

シリコンナノ p n 接合とその光応答

[1] 組織

代表者：水田 博

(北陸先端科学技術大学院大学／サザンプトン大学)

対応者：田部 道晴

(静岡大学 電子工学研究所)

分担者：

小野 行徳 (国立大学法人 富山大学)

堀 匡寛 (国立大学法人 富山大学)

品田 賢宏 (東北大学)

谷井 孝至 (早稲田大学)

Manoharan Muruganathan

(北陸先端科学技術大学院大学)

Le The Anh

(北陸先端科学技術大学院大学)

鈴木 俊英

(北陸先端科学技術大学院大学)

モラル ダニエル (静岡大学)

[2] 研究経過

近年、集積回路、太陽電池、センサーなどの幅広い分野で、シリコンナノワイヤなどの微小な構造中の p n 接合を利用する試みが盛んである。このようなナノ p n 接合はマクロな p n 接合とは異なり、関与するドーパントの個数が少なくなるとともにドーパントのエネルギーレベルが深くなるという特筆すべき特徴が予想されるが、これまでその基本的性質についてはほとんど調べられてはいない。

本研究では、超高感度イメージングデバイスへの応用を目指して、横型のシリコンナノ p n 接合および p i n 接合を作製するとともに、ドーパント原子の個別性が電氣的、物理的特性に与える効果を明らかにすることを第一の目的とする。さらに、その次の段階で、光照射の効果、特にフォトン感受性を明らかにする。

以下、研究活動状況の概要を記す。

第1回研究会の開催

「シリコンナノ p n 接合とその光応答」

開催日：平成26年10月15日

開催の趣旨：

本研究会は、ドーパント原子の個別性に基づく物性を中心に、関連する少数個のチャンネル中の欠陥、およびさらに広範なナノデバイスの研究状況などについて最新の成果を持ち寄り、発表・討論することを目的として開催した。

研究会の成果：

JAIST 水田 G から、シングルドーパントの電子状態について第一原理計算による結果が詳しく報告された。特に、P と B が近接して共存する系の電子状態 (未発表) は、ナノ p n 接合の性質を決める重要な物理であるとの共通理解が得られた。さらに、最近その重要性が高まっている RF-SET やグラフェンデバイスの研究状況について報告があった。

イタリア国立研究所の Enrico Prati 博士は、非メンバーであるが、この時期に日本に滞在しており本研究会に参加して研究発表をしていただいた。東北大学品田 G との共同研究でシングルイオン注入によって作製した一次元ドーパント列からなるチャンネルの伝導特性について詳しい報告があった。

静大田部 G からは、少数個の P ドナーをチャンネル中にドーピングしたナノ MOSFET の特性と、比較的高濃度のナノ p n ダイオードの階段型 I-V 特性、および P ドナーの高濃度ドーピング領域の電位分布観察について報告があった。

富山大小野 G からは、チャージポンピング法によるチャンネル中の少数個の欠陥への (からの) 電荷の出し入れのダイナミクスが報告された。

早大谷井 G からは、シングルイオン注入を用いた蛍光評価、特にダイヤモンド中の Si-空孔欠陥について詳しい報告があった。

以上、さまざまな観点から少数個ドーパントの性質が解明されつつあることが確認でき、今後の研究遂行にあたってきわめて有益であった。

第2回研究会の開催

「シリコンナノ p n 接合とその光応答」

開催日：平成 27 年 1 月 9 日

開催の趣旨：

本研究会は前回よりもテーマを絞って、ナノシリコン中のドナー、アクセプター共存状態を中心に最新の結果を持ち寄り、発表・討論することを目的として開催した。

研究会の成果：

JAIST 水田 G から、前回よりもさらに詳しく P と B がそれぞれクラスター化して共存するナノシリコン系の電子状態と電気伝導特性の第一原理計算の研究状況について報告があった。

静大田部 G からは、きわめて高濃度のナノ pn ダイオードの I-V 特性について報告があった。

両者の報告の中で、pn 接合の空乏層中に存在するドーパントが、共鳴現象を引き起こしコンダクタンスのピークを形成することの重要性が共通して認識され、きわめて有意義な研究会となった。

