

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K19052

研究課題名(和文) ミクロの原子/分子スイッチとマクロの電気伝導を繋ぐ原子スケールエレクトロニクス

研究課題名(英文) Atomic-scale electronics linking microscopic atomic/molecular switches and macroscopic electrical transport

研究代表者

山崎 詩郎 (Yamazaki, Shiro)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：70456200

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：超高真空状態の達成、コントローラーをはじめとするすべての電極の接続を確認した。まずは室温において超高真空中でナノスケールの像を得ることに成功した。これにより、室温でのSTMの立ち上げが完了し、本研究計画に必要な80Kでの低温測定およびAFM化への下地が全て整った。研究の基盤となるSi₄単体のAFMによる原子スイッチの研究結果が、日本物理学会誌にされた。絶縁体であるTiO₂基板上のSrTiO₃-r13xr13表面においてSTMの電流誘起の新しい原子スイッチを発見した。これは絶縁体上としては稀な原子スイッチと言え、国際学会2件を含む学会3件で発表され、国際学会において発表賞を受賞した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

走査トンネル顕微鏡(STM)は、原子分解能像を得るのみならず、原子を一つ一つ動かす原子操作や原子スイッチが可能である。一方で、原子間力顕微鏡(AFM)により、単一分子の分子骨格が画像化されるなど進展が著しい。研究代表者は、4つのSi原子が傾いて結合したSi₄原子スイッチを作製し、世界で初めてSTMのトンネル電流とAFMの化学結合力の両方で同時に原子スイッチさせることに成功した[論文Nano Letters]。本研究計画では、Si₄原子スイッチ同士や分子と連動させて、それらの電子状態をSTMで結合状態をAFMで、さらに電気伝導状態をSTPで可視化することを最終目標とした。

研究成果の概要(英文)：We have achieved an ultra-high vacuum state and confirmed the connection of all electrodes including the controller. First, we succeeded in obtaining nano-scale images in an ultra-high vacuum at room temperature. As a result, the start-up of STM at room temperature was completed, and all the foundations for low-temperature measurement at 80 K and AFM necessary for this research plan were completed. The results of research on atomic switches by AFM of single Si₄, which is the basis of research, were published in the Journal of the Physical Society of Japan. A novel current-induced atomic switch for STM was discovered on the surface of SrTiO₃-r13xr13 on an insulating TiO₂ substrate. This can be said to be a rare atomic switch on an insulator, and was presented at 3 conferences, including 2 international conferences, and received a presentation award at the international conference.

研究分野：物理学

キーワード：走査トンネル顕微鏡 原子間力顕微鏡 走査トンネル電位計 原子スイッチ 電気伝導 分子 表面

1. 研究開始当初の背景

ノーベル物理学賞に輝いた走査トンネル顕微鏡 (STM) は、鋭い探針を 1nm 以下まで対象に近づけてトンネル電流を検出し、原子スケールで電子状態を画像化する顕微鏡である。また、原子間力顕微鏡 (AFM) は、探針を数 nm まで対象に近づけて数 nN の原子間の力を検出し、STM 以上の分解能で原子構造や分子骨格を画像化する顕微鏡である。

これらの顕微鏡は探針を用いるため、探針で対象を“触る”ことで原子を一つ一つ動かす原子操作が可能なのが他の顕微鏡にはない特徴である。特に、原子操作によって 2 つの基底状態の間で変形するものは原子スイッチと呼ばれる。1991 年に世界初の原子スイッチ (D. Eigler, et al., Nature 352, 600 (1991)) が報告されてから、新たな動作原理や応用可能性を備えた 100 種類を超える原子/分子スイッチが報告されてきた (Science 306, 242 (2004), Science 317, 1203 (2007), Nat. Nanotechnol. 8, 46 (2012))。このような原子スイッチは限界を迎えつつあるトップダウン型の半導体微細加工技術を根本的に解決するボトムアップ型の次世代エレクトロニクスの要素技術として応用面からも期待がもたれている。

しかしながら、これまで発見された原子スイッチのほとんどは、理想的に準備された金属表面上で極低温 (4K) で限のみ実現され、現代の半導体産業と親和性の無いものであった。また、動作原理は STM のトンネル電流のみによってランダムに駆動するものがほとんどであった。さらに、論理演算に必要な原子スイッチ間の相互作用の研究はごくわずかしかなかった。

