

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：13801

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13970

研究課題名(和文) 高感度チャージポンピング・スピン共鳴法の開発と電子対再結合のスピン制御

研究課題名(英文) Development of sensitive charge-pumping spin-resonance method and its application to spin control in electron-pair recombination process

研究代表者

小野 行徳 (ONO, YUKINORI)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号：80374073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：チャージポンピング(CP)とEDMR(Electrically detected magnetic resonance)を組み合わせたCP-EDMR法を立ち上げ、その高感度化を行った。これにより、シリコンMOSトランジスタのCP-EDMRの観測に世界で初めて成功した。検出スピン数の下限値は1000スピン程度であり、CPを高周波で行うことにより単一スピンの検出が可能であるとの見通しが得られた。また、CP-EDMR法で用いるゲート電圧パルスを変調することにより、エネルギー分光が可能であることを実証した。

これらの結果は、同手法によりスピン相関を観測することができることを示すものである。

研究成果の概要(英文)：We developed the charge-pumping (CP) electrically detected magnetic resonance (EDMR), and improved its sensitivity. Owing to the improved sensitivity, we successfully performed the CP-EDMR experiments on silicon MOS transistors. The current sensitivity is as low as 103 spins and it is expected that single spin detection is possible by higher frequency (GHz range) operations. We also demonstrated that the energy spectroscopy can be performed by the CP-EDMR. These results indicated that the developed CP-EDMR allows us to investigate the spin correlation during the CP process.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：チャージポンピング 電子スピン共鳴 シリコン酸化膜界面

### 1. 研究開始当初の背景

近年、半導体中の単一原子（ドープド原子や界面欠陥）を構成単位とする新デバイスコンセプトが次々と打ち出されており、単一ドープド・テクノロジーと呼ばれる新しい分野が形成されつつある。半導体中のドープド原子、あるいはトランジスタ界面に存在する電荷捕獲中心は、自然界に存在する量子ドットとみなすことができる。その量子ドットとしての特性はドープド種（または欠陥種）により一意に決まり、その電氣的、化学的性質を利用した様々な応用が期待されている。シリコン中の単一ドナー原子のスピニコヒーレント制御や単一界面欠陥による高速電荷操作はその例であり、世界的に激しい競争がなされている。

一方、電子デバイスのナノスケール化・原子スケール化に伴い、トランジスタ界面のたった1個の欠陥がトランジスタの特性に大きな影響を及ぼすことから、界面欠陥のカウンティング技術の確立が急務とされている。申請者らは、他にない高感度チャージポンピング技術を立ち上げ、この技術を用いて界面欠陥を調べる過程で、単一界面欠陥による再結合電流が「電子対」によるものであることを見出した。この結果は、界面欠陥評価法として最も信頼性があり、最も広く普及しているチャージポンピング法の基礎をなす電荷再結合のメカニズムが、これまで常識と考えられていた、Shockley-Read-Hall (SRH) 理論では記述できないことを強く示唆しており、学術、応用の両面においてその意義は極めて大きいと考える。同時に、単一欠陥における再結合過程が「電荷転送というデバイス動作」に対して、潜在的に豊かな物理を持っていることを示唆している。また、この発見が室温でなされたという事実は、この系が素電荷の制御に対して、非常に高い精度を有していることを明確に示している。

### 2. 研究の目的

本研究では、我々が培ってきた単一電荷転送と単一欠陥評価の独自技術をベースとして、これに電子スピン共鳴の技術を融合させることにより、新規な欠陥評価手法「高感度チャージポンピング・スピン共鳴法」を確立する。そしてこの新手法を基軸として、上記「電子対転送」のメカニズム解明に取り組み、「室温動作が可能な単一電荷、単一スピン制御技術」確立のための指針を示す。

