

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02203

研究課題名（和文）シリコントランジスタのゲート制御による電子正孔系の形成と量子凝縮現象の発現

研究課題名（英文）Electrical control of electron-hole coexisting system at silicon transistors

研究代表者

堀 匡寛 (HORI, Masahiro)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号：50643269

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：エレクトロニクスへの応用上、特に重要となるシリコン・トランジスタにおいて励起子の量子凝縮（超流動）を観測することを念頭に、電子正孔共存系の形成手法を提案し、これを実証した。具体的には、シリコン・トランジスタのゲート電圧制御により、電子と正孔をトランジスタ界面近傍で同時に存在させることに成功した。またそこで生じる再結合電流の解析により、量子凝縮で必要となる近接した電子正孔二層系が形成されていることを明らかにした。さらに、再結合電流の実時間計測から励起子生成の可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度情報化社会を支える集積回路の性能は、その主要構成素子であるシリコン・トランジスタの性能に依っている。しかし、従来のトランジスタ微細化だけでは性能向上は期待できず、そのため新原理で動作する革新的デバイスの創出が急務とされている。本課題では、励起子量子凝縮を反映した特徴的な特性（超流動）を新たな伝導機構としてシリコン・トランジスタに付与することを念頭に、電子正孔共存系の形成手法を確立した。本手法を用いてさらに検討を進めていくことで、既存トランジスタの消費電力を大幅に低減できる可能性があり、これによりエレクトロニクスに貢献するものと期待される。

研究成果の概要（英文）：A basic technology has been developed with a view to observing exciton quantum condensation (superfluidity phenomenon) in silicon transistors, which is particularly important for electronics applications. We have succeeded in forming electrons and holes co-existing system by controlling the gate of a silicon transistor at low temperatures. Analysis of the recombination current generated in the transistor revealed that the electrons and holes are in extremely close proximity. Direct observation of the recombination processes suggests the formation of excitons, which is important in quantum condensation.

研究分野：ナノエレクトロニクス

キーワード：シリコンMOSFET 電子正孔共存系 再結合

### 1. 研究開始当初の背景

高度情報化社会を基盤から支える集積回路の性能は、その主要構成部品であるシリコン・トランジスタの性能に依ってる。これまでトランジスタは微細化により動作速度向上と消費電力低減を可能にしてきた。しかし、原子サイズにまで縮小したトランジスタでは性能向上はもはや期待できず、そのため微細化に依らない新原理で動作する革新的デバイスの創出が急務となっている。

一方、半導体上で電子と正孔が同時に存在する多体系（電子正孔共存系）では、電子-正孔間に働くクーロン相互作用により、その密度と温度に依存して、励起子ガス、プラズマ、液体（液滴）といった多様な相が形成され、基礎多体系物理の観点から広く調べられている（図 1）。特に極低温下における励起子は量子凝縮（ボース・アインシュタイン凝縮）すると超流動へと転移することが理論的に証明されており、これを電子デバイスに応用する研究が様々な材料・構造を用いて盛んに進められている[1,2]。しかしながら、エレクトロニクスにおいて特に重要となるシリコン・トランジスタでは、励起子量子凝縮に必要な均一な密度分布で、かつ、近接した電子正孔二層系を形成することが技術的に困難であったため、その研究はほとんど進んでいない。もしシリコン・トランジスタ上で励起子の量子凝縮を発現することができれば、既存トランジスタの消費電力を大幅に低減できる可能性があり、これにより大規模量子コンピュータで必須となるクライオ CMOS 集積回路などの低温エレクトロニクスに貢献するものと期待される。