研究代表者は、半導体である Si(111)-7×7 表面上に原子操作によって 4 つの Si 原子が傾いて結合した Si₄ 原子スイッチを作成することに成功した。さらに、STM のトンネル電流だけではなく、AFM の探針相互作用力によって指向向にスイッチ駆動させ、さらに STM と AFM を組み合わせることで任意の方向に自由自在に原子スイッチさせることに成功した [日本物理学会若手奨励賞、論文 Nano Letters]。

一方で、走査トンネル電位計 (STP) は 2 本の端子で試料面内方向にマクロな電流を流しながら第 3 の探針で電気伝導を画像化する手法である。電位降下の傾きの大小から電気抵抗の高低が局所的にわかる。近年、4 つの探針で接触抵抗なしに電気伝導を測定する 4 探針 STM に STP を組み込んだ 4 探針 STP により原子スケールの電気伝導が画像化された [Nat. Mat. 11, 114 (2012)]。研究代表者は同様の装置の立ち上げや、構造を持った単原子層グラフェン [日本物理学会若手奨励賞、論文 Nano Letters]、単原子層 [日本物理学会若手奨励賞、論文 Physical Review Letters] の電気伝導測定に取り組んできた。

電気伝導は試料全体で起こるマクロな現象であるが、かといって試料のマクロな電子状態さえわかれば電気伝導のすべてが説明できるわけではない。なぜなら、試料には原子スケールの接合、単原子ステップ、曲げ、モアレ、表面構造、エッジ状態、位相欠陥などのミクロ構造が多数あり、これらがマクロな電気伝導に影響を与えるからである。しかしながら、両者はスケールの異なる現象であり、これらの関係はほとんど明らかになっていない。

2. 研究の目的

走査トンネル顕微鏡 (STM) は原子スケールで電子状態を可視化する顕微鏡である。一方、原子間力顕微鏡 (AFM) は原子位置や分子骨格を可視化する顕微鏡である。さらに、走査トンネル電位計 (STP) は試料にマクロな電流を流しながらナノスケールで電気伝導をマッピングする手法である。本研究計画ではこれらを組みあわせ、原子や分子や単原子層を対象に、それらの電子状態を STM で結合状態を AFM で、さらに電気伝導状態を STP で、原子スケールで可視化する。これにより、ミクロな構造がマクロな電気伝導にどのような影響を与えるのかを明らかにすることを最終目標に掲げた。

物性物理の学術の現状は、大きく二分化されている。一つは光電子分光や STM を用いて電子状態や原子構造などの原子スケールのミクロな静的な物性を詳しく調べる方向である。もう一つは電気伝導測定などにより mm スケールのマクロな動的な性質を調べる方向である。両者が相いれないのは原子スケールで静的な物性を把握しつつ、同時にそこに原子スケールで電気を流すといった測定が大変困難だからである。しかし 10 年後にはムーアの法則が限界を迎え、真に原子スケールのエレクトロニクスの時代が始まる。研究代表者はこの困難に挑戦しミクロとマクロを融合する。

3. 研究の方法

本研究計画では、実験装置の開発と立ち上げが非常に大きなウエイトを占めた。以下に、その状況を述べる。

室温における超高真空走査トンネル顕微鏡の立ち上げの完了

(本研究計画の【装置改造1：力と分子骨格計測のためのAFM化】、および【装置改造2：電気伝導測定のためのSTP多探針化】の基幹部分に対応。)

東北大学との共同研究により、Unisoku社製の走査トンネル顕微鏡の骨格となる装置を整備し、修繕が必要であった数十の点を一つ一つ解決した。特に、天井に穴をあけて装置全体の60cmかさ上げする大規模な工事は次のステップとなる低温実験の準備として重要な進展であった。ターボポンプやイオンポンプなどの真空部品約30点を装置に組み込み、さらにベーキング機構を整えることで、装置全体を超高真空状態にする重要なステップをクリアした。

並行して、STMの本体の内部の配線と電極的な接続を慎重に確認し、高電圧アンプなどのNanonis社製のSTMのコントローラーを接続し、専用のコンピューターと接続することで、STMとして動作させるステップをクリアした。また、ロックインアンプを接続し、電流のキャパシタンス成分を検出し探針の位置を確認する方法を確立した。以上の整備により、まずは室温において超高真空中でナノスケールのSTM像を得ることに成功した。試料の加熱機構を整備し、Si(111)基板を清浄化し、7x7表面の形成を確認するための反射高速電子線回折(RHEED)の設置を完了させた。以上より、室温におけるSTMの立ち上げが完了し、引き続き80Kでの低温測定の準備が進んでいる。

