

課題番号 P-5

フォトニクス応用に向けたドーパント原子デバイス

[1] 組織

代表者：品田 賢宏
(早稲田大学)

対応者：田部 道晴
(静岡大学電子工学研究所)

分担者：

水田 博 (北陸先端科学技術大学院大学)
土屋 良重 (サザンプトン大学)
小野 行徳 (NTT・物性科学基礎研究所)
ダニエル モラル (静岡大学電子工学研究所)
堀 匡寛 (早稲田大学)
小松原 彰 (早稲田大学)
熊谷 国憲 (早稲田大学)
坂口 雄紀 (早稲田大学)

[2] 研究経過

シリコン中のドーパント原子1個を利用したまったく新しい動作原理で動作するドーパント原子デバイスの光応用を目的とし、そのデバイス物理、作製プロセス、および評価技術の基礎的研究を行うことを目的とする。プロセス、デバイス、第一原理計算、などそれぞれ得意とする分野が異なる研究者が協力し合い、学際異分野融合により研究を推進する。

以下、研究活動状況の概要を記す。

共同研究は、上記構成メンバーが随時学会・研究会の機会を得て討論を行い、実施しているが、特に重要なミーティングは、次の3件である。

(i) 2011.7.16 本年度第1回共同研究プロジェクト研究会を行った。品田は単一イオン注入プロセスを用いた1nm制度への挑戦についてその可能性と途中経過について、田部はドーパント原子デバイスの高温度動作の可能性について、小野は単一ドーパントの分析手法について、水田は単一ドーパントのシミュレーションについて述べた。

(ii) 2011.11.29 第2回共同研究プロジェクト研究会を行った。品田グループからはシングルイオン注入の制御性向上およびダイヤモンドや生体応用について、田部グループからはケルビンプローブ顕微鏡で

のドナー原子への電子トラップなどについて報告があった。

(iii) 2011.11.10 ナノエレクトロニクスワークショップ「単一原子制御」が、早稲田大学とイタリア大使館共催で行われた。品田、田部、小野、水田が各々成果を発表し、イタリアの研究者と討論を行った。

[3] 成果

(3-1) 研究成果

本年度は、以下に示す研究成果を得た。

(1) 品田 (早大) は、独自に開発してきたシングルドーパントイオン注入技術の制御性をさらに向上させ、その応用例のひとつとしてチャンネル中の規則配列ドーパントによる低温での特徴的なコンダクタンス特性を示した。

(2) 田部 (静大) は、シングルドーパントデバイスの研究、特にフォトン照射下で観測されるランダムテレグラフシグナルを解析し、ドナー原子によるフォトン誘起電子のトラップによるものであることを示した。さらに、ドーパントのポテンシャル検出技術 (KFM) に関してドナーイオンへの電子の注入を観測した。

(3) 水田 (JAIST, サザンプトン大学) は、第一原理計算でドーパント、特にSiナノチャンネル中の1個のリンドナーの電子状態を調べ、イオン化エネルギーがバルクSi中の場合よりはるかに大きいこと、またドナーの基底状態が $\langle 110 \rangle$ 等価方向に長く伸びていることを明らかにした。

(4) 小野 (NTT) は、電子スピン共鳴法 (ESR) を用いてドナーのスピンを観察する試みを行っておりSiのごく表面に近い場所にイオン注入したドーパントの活性化率を調べた。

以上の成果は、本プロジェクト構成メンバーのさまざまな組み合わせによる共同研究として行った結果である。

(3-2) 波及効果と発展性など

(大型プロジェクトへの発展・国際会議 (シンポジウム) への発展・学外研究者との交流、共同研究による効果・研究者ネットワークの拡大・若手研究者の育成・新研究領域の開拓・成果の他分野への応用・

萌芽的研究への発展等)