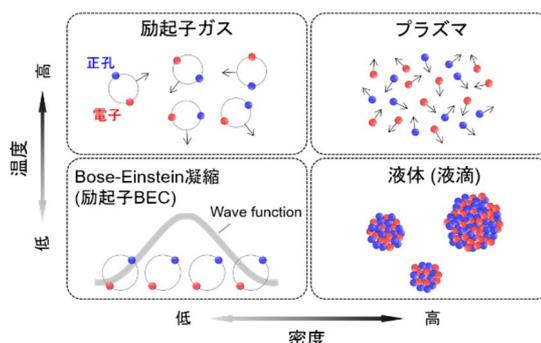


図 1. 半導体における電子正孔共存系の相図。クーロン相互作用により温度と密度に依存して多様な相が形成される。

### 2. 研究の目的

上記の背景のもと、本研究ではシリコン・トランジスタで励起子の量子凝縮を観測することを念頭に、同トランジスタの界面で電子正孔共存系の形成手法の確立を目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、標準プロセスで作製されたシリコン MOS(metal-oxide-semiconductor)トランジスタを用い、そのゲート電圧制御により電子正孔共存系を形成した[3]。図 2(a)は N チャネル MOS トランジスタを用いた場合のセットアップを示している。ゲートにはパルス電圧を印加し、ソース、ドレイン、基板はともに接地している。なお、挿入図はゲートパルスのベース電圧  $V_{base}$  と振幅電圧  $V_{amp}$  の定義を示している。

電子正孔共存系形成の手順は以下の通りである。はじめに、ゲートに負のベース電圧  $V_{base}$  を印加し、界面に正孔を蓄積させる（パルス・セット状態、図 2(b)左）。次に、ゲートに正方向となる振幅電圧  $V_{amp}$  を与える（パルス・オン状態、図 2(b)右）。この一連のパルス操作を低温下（30 K 以下）で行うと、正方向のゲート電圧変化を与えても、蓄積した正孔は MOS 界面でのポテンシャル障壁を熱的に乗り越えることができずに界面に留まる。また、パルス・オン時の正方向への電圧振幅  $V_{amp}$  を十分に大きくすると、界面に留まる正孔に向かってソース/ドレイン端子から電子が流入する。これにより、過渡的に電子正孔共存系が形成される。その後、電子と正孔は再結合して消滅する。

電子正孔共存系の形成の確認には、再結合の電流  $I_{rec}$  を計測する。ここで  $I_{rec}$  は素電荷  $e$ 、電子正孔再結合密度  $N_{rec}$ 、パルス周波数  $f$ 、チャネル面積  $A$  で決まる値である ( $I_{rec}=eN_{rec}fA$ )。励起子量子凝縮を観測するためには、再結合までの時間が長いほど好ましい。シリコンは間接遷移半導体の一つであり、量子凝縮において重要とな

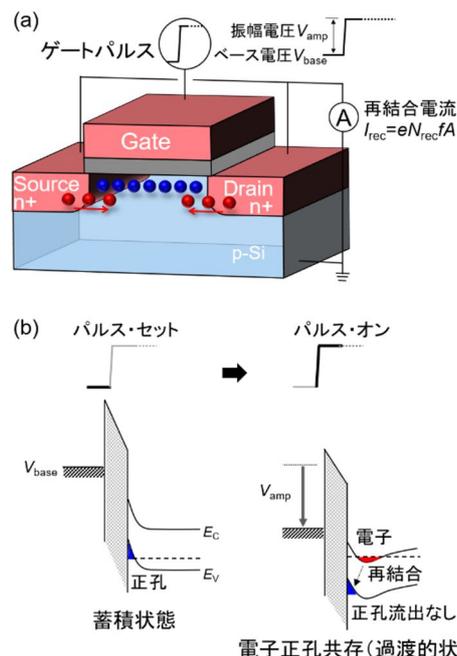


図 2. (a)シリコン N チャネル MOS トランジスタを用いた場合のセットアップ図。(b)電子正孔共存系形成手法の概要図。まずパルス・セットで正孔を蓄積し(左)次にパルス・オン(右)で電子を流入させる。2つのエネルギーバンド図は、各電圧印加時の様子。

る励起子の再結合時定数がマイクロ秒と他の材料と比べて長いという利点がある。以下では、電子と正孔の密度がゲートパルスのパラメータ(ベース電圧と振幅電圧)により制御できることを示す。次に、電子と正孔の層間距離の見積もり、および、再結合時定数の見積もりについて報告する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 電子正孔密度の評価