[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。

図1にあるようなナノスケールのエサキトンネルダイオードを作製した。

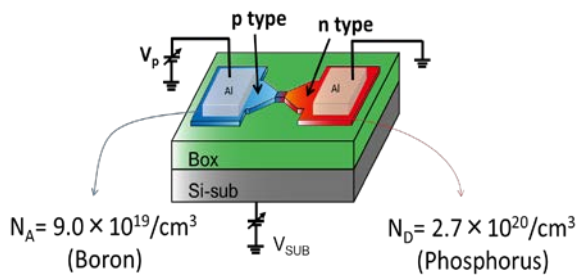


図1. 作製した高濃度ナノ pn 接合ダイオード (ナノエサキトンネルダイオード)。接合部の縦方向の厚さは約 5nm であり、2D 構造をしている。

その I-V 特性は、図2に示すように典型的な負性微分コンダクタンス (NDC) が低温域では観測される。温度の上昇とともにエクセス電流成分が増えて NDC は見えなくなる。しかし、このようなありきたりの特性だけでなく、いくつかのダイオードで図3のような特異な電流ピークをもった特性が観測される。これはごく最近得られた結果であって、pn 接合部に生じた巨大なポテンシャル揺らぎがこの電

流ピークの原因と考えて現在解析を進め、投稿準備を行っている段階である。

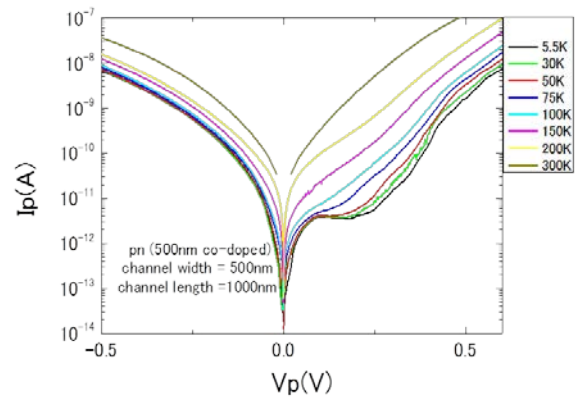


図2. 作製した高濃度ナノ pn 接合ダイオードの順、および逆方向特性の温度依存性。

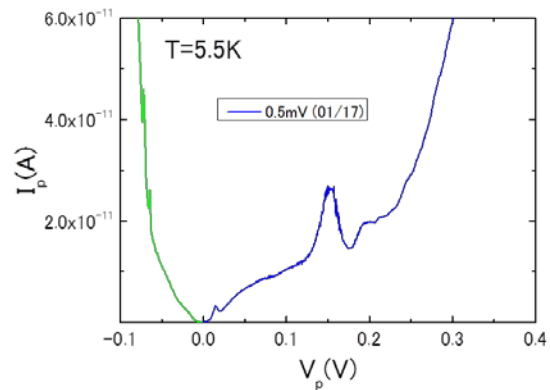


図3. いくつかのダイオードで観測される電流ピーク付き I-V 特性。

(3-2) 波及効果と発展性など

本研究は、水田 G による第一原理計算と田部 G によるデバイス試作・評価が中心であって、緊密に連携して成果を上げてきている。また、小野 G は個別欠陥の実時間チャージポンピング法による解析手法を立ち上げつつあり、品田・谷井 G のシングルイオン注入技術と融合して新しい研究分野を切り開く可能性がある。

本研究プロジェクトの主目的である高濃度 pn ダイオードの光応答は、光強度に敏感に反応する可能性がある。しかし、このようなキャリアのバンド間トンネリングに対する光応答はこれまでほとんど研究例がなく、次年度に詳しく検討する予定である。