### 3. 研究の方法

第一には、単一欠陥検出に対応できる、高感度な電子スピン共鳴技術：チャージポンピング EDMR (Electrically detected magnetic resonance) 法を確立する。特に、マイクロ波印加時においても、単一電荷、単一スピンの検出感度が出せるような、低雑音系の構築を行う。またこれにより、チャージポンピング法で検出される欠陥の化学的結合を同定

する。

第二には、パルス波形を制御することにより、電子スピン共鳴信号のエネルギー分光が可能であることを室温で実証する。これにより、「単一電子対」のスピン偏極状態が室温で制御可能であることを示す。

### 4. 研究成果

図1(a)に、今回立ち上げたチャージポンピング EDMR 法の測定系を示す。汎用の X バンド ESR キャビティの中にトランジスタを導入し、ESR の条件下でチャージポンピング電流を計測する。図1(b)は、ESR 条件下でのチャージポンピング過程の様子を表すバンド図を示している。マイクロ波の共鳴条件におけるスピン偏極率の変化に起因してチャージポンピング電流が変化すると期待される。

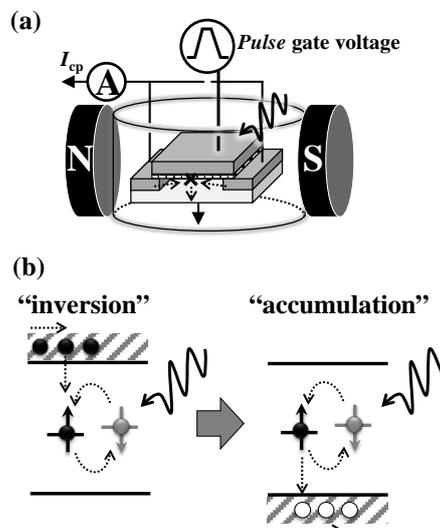


図1. チャージポンピング EDMR の測定系(a)と ESR 条件下におけるチャージポンピング過程(b)

チャージポンピング EDMR 法の高感度化に向けた方策の一例を図2に示す。図2(a)に示す電圧パルスをとランジスタのゲートに印加すると、図2(b)に示すようなミリアンペアに近い大きな過渡応答電流が発生しており、これが電流アンプの感度を律速することが明らかになった。そこで過渡応答電流をフィルタリングする回路(図2(e)挿入図)を導入し、これを抑制することに成功した。時定数  $\tau$  700ns と 40us の結果を図2(c) (d)に、過渡応答電流振幅の  $\tau$  依存性を図2(e)に示した。

上記、および、その他のノイズ低減策により、シリコントランジスタにおいて良好なチャージポンピング EDMR 信号の室温検出に成功した。結果を図3に示す。図3(a)はゲートパルス 1MHz におけるチャージポンピング EDMR 信号である。g 値から Si(100) 界面欠陥として知られる Pb0 センターによる信号と同定された。これはチャージポンピングに關与する界面欠陥が Pb0 センターであることを初めて直接的に示した結果である。

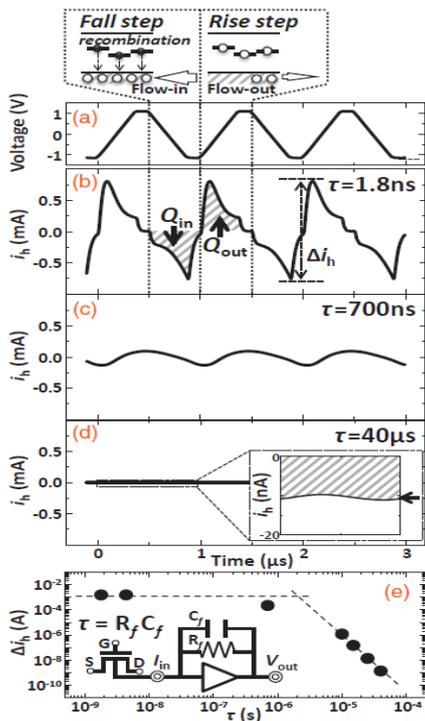


図2. チャージポンピングEDMRの高感度化のための過渡応答電流のフィルタリング。(a)ゲート電圧パルス、(b)-(d)時定数 $\tau=1.8\text{ns}$ ,  $700\text{ns}$ ,  $40\mu\text{s}$ における電流波形、(e)電流振幅 $\Delta i_h$ の $\tau$ 依存性。挿入図は電流フィルタの等価回路図。

