

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)

物理と応用

開催日：平成28年1月8日(金)

開催場所：静岡大学電子工学研究所(第1研修室)

出席者：島根大学 土屋 敏章(研究代表者)

影島 博之

早稲田大学 谷井 孝至

富山大学 小野 行徳

堀 匡寛

渡邊 時暢

静岡大学 田部 道晴

池田 浩也

Daniel Moraru

[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。

共同研究プロジェクトに関する個別討論会

開催日：平成27年12月1-2日

開催場所：静岡大学電子工学研究所(222室)

出席者：富山大学 小野 行徳

静岡大学 田部 道晴

Daniel Moraru

開催の趣旨と成果：

小野(富山大)は、Si/SiO₂界面の欠陥準位に対するチャージポンピングの実時間測定について詳しく研究状況を報告した。また、田部は複数のドーパントが作る量子井戸の形成についてケルビンプローブフォース顕微鏡による測定結果を報告し、相互の理解を深めるとともに、共同研究の進め方について議論を行った。

平成27年度静岡大学電子工学研究所共同研究プロジェクト合同研究会

P-47「シリコンナノp-n接合とその光応答」

P-48「シリコンナノデバイスにおける複合欠陥の

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。次の2つのプロジェクト：P-47「シリコンナノp-n接合とその光応答」およびP-48「シリコンナノデバイスにおける複合欠陥の物理と応用」は、お互いの物理原理に重なる点が多いことから合同研究会として開催し、討論を行った。

研究会の成果：

土屋(島根大)からは単一界面トラップのDOSとトラップ間相互作用について、検出法とその物理の詳細な報告があった。影島(島根大)は、ナノデバイスの基本構造であるSiナノピラーの表面酸化機構を原子レベルの動きを基に理論的な考察を行った。谷井(早稲田大)からは、ナノホールレジストマスクを用いたN₂分子イオン注入によるNVセンター配列の作製について報告があった。小野(富山大)は、SiO₂/Si界面欠陥の低温チャージポンピング解析について、堀(富山大)は、電子スピン共鳴を利用した高感度チャージポンピングEDMR法の開発状況について報告した。池田(静岡大)は、ナノワイヤサーモパイル赤外線センサの高感度化について、モラル(静岡大)は、リンドナークラスタを介したMOSFET、およびナノエサキダイオードについて研究状況を報告した。これらの報告はいずれも「原子とデバイス」という観点で共通しており、きわめて有益な討論を行うことができた。

共同研究プロジェクトに関する個別討論会

開催日：平成 28 年 1 月 22 日

開催場所：静岡大学電子工学研究所 (222 室)

出席者：富山大学 小野 行徳

堀 匡寛

静岡大学 田部 道晴

Daniel Moraru

開催の趣旨と成果：堀（富山大）から欠陥評価法として今後の展開が期待できる EDMR (Electrically Detected Magnetic Resonance) の立ち上げ状況が詳しく報告された。また、モラルは、電界による 2 つのドナーポテンシャルの融合とドーパントクラスターを介したトンネル輸送機構が室温に近い高温域まで機能するという最新の結果を報告し、今後の展開にとってきわめて有用な討論会となった。

(この際に、研究会・研究打ち合わせ・研究討論会・研究発表会・研究集会等の開催状況を記載してください。)

[3] 成果

(3-1) 研究成果

(本プロジェクトで明らかになった研究成果を具体的に記載して下さい。)

本年度は、以下に示す主要な研究成果を得た。

まず、第一はドーパントの電界融合の実験的検証である (成果資料(6) Sci. Rep (2015).)。

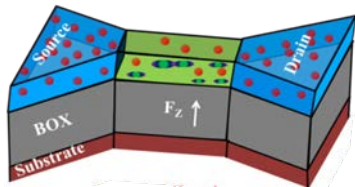


図 1. リンドナーが均一にチャンネル中に分布している状態で、縦方向に強い電界を印加し、近接した 2 個のドナーが一体化する現象を捉える。

ドーパント原子同士を融合させ、分子として一体化させるとデバイス応用の幅が飛躍的に広がる。すなわち、図 1 のような微細 SOIMOSFET に対して、図 2 に示したように、チャンネル中の縦方向電界を強めていくと、埋め込み酸化膜との界面付近に形成されるドナー由来の量子井戸が次第に大きくなってついには融合する。これを介してソース、ドレイン間にトンネル電流が流れることから、2 つのリソ原子はひとつの量子ドットとして振る舞うことが明らかになった。

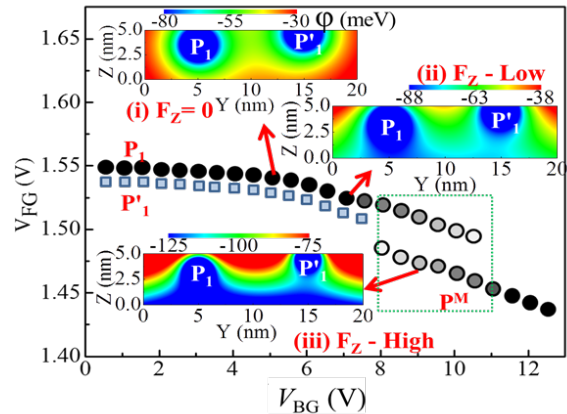


図 2. バックゲート電圧 (横軸) を次第に大きくして縦方向電界を強めていくと、ある臨界電圧でポテンシャルの融合が起き、これが単電子トンネル電流の突然の電圧シフトとして現れる。