さらに、数か月を要して、数百点の装置全体を極低温における研究環境の整った大学に全て移設した。これに伴うSTMヘッドの配線と粗動機構の修理を完了させ、移動後にSTMとして動作させることに成功した。高さのある装置を収納するために天井の工事を行った。スペアとしてもう一つのSTMの組み立てを開始している。

将来的には、力による原子スイッチと分子骨格計測を行うためにはAFMセンサーの加振とその検出のために2つの電極を追加し、AFMによる測定を行う。

パルスレーザー蒸着を備えた、低温原子間力顕微鏡の立ち上げの完了

(本研究計画の【装置改造1：力と分子骨格計測のためのAFM化】に対応。)

大阪大学との共同研究により、qPlusセンサーを用いたOmicron社製の低温型原子間力顕微鏡の整備を行った。この装置は研究代表者が過去に管理していたものであるが、震災の影響でほぼすべてが一新され新規の立ち上げが必要となった。トランスファーロードによる試料の輸送機構の改善、赤外線から通電過熱への試料加熱機構の変更などの多数の改善を行った。特に、共同研究者によりパルスレーザー蒸着のためのレーザーが組み込まれたのは最大の進展であった。

並行して、AFMのコントローラーを旧型のものから新型のものに交換し、さらにNanonis社製のものを追加し、そのたびに入念に実験手順を確立させた。探針が動きにくくなる問題が発生したが、装置全体を開ける大規模な修理を4回行い、最深部の問題を特定し解決した。

標準試料となるSi(111)-7x7表面を用いて、80Kの低温においてSTMとAFMによる原子分解能増を取得し、装置の立ち上げを完了させた。さらに、絶縁体基板であるSTOのr13超構造の試料作製、パルスレーザー蒸着によるTiO₂表面の作製手順を確立させた。

原子間力顕微鏡の手法と技術開発

(本研究計画の【装置改造1：力と分子骨格計測のためのAFM化】に対応。)

東京大学との共同研究により、世界最高性能の光干渉型室温AFMを用い、半導体表面上の原子操作やフォースカーブ測定の研究を行った。また、NIMSとの共同研究により、Kolibriセンサーを用いた極低温AFMの測定手法を学んだ。さらに、工学院大学との共同研究により、低真空AFMとNanosurf社製のAFMコントローラーを接合する技術開発を進めた。これらの多岐にわたるAFMを用いた共同研究は、本研究計画に必要なAFMの技術開発に予想を超える大きな知見を与えた。

4 探針走査トンネル顕微鏡の立ち上げの順調な進展

(本研究計画の【装置改造2：電気伝導測定のためのSTP多探針化】に対応。)

奈良先端大学との共同研究により、Omicron 社製低温 4 探針 STM の立ち上げを進めた。受け入れ実験室の整備と清浄化を徹底的に行い、装置の搬入を済ませた。ドライポンプの新規導入や破損したイオンポンプの交換を含む超高真空を得るのに必要な真空備品の整備を行った。新設したイオンポンプとそのコントローラーを接続するアダプターの設計と製造を行った。

並行して、4 探針 STM と SEM に関係するかなり複雑な 100 本以上の配線の接続を確認し、3 つのラックを整備した。電気伝導測定に必要な微小電流計と微小電圧計をデルタモードで測定するセットアップを完了し、約 10m Ω 程度の微小な抵抗を精度よく測定する手順を確立した。それらを LabView で制御するソフトウェアを開発し、4 端子測定装置を完成させた。また、STP に必要な電気回路である積分器に関して、トランジスタなどの電子素子の選定を進めた。

さらに、数か月を要して、数百点の装置全体をより研究環境の整った大学に全て移設した。現在、SEM のフィラメント冷却に必要なチラーの導入、ベーキング機構の導入による超高真空の立ち上げが進んでいる。東京大学との共同研究により、4 探針 STM を 4 探針 STP へ改造し、原子構造と電気伝導の原子スケール可視化を行う計画が進んでいる。最終目標に必要な要素技術が一つ一つ確立しつつある。

関連して、東大との共同研究により、UNISOKU 社製低温 4 端子の主要な物品の整理を行い、電気測定に必要な真空備品の選定を進めている。さらに、数か月を要して、数百点の装置全体をより研究環境の整った大学に全て移設した。