本プロジェクトは、シリコンテクノロジーの革新を目指した極めて独創的なものであり、ドーパント原子1個1個のポテンシャルを利用して動作するデバイスを開拓することを目的に、学外研究者と協力し合って多面的に研究を進めているものである。2012年1月になって、ITRS (国際半導体テクノロジーロードマップ) 2011年度版が公開され、初めてシングルドーパント技術が「新規技術」に正式に取り上げられた。本プロジェクトのメンバーによる論文も5件以上「重要論文」として取り上げられている。ITRSは世界の半導体研究者やエレクトロニクス関連企業が参考とするものであり、インパクトは大きい。

[4] 成果資料

- (1) M. Hori, T. Shinada, Y. Ono, A. Komatsubara, K. Kumagai, T. Tanii, T. Endoh, I. Ohdomari, “Impact of a few Dopant Positions Controlled by Deterministic Single-Ion Doping on the Transconductance of Field-Effect Transistors”, *Applied Physics Letters* **99**, 062103 (2011).
- (2) M. Hori, T. Shinada, K. Taira, A. Komatsubara, Y. Ono, T. Tanii, T. Endoh, I. Ohdomari, “Enhancing Single-ion Detection Efficiency by Applying a Substrate Bias Voltage for Deterministic Single-ion Doping”, *Applied Physics Express* **4**, 046501 (2011).
- (3) D. Moraru, A. Udhiarto, M. Anwar, R. Nowak, R. Jablonski, E. Hamid, J. C. Tarido, T. Mizuno, and M. Tabe, “Atom devices based on single dopants in silicon nanostructures”, *Nanoscale Research Letters* **6**, 479 (2011).
- (4) 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**, 113108 (2011).
- (5) M. Tabe, D. Moraru, A. Udhiarto, and T. Mizuno, 「個々のドーパント原子を利用したシリコンナノデバイス—デバイス特性とフォトンセンシング機能—」、*応用物理* **81**, 147-150 (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 microscopy”, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 213101 (2011).

出張報告

氏名：品田 賢宏

所属：早稲田大学

期間：2011年7月16日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：共同研究プロジェクトに関する研究打ち合わせならびに研究会開催による中間成果の発表・討論

主たる対応者：田部 道晴

氏名：水田 博

所属：北陸先端科学技術大学院大学

期間：2011年7月15日～16日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：共同研究プロジェクトに関する研究打ち合わせならびに研究会開催による中間成果の発表・討論

主たる対応者：田部 道晴

氏名：小野 行徳

所属：NTT・物性科学基礎研究所

期間：2011年7月15日～16日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：共同研究プロジェクトに関する研究打ち合わせならびに研究会開催による中間成果の発表・討論

主たる対応者：田部 道晴

氏名：品田 賢宏

所属：早稲田大学

期間：2011年11月29日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：共同研究プロジェクトに関する研究打ち合わせならびに研究会開催による中間成果の発表・討論

主たる対応者：田部 道晴

氏名：小野 行徳

所属：NTT・物性科学基礎研究所

期間：2011年11月29日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：共同研究プロジェクトに関する研究打ち合わせならびに研究会開催による中間成果の発表・討論

主たる対応者：田部 道晴

氏名：堀 匡寛

所属：早稲田大学

期間：2011年11月29日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：共同研究プロジェクトに関する研究打ち合わせならびに研究会開催による中間成果の発表・討論

主たる対応者：田部 道晴

氏名：小松原 彰

所属：早稲田大学

期間：2011年11月29日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：共同研究プロジェクトに関する研究打ち合わせならびに研究会開催による中間成果の発表・討論

主たる対応者：田部 道晴

氏 名：坂口 雄紀

所 属：早稲田大学

期 間：2011年11月29日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：共同研究プロジェクトに関する研究打ち合わせならびに研究会開催による中間成果の発表・討論

主たる対応者：田部 道晴

氏 名：熊谷 国憲

所 属：早稲田大学

期 間：2011年11月29日

用務先：静岡大学電子工学研究所

用務内容：共同研究プロジェクトに関する研究打ち合わせならびに研究会開催による中間成果の発表・討論

主たる対応者：田部 道晴