

## 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 (富山大学大学院理工学研究部)  
堀 匡寛 (富山大学大学院理工学研究部)  
品田 賢宏 (産業技術総合研究所)  
Manoharan Muruganatha  
(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)  
谷井 孝至 (早稲田大学)  
熊谷 国憲 (早稲田大学)  
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。

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 25 年 12 月 6 日

開催の趣旨：シリコンナノ p n 接合の作製において重要となるシングルドーパント技術に関する最新の研究成果を持ち寄り、共通理解を深めるとともに、

効率の良い共同研究を推進することを目的とする。研究会の成果：本研究会では、それぞれのグループの研究が進展し、①近接する複数のリンドナー原子が、分子軌道を形成すること、②数 10nm 角領域に 1 個のイオンを導入する精度改善を行っていること、③実時間チャージポンピング法を開拓し、欠陥への電荷の充放電のダイナミクスを解析していること、④少数個のドーパントの選択ドーピングを行ったデバイス作製が進展していること、などが報告された。

### [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。  
①FET 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 (文献(2)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((4)APL(2013))。

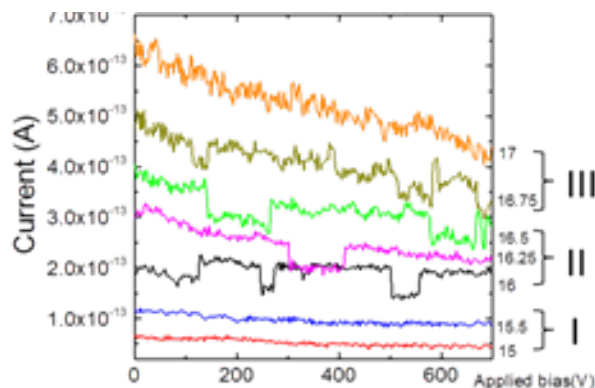


図1. ナノ p n 接合ダイオードにおける、順方向拡散電流の空乏層近辺でのドーパント原子の充放電に

よる RTS ((2)APL(2013))。

②極低温ケルビンプローブフォース顕微鏡 (LT-KFM) を用いて、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 ((4)APL(2013))。

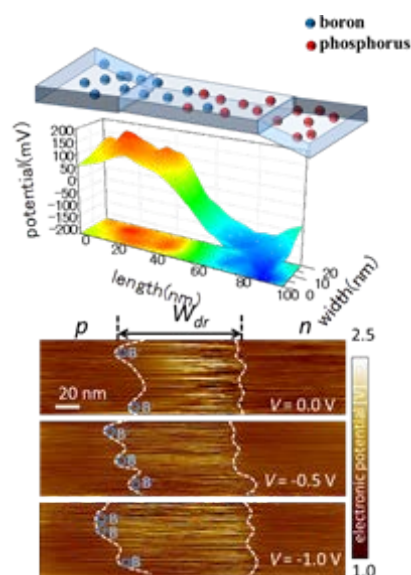


図2. ナノ pn 接合の KFM 像。空乏層領域でドーパントの充放電による電位の時間揺らぎノイズが観察される ((4)APL(2013))。

### (3-2) 波及効果と発展性など

本プロジェクトは、これまで常識のように平均場として扱われてきたドーパントが、シリコンナノ構造中では個数が極端に減少するという特徴だけでなく、その電子準位も深くなるのが、我々の研究によってより明確になってきている。我々の 2013 年の論文 (文献 (7)) は、本プロジェクトの呼び水となった成果であってそれを端的に実証したものであり、論文賞を最近受賞した。今後、このコンセプトがますますエレクトロニクス研究者の間で注目され、研究の輪が広がると思われる。

### [4] 成果資料

- (1) D. Moraru, S. Purwiyanti, R. Nowak, T. Mizuno, A. Udhiarto, D. Hartanto, R. Jablonski, and M. Tabe, "Individuality of dopants in silicon nano-pn junctions", Materials Science (accepted for publication).
- (2) 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).

- (3) R. Nowak, D. Moraru, T. Mizuno, R. Jablonski, and M. 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).
- (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, pp. 083109-1-4 (2013).
- (5) M. Tabe, D. Moraru, E. Hamid, A. Samanta, L. T. Anh, T. Mizuno, and H. Mizuta, "Dopant-Atom-Based Tunnel SOI-MOSFETs", ECS Trans. 58, pp. 89-95 (2013).
- (6) D. Moraru, E. Hamid, Y. Kuzuya, T. Mizuno, L. T. Anh, H. Mizuta, and M. Tabe, "Experimental and ab initio study of donor state deepening in nanoscale SOI-MOSFETs", Trans. Mat. Res. Soc. Japan, vol.38, no.2, pp.261-264 (2013).
- (7) 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)

## 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：2013年12月6日（金）～12月7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合せを行った。  
主たる対応者：田部 道晴

氏名：小野 行徳  
所属：富山大学大学院理工学研究部  
期間：2013年12月6日（金）  
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合せを行った。  
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：2013年12月6日（金）～12月7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合せを行った。  
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：2013年12月6日（金）～12月7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合せを行った。  
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：2013年12月6日（金）  
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合せを行った。  
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：2013年12月6日（金）  
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合せを行った。  
主たる対応者：田部 道晴