新しい実験室環境の立ち上げ

これまで述べたように、低温 STM、低温 4 探針 STM、低温 4 端子の 3 つの大型装置をより研究環境の整った大学に移設した。これに伴って数か月を要して旧環境の原状復帰を行った。また、数か月を要して新環境の環境の整備を行った。さらに、数か月を要して実験を遂行するための準備室の整備を完了させた。これらの研究環境の大幅な変化は、本研究計画の遂行に何よりも重要な進展であったことを付け加える。

4. 研究成果

Si₄原子スイッチ研究のレビュー出版と、双子 Si₄-Si₄原子スイッチ論文の執筆
(本研究計画の【大計画 1: 原子/分子スイッチの運動を、STM と AFM で測定/操作】、および【計画 1-1: 連動する双子 Si₄-Si₄ 原子スイッチを AFM の力で原子スイッチする】に対応。)

本研究計画の基礎ともなっている STM と AFM 研究を応用した Si₄単体の原子スイッチの研究成果をまとめ、日本物理学会誌に掲載された[日本物理学会誌]。その過程で、双子 Si₄-Si₄原子スイッチの研究に関する解析と考察を最終段階まで進め、論文の執筆が進んでいる。

STM の電流による SrTiO₃(100)- 13 × 13 表面超構造上の原子スイッチ
(本研究計画の【大計画 1: 原子/分子スイッチの運動を、STM と AFM で測定/操作】、および【計画 1-1: 連動する双子 Si₄-Si₄ 原子スイッチを AFM の力で原子スイッチする】に対応。)

次世代デバイスとして注目されている、ペロブスカイト型の遷移金属酸化物である絶縁体の SrTiO₃(100)を基盤として選択した。SrTiO₃基盤を酸素雰囲気中でアニールすることで 13 表面超構造が形成されることを反射高速電子線回折により確認した。立ち上げに成功した qPlus 式の Omicron 社製低温 STM および AFM を用いて、13 周期の特徴的な格子状構造を原子スケールで確認した。

格子線上や格子点上などに数種類の欠陥が輝点として観測されたが、一部の輝点は STM スキャン中に構造が不連続に変化し、原子スイッチと考えられることがわかった。原子スイッチの頻度の電流依存性を調べたところ、電流に大まかに比例して上昇する傾向があり、このことは原子スイッチの機構が電流による一電子過程であることを示唆している。また、原子スイッチの頻度の電圧依存性を調べたところ、およそ 1.8 V から指数関数的に上昇した。これは、およそ 2 V に存在する SrTiO₃の DOS に近く、原子スイッチの機構が電子励起であることを示唆している。

この原子スイッチは絶縁体である遷移金属酸化物基板上としては非常にまれなものであり、国際学会 2 件[ALC, ICSPM]、国内学会[日本表面真空学会]にて発表され、特に国際学会においてポスター発表賞を受賞した。

今後は、Si₄原子スイッチの研究にならひ、電流の時間変化を詳細に測定し、電流/電圧/場所依存性を定量的に評価し、理論計算による原子構造、電子状態と比較することで、電流による原子スイッチの機構を確定する。また、TiO₂基板においても原子スイッチの発見に挑戦する。

TiO₂(110)ステップ基板上 VO₂薄膜の金属-絶縁体相転移における結晶方位依存性
(本研究計画の【大計画2: 分子スイッチの On/Off を電気伝導で直接見る】、および【計画2-1: PTCDA 分子のポイントコンタクトを作成し、AFM で分子骨格の接続を見る】に対応。)

二酸化バナジウム (VO₂) は室温近傍で金属絶縁体転移を示すことで注目されている。ステップ構造をもつ TiO₂(110)基板上にパルスレーザー蒸着法を用いて VO₂ 薄膜を作製し、金属絶縁体転移がステップの方向にどのように依存するかを調べた。

VO₂ 薄膜は X 線回折および大気中 AFM で評価し、特に AFM の解析によりステップ構造がどの程度保たれているか定量的に評価した。VO₂ 薄膜に対して細線加工を行いフォトリソグラフィによる電気伝導測定を行った。

その結果、VO₂ 薄膜は TiO₂(110)基板上で正方晶[110]軸方向に成長しており、VO₂ 薄膜表面には TiO₂ のステップ構造が保たれていることを確かめた。また、VO₂ 薄膜の金属絶縁体転移が確認され、その相転移温度が電流の向きがステップ方向に垂直か水平かによって 20K も変化することを発見した。