図3は、再結合電流  $I_{rec}$  のベース電圧  $V_{base}$  依存性を示している(測定温度は8ケルビンである)。右軸には  $I_{rec}$  から変換した再結合密度  $N_{rec}$  を示している。ベース電圧を負方向に掃引していくと、再結合電流は直線的に増加していることがわかる。これは、パルス・セット状態で蓄積される初期の正孔密度  $N_{h0}$  がベース電圧に依存して増加しているためである(青線)。ここで、直線の傾きはゲート-正孔間の容量  $C_{g,h}$  を反映するはずであり、実際にこの値は容量電圧  $C-V$  測定から見積もられたゲート酸化膜容量  $C_{ox}$  とよく一致することを確認した。

さらに負方向にベース電圧を掃引していくと再結合電流が一定となり飽和していることがわかる。これは、ベース電圧に依存して正孔密度は増加する一方で、振幅電圧  $V_{amp}$  を固定しており流入電子の密度  $N_e$  が一定であるためと考えられる。このことを確認するために、同様の測定を振幅電圧  $V_{amp}$  をパラメータとして実施した。なお挿入図は、各ベース電圧における4つのバンドダイアグラムを示している。同バンドダイアグラムに示すように、再結合密度  $N_{rec}$  (黒矢印の本数)は正孔密度  $N_{h0}$  (青丸の数)と電子密度  $N_e$  (赤丸の数)のいずれか少ない方で決まるはずであり、直線領域では正孔密度が電子密度よりも少なく( $N_{h0} < N_e$ )、飽和領域では電子密度が正孔密度よりも少ない( $N_e < N_{h0}$ )と考えられる。(図中の再結合電流における斜線領域は、シリコン酸化膜/シリコン界面欠陥に捕獲された正孔と電子との再結合に起因する電流で、いわゆるチャージポンピング電流と呼ばれる電流である[4]。)

図4(a)は、再結合電流  $I_{rec}$  のベース電圧  $V_{base}$  依存性を振幅電圧  $V_{amp}$  をパラメータとして取得したものである。上で予想した通り、振幅電圧の増加に伴い再結合電流が増加しており、電子密度  $N_e$  の増加が確認された。図4(b)はベース電圧を  $-10V$  に固定し、振幅電圧をパラメータとした再結合電流依存性を示している。ここから、シリコンのバンドギャップに相当する電圧変化(振幅電圧  $V_{amp,th} \sim 1.1V$ )以上を与えると電子が流入し、再結合電流が生じていることがわかる。また、振幅電圧と再結合電流が線形の関係にあることから、ゲートと流入電子は容量的に結合しており、その直線の傾きはゲート-電子間の容量  $C_{g,e}$  を反映するものと考えられる。以上のように、電子密度と正孔密度をそれぞれパルスの振幅とベース電圧により制御できることを確認した。

##### (2) 電子正孔層間距離の見積もり

次に、上記で取得したゲート-正孔間容量  $C_{g,h} = 116 \text{ nF/cm}^2$  (図3と図4(a)の青線の傾き) および、ゲート-電子間の容量  $C_{g,e} = 109 \text{ nF/cm}^2$  (図4(b)の赤線の傾き)の値から、電子と正孔の層間距離の見積もりを行う。それぞれの容量値を比較す

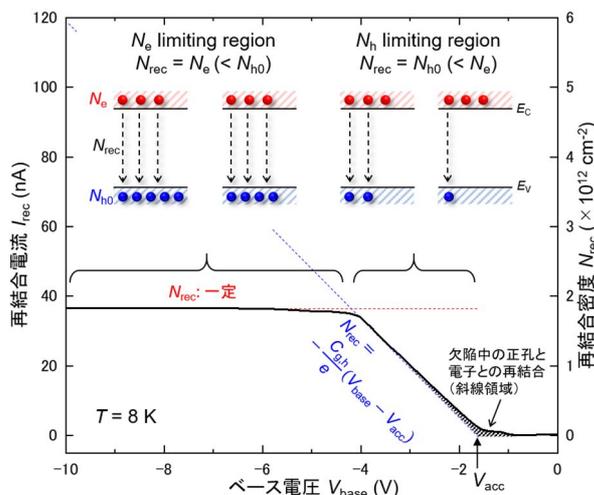


図3. 再結合電流のベース電圧依存性。右軸は再結合電流から換算した再結合密度。挿入図は各ベース電圧におけるエネルギーバンド図。赤丸と青丸はそれぞれ電子と正孔を示している。

