

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06087

研究課題名（和文）単一界面欠陥のチャージポンピング過程を用いた2電子スピン相関の室温観測

研究課題名（英文）Two-electron spin pairs in charge pumping under magnetic resonance condition

研究代表者

堀 匡寛 (Hori, Masahiro)

静岡大学・電子工学研究所・講師

研究者番号：50643269

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,500,000円

研究成果の概要（和文）：ゲートへの高周波電圧印加により、電子正孔再結合を誘導するチャージポンピング法は、MOSトランジスタの界面欠陥評価法として広く用いられている。本研究課題では、「チャージポンピング法」にスピン共鳴の手法を取り入れ、シリコン/シリコン酸化膜界面の欠陥に対して電気的性質と化学的(磁気的)性質を同時に評価できる新手法を確立した。また、チャージポンピング過程を正確に記述する新たな理論体系を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、従来の「チャージポンピング法」と「電子スピン共鳴法」を組み合わせることで、シリコン・トランジスタの界面欠陥を高精度で観測する手法を確立した。これにより、界面欠陥の電子スピンの状態を高精度で観測することが可能となり、トランジスタの性能劣化の原因となる界面欠陥の構造を同定することに成功した。本研究課題で確立した手法は、トランジスタの信頼性評価、ならびに、量子情報処理における電子スピン制御の分野において、新たな分析手法となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Gate-pulse-induced electron-hole recombination is a fundamental phenomenon in semiconductors, and is widely used for analyzing the defects at metal-oxide-semiconductor (MOS) interfaces called as the charge pumping (CP) method. In this study, the CP under the electron spin resonance condition was conducted in silicon MOS transistors. The results showed that two major defects at the Si(100)/SiO<sub>2</sub> interface participate in the CP process. Moreover, the two-electron CP process was proposed based on the analysis of the resonance signals.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：シリコンMOSFET 界面欠陥 チャージポンピング法 電子スピン共鳴法 EDMR法 信頼性評価 再結合過程 量子情報

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、シリコン中の局在準位(界面欠陥やドーパント原子)を利用した電荷、スピン制御の研究が活発化している。トランジスタ界面に存在する構造欠陥(ダングリングボンド)やチャンネル中に存在するドーパント原子は、電荷の捕獲中心であり、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欠陥種(あるいはドーパント種)により一意に決まり、その電氣的、化学的(磁氣的)性質を利用した様々な応用が期待されている。実際これまでに、シリコントランジスタ界面の欠陥のスピン検出やリン原子の核スピンのコヒーレント制御が実証されている<sup>[1]</sup>。

一方、トランジスタの微細化に伴い、界面の少数個の欠陥がその特性に影響を及ぼすことから、界面欠陥の評価技術の確立が急務とされている。界面欠陥評価手法として広く用いられている手法が「チャージポンピング法」である(図1a)<sup>[2]</sup>。同手法では、MOS(metal-oxide-semiconductor)トランジスタのゲートに正負の電圧パルスを印加し、界面欠陥を介して流れる電子正孔再結合電流(チャージポンピング電流 $I_{CP}$ )を検出する(図1b)。その電流は、欠陥個数 $N$ 、素電荷 $e$ 、パルス周波数 $f$ で決まる( $I_{CP}=Nef$ )ため、電流の測定から欠陥の個数を評価できる。また、ゲートパルスのパラメータ操作により、欠陥のエネルギー準位や捕獲断面積などを調べることができる。しかしながら、磁気共鳴法を必要とする欠陥の磁氣的(スピンの)性質は解析できず、そのため、これまでにチャージポンピングに寄与する欠陥の種類(結合の構造)は明らかでなかった。加えて、詳細なチャージポンピング過程についても十分な理解は得られていなかった。