この成果は、国際学会3件を含む学会5件で発表され[IVC-22, 応用物理学会, IWXXXIII, SANKEN, 日本金属学会 2022 年秋期講演大会]、応用物理学の速報誌[論文 Applied Physics Express]に速やかに受理された。この研究ではマクロな電気伝導に対するミクロなステップの影響が明らかになったが、当初予定されていた分子によるものではないが、これはまさにミクロとマクロを繋ぐ本研究計画の最終目標と同じ方向性であり、下地が整ったといえる。将来展望として、STP を導入し、ステップ構造と電気伝導度の同時画像化に挑戦する。

TiO₂ 表面上の Ag 原子スイッチ

大阪大学との国際的な共同研究により、Si(111)-7x7 表面上に Ag を蒸着することで Ag の蒸着レートを正確に見積もった。次に、触媒表面としてとして実用化が進んでいる TiO₂ 基板の清浄化を行い、STM によりその評価を行った。さらに、TiO₂ 上に Ag を蒸着することで形成される表面構造の解析を進めた。SrTiO₃(100)- 13x 13 表面超構造上で発見された STM の電流による原子スイッチと同じように、将来的には、TiO₂ 基板上の Ag 構造物による原子スイッチを探索する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kyungmin Kim, Shingo Genchi, Shiro Yamazaki, Hidekazu Tanaka and Masayuki Abe	4. 巻 15
2. 論文標題 Crystal orientation dependence of metal-insulator transition for VO ₂ microwires fabricated on TiO ₂ (110) substrates with step and terrace structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 045503-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.15.045503	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 Kishu Sugawara, Insung Seo, Shiro Yamazaki, Kan Nakatsuji, Yoshihiro Gohda, Hiroyuki Hirayama	4. 巻 704
2. 論文標題 Effective quantum-well width of confined electrons in ultra thin Ag(111) films on Si(111) 7×7 substrates	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Surface Science	6. 最初と最後の頁 121745-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susc.2020.121745	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 山崎詩郎、杉本宜昭、森田清三	4. 巻 75
2. 論文標題 原子1個の綱引き 「電流」vs「力」 ~シリコン原子スイッチにおけるトンネル電流と原子間力の競合~	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 677-682
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.75.11_677	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 Takahiro Ogino, Valentin Motoi Kuzumo, Shiro Yamazaki, Kan Nakatsuji and Hiroyuki Hirayama	4. 巻 32
2. 論文標題 Variation of the 4 × 1 to 8 × 2 structural transition temperature of quasi-one-dimensional indium chains upon carrier doping from Si(111) substrates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 415001-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/ab97e1	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 山崎詩郎、杉本宜昭、森田清三	4. 巻 -
2. 論文標題 原子1個の綱引き 「電流」vs「力」 ~シリコン原子スイッチにおけるトンネル電流と原子間力の競合~	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 福元博之、吉池雄作、田尻寛男、山崎詩郎、中辻寛、平山博	4. 巻 61
2. 論文標題 Si(111) 3x 3-B基板上的Ag(111)超薄膜のSTM像に現われる埋もれた界面構造	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 表面と真空	6. 最初と最後の頁 657-662
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/vss.61.657	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 Y. Yoshiike, H. Tajiri, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama	4. 巻 57
2. 論文標題 X-ray structural analysis of epitaxially grown Ag film/Si(111) 3x 3-B substrate interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 075701-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.57.075701	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 K. Nagase, I. Kokubo, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama	4. 巻 97
2. 論文標題 Structure and growth of Bi(110) islands on Si(111) 3x 3-B substrates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195418-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.195418	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 Y. Yoshiike, H. Tajiri, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 X-ray structural analysis of epitaxially grown Ag film/Si(111) 3x 3-B substrate interface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 K. Nagase, I. Kokubo, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Structure and growth of Bi(110) islands on Si(111) 3x 3-B substrates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 K. Sugawara, K. Nagase, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama	4. 巻 96
2. 論文標題 Interaction of Stark-shifted image potential states with quantum well states in ultra-thin Ag(111) films on Si(111) 3x 3-B substrates	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 75444
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.075444	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 Takagi Yuka, Yamazaki Shiro, Nakatsuji Kan, Hirayama Hiroyuki	4. 巻 13
2. 論文標題 Size, shape, and number density of deposits in the graphene solution liquid droplet method	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Materials Today Communications	6. 最初と最後の頁 65-71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mtcomm.2017.08.009	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 Kota Iwata, Shiro Yamazaki, Akitoshi Shiotari and Yoshiaki Sugimoto	4. 巻 56
2. 論文標題 Mechanical properties of In/Si(111)-(8×2) investigated by atomic force microscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 15701
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.015701	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 -

