

P-3

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：小野 行徳

(富山大学大学院理工学研究部)

対応者：田部 道晴

(静岡大学電子工学研究所)

分担者：

品田 賢宏 (産業技術総合研究所)

水田 博 (北陸先端科学技術大学院大学)

堀 匡寛 (富山大学大学院理工学研究部)

小松原 明 (早稲田大学)

熊谷 国憲 (早稲田大学)

坂口 雄紀 (早稲田大学)

モラル ダニエル (静岡大学)

[2] 研究経過 (以下10.5ポイント)

半世紀以上にわたって進展してきたシリコンテクノロジーは、基盤となる MOSFET のチャンネル長が 30nm を切るようになり、文字通りナノ領域に入ってきている。そのような状況では、1 個のドーパント原子が FET の伝導特性を決める可能性もあり、我々はこれを積極的に利用するという視点から「ドーパント原子デバイス」と名付けて究極の小型・低消費電力デバイスとして研究を進めてきた。

本プロジェクトでは、このドーパント原子デバイス」を超高感度のフォトンセンサとして展開させることを目的として、デバイス、プロセス、評価、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ものである。

本プロジェクトは、本年度が 3 年目であった。これまで、主にトップゲートを持たない MOSFET 構造を対象にその基本的なフォトン吸収特性を調べてきた。本年度は、これまでの成果を踏まえながら、それぞれのグループの研究項目を深めるとともに、ナノ寸法の pn 接合に対する光照射効果の研究を行い、顕著な進展があった。

以下、研究活動状況の概要を記す。

(i)2012.10.6 共同研究打合せ (全グループ参加)

共同研究プロジェクトに関する研究打合せ、および中間成果の発表・討論を行った。代表者小野の挨拶のあと、品田から半導体国際ロードマップ委員会 (ITRS) での議論の動向、小野から電子スピン共鳴 (ESR) を用いたドーパントの物性評価、水田からドーパントの第一原理計算、田部からドーパント

FET の高温動作とナノ pn 接合の光照射効果について報告があり、議論を深めた。

(ii)2013.1.31 ITRS ERM Workshop

米国バークレーで開催された招待講演ベースの権威ある研究会であり、ドーパントの制御・評価・デバイス応用についてオーガナイザとして品田が、招待講演者としてモラル・ダニエルが参加した。

[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。

まず第 1 に、SOI 基板を用いて作製した Si ナノ pn ダイオードによるフォトン検出機能を実証した。すなわち、Si ナノ pn ダイオード可視光を照射したところ、低温での I-V 特性に顕著なランダムテレグラフシグナル (RTS) が現れた。これは、信号の解析と第一原理計算から、B-P 複合体による光誘起キャリアのトラップによることを示した (APEX(2012))。

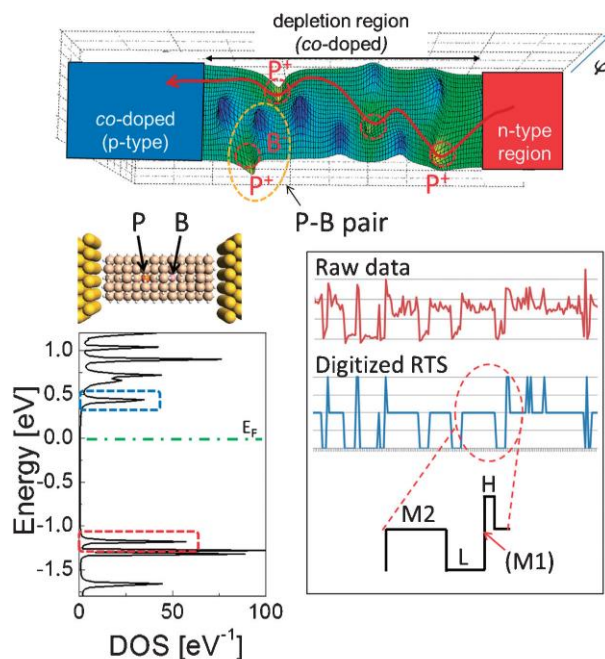


図 1. ナノ pn 接合の光誘起 RTS と電子をトラップする B-P 複合体モデル (APEX(2012))