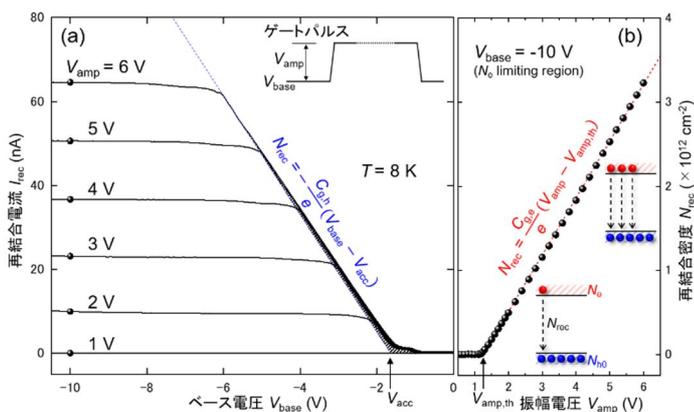


図4. (a)振幅電圧をパラメータとした再結合電流のベース電圧依存性。(b)再結合電流の振幅電圧依存性。挿入図は各振幅電圧のエネルギーバンド図。

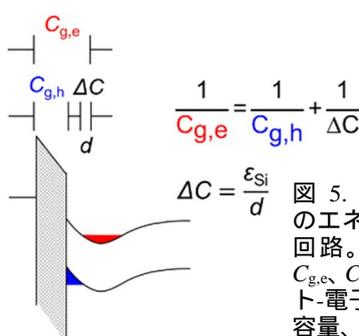


図5. 電子正孔共存系形成時のエネルギーバンド図と等価回路。等価回路中の各容量  $C_{g,e}$ ,  $C_{g,h}$ ,  $C$  はそれぞれゲート-電子間容量、ゲート-正孔間容量、付加容量を示している。

ると、 $C_{g,e}$ の値が $C_{g,h}$ の値よりも小さいことから、電子は界面の正孔から基板方向に離れて存在していることが考えられる(図5)。ここで、付加容量 $\Delta C$ を用いると以下の関係が成り立つ。

$$1/C_{g,e} = 1/C_{g,h} + 1/\Delta C \quad (1)$$

$\Delta C$ の値から距離 $d$ は約5ナノメートルと見積もられた。この距離は、過去に報告されているシリコンの励起子ボア半径とよく一致しており、本手法によって極めて近接した電子正孔2層系が形成されていることが明らかとなった。

### (3) 再結合時定数の見積もり

以下では電子正孔共存系の再結合時定数の見積もりについて報告する。このために、ゲートパルスのオン時間 $t_{ON}$ をパラメータとした(オン時間の定義は図6挿入図に示している)。上記の(1)と(2)の実験では $t_{ON}$ はすべての再結合が完了するミリ秒に設定していたが、ここでは $t_{ON}$ を可変とする。 $t_{ON}$ を短くすることにより、再結合時間の長い電子正孔対は再結合に参加できず、そのため再結合電流 $I_{rec}$ は減少するものと期待される。

図6(a)は $t_{ON}$ の再結合電流依存性を示している。期待通り $t_{ON}$ が短くなるにつれて再結合電流は減少している。フィッティングにより再結合時定数を見積もると、短い時定数(30ナノ秒、赤線)と長い時定数(0.7マイクロ秒、青線)の2種類の時定数があることがわかった。なお、フィッティングに用いた式は図中に示しており、測定結果から短い時定数のフィッティング曲線(赤線)を差し引いた後の再結合電流を図6(b)に示している。過去の報告から、これらの時定数の値は、それぞれ高密度プラズマおよび励起子の再結合時定数とよく一致していることがわかった。このことから、電子正孔共存系の形成直後の高密度なプラズマ状態を経て、再結合が進むにつれて、低密度で強く束縛した電子正孔対(励起子)が生成されている可能性が示唆された。

以上より、本手法により量子凝縮で重要となる近接した電子正孔2層系を形成できることを示し、また、励起子形成を示唆する結果を得た。今後は電子正孔密度や温度をパラメータとして詳細な解析を進める予定である。