〔学会発表〕 計60件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 22件)

1. 発表者名 Kyungmin Kim, Shingo Genchi, Shiro Yamazaki, Hidekazu Tanaka, and Masayuki Abe
2. 発表標題 Crystal orientation dependence of metal-insulator transition for V02 microwires fabricated on Ti02 (110) substrates with step and terrace structures
3. 学会等名 THE 22ND INTERNATIONAL VACUUM CONGRESS (IVC-22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金庚民、玄地真悟、山崎詩郎、田中秀和、阿部真之
2. 発表標題 TiO2(110)ステップ基板上 V02薄膜の相転移特性の素子方向依存性
3. 学会等名 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 Kyungmin Kim, Shingo Genchi, Shiro Yamazaki, Hidekazu Tanaka, and Masayuki Abe
2. 発表標題 Manipulation of metal-insulator transition in V02 thin films by using step-terrace orientations of TiO2(110) substrates
3. 学会等名 13th International Workshop on Oxide Surfaces (IWOX-XIII) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kyungmin Kim, Shingo Genchi, Shiro Yamazaki, Hidekazu Tanaka, and Masayuki Abe
2. 発表標題 Manipulation of metal-insulator transition in VO ₂ thin films by using step-terrace orientations of TiO ₂ (110) substrates
3. 学会等名 The 25th SANKEN International Symposium (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kyungmin Kim, Shiro Yamazaki, Daiki Katsube, Hayato Yamashita, and Masayuki Abe
2. 発表標題 Atom switch by STM current on SrTiO ₃ (100)-13 × 13 surfaces
3. 学会等名 29th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (ICSPM29) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金庚民、山崎詩郎、勝部大樹、山下隼人、阿部真之
2. 発表標題 STMの電流によるSrTiO ₃ (100)-13 × 13表面上の原子スイッチ
3. 学会等名 2021年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kyungmin Kim, Shiro Yamazaki, Daiki Katsube, Hayato Yamashita, and Masayuki Abe
2. 発表標題 Atom switch by STM current on SrTiO ₃ (100)-(13 × 13) surfaces
3. 学会等名 International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '21 (ALC'21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金野達、勝俣錬、木村彰博、中村玲雄、諸貫亮太、山崎詩郎、小澤健一、間瀬一彦、飯盛拓嗣、小森文夫、平山博之、中辻寛
2. 発表標題 Si(110)3x2-Bi表面の電子状態
3. 学会等名 日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金野達、勝俣錬、木村彰博、中村玲雄、山崎詩郎、小澤健一、間瀬一彦、飯盛拓嗣、小森文夫、平山博之、中辻寛
2. 発表標題 Si(110)3x2-Bi表面の電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 潮田亮太、長瀬謙太郎、荻野嵩大、車尾ヴァレンティン基、中辻 寛、白澤 徹郎、平山 博之
2. 発表標題 Si(111)7x7 基板上における奇数層高さBi(110)島の出現
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金野達、勝俣錬、木村彰博、中村玲雄、山崎詩郎、小澤健一、間瀬一彦、飯盛拓嗣、小森文夫、平山博之、中辻寛
2. 発表標題 Si(110)3x2-Bi表面の電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 Kentaro Nagase
2 . 発表標題 Structure and Growth of Bi(110) ultra thin film
3 . 学会等名 Tokyo Tech and IIT Guwahati joint workshop (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Nagase, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama
2 . 発表標題 Structural change of Bi ultrathin films in the two-step growth on Si(111) 3 x 3-B substrate
3 . 学会等名 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Yamagami, S. Yotsutani, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama
2 . 発表標題 Characterization of Mono- and multilayer hexagonal Boron Nitride on Cu (111) substrate
3 . 学会等名 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 長瀬謙太郎、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2 . 発表標題 Si(111) 3x3-B基板上に低温蒸着したピスマス超薄膜の室温アニールによる構造変化
3 . 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 山上剛史、四ツ谷壮一郎、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Cu(111)上に成長させたh-BN膜における成長様式・電子状態の層数依存性
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中和也、金野達、下川裕理、佐藤圭介、山崎詩郎、飯盛拓嗣、小森文夫、間瀬一彦、平山博之、中辻寛
2. 発表標題 Si(111)基板上におけるBi-In表面合金の構造と電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤圭介、金野達、木村彰博、渡邊瞳、田中和也、山崎詩郎、飯盛拓嗣、小森文夫、平山博之、中辻寛
2. 発表標題 酸素サーファクタントを用いてCu(001)表面上に作製したFe薄膜の表面構造と電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原喜周、板倉悠太、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Si(111)基板上Ag(111)超薄膜の有効量子井戸幅評価
