

## シリコンナノ構造を基盤としたドーパント原子デバイスの開発 Development of dopant atom devices based on silicon nanostructures

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、半世紀以上にわたってシリコンテクノロジーを支えてきたドーパントの概念を一新し、個々のドーパント原子を利用した**ドーパント原子デバイスの開発**を目指すものである。

1個のドーパント原子を用いたトランジスタを基本とし、さらに2個～数個を利用したメモリ、単電子転送デバイス、フォトニックデバイスなどドーパント原子デバイス群の基盤を構築する。

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：電子デバイス・集積回路

### 1. 研究開始当初の背景

シリコンテクノロジーは、トランジスタの発明以来ドーパント不純物原子を利用して発展してきた。しかし、素子の微細化に伴い、チャンネル中のドーパント原子の個数が減少して配置による特性ばらつき（ドーパント揺らぎの問題）が顕在化してきている。一方、全く別の「原子」の視点からの研究として、単ドーパント原子による低温トンネル特性が、我々を含むいくつかのグループによって報告され始めており、原子デバイスの扉が開かれつつある。

### 2. 研究の目的

本研究計画は、このような状況下で1個のドーパント原子を用いたトランジスタを基本とし、さらに2個～数個を利用したドーパント原子デバイスを開発し、新しい学術・技術基盤の構築を目指すものである。すなわち、Siナノ構造中にドーパント原子1個～数個を埋め込んでトンネル型電子輸送を制御し、究極の小型・低消費電力デバイス群を開発する。ドーパントは大きさの揃った極小量子ドットとみなされ、また、複数個のドーパントを組み合わせれば輸送キャリア数も1個単位で制御できるという従来デバイスにはない特長を備えている。

### 3. 研究の方法

本研究計画では、デバイス、第一原理計算、ドーパント原子の検出・評価、高精度ドーピ

ングの各要素研究を総合的に進めていくが、デバイスでは、特にドーパント原子 FET の開発を重点目標とする。期間前半は主に低温での原理実証を、後半はドーパントの複合化やナノチャンネル形状効果を駆使して動作温度の高温化・室温化を図る。本研究は、研究代表者（田部（静大））と3名の研究分担者（小野（富山大）、品田（産総研）、水田（北陸先端大/サザンプトン大））の各グループの密接な連携の下で進めている。

### 4. これまでの成果

#### (1) ドーパント原子 FET :

従来の報告では、ナノ MOSFET において、リンドナー原子を介したトンネル電流はドナー準位が 45meV と浅いために、20K までの低温での観測に限られていた。しかし、誘電・量子閉じ込め効果を利用すれば、チャンネルの微小化と形状の工夫により、ドナー準位を深くすることができ、より高温でのトンネル輸送が可能となると考えられる。実際、チャンネル中央部に出っ張りをもたせたスタブ型チャンネル FET を作製した。その結果、スタブ部にあるリン原子を介したトンネル輸送が 100K 以上で観測されることを見出した (PRB(2013) : 応物学会シリコンテクノロジー分科会論文賞受賞)。この結果は誘電閉じ込め効果によるドナー準位のディープ化を初めてデバイス特性として示したものであって、室温動作へ向けた重要な一歩である。また、研究分担者品田らは、独自技術であ

るシングルイオン注入法を用いてヒ素を少数個アレイ状に注入し、個数に応じた特徴的な  $I_d-V_G$  特性を低温で得た (**Nature Nano (2012)**)。まだ配列の精度は改善の余地があるが、極限技術としての可能性を示したものである。

#### (2) 横型ナノ pn 接合ダイオード :

FET型デバイスに限らず、pn接合ダイオードも微細化していくと接合部のドーパント数は減少して個々のドーパント原子の影響が顕在化してくる。しかし、このようなナノ pn 接合の物理はほとんど未解明であった。我々は、断面が 10nm オーダーのナノ pn 接合ダイオードを作製し、順方向電流のバイアス依存性を詳しく調べたところ、空乏層端近傍の 1 個のドーパントが充放電を繰り返すことによってランダムテレグラフ信号 (RTS) が現れることを見出し、ダイオードにおけるドーパント原子の影響を初めて報告した (**APL (2013)**)。さらにこのドーパントの充放電現象は、ケルビンプローブフォース顕微鏡 (KFM) による局所電位変動によって、より直接的に証明することができた (**APL (2013)**)。