図3(b)は、図3(a)の信号を磁場に対して積分した結果であり、実際のチャージポンピング電流のESRによる変化を表している。図3(c)は裾部分の拡大図であり、この結果からスピンの検出感度は $10^3$  spin程度と見積もられる。

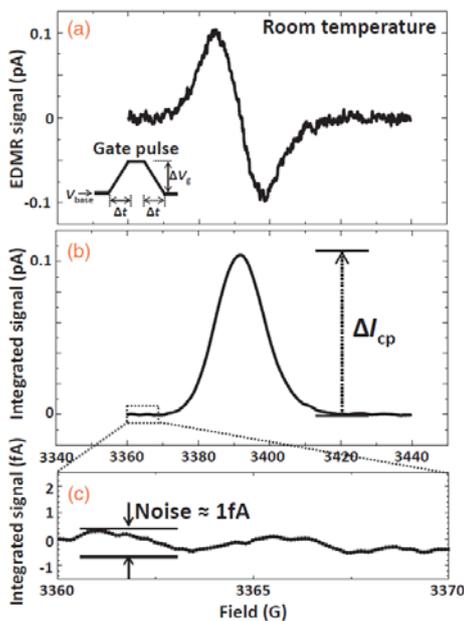


図3. 観測信号(a)、観測信号を積分した結果(b)、裾部分の拡大図(c)。

これらの結果は、1MHzのゲートパルスによって得られたものである。したがって、1GHzのゲートパルスを用いれば、検出感度を三桁上げることができ、したがって単一スピンの検出が可能となると期待できる。

図4は、ゲートパルスの立ち上がり、立ち下り時間 $\Delta t$ を変化させたときのチャージポンピング電流 $I_{cp}$ とチャージポンピングEDMR信号 $\Delta I_{cp}$ の振る舞いを表している。両者の $\Delta t$ 依存性が良く一致していることがわかる。このことは、電子スピン共鳴信号のエネルギー分光が可能であることを室温で実証するものであり、「単一電子対」のスピン偏極状態が室温で制御可能であることを示すものである。

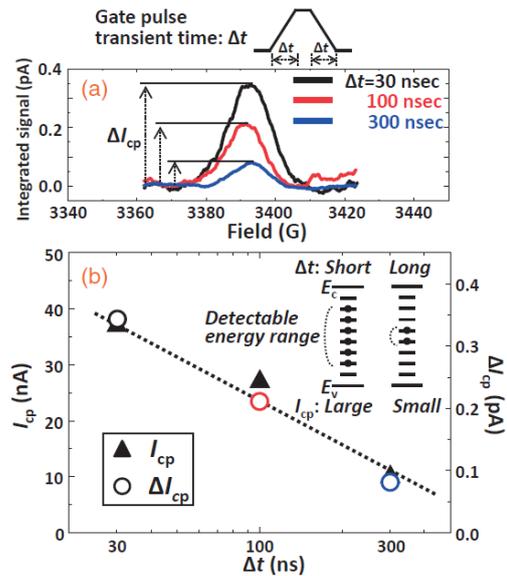


図4. チャージポンピング電流 $I_{cp}$ とチャージポンピングEDMR信号 $\Delta I_{cp}$ のゲートパルスの立ち上がり時間、立ち下り時間 $\Delta t$ 依存性。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計7件)