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nakatsuji, Y. Shimokawa, T. Fujiwara, K. Nagase, S. Yamazaki, Y. Watanabe, K. Mase, K. Takahashi and H. Hirayama
2. 発表標題 Electronic Structure of Bi(110) Islands Grown on a Si(111) 3× 3-B Substrate
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nagase, I. Kokubo, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama
2. 発表標題 Atomic Structure and Growth of Bi(110) Islands on Si(111) 3× 3-B Substrates
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ogino, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama
2. 発表標題 Suppression of Metal-Insulator Transition by Electron Doping from Substrates to Indium Atomic Wires: Si(111)4×1-In
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures (ACSIN-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長瀬謙太郎、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Si(111) 3x 3-B基板上に低温吸着したピスマス超薄膜のアニールによる構造変化
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 菅原喜周、板倉悠太、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Ag超薄膜/Si(111)基板界面wetting layerの結晶化に伴う量子井戸準位のエネルギーシフト
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 車尾ヴァレンティン基、荻野嵩大、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Si(111) 3x 3-B基板上的In吸着表面超構造
3. 学会等名 日本表面科学会 第3回関東支部講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板倉悠太、菅原喜周、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Ag超薄膜中の量子閉じ込めにおけるwetting layerの効果
3. 学会等名 日本表面科学会 第3回関東支部講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長瀬謙太郎、小久保郁也、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Si(111) 3x 3-B表面上に成長したBi(110)超薄膜の構造
3. 学会等名 SPRUC顕微ナノ材料科学研究会・表面科学会放射光部会・プローブ顕微鏡研究部会合同シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yamazaki, K. Maeda, Y. Sugimoto, M. Abe, P. Pou, L. Rodrigo, R. Perez, P. Mutombo, P. Jelinek, S. Morita
2. 発表標題 AFM vs STM on Si atom switch
3. 学会等名 21th International Conference on Non-Contact Atomic Force Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yamazaki
2. 発表標題 AFM and STM-induced Si atom switch
3. 学会等名 The International Workshop: New Developments in STM on Surfaces of Functional Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎詩郎
2. 発表標題 STMとAFMを同時に用いた原子スイッチの競合
3. 学会等名 日本表面真空学会 第3回関東支部大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎詩郎
2. 発表標題 Atom switch and atom-scale transport using STM
3. 学会等名 沖縄科学技術大学院大学 招待セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 車尾ヴァレンティン基、荻野嵩大、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Si(111) 3x 3-B基板上的In吸着表面超構造
3. 学会等名 日本表面科学会 第3回関東支部講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板倉悠太、菅原喜周、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Ag超薄膜中の量子閉じ込めにおけるwetting layerの効果
3. 学会等名 日本表面科学会 第3回関東支部講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山崎詩郎
2. 発表標題 STMとAFMを同時に用いた 原子スイッチの競合
3. 学会等名 日本表面科学会 第3回関東支部講演大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長瀬謙太郎、小久保郁也、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Si(111) 3x 3-B表面上に成長したBi(110)超薄膜の構造
3. 学会等名 プローブ顕微鏡研究部会合同シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉池雄作、田尻寛男、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 表面X線回折によるAg/Si(111) 3x 3-B界面構造の研究
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 下川裕理、田中和也、佐藤圭介、渡邊瞳、山崎詩郎、飯盛拓嗣、小森文夫、間瀬一彦、平山博之、中辻寛
2. 発表標題 Bi/Si(111)4x1-In表面の構造と電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 車尾ヴァレンティン基、荻野嵩大、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Si(111) 3x 3-B表面のIn吸着構造
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Yamazaki, K. Maeda, Y. Sugimoto, M. Abe, P. Pou, L. Rodrigo, R. Perez, P. Mutombo, P. Jelinek and S. Morita
2. 発表標題 AFM/STM-induced atom-scale catalytic switching of molecule-like Si
3. 学会等名 Forefront of Molecular Dynamics at Surfaces and Interfaces (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Yamazaki, K. Maeda, Y. Sugimoto, M. Abe, P. Pou, L. Rodrigo, R. Perez, P. Mutombo, P. Jelinek and S. Morita