第 2 に、ドーパント原子デバイスの室温動作を目指した研究が進展した。チャンネル形状の工夫により、ドナーレベルをバルクの値より大きく (深く) することができて、高温までドナー原子を介したトンネ

ル伝導が観測できることを示した (PRB(2013))。これは、室温動作の原子レベルフォトン検出器への可能性を示す成果である。

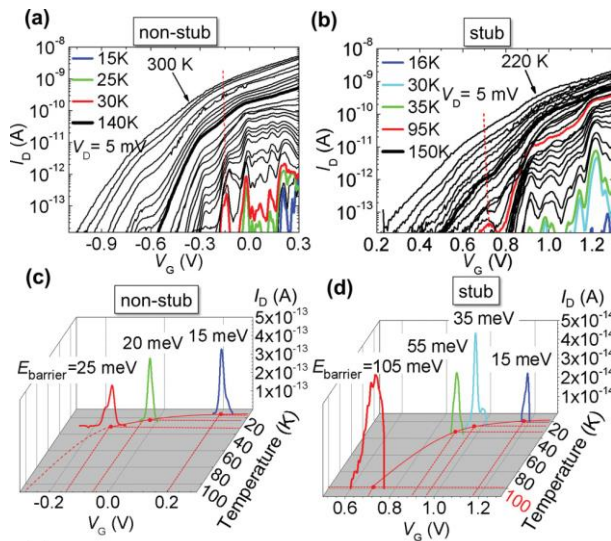


図2. スタブ型とノンスタブ型の2つのチャネル形状をもつ、ドーパント原子 MOSFET の I_D - V_G 特性とその温度依存性。スタブ型は高温 (100K) でもトンネル動作することを見出した (PRB(2013))。

(3-2) 波及効果と発展性など

本プロジェクトは、上述のように半導体国際ロードマップ委員会 (ITRS) で評価され、2013.1.31 のワークショップに招待された。これに関連して、イタリア国立研究所所属の Enrico Prati 博士と本プロジェクトの品田が主体となって 2013 年 4 月にイタリアで新しいエレクトロニクス・フォトニクスをテーマにした国際会議が催されることとなり、本プロジェクトの関係者はほぼ全員が招待講演をすることとなった。

また、ナノ p n 接合の光照射効果は、インドネシア大学の Djoko Hartanto 教授との共同研究に発展しており、2013 年 6 月にインドネシアで国際会議が催され、本プロジェクトから田部が招待講演をする予定である。

[4] 成果資料

- (1) R. Nowak, M. Anwar, D. Moraru, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. Tabe, "Electron filling in phosphorus donors embedded in silicon nanostructures observed by KFM technique", *J. Adv. Res. Phys.*, Vol. 3, No. 2, pp. 021202-1-3 (2012).
- (2) A. Udhiarto, D. Moraru, S. Purwiyanti, Y. Kuzuya, T. Mizuno, H. Mizuta, and M. Tabe, "Photon-Induced Random Telegraph Signal Due to Potential Fluctuation of a Single Donor-Acceptor Pair in Nanoscale Si p-n Junctions", *Appl. Phys. Express*, Vol. 5, No. 11, pp. 112201-1-3 (2012).
- (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, 085420-1-5 (2013).
- (4) 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, 083109-1-4 (2013).
- (5) E. Prati, M. Hori, F. Guagliardo, G. Ferrari and T. Shinada, "Anderson-Mott transition in arrays of a few dopant atoms in a silicon transistor", *Nature Nanotechnology* 7, 443-447 (2012).
- (6) M. Hori, K. Taira, A. Komatsubara, K. Kumagai, Y. Ono, T. Tanii and T. Shinada, "Reduction of threshold voltage fluctuation in field-effect transistors by controlling individual dopant position", *Appl. Phys. Lett.* 101, 013503 (2012).

出張報告

氏名：小野 行徳
所属：富山大学大学院理工学研究部
期間：2012年10月6日（土）
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
打ち合わせを行った。
主たる対応者：田部 道晴

氏名：品田 賢宏
所属：産業技術総合研究所
期間：2012年10月6日（土）
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
打ち合わせを行った。
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：2012年10月6日（土）
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
打ち合わせを行った。
主たる対応者：田部 道晴

氏名：堀 匡寛
所属：富山大学大学院理工学研究部
期間：2012年10月6日（土）
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
打ち合わせを行った。
主たる対応者：田部 道晴