第二は、電子捕獲・再結合の過渡現象を活用した新手法を駆使してチャージポンピング (CP) 電流を詳しく調べることにより、単一界面トラップの詳細評価にはじめて成功したことである (成果資料(4) Jpn. J. Appl. Phys.(2015))。

MOS 界面トラップ 1 個当たりの CP 電流は、従来の「常識」であった fq (f : ゲート周波数, q : 電気素量) を覆し、2 電子状態が関与する $2fq$ が本質であることを明らかにした。さらに、トラップのエネルギー準位や近傍トラップとのクーロン相互作用などの条件に依存して $2fq$ より小さな値をとり得ることを示した。このように、トラップをこれまでの「密度」というマクロな視点ではなく、原子スケールで捉えることで「単一トラップの評価技術」の基盤となる成果をあげた。

(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、ドーパント原子や界面原子欠陥において、それが融合してデバイスとしての新しい機能を生み出すことができるかどうかを調べる野心的な研究であり、「ドーパント原子」や「界面の原子スケールの欠陥」を扱う研究者が協力し合って情報を交換し、新しいフェーズに踏み出す段階にある。共同研究に伴う具体的な論文成果が出始めており、今後の展開が大いに期待できる。

[4] 成果資料

- (1) "Evaluation of accuracy of time-domain charge pumping"
T. Watanabe, M. Hori, T. Tsuchiya, Y. Ono
IEICE Trans. Electron. Vol. E98-C, No. 5, 390–394 (2015)
- (2) "Electrical activation and electron spin resonance measurements of arsenic implanted in silicon"
M. Hori, M. Uematsu, A. Fujiwara, Y. Ono
Appl. Phys. Lett. Vol. 106, No. 14, 142105_1–4 (2015)
- (3) "Direct observation of electron emission and recombination processes by time domain measurements of charge pumping current"
M. Hori, T. Watanabe, T. Tsuchiya, Y. Ono
Appl. Phys. Lett. Vol. 106, No. 4, 041603_1–4 (2015)
- (4) "Charge pumping current from single Si/SiO₂ interface traps: Direct observation of P_0 centers and fundamental trap-counting by the charge pumping method"
Toshiaki Tsuchiya and Yukinori Ono, " Jpn. J. Appl. Phys., vol. 54, no. 4S, pp. 04DC01_1-7 (2015)
- (5) "Characterization of Individual Si/SiO₂ Interface Traps: Direct Observation of Single P_0 Centers by the Charge Pumping (CP) Method and Correction of the Conventional CP Theory"
T. Tsuchiya, ECS Trans. vol. 69(10), pp. 145-154 (2015)
- (6) "Electric-Field-Assisted Formation of an Interfacial Double-Donor Molecule in Silicon Nano-Transistors"
Arup Samanta, Daniel Moraru, Takeshi Mizuno, Michiharu Tabe
Scientific Reports, vol. 5, pp. 17377-1~10 (2015)
- (7) "Tunneling in Systems of Coupled Dopant-Atoms in Silicon Nanodevices"
Daniel Moraru, Arup Samanta, Krzysztof Tyszka, Le The Anh, Manoharan Muruganathan, Takeshi Mizuno, Ryszard Jablonski, Hiroshi Mizuta, Michiharu Tabe
Nanoscale Research Letters, vol 10 : 372 ,pp. 1-10 (2015)
- (8) "Effect of selective doping on the spatial dispersion of donor-induced quantum dots in Si nanoscale transistors"
Krzysztof Tyszka, Daniel Moraru, Arup Samanta, Takashi Mizuno, Ryszard Jablonski, Michiharu Tabe
Applied Physics Express, vol.,8 ,pp. 094202-1~094202-4 (2015)
- (9) "Comparative study of donor-induced quantum dots in Si nano-channels by single-electron transport characterization and Kelvin probe force microscopy"
Krzysztof Tyszka, Daniel Moraru, Arup Samanta, Takashi Mizuno, Ryszard Jablonski, Michiharu Tabe
Journal of Applied Physics, vol.117, pp.244307-1~244307-6 (2015)
- (10) "Atomistic nature in band-to-band tunneling in two-dimensional silicon pn tunnel diodes"
Michiharu Tabe, Hoang Nhat Tan, Takeshi Mizuno, Manoharan Muruganathan, Le The Anh, Hiroshi Mizuta, Ratno Nuryadi, Daniel Moraru
Applied Physics Letters, vol.108, issue9, pp093502-1~093502-5 (2016)

出張報告

氏名：小野 行徳
所属：国立大学法人 富山大学
期間：2016年12月1日－12月2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個別討論会を行った。
主たる対応者：田部 道晴

氏名：土屋 敏章
所属：国立大学法人 島根大学
期間：2016年1月8日－1月9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：2016年1月8日－1月9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：2016年1月22日－1月23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個別討論会を行った。
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：2016年1月22日－1月23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個別討論会を行った。
主たる対応者：田部 道晴