- 1) M. Hori, T. Tsuchiya, Y. Ono "Improvement of charge-pumping electrically detected magnetic resonance and its application to silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistor", Appl. Phys. Express, 査読有, 10, (2017), pp. 015701\_1-4, <https://doi.org/10.7567/APEX.10.015701>
- 2) T. Watanabe, M. Hori, T. Tsuchiya, A. Fujiwara, Y. Ono "Time-domain charge pumping on silicon-on-insulator MOS devices" Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 56, (2017), pp. 011303\_1-5, <https://doi.org/10.7567/JJAP.56.011303>
- 3) M. Hori, Y. Ono "EDMR on recombination process in silicon MOSFETs at room temperature" Appl. Phys. Express, 査読有, 10, (2017), pp. 015701\_1-4, <https://doi.org/10.7567/APEX.10.015701>

- m temperature” Springer Advances in intelligent system and computing, 査読有, 519, (2017), pp. 89-93, DOI:10.1007/978-3-319-46490-9\_13
- 4) Y. Ono, M. Hori, G. P. Lansbergen, A. Fujiwara “Manipulation of single charges using dopant atoms in silicon - Interplay with intervalley phonon emission -”, Springer Advances in intelligent system and computing, 査読有, 519, (2017), pp. 137-141, DOI:10.1007/978-3-319-46490-9\_20
  - 5) M. Jo, T. Uchida, A. Tsurumaki-Fukuchi, M. Arita, A. Fujiwara, Y. Ono, K. Nishiguchi, H. Inokawa, Y. Takahashi ” Fabrication and single-electron-transfer operation of a triple-dot single-electron transistor” J. Appl. Phys., 査読有, 118, (2015), pp. 214305\_5-6, http://dx.doi.org/10.1063/1.4936790
  - 6) T. Watanebe, M. Hori, T. Tsuchiya, Y. Ono” Evaluation of accuracy of charge pumping current in time domain”, IEICE Trans. Electron, 査読有, E98-C, (2015), pp. 390-394, http://doi.org/10.1587/transele.E98.C.390
  - 7) M. Hori, M. Uematsu, A. Fujiwara, Y. Ono” Electrical activation and electron spin resonance measurements of arsenic implanted in silicon” Appl. Phys. Lett., 査読有, 106, (2015), pp. 142105\_1-4, http://dx.doi.org/10.1063/1.4917295
- [学会発表] (計 19 件)
- 1) (招待講演) 小野行徳, 堀匡寛, 土屋敏章 “シリコンにおけるチャージポンプ電荷とスピンの室温極限操作に向けて”, 第 29 回シリサイド系半導体研究会, 2017. 3. 17, 八洲学園大学(神奈川県横浜市)
  - 2) 渡邊時暢, 堀匡寛, 土屋敏章, 藤原聡, 小野行徳 “Silicon-on-insulator MOS デバイスにおける実時間チャージポンピングの応用”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017. 3. 16, パシフィコ横浜(神奈川県横浜市)
  - 3) 渡邊時暢, 堀匡寛, 小野行徳, “SOI MOS p-i-n ダイオードの低温チャージポンピング”, 電子情報通信学会研究会, 2017. 2. 24, 北海道大学(北海道札幌市)
  - 4) (招待講演) M. Hori, Y. Ono “Charge pumping EDMR for MOS interface analysis”, The 18th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium, 2016. 11. 15-11. 16, 静岡大学(静岡県浜松市)
  - 5) (招待講演) 小野行徳 “Single-dopant transistor and pump - Interplay with single phonon-” 電気学会ナノエレクトロニクス新機能創出・集積化技術調査専門委員会, 2016. 11. 11, 早稲田大学(東京都新宿区)
  - 6) Y. Ono, M. Hori, A. Fujiwara, “Silicon Single Boron Transistor”, ICNERE EECCi S2016, 2016. 10. 31-11. 2, (マラン、インドネシア)
  - 7) M. Hori, Y. Ono “EDMR on recombination process in Silicon MOSFETs at room Temperature” Inter Academia2016, 2016. 9. 26-9. 28, (ワルシャワ、ポーランド)
  - 8) Y. Ono, M. Hori, G. P. Lansbergen, A. Fujiwara, ” Manipulation of Single Charges Using Dopant Atoms in Silicon-Interplay with Intervalley Phonon Emission”, Inter Academia2016, 2016. 9. 26-9. 28, (ワルシャワ、ポーランド)
  - 9) 堀匡寛, 成松諒一, 土屋敏章, 小野行徳, ”高感度チャージポンピング EDMR 法の開発”, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016. 9. 13-9. 16, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)
  - 10) (招待講演) 土屋敏章, 小野行徳, ” Charge Pumping Current from Single Si/SiO<sub>2</sub> Interface Traps: Direct Observation of Pb Centers and Fundamental Trap-Counting by the Charge Pumping Method by the charge pumping method”, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016. 9. 13-9. 16, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)
  - 11) T. Watanabe, M. Hori, Y. Ono” Time domain charge pumping on silicon-on-insulator MOS transistors”, 2016 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices(AWAD2016), 2016. 7. 4-7. 6, 函館国際ホテル(北海道函館市)
  - 12) M. Hori, R. Narimatsu, Y. Ono” Charge pumping EDMR towards charge/spin manipulation in silicon at room temperature”, 2016 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop(SNW2016), 2016. 6. 12-6. 13, (ホノルル、米国)
  - 13) (招待講演) M. Hori, Y. Ono, ” Novel application of the charge pumping process for charge and spin control”, EMN Meeting on Quantum 2016, 2016. 4. 8-4. 11, (プーケット、タイ)
  - 14) T. Watanabe, M. Hori, T. Saruwatari, A. Fujiwara, Y. Ono, “Cryogenic Charge Pumping using Silicon on Insulators” 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference(MNC2015), 2015. 11. 10-11. 13, Toyama International Conference Center(富山県富山市)
  - 15) M. Jo, T. Uchida, A. Tsurumaki-Fukuchi, M. Arita, A. Fujiwara, Y. Ono, K. Nishiguchi, H. Inokawa, Y. Takahashi” Fabrication of triple-dot single-electron tra