[4] 成果資料

- (1) Daniel Moraru, Arup Samanta, Le The Anh, Takeshi Mizuno, Hiroshi Mizuta, and Michiharu Tabe
"Transport spectroscopy of coupled donors in silicon nano-transistors"
Scientific Reports vol.4, pp6219-1~6 (2014) .
- (2) Le The Anh, Daniel Moraru, Muruganathan Manoharan, Michiharu Tabe, and Hiroshi Mizuta
"The impacts of electronic state hybridization on the binding energy of single phosphorus donor electrons in extremely downscaled silicon nanostructures"
Journal of Applied Physics vol. 116, issue 6, pp. 063705-1-9 (2014).
- (3) Sri Purwiyanti, Arief Udhiarto, Daniel Moraru, Takeshi Mizuno, Djoko Hartanto, and Michiharu Tabe
"Observation of Tunneling Effects in Lateral Nanowire pn Junctions"
Makara Journal of Technology, vol18.no.2, pp.91-95 (2014).
- (4) Daniel Moraru, Sri Puwiyanti, Roland Nowak, Takeshi Mizuno, Arief Udhiarto, Djoko Hartanto ,Ryszard Jablonski, and Michiharu Tabe
"Individuality of Dopants in Silicon Nano-pn Junctions"
Materoals Science, vol.20, no.2, pp.129-131 (2014).
- (5) Roland Nowak, Daniel Moraru, Takeshi Mizuno, Ryszard Jablonski, and Michiharu Tabe
"Potential Profile and Photovoltaic Effect in Nanoscale Lateral pn Junction Observed by Kelvin Probe Force Microscopy"
Thin Solid Films, 557, pp.249-253 (2014).
- (6) M. Hori, T. Watanabe, T. Tsuchiya, Y. Ono:
"Analysis of electron capture process in charge pumping sequence using time domain measurements"
Appl. Phys. Lett. Vol. 105, No. 26, December (2014) .
- (7) S.Tamura, G.Koike, A.Komatsubara, T.Teraji, S.Onoda, L.P.McGuinness, L.Rogers, B.Yaydenov, E. Wu, L.Yan, F.Jelezko, T.Ohshima, J.Isoya, T.Shinada, T.Tanii:
"Array of bright silicon-vacancy centers indiamond fabricated by low-energy focused ion beam implantation",
Applied Physics Express 7,pp.115201 (2014).
- (8) Masahiro Hori, Tokonibu Watanabe, Toshiaki Tsuchiya and Yukinori Ono,
"Analysis of electron capture process in charge pumping sequence using time domain measurements," Appl. Phys. Lett. vol. 105, no. 26, pp. 261602_1-4, Dec. (2014).
- (9) T. Tsuchiya, Y. Ono
"Charge pumping current from single Si/SiO₂ interface traps: Direct observation of Pb centers and fundamental trap-counting by the charge pumping method"
Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 54, January (2015) 04DC01_1 – 7.
- (10) M. Hori, T. Watanabe, T. Tsuchiya, Y. Ono
"Direct observation of electron emission and recombination processes by time domain measurements of charge pumping current"
Appl. Phys. Lett. Vol. 106, No. 4, January (2015) 041603_1 – 4.

出張報告

氏名：水田 博

所属：北陸先端科学技術大学院大学

期間：(1回目) 2014年10月15日(水) - 2014年10月16日(木)

(2回目) 2015年1月9日(金) - 2015年1月10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会を行い、成果の発表及び討論を行った。

主たる対応者：田部 道晴

氏名：Manoharan Muruganathan

所属：北陸先端科学技術大学院大学

期間：2014年10月15日(水) - 2014年10月16日(木)

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会を行い、成果の発表及び討論を行った。

主たる対応者：田部 道晴

氏名：Le The Anh

所属：北陸先端科学技術大学院大学

期間：(1回目) 2014年10月15日(水) - 2014年10月16日(木)

(2回目) 2015年1月9日(金) - 2015年1月10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会を行い、成果の発表及び討論を行った。

主たる対応者：田部 道晴

氏名：鈴木 俊英

所属：北陸先端科学技術大学院大学

期間：2014年10月15日(水) - 2014年10月16日(木)

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会を行い、成果の発表及び討論を行った。

主たる対応者：田部 道晴

氏名：小野 行徳

所属：国立大学法人 富山大学

期間：2014年10月15日(水) - 2014年10月16日(木)

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会を行い、成果の発表及び討論を行った。

主たる対応者：田部 道晴

氏名：谷井 孝至

所属：早稲田大学

期間：2014年10月15日(水) - 2014年10月16日(木)

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会を行い、成果の発表及び討論を行った。

主たる対応者：田部 道晴