### 2. 研究の目的

上記の背景のもと、研究代表者は、チャージポンピング法にスピン共鳴の手法を取り入れることこそが、電氣的な情報と磁氣的な(スピンの)情報の両者を同時に取得できる極めて強力な欠陥評価手法の構築に繋がるのではないかと考えた。また、同手法をスピン操作の手段として活用することにより、CMOSテクノロジーに立脚した、量子情報操作に道を開くのではないかと期待した。そこで、本研究課題では、「チャージポンピング・スピン共鳴法」の確立と、チャージポンピング理論の再構築を目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、以下の2つの研究を行った。

#### (1) スピン状態の電氣的検出手法の確立

チャージポンピング法にスピン共鳴の手法を取り入れるためには、スピンの情報を電気信号(電流)に変換する必要がある。ここでは、その最も有力な手段である、電子スピン共鳴(ESR)の電氣的読み出し手法であるEDMR(Electrically detected magnetic resonance)を適用した。以後、本手法をチャージポンピングEDMR法と呼ぶ(図1c)。EDMRのスピン偏極に関する感度は $10^{-5}$ 程度である。したがって、チャージポンピング電流のスピン偏極観測のためには、スピン共鳴条件下でごく微小な(フェムト( $10^{-15}$ )アンペアオーダーの)電流変動を高い感度で検出する必要がある。ここでは、まず、測定系のノイズの低減と、低温測定による信号強度の増大により、高感度EDMR測定のための技術を確立した。

#### (2) チャージポンピング理論の再構築

既存のチャージポンピング理論は、再結合過程の1電子状態のみを考慮するSRH(Shockley-Read-Hall)モデルに立脚していた(図1b)。しかし、半導体界面に存在する欠陥は、本質的に価電子帯の状態を反映した(donor-like)1電子状態の他に、伝導帯の状態を反映した(acceptor-like)2電子状態を有しており、この2電子状態からの再結合過程に切り込まなければ、チャージポンピングの完全な理解は得られない。ここでは、2電子状態からの(スピン状態に依存した)再結合過程を詳細に調べることで、正確なチャージポンピングのモデルを構築した。

### 4. 研究成果

#### (1) スピン状態の電氣的検出法の確立

最初に、EDMR測定系のノイズを低減させ、その感度の評価を行った。ここでは、研究代表者がこれまで確立したチャージポンピング電流の実時間観測技術<sup>[3]</sup>を適用した。

図2aと図2bは、それぞれ実時間領域におけるゲートパルス電圧とチャージポンピング電流

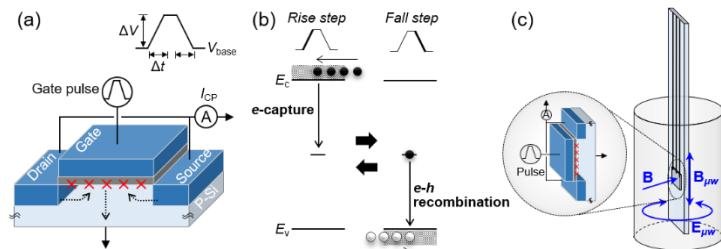


図1(a)チャージポンピング測定の設定アップ図。MOSトランジスタのゲートにパルス電圧を印加し、界面欠陥(図中のバツ印)を介した電子正孔再結合電流 $I_{CP}$ から欠陥密度を評価する。挿入図はパルスの定義。 $\Delta V$ 、 $V_{base}$ 、 $\Delta t$ はそれぞれ振幅、ベース電圧、遷移時間を示している。(b)パルス1周期のチャージポンピング過程。反転状態で伝導帯( $E_c$ )の電子が界面欠陥準位に捕獲され、蓄積状態で捕獲電子が価電子帯( $E_v$ )の正孔と再結合する。ここでは1つの欠陥サイトで電子と正孔が1つずつ再結合する単純なモデルを示している(一方、図6は本研究で提案した詳細なモデル)。(c)チャージポンピングEDMR測定の設定アップ図。シリコンMOSトランジスタを配線した状態で電子スピン共鳴装置に挿入し、チャージポンピング測定する。スピン共鳴に伴うチャージポンピング電流の微小変化(EDMR信号)を検出する。 $B$ 、 $B_{\mu w}$ 、 $E_{\mu w}$ はそれぞれ定磁場、マイクロ波の交流磁場、電場を示している。

