

シリコンナノデバイスにおける複合欠陥の物理と応用

[1] 組織

代表者：土屋 敏章

(国立大学法人 島根大学)

対応者：田部 道晴

(静岡大学 電子工学研究所)

分担者：

影島 博之 (国立大学法人 島根大学)

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)

モラル ダニエル (静岡大学)

[2] 研究経過

シリコンテクノロジーは、MOSFETの微細化・高密度化とともにチャネル中の少数個の界面欠陥やドーパントが特性に影響を与えるようになってきている。特にそれらの欠陥が近接して互いに相互作用しあう状況の物理的理解が、重要となってきている。本研究プロジェクトは、少数個の欠陥やドーパント原子の電気的特性に与える効果について、特に近接する2つ以上の欠陥やドーパント原子の効果について研究を進めている。

以下、研究活動状況の概要を記す。

第1回研究会の開催

「シリコンナノデバイスにおける複合欠陥の物理と応用」

開催日：平成26年10月24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：

島根大土屋Gは、Si/SiO₂界面の単一欠陥について、高精密なチャージポンピング法を用いて詳しく評価した結果を報告した。また、より一般的な欠陥生成の理論的考察も行った。富山大学小野Gからは、実時間チャージポンピング法という新しい欠陥評価手法について報告があった。静岡大田部Gからは、複合ドナーを介した電子のトンネル輸送について詳しく報告した。

最後に、相互の研究成果の関連性について討論を行い、今後の研究の進め方を話し合った。きわめて有益な研究会であった。

第2回研究会の開催

「シリコンナノデバイスにおける複合欠陥の物理と応用」

開催日：平成27年1月23日

開催の趣旨：

今回の研究会は少人数であるが、テーマを絞って集中的な議論を行った。主に研究代表者土屋がMOSFETの界面欠陥生成機構として再びその重要性が注目されているホットエレクトロンの研究を概観した。また、田部とモラルは、最近のバンド間トンネリングの最新の成果を発表・討論を行った。

研究会の成果：

島根大土屋は、MOSFETの0.8 μ mサイズの時代に重要であったホットエレクトロン効果、すなわち加速された電子がドレイン近傍で作る界面欠陥についてそのメカニズムを詳しく説明するとともに、それが、電源電圧と素子の微細化の相対的な関係から再び重要性を増してきている状況について報告がなされた。静岡大田部Gからは、ごく最近のインターバンドトンネリングの異常（電流ピークの出現）について詳しく報告した。

最後に、今後の研究の進め方を話し合った。きわめて有益な研究会であった。

[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。

その第一は、新しい欠陥の検出法であり、堀・小野らは、図1に示す新しい実時間分解のチャージポンピング法を新たに提案し、電子電流と正孔電流の時間変化から欠陥の性質を明らかにする試みに成功している。電圧パルスの立ち上がり速度に依存した電流ピークのゲート電圧が観測され、多くの知見が得られている。今のところ対象とする欠陥の数は数百個のレベルであるが、この手法は単一欠陥にも適用できるものであり、今後が期待される。

も深くなるため、このトンネル輸送機構は比較的高温まで有効に働く可能性がある。

Time-domain CP method

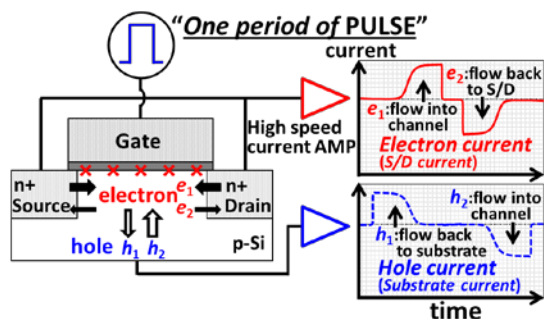


図1. 堀・小野 G による新しい実時間チャージポンピング法の原理図 (APL (2014))。

(3-2) 波及効果と発展性など

本プロジェクトは、1 個～少数個の欠陥やドーパントを検出する研究を行っている土屋 G、小野 G の研究成果を田部 G で行っているデバイス研究に融合させようとするものである。すでに世界的にも優位に立っているチャージポンピング法の深化によって、少数個の欠陥の物理的評価が進んでいる。これは遠からずドーパント原子デバイスの機能の研究と融合することが期待される。

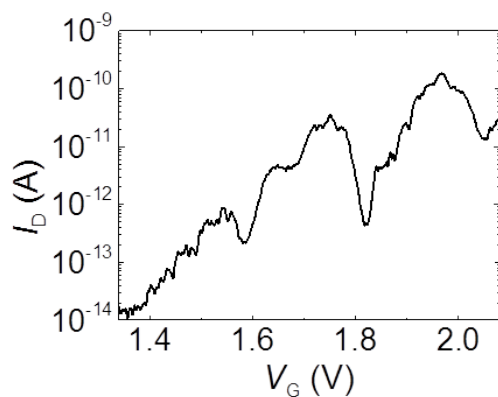
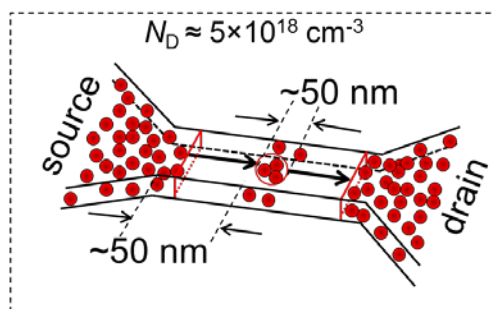


図2. 選択ドーピングによる数個のリンドナーからなるドーパントクラスター量子ドット FET の模式図 (上図) と単電子トンネリング特性 (下図) (Scientific Reports (2014))。

図2は、Moraru・田部らによる少数個のリンドナーが作る量子井戸を介した電子トンネリングの実験結果である。数個のリンドナーが互いに近接しているため、波動関数が重なり合い、言わばドナーの分子状態が形成される。これは、ポテンシャル井戸の深さ

[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"
Materials 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, (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 in diamond 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, (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：土屋 敏章

所属：国立大学法人 島根大学

期間：(1回目) 2014年8月8日(金) - 2014年8月9日(土)

(2回目) 2014年10月24日(金) - 2014年10月25日(土)

(3回目) 2015年1月23日(金) - 2015年1月24日(土)

用務先：静岡大学 電子工学研究所

用務内容：(1回目) 共同研究プロジェクトに関する研究打合せを行った。

(2回目、3回目) 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：影島 博之

所属：国立大学法人 島根大学

期間：2014年10月24日(金) - 2014年10月25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：小野 行徳

所属：国立大学法人 富山大学

期間：2014年10月24日(金) - 2014年10月25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：堀 匡寛

所属：国立大学法人 富山大学

期間：2014年10月24日(金) - 2014年10月25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