1. ランダム接合系における単電子転送の観測。  $I_d=ef$  でのプラトーが単電子転送に対応。

(2) マルチドット型単電子 FET による可視域光子の検出 (PRB (2006)) (図2)

マルチドット型単電子 FET に対する光照射効果は、期待以上の大きな進展があり、単光子の検出に成功した。本来、単電子 FET は現在考える最高の感度を持つ超高感度電位計であるため、電流経路の近傍に発生した

〔4. 研究の主な成果 (続き)〕

たった1個の光誘起電荷によってソース・ドレイン間電流が変調を受ける。Siで単光子吸収の効果を明瞭に示したのは本報告が初めてである。

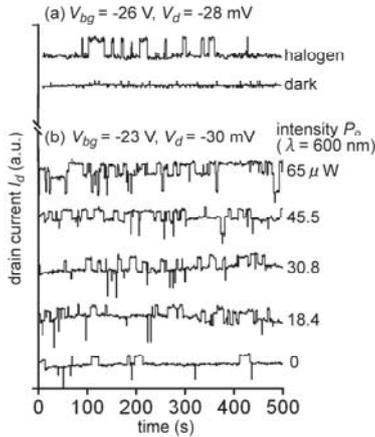


図2. 多重ドットランダム接合 FET に波長 600nm の光を照射したときの、光子吸収に対応する電流変動。

(3) 単一リン・ボロンドーパントの電位の検出 (APL (2008))

Siチャンネル中のリンは通常電子を放出して正に帯電する。基板裏面に負バイアスをかけてチャンネルを空乏化した状態で極低温で表面電位分布を測定したところ、個々のリンドーパントが作る電位分布を測定することに成功した。一方、ボロンについても測定に成功し、ドナー、アクセプター両者について検出することができた。これは、実デバイス中のドーパント電位を1個レベルで検出した初めての実験である。

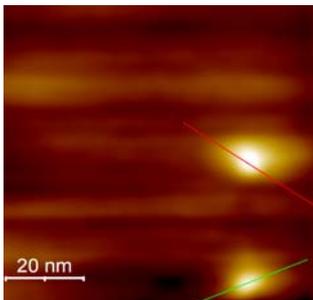


図3. Si中の単一ボロン原子の観察 (@13K)

以上の成果は、総合して与えられた自然の揺らぎの下で、単電子転送を単一ドーパントレベルで制御できることを示したもので、ランダム系利用への一歩と考える。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

多重ドット系では、配置や数に揺らぎがあっても、単電子転送機能を有することを明らかにし、さらに、ドット数を制御する手法を提案・実証した。これはナノ領域の精密プロセスと自然揺らぎとの調和をもたらす考え方であり、世界的にも例がない。また、並行して極低温 KFM という素電荷観察手法を立ち上げ、チャンネル内のドーパント原子1個を観測した。今後デバイス開発にとって大変重要なツールとなるものである。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字、研究分担者は二重下線、連携研究者は一重下線)

- 1) K. Yokoi, D. Moraru, M. Ligowski and **M. Tabe**, "Single-Gated Single-Electron Transfer in Nonuniform Arrays of Quantum Dots", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.48, pp.024503-1-7 (2009).
- 2) 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, No.14, pp.142101-1-3 (2008).
- 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, Vol.76, no.7, pp. 075332-1-5 (2007).
- 4) 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, No.4, pp.042103-1-3 (2007).
- 5) H. Ikeda and **M. Tabe**, "Numerical study of turnstile operation in random-multidot-channel field-effect transistor", Journal of Applied Physics 99, pp.073705-1-6 (2006).
- 6) Y. Ishikawa, C. Yamamoto and **M. Tabe**, "Single-electron tunneling in a silicon-on-insulator layer embedding an artificial dislocation network", Appl. Phys. Lett. Vol.88, pp.073112-1-3 (2006).
- 7) R. Nuryadi, Y. Ishikawa and **M. Tabe**, "Single-photon-induced random telegraph signal in a two-dimensional multiple-tunnel-junction array", Phys. Rev. B 73, pp.045310-1-7 (2006).

ホームページ等

<http://www.rie.shizuoka.ac.jp/index.html>  
<http://www.rie.shizuoka.ac.jp/~nanohome>