を示している。チャージポンピング電流は直流電流（本トランジスタでは  $I_{CP}=10\text{nA}$ ）であるが、実時間測定の結果から、ゲートパルスに伴いチャネルに入り出す電子/正孔に由来した  $1\text{mA}$  程度の大きな振幅の過渡（交流）電流がチャージポンピング電流に重畳していることが分かった。この交流電流は、EDMR 測定の後段で用いるロックイン検出の妨げとなる。そのため、ここでは交流電流成分をフィルタリングする回路をロックイン検出の直前に導入した。

図 2c は、交流電流の振幅を、フィルタ回路の抵抗  $R$  と容量  $C$  で決まる時定数  $\tau$  を横軸として、プロットしたものである。時定数  $\tau$  が増大するにつれて、交流電流の振幅が低減していき、(直流の) チャージポンピング電流のみを抽出することに成功した (図 2d) [4]。

続いて、測定系の感度を、室温下のシリコン MOS トランジスタのチャージポンピング EDMR 測定から評価した。ロックインの出力（微分）スペクトルにおいて、電子スピン共鳴に伴う微小な電流変化 (EDMR 信号) を確認した (図 3a)。これを掃引磁場で積分することで、もとの信号を取得した (図 3b)。

電流変化の大きさ  $\Delta I_{CP}$  は  $100\text{fA}$  であり、図 3c に示す測定系のノイズ ( $1\text{fA}$ ) と比べて十分に大きいことがわかった (信号対ノイズ比は 100)。また、本測定でのチャージポンピング電流 ( $I_{CP}=10\text{nA}$ ) から、欠陥数は  $6 \times 10^4$  個であり、上述の信号対ノイズ比から、本測定系で検出可能なスピン数は、約 600 個であると見積もった。このことは、十分に高い感度を有する測定系を構築できたことを示している。

次に、低温下でのチャージポンピング EDMR 測定を行った。ここでは EDMR 測定系に冷凍機を導入することで、 $10\text{K} \sim 300\text{K}$  の範囲での測定を可能とした。なお、冷凍機の機械振動によってノイズが生じることがわかり、これを抑制することで約 2 桁のノイズの低減に成功した。

図 4a は、低温下 ( $27\text{K}$ ) における出力（微分）スペクトルであり、図 4b は、これを掃引磁場で積分したスペクトルである。図 3 と同様に、電子スピン共鳴に伴うチャージポンピング電流の変化  $\Delta I_{CP}$  が観測された。これを Voigt 関数でフィッティングしたところ、3つのピークで構成されていることがわかった。それぞれの共鳴磁場 ( $g$  値) から信号の起源は、シリコン(100)面/シリコン酸化膜の界面における主要な界面 (近傍) 欠陥 ( $P_{b0}$  センター (赤線) および  $E'$  センター (緑線)) であることが分かった。これらの欠陥の種類の同定においては、定磁場方向に対するトランジスタの挿入角度を変えた複数のスペクトルを取得しており、ピークの  $g$  値の挿入角度依存性が、文献や理論的に導出した  $P_{b0}$  センターと  $E'$  センターの  $g$  値と良く一致することから、この同定が正しいことを裏付けた (なお、 $P_b$  センター、 $E'$  センターはそれぞれ異方性、等方性を示す)。また、同スペクトルでは、伝導帯近傍の浅い準位 (Shallow state, SS) に由来するピークも観測された (青線) [5]。