nsistor and its turnstile operation”, 28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC2015), 2015. 11. 10-11. 13, Toyama International Conference Center (富山県富山市)

- 16) Y. Nishiuchi, K. Furuta, T. Mitani, M. Hori, Y. Ono “Electrically detected magnetic resonance study on silicon PN junction” 2015 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD 2015), 2015. 6. 29-7. 1 (済州島、韓国)
- 17) M. Hori, M. Uematsu, A. Fujiwara, Y. Ono “ESR measurements of As donor electrons in silicon” The 5th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, 2015. 6. 16-6. 19, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市)
- 18) (招待講演)Y. Ono, M. Hori “Charge pumping by point defects -Towards ultimate control of recombination in silicon- “ , III Bilateral Italy-Japan Seminar, 2015. 6. 15-6. 16, Campus Plaza Kyoto (京都府京都市)
- 19) T. Watanabe, M. Hori, T. Saruwatari, A. Fujiwara, Y. Ono, “Low Temperature Charge Pumping in SOI Gated PIN Diode” , 2015 Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW-2015), 2015. 6. 14-6. 15, Rihga Royal Hotel (京都府京都市)

[その他]

ホームページ等

静岡大学小野・堀研究室

<https://wpp.shizuoka.ac.jp/nano/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小野 行徳 (ONO, Yukinori)

静岡大学・電子工学研究所・教授

研究者番号 : 80374073

### (2) 研究分担者

土屋 敏章 (TSUCHIYA, Toshiaki)

島根大学・総合理工学研究科・教授

研究者番号 : 20304248

### (3) 研究分担者

堀 匡寛 (HORI, Masahiro)

静岡大学・電子工学研究所・講師

研究者番号 : 50643269