2 . 発表標題 AFM/STM-induced Interacting Si atom switch
3 . 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 Shiro Yamazaki
2 . 発表標題 Atom switch and atom-scale transport using scanning probe microscopy
3 . 学会等名 Shanghai Jiaotong University (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Nagase, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama
2 . 発表標題 Even-odd-parity and electronic structure of Bi(110) ultra-thin films
3 . 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 T.Ogino, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama
2 . 発表標題 Electron doping induced control of Metal-Insulator transition on Si(111)4x1-In surface
3 . 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Shimokawa, T. Fujiwara, K. Nagase, S. Yamazaki, Y. Watanabe, M. Nakatake, K. Mase, K. Takahashi, K. Nakatsuji, H. Hirayama
2. 発表標題 Electronic structure of Bi(110) ultra-thin films grown on Si(111) 3×3 -B surfaces
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Sugawara, K. Nagase, S. Yamazaki, K. Nakatsuji, H. Hirayama
2. 発表標題 Interaction of Image-Potential States with Quantum-Well State in Ultra-thin Ag(111) films on Si(111) 3×3 -B substrate
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Yamazaki, K. Maeda, Y. Sugimoto, M. Abe, P. Pou, L. Rodrigo, R. Perez, P. Mutombo, P. Jelinek and S. Morita
2. 発表標題 Interacting Si atom switches induced by AFM and STM
3. 学会等名 Non-Contact Atomic Force Microscopy 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長瀬謙太郎、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 低温蒸着によるBi超薄膜の構造と電子状態
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山上剛史、高木優香、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 アンモニアボラン分子蒸着による銅表面上での六方晶窒化ホウ素の合成
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 下川裕理、藤原翼、長瀬謙太郎、山崎詩郎、渡辺義夫、仲武昌史、間瀬一彦、高橋和敏、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Si(111) 3x 3-B表面上に成長した数層Bi(110)薄膜の電子状態
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 荻野嵩大、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 キャリアドーピングによるSi(111)4xi-In表面の金属 絶縁体転移の制御
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石綿慈、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 グラファイト表面上のモアレ構造部分におけるdz/dVスペクトル測定
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長瀬謙太郎、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Bi(110)超薄膜の膜厚偶奇性と電子状態
3. 学会等名 第37回表面科学学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菅原喜周、長瀬謙太郎、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Ag(111)超薄膜中の量子井戸準位と真空中の鏡像準位におけるavoided crossingの測定
3. 学会等名 第37回表面科学学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 荻野嵩大、山崎詩郎、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Si(111)4x1-In表面における電子ドーピングによる金属 絶縁体転移の操作
3. 学会等名 第37回表面科学学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 長瀬謙太郎、渡辺成栄、山崎詩郎、合田義弘、中辻寛、平山博之
2. 発表標題 Si(111) 3x3-B表面上に形成されるBi(110)超薄膜の電子状態(II)
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤原翼, 下川裕理, 長瀬謙太郎, 山崎詩郎, 間瀬一彦, 渡辺義夫, 仲武昌史, 中辻寛, 平山博之
2. 発表標題 Si(111) 3× 3-B 表面上のBi(110)超薄膜の成長と電子状態
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 菅原喜周, 長瀬謙太郎, 山崎詩郎, 中辻寛, 平山博之
2. 発表標題 Si(111) 3× 3-B 表面上Ag(111)超薄膜のImage Potential Stateの測定
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山崎詩郎, 前田圭亮, 杉本宜昭, 阿部真之, P. Pou, L. Rodrigo, R. Perez, P. Mutombo, P. Jelinek, 森田清三
2. 発表標題 隣接する Si4原子スイッチの相互作用
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 山崎詩郎
2. 発表標題 走査型プローブ顕微鏡を応用した原子スケールの電気伝導と原子スイッチ
3. 学会等名 横浜国立大学セミナー招待講演(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Yamazaki, K. Maeda, Y. Sugimoto, M. Abe, P. Pou, L. Rodrigo, R. Perez, P. Mutombo, P. Jelinek and S. Morita
2. 発表標題 Interacting Si atom switches induced by force and current
3. 学会等名 24th International Colloquium on Scanning Probe Microscopy (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------