図 5a (次頁) は、異なる 5つのゲートパルス周波数 ( $3 \sim 5\text{kHz}$ ) に対するスペクトルを示している。図 5b には、同スペクトルの 3つのピークの強度 (高さ) を評価し、それらを周波数の関数としてプロットしている。グラフ上には、同じ周波数条件でのチャージポンピング電流もプロットしている。

3つのすべてのピークにおいて、ピーク強度はパルス周波数に比例していることから、検出された  $P_{b0}$  センターと  $E'$  センターは確かにチャージポンピング過程に寄与していることを確認した。同様に、浅い準位 SS も周波数に比例しているが、後述するように、SS は再結合センターで

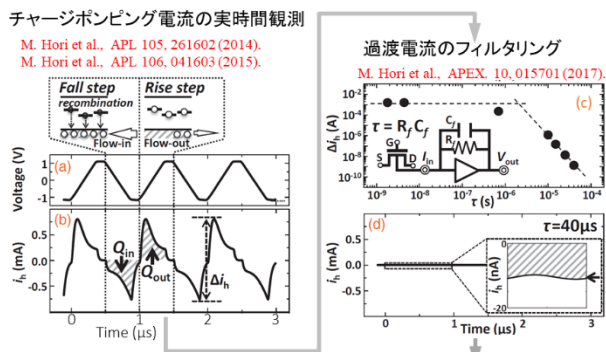


図 2 チャージポンピング電流の実時間観測の結果。(a)パルス電圧と、(b)基板の正孔電流。(c)フィルタ回路の時定数  $\tau$  と交流電流の振幅の関係。(d)時定数  $\tau=40\mu\text{s}$  での実時間測定の結果。

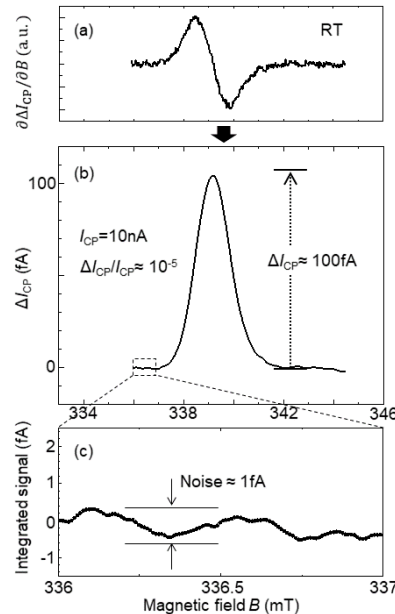


図 3 室温下でのチャージポンピング EDMR の測定結果。(a)微分出力波形と(b)積分波形、および、(c)その拡大図。

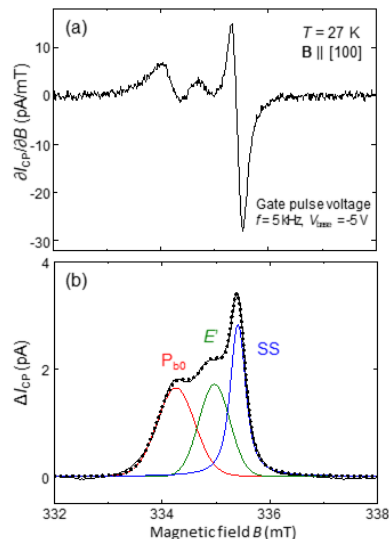
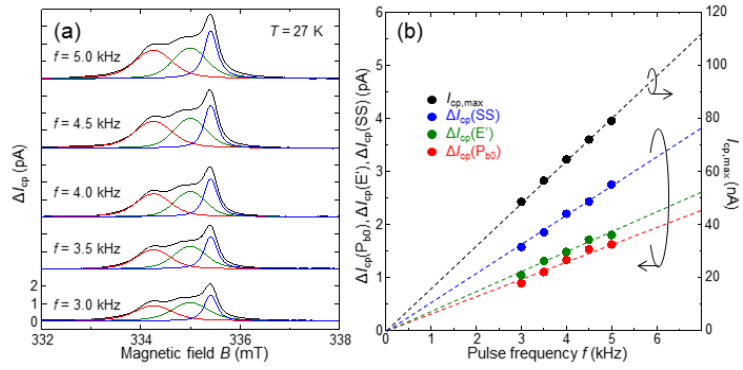