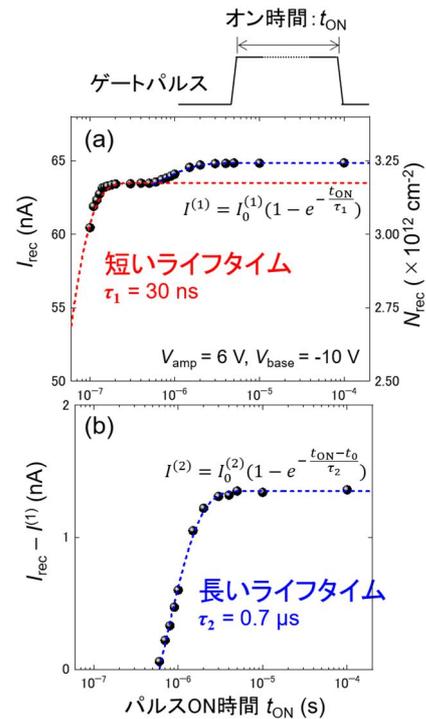


図6. (a)再結合電流のパルス・オン時間依存性。挿入図はゲートパルスのオン時間の定義。赤線、青線はフィッティング曲線を示している。赤線より短いライフタイムが見積もられた。(b)測定結果から赤線を差し引いた再結合電流。青線より長いライフタイムが見積もられた。