#### (3) ドーパント原子検出・評価技術 :

極低温ケルビンプローブフォース顕微鏡 (LT-KFM) を用いて、P ドナーポテンシャルとその単電子の注入による変化を調べた。その結果、低温では電子が 1 個ずつ各 P ドナーにトラップされて、ポテンシャル井戸が順次消失することを見出した (**APL (2011)**)。これは、デバイス動作原理の基盤となる結果である。さらに、横型ナノ pn ダイオードのポテンシャル分布を測定したところ、ドーパントの充放電によるポテンシャル揺らぎが空乏層領域において、ゼロバイアスの状態でも観測され、pn 接合部ではキャリア捕獲と放出が定常的に生じていることを初めて直接観察した (**APL (2013)**)。

#### 5. 今後の計画

研究を牽引するデバイスとして、これまで同様ドーパント原子 FET を中心に研究を進め、その室温動作を目指す。その際、以下の 2 つの深い量子井戸形成方法を融合して進める。すなわち、①チャンネル形状の工夫による誘電・量子閉じ込め効果の利用と②ナノ領域選択ドーピング、である。特に②については、将来への展開を見据えて、ナノスケールの極微細孔 EB マスクを用いた熱拡散法を第一に、シングルイオン注入法も並行して検討する。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

##### 主要な発表論文

- 1) S. Purwiyanti, R. Nowak, D. Moraru, T. Mizuno, D. Hartanto, R. Jablonski, and M. Tabe, “Dopant-induced random telegraph signal in nanoscale lateral

silicon pn diodes at low temperatures”, *Appl. Phys. Lett.*, 103, pp.243102-1-4 (2013).

- 2) R. Nowak, D. Moraru, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, “Effects of deep-level dopants on the electronic potential of thin Si pn junctions observed by Kelvin probe force microscope”, *Appl. Phys. Lett.* 102, pp. 083109-1-4 (2013).
- 3) E. Hamid, D. Moraru, Y. Kuzuya, T. Mizuno, L. T. Anh, H. Mizuta, and M. Tabe, “Electron-tunneling operation of single-donor-atom transistors at elevated temperatures”, *Phys. Rev. B* 87, pp. 085420-1-5 (2013). (第 5 回応物学会シリコンテク分科会「論文賞」受賞)
- 4) M. Hori, K. Taira, A. Komatsubara, K. Kumagai, Y. Ono, T. Tanii, T. Endoh, T. Shinada, “Reduction of threshold voltage fluctuation in field-effect transistors by controlling individual dopant position”, *Appl. Phys. Lett.* 101, pp. 013503-1-3 (2012).
- 5) E. Prati, T. Shinada, et al., “Anderson-Mott transition in arrays of a few dopant atoms in a silicon transistor”, *Nature Nanotechnology*, 7, 443-447 (2012).
- 6) M. Anwar, R. Nowak, D. Moraru, A. Udhiarto, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, “Effect of electron injection into phosphorus donors in silicon-on-insulator channel observed by Kelvin probe force microscope”, *Appl. Phys. Lett.* 99, pp.213101-1-3 (2011).
- 7) A. Udhiarto, D. Moraru, T. Mizuno, and M. Tabe, “Trapping of a photoexcited electron by a donor in nanometer-scale phosphorus-doped silicon-on-insulator field-effect transistors”, *Appl. Phys. Lett.* 99, pp.113108-1-3 (2011).

##### 主な受賞

- 1) 田部道晴、他：第 5 回応物学会シリコンテクノ分科会「論文賞」受賞 (2013)。
- 2) 特任助教 D. Moraru : IUMRS-ICEM2012, Young Scientist Awards: Gold Award.
- 3) 田部道晴 : 平成 24 年度文科大臣表彰。

##### ホームページ等

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