図 4 低温下におけるチャージポンピング EDMR 測定結果 ( $27\text{K}$ )。 (a)出力微分波形。(b)積分波形。微小電流変化  $\Delta I_{CP}$  をフィッティングにより、 $P_{b0}$  センター (赤線)、 $E'$  センター (緑線)、浅い準位 (SS、青線) の 3つのピークに分離した。



はなく、SS と欠陥の電子がスピンペアを形成し、スピンの依存した過程において、SS は欠陥へ電子を供給する役割を果たしていることが分かった。

図 5(a)異なる 5つのゲートパルス周波数( $f=3\sim 5\text{kHz}$ )に対するチャージポンピング EDMR スペクトル。測定温度は 27K。(b)  $P_{b0}$ (赤)、 $E'$ (緑)、SS(青)のピーク高さ  $\Delta I_{CP}$  のパルス周波数依存性。同パルス条件下でのチャージポンピング電流  $I_{CP,max}$ (黒)も同グラフ上でプロットしている。



## (2) チャージポンピング理論の再構築

上記の測定結果に基づき、チャージポンピング理論の再構築を行った。まず、信号の符号に注目すると、図 4b に示したように、共鳴時ではチャージポンピング電流に重畳してわずかに正に増大していることが分かる。このことは、以下のように、EDMR における 2 電子スピンペアのスピンの依存したプロセスで説明できることがわかった。

2 電子スピンペアは、トリプレット (三重項)、あるいは、シングレット (一重項) の状態をとる。トリプレットの場合は、スピンの選択則のために、エネルギーの高い励起状態からエネルギーの低い基底状態へと遷移できず、再結合に寄与しない。一方、シングレットの場合は、励起状態から基底状態へ緩和するため、再結合レートが増大し再結合電流の増加に寄与する。したがって、スピン共鳴により、トリプレットからシングレットへの遷移が可能となり、再結合が加速して、EDMR 信号が観測されると考えられる。

低温下では、欠陥( $P_{b0}$  センターと  $E'$  センター)の電子と浅い準位(SS)の電子とがスピンペアを形成する (オフサイトペア、図 6a 左)。このことは、EDMR スペクトルで SS のピークが、必ず欠陥のピークとともにあらわれることや、SS と欠陥のピーク強度の温度依存性がともに温度のマイナス 2 乗( $T^{-2}$ )の関数であることなどに由来している<sup>[5]</sup>。上述したように、スピン共鳴によって、トリプレットからシングレットへ遷移し、SS の電子が欠陥に供給され、基底状態となる。共鳴時には、欠陥のスピン、あるいは、SS のスピンのいずれかが、それぞれの共鳴磁場でフリップするため、信号は別々の磁場で観測されている。

一方、高温下では、SS の浅い準位のために、その電子は熱的に放出され、スピンペアは同一の欠陥サイトに捕獲される 2 電子間で形成される (オンサイトペア、図 6a 右)。このため、SS の信号は観測されず、欠陥の信号のみが観測される。このように、低温と高温では、異なるスピンペアの形成によって EDMR 信号が検出される。

上述したように、チャージポンピングにおけるスピンの依存したプロセスは、2つの電子のスピンペアの形成に由来している。このことから、 $P_{b0}$  センターと  $E'$  センターを介したチャージポンピングでは、1つの欠陥サイトに対して、2つの電子が伝導帯から価電子帯へ転送されるものと考えられる。このことを図 6b にまとめている。ゲートパルスで正方向に電圧を印加すると、伝導帯の 2つの電子が欠陥サイトに捕獲される (b1 と b2)。続いて、負方向にパルス電圧を印加していくと、捕獲された 2 電子は、2つの価電子帯の正孔と再結合する (b3 と b4)。このように、 $P_{b0}$  センターと  $E'$  センターを介したチャージポンピングは、2 電子のモデルで説明できることが明らかとなった。