### < 引用文献 >

- [1] J. P. Eisenstein et al., *Nature* **432**, 691 (2004).
- [2] Z. Wang et al., *Nature* **574**, 76 (2019).
- [3] M. Hori et al., *Communications Physics* **6**, 316\_1-11 (2023).
- [4] M. Hori et al., *Applied Physics Letters* **118**, 263504\_1-6 (2021).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hori Masahiro, Kume Jinya, Razanoelina Manjakavahoaka, Kageshima Hiroyuki, Ono Yukinori	4. 巻 6
2. 論文標題 Electrical control of transient formation of electron-hole coexisting system at silicon metal-oxide-semiconductor interfaces	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 316_1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42005-023-01428-1	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 Watanabe Ryo, Karasawa Fumiya, Yokoyama Chikamasa, Oshima Kazumasa, Kishida Masahiro, Hori Masahiro, Ono Yukinori, Satokawa Shigeo, Verma Priyanka, Fukuhara Choji	4. 巻 13
2. 論文標題 Highly stable Fe/CeO <sub>2</sub> catalyst for the reverse water gas shift reaction in the presence of H <sub>2</sub> S	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 RSC Advances	6. 最初と最後の頁 11525-11529
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1039/d3ra01323e	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 Toida Hiraku, Sakai Koji, Teshima Tetsuhiko F., Hori Masahiro, Kakuyanagi Kosuke, Mahboob Imran, Ono Yukinori, Saito Shiro	4. 巻 6
2. 論文標題 Magnetometry of neurons using a superconducting qubit	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications Physics	6. 最初と最後の頁 19_1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42005-023-01133-z	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 Razanoelina Manjakavahoaka, Hori Masahiro, Fujiwara Akira, Ono Yukinori	4. 巻 14
2. 論文標題 Critical conductance of two-dimensional electron gas in silicon-on-insulator metal-oxide-semiconductor field-effect transistor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 104003_1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ac25c4	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, Ono Yukinori	4. 巻 118
2. 論文標題 Detection of arsenic donor electrons using gate-pulse-induced spin-dependent recombination in silicon transistors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 263504_1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0053196	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26件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 堀 匡寛, 小野 行徳
2. 発表標題 シリコンMOS界面における電子正孔共存系の形成
3. 学会等名 2024年 第71回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 土屋 敏章, 堀 匡寛, 小野 行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測 (11) -捕獲電子の再結合過程 ( )-
3. 学会等名 2024年 第71回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 土屋 敏章, 堀 匡寛, 小野 行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測 (10) -捕獲電子の再結合過程 ( )-
3. 学会等名 2024年 第71回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 土屋 敏章, 堀 匡寛, 小野 行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測 (9) -捕獲電子の再結合過程 ( )-
3. 学会等名 2023年 第84回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 土屋 敏章, 堀 匡寛, 小野 行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測 (8) -捕獲電子の再結合過程 (I)-
3. 学会等名 2023年 第84回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋田 啓, 角柳 孝輔, Leonid V. Abdurakhimov, 堀 匡寛, 小野 行徳, 齊藤 志郎
2. 発表標題 超伝導磁束量子ビットによるシリコン中ピスマス不純物の磁化測定
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会 (2023年)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masahiro Hori, Jinya Kume, Yukinori Ono
2. 発表標題 Electrical formation of electron-hole bilayer system in Si MOS transistors
3. 学会等名 2023 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ahmed Nabil, Manjakavahoaka Razanoelina, Masahiro Hori, Akira Fujiwara, Yukinori Ono
2. 発表標題 Drag of Electron-Hole Bilayer in Silicon-on-Insulator at Low Temperature
3. 学会等名 Silicon Nanoelectronics Workshop 2023 (SNW 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 樋田啓, 酒井洸児, 手島哲彦, 堀匡寛, 角柳孝輔, Imran Mahboob, 小野行徳, 齊藤志郎
2. 発表標題 超伝導磁束量子ビットによる神経細胞の磁化測定
3. 学会等名 2023年 日本物理学会 春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 土屋敏章, 堀匡寛, 小野行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測 (7) - Dに関する考察 -
3. 学会等名 2023年 第70回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 土屋敏章, 堀匡寛, 小野行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測 (6) - 欠陥構造緩和( )-
3. 学会等名 2023年 第70回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Hori
2. 発表標題 Charge pumping under electron spin resonance in Si MOSFETs
3. 学会等名 第24回高柳健次郎記念シンポジウム（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jinya Kume, Yukinori Ono, and Masahiro Hori
2. 発表標題 Electrical formation of electron-hole coexisting system at Si MOS interfaces
3. 学会等名 第24回高柳健次郎記念シンポジウム（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋敏章，堀匡寛，小野行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測（5）-タイプ4と5の識別-
3. 学会等名 2022年 第83回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋敏章，堀匡寛，小野行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測（4）-欠陥構造緩和-
3. 学会等名 2022年 第83回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋敏章, 堀匡寛, 小野行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測(3)-ドナー型準位-
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋敏章, 堀匡寛, 小野行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測(2)-アクセプタ型準位-
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土屋敏章, 堀匡寛, 小野行徳
2. 発表標題 MOS界面の単一欠陥チャージポンピングによって可能となった両性準位における電子捕獲素過程の直接観測(1)-両性準位のDOS-
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀匡寛, 小野行徳
2. 発表標題 Si MOSFETにおける電子スピン共鳴チャージポンピング
3. 学会等名 東北大学-静岡大学合同冬季研究会 共同プロジェクト研究(R02/S01) 先端的コヒーレント波技術の基盤構築とその応用
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Hori, Y. Ono
2. 発表標題 Charge pumping under electron spin resonance in Si MOSFETs-Identification of interface defects and detection of donor electrons-
3. 学会等名 International Workshop on Dielectric Thin Films for Future Electron Devices (2021 IWDTF) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金原涼伽, 加藤拓也, 堀匡寛, 小野行徳
2. 発表標題 4端子シリコン・エサキダイオードの作製と低温特性評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 久米仁也, 小野行徳, 堀匡寛
2. 発表標題 シリコントランジスタのゲート制御による電子正孔系の形成手法の確立
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021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を用いたシリコントランジスタ中のヒ素ドナー電子の検出
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masahiro Hori
2. 発表標題 Charge pumping under electron spin resonance
3. 学会等名 6th International Conference on Nanoscience and Nanotechnology (ICONN2021)Virtual Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021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 (再講演)
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小野 行徳, フィルガス ヒンマ, 渡邊 時暢, 堀 匡寛, モラル ダニエル, 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 (再講演)
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

静岡大学 小野・堀研究室ホームページ  
<https://wpp.shizuoka.ac.jp/nano/>

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
研究 分 担 者	小野 行徳  (ONO Yukinori)  (80374073)	静岡大学・電子工学研究所・教授     (13801)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関