なお、一連のチャージポンピング過程で、スピンの依存した過程は、b2 と b3 のプロセス、すなわち、2つ目の電子の捕獲、再結合過程である。以上のように、本研究課題では、測定結果に基づき、チャージポンピング過程を正確に記述する新たなモデルを提案した。

引用文献

- [1] F. A. Zwanenburg et al., *Rev. Mod. Phys.* **85**, 961 (2013).
- [2] G. Groeseneken et al., *IEEE Trans. Electron Devices* **31**, 42 (1984).
- [3] M. Hori et al., *Appl. Phys. Lett.* **105**, 261602\_1-4 (2014), *Appl. Phys. Lett.* **106**, 041603\_1-4 (2015).
- [4] M. Hori, T. Tsuchiya, and Y. Ono, *Appl. Phys. Expr.* **10**, 015701\_1-4 (2017).
- [5] M. Hori and Y. Ono, *Phys. Rev. Appl.* **11**, 064064\_1-12 (2019).

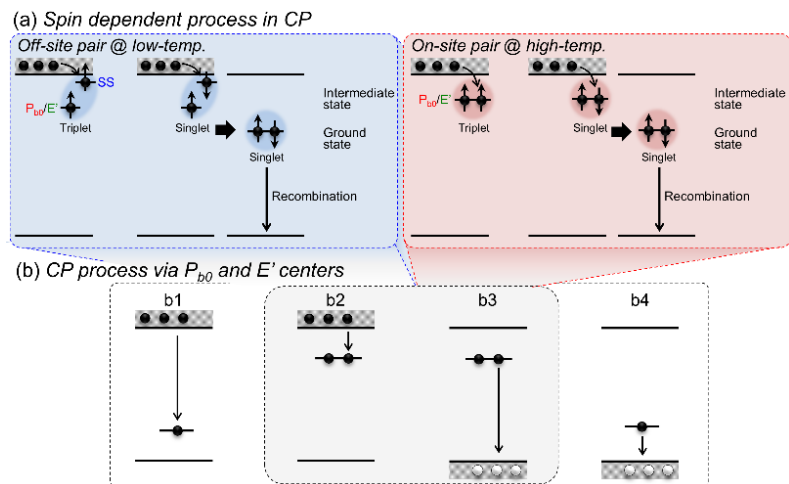


図 6(a)低温下、および、高温下でのスピンの依存したプロセス。(b)  $P_{b0}$  センターおよび  $E'$  センターを介したチャージポンピングモデル。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Afiff Adnan, Samanta Arup, Udhiarto Arief, Sudibyo Harry, Hori Masahiro, Ono Yukinori, Tabe Michiharu, Moraru Daniel	4. 巻 12
2. 論文標題 Coulomb-blockade transport in selectively-doped Si nano-transistors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 085004_1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1882-0786/ab2cd7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Hori Masahiro, Ono Yukinori	4. 巻 11
2. 論文標題 Charge Pumping Under Spin Resonance in Si(100) Metal-Oxide-Semiconductor Transistors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 064064_1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevApplied.11.064064	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Prabhudesai Gaurang, Muruganathan Manoharan, Anh Le The, Mizuta Hiroshi, Hori Masahiro, Ono Yukinori, Tabe Michiharu, Moraru Daniel	4. 巻 114
2. 論文標題 Single-charge band-to-band tunneling via multiple-dopant clusters in nanoscale Si Esaki diodes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 243502_1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5100342	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Firdaus Himma, Watanabe Tokinobu, Hori Masahiro, Moraru Daniel, Takahashi Yasuo, Fujiwara Akira, Ono Yukinori	4. 巻 9
2. 論文標題 Electron aspirator using electron-electron scattering in nanoscale silicon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4813_1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-018-07278-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Firdaus Himma, Watanabe Tokinobu, Hori Masahiro, Moraru Daniel, Takahashi Yasuo, Fujiwara Akira, Ono Yukinori	4. 巻 113
2. 論文標題 Detection of single holes generated by impact ionization in silicon	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 163103_1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5046865	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Samanta Arup, Muruganathan Manoharan, Hori Masahiro, Ono Yukinori, Mizuta Hiroshi, Tabe Michiharu, Moraru Daniel	4. 巻 110
2. 論文標題 Single-electron quantization at room temperature in a-few-donor quantum dot in silicon nano-transistors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 093107_1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4977836	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hori Masahiro, Tsuchiya Toshiaki, Ono Yukinori	4. 巻 10
2. 論文標題 Improvement of charge-pumping electrically detected magnetic resonance and its application to silicon metal-oxide-semiconductor field-effect transistor	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 015701_1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.10.015701	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Tokinobu, Hori Masahiro, Tsuchiya Toshiaki, Fujiwara Akira, Ono Yukinori	4. 巻 56
2. 論文標題 Time-domain charge pumping on silicon-on-insulator MOS devices	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 011303_1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.011303	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計40件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 16件）

1. 発表者名 M. Hori, T. Tsuchiya, Y. Ono
2. 発表標題 Charge Pumping in Silicon MOSFETs-Towards Ultimate Control of Charges and Spins-
3. 学会等名 8th International Symposium on Control of Semiconductor Interfaces (ISCSI-VIII) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野行徳、ヒンマ フィルダウス、渡邊時暢、堀匡寛、ダニエル モラル、高橋 庸夫、藤原聡
2. 発表標題 ナノスケール・シリコンにおける電子・電子散乱を利用したエレクトロン・アスピレーター
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀匡寛、小野行徳
2. 発表標題 シリコンMOSトランジスタにおける電子スピン共鳴下のチャージポンピング
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 土屋敏章、堀匡寛、小野行徳
2. 発表標題 チャージポンピング法による単一Pb1センターの検出
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀匡寛、土屋敏章、小野行徳
2. 発表標題 シリコンMOS界面のチャージポンピングEDMRにおける信号強度の温度依存性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土屋敏章、堀匡寛、小野行徳
2. 発表標題 単一MOS 界面トラップの2 電子準位の相関I -準位密度分布-
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土屋敏章、堀匡寛、小野行徳
2. 発表標題 単一MOS 界面トラップの2 電子準位の相関 II -電子捕獲過程-
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Hori、Y. Ono
2. 発表標題 Charge pumping EDMR on silicon MOSFETs
3. 学会等名 5th International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (ICONN2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 T. Tsuchiya, M. Hori, Y. Ono
2. 発表標題 Detection and Characterization of Single Near-Interface Oxide Traps with the Charge Pumping Method
3. 学会等名 2018 IEEE International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀匡寛、土屋敏章、小野行徳
2. 発表標題 シリコンMOS界面におけるチャージポンピングEDMR
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土屋敏章、堀匡寛、小野行徳
2. 発表標題 2トラップ間のチャージポンピング相互作用
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀匡寛、小野行徳
2. 発表標題 チャージポンピングEDMR法を用いたSiO <sub>2</sub> /Si界面の欠陥検出
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会中部支部研究会『Si表面・界面・ナノ構造の研究最前線』（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Ono, H. Firdaus, M. Hori
2. 発表標題 Observation of Impact Ionization in Silicon at Low Temperature
3. 学会等名 IV Bilateral Italy-Japan Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Hori, Y. Ono
2. 発表標題 Charge pumping EDMR towards ultimate charge/spin control at room temperature in silicon
3. 学会等名 IV Bilateral Italy-Japan Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Firdaus, M. Hori, Y. Takahashi, A. Fujiwara, Y. Ono
2. 発表標題 Sensitive Detection of Holes Generated by Impact Ionization in Silicon
3. 学会等名 2017 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Hori, T. Watanabe, Y. Ono
2. 発表標題 Real-time Monitoring of Charge-pumping Process for SiO <sub>2</sub> /Si Interface Analysis
3. 学会等名 The 15th International Conference on QiR (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堀匡寛、土屋敏章、小野行徳
2. 発表標題 チャージポンピング E D M R法を用いたシリコン酸化膜界面欠陥の検出
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊時暢、堀匡寛、小野行徳
2. 発表標題 Silicon-on-insulatorデバイスにおける低温チャージポンピング
3. 学会等名 電子情報通信学会 シリコン材料・デバイス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堀匡寛、土屋敏章、小野行徳
2. 発表標題 チャージポンピング E D M R法を用いたシリコン酸化膜界面欠陥の検出
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土屋敏章、堀匡寛、小野行徳
2. 発表標題 チャージポンピング法によるSi/SiO <sub>2</sub> 界面近傍酸化膜トラップの評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 安藤克哉、堀匡寛、土屋敏章、小野行徳
2. 発表標題 チャージポンピングEDMR法における信号強度の温度異存性評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M.Hori、Y.Ono
2. 発表標題 Charge pumping EDMR for MOS interface analysis
3. 学会等名 The 18th Takayanagi Kenjiro Memorial Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y.Ono、M.Hori、A.Fujiwara
2. 発表標題 Silicon Single Boron Transistor
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Nano Electronics Research and Education (ICNERE2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M.Hori、Y.Ono
2. 発表標題 EDMR on recombination process in Silicon MOSFETs at room Temperature
3. 学会等名 15th International Conference on Global Research and Education (Inter-Academia 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Y.Ono、M.Hori、G.P.Lansbergen、A.Fujiwara
2. 発表標題 Manipulation of Single Charges Using Dopant Atoms in Silicon-Interplay with Intervalley Phonon Emission
3. 学会等名 15th International Conference on Global Research and Education (Inter-Academia 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 T. Watanabe、M.Hori、Y.Ono
2. 発表標題 Time domain charge pumping on silicon-on-insulator MOS transistors
3. 学会等名 2016 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M.Hori、R.Narimatsu、Y. Ono
2. 発表標題 Charge pumping EDMR towards charge/spin manipulation in silicon at room temperature
3. 学会等名 2016 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 M. Hori、Y. Ono
2. 発表標題 Novel application of the charge pumping process for charge and spin control
3. 学会等名 EMN Meeting on Quantum 2016 (EMN2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 小野行徳、堀匡寛、土屋敏章
2. 発表標題 シリコンにおけるチャージポンプー電荷とスピンの室温極限操作に向けてー
3. 学会等名 第29回シリサイド系半導体研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊時暢、堀匡寛、土屋敏章、藤原聡、小野行徳
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渡邊時暢、堀匡寛、小野行徳
2. 発表標題 SOI MOS p-i-nダイオードの低温チャージポンピング
3. 学会等名 電子情報通信学会研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 堀匡寛、成松諒一、土屋敏章、小野行徳
2. 発表標題 高感度チャージポンピングEDMR法の開発
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ  
<https://wpp.shizuoka.ac.jp/nano/>  
プレス発表  
トランジスタ界面欠陥の高精度観測技術を確立 (2019年6月24日)  
[https://www.shizuoka.ac.jp/pressrelease/pdf/2019/PressRelease\\_11.pdf](https://www.shizuoka.ac.jp/pressrelease/pdf/2019/PressRelease_11.pdf)  
静大, トランジスタ界面欠陥を高精度で観測 (2019年6月25日)  
<http://www.optronics-media.com/news/20190625/58192/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----