

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：84502

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H06201

研究課題名（和文）高分解能ディスプレイ型光電子分析器による構造と電子状態の同時観測法の開発

研究課題名（英文）Development of method for simultaneously observing atomic and electronic structures by a high-resolution display-type photoelectron analyzer

研究代表者

室 隆桂之（Muro, Takayuki）

公益財団法人高輝度光科学研究センター・分光・イメージング推進室・主幹研究員

研究者番号：50416385

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：物質の物理的性質（物性）は、物質内での原子構造と電子状態によって決定される。本研究の目的は、物質の原子構造と電子状態を共に観測可能な、従来にない実験手法を開発することであった。これを実現するため、高いエネルギー分解能を持つ、阻止電場型分析器と呼ばれるディスプレイ型の光電子分析器を新たに開発し、原子構造の観測実験と電子状態の観測実験を一つの分析器で行うことに成功した。物性の新たな研究手法としての活用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の研究では、物質の性質を担う原子構造と電子状態は別々の環境で、異なる実験手法で調べられてきた。しかしながら、例えばグラフェンなどのように次世代のエレクトロニクス産業を担うと期待される新しい材料の多くは、原子構造と電子状態を共に同じ環境で観察することが求められている。しかし、従来はそれを可能にする実験手法がなかった。今回の研究で実現した、原子構造と電子状態を共に観測可能な実験手法により、次世代の産業を担う材料開発が加速すると期待される。

研究成果の概要（英文）：Physical properties of materials are determined by atomic structures and electronic structures in the materials. This study aimed to develop a new experimental method for simultaneously observing the atomic and electronic structures of a material. For this aim, we developed a high-energy-resolution display-type photoelectron analyzer called a retarding field analyzer. As a result, we succeeded in performing an experiment for observing electronic and atomic structures using the same analyzer. We expect that this new method will be used for materials science.

研究分野：放射光軟X線分光

キーワード：光電子ホロブラフィー 角度分解光電子分光 電子状態解析 局所構造解析

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

従来の物性研究では、構造と電子状態は別々の手法(例えば X 線回折と光電子分光)で観測するのが常套手段であった。バルク材料の物性研究では、このような研究スタイルは一定の整合性を保ってきた。しかし、本研究の開始当初、物性科学は従来のスタイルでは研究が難しい物質群に直面していた。例えば、グラフェン等に代表される単層物質である。グラフェンの発見に端を発し、シリセンやジャーマニン、あるいは単層黒リン等の単層材料が次世代エレクトロニクスを担う電子材料として活発に研究され始めていた。これらの物性は基板との相互作用の影響を受けるため、統一的な物性の理解のためには単層物質と基板との複合構造を明らかにし、かつ、構造を観測した“その場”で電子状態を観測することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、物質の構造と電子状態の同時測定を可能にする実験手法を開発し、前述の状況にブレークスルーをもたらすことであった。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するために我々が目指した方法は、光電子分光において構造と電子状態を観測するための二つの異なる手法を融合することであった。また、それを可能にする、従来にない高分解能ディスプレイ型分析器の開発を放射光施設 SPring-8 で進めた。この装置が実現すれば、試料上で放射光が照射されている場所の、同じ空間領域での構造と電子状態の直接比較が可能になる。光電子は、構造と電子状態の情報を提供するプローブである。構造を観測する手法は、光電子ホログラフィー (PEH: photoelectron holography) [1] である。物質中のある原子から放出される光電子の球面波は、周囲の原子によって散乱され、そこからさらに球面波が発生する。これらの干渉による光電子の放出強度角度分布(光電子ホログラム)を解析によって実空間に戻し、三次元原子配列像を得るのが PEH である。一方、電子状態(価電子帯のバンド構造)を観測する手法は角度分解光電子分光 (ARPES: angle-resolved photoemission spectroscopy) として知られている。PEH と ARPES は、どちらも光電子の放出角度分布を測定するため、実験的にはほぼ同じことを行う。異なる点は、PEH では内殻からの電子を検出するのに対し、ARPES では価電子帯からの電子を検出することである。しかし実際には、PEH と ARPES の実験が同時に行われることはない。この主な理由は、現在の光電子角度分布の測定法では時間がかかりすぎ、両方の測定を行うのが現実的ではないからである。現在の測定法では、微小な取り込み立体角を持つ静電半球型分析器に対して試料の角度を走査して角度分布を測定する。静電半球型分析器を用いる理由は、エネルギー分解能が高いからである。特に ARPES に高いエネルギー分解能が求められるが、この条件を満たすのは現在のところ静電半球型分析器しかない。この問題は、光電子角度分布を一度に観測することができ、かつ、高いエネルギー分解能を持つディスプレイ型分析器が出現すれば、直ちに解決する。本研究で我々が開発を目指したのは、そのような分析器である。

既にいくつかのタイプのディスプレイ型分析器が提案されているが、PEH と ARPES の両者に適用可能な分析器は我々の知る限り存在しない。いずれも、エネルギー分解能あるいは光電子の取込角度が不足するなどの問題がある。我々が開発のベースとして採用したのは、図 1 に示す阻止電場型分析器 (RFA: retarding field analyzer) である。RFA は低速電子線回折 (LEED) によく用いられている分析器であるが、従来の RFA はエネルギー分解能 $E/\Delta E$ (ここで E は電子の運動エネルギー) が 100 程度と低いため、光電子分光には用いられていない。しかし、我々は RFA がディスプレイ型である点に着目した。

また、RFA の性能研究が盛んに行われたのは 1960~70 年代であるため、最新の計算シミュレーションによって再評価すれば、高分解能化の方法が見つかる可能性があると考えた。既に我々は、科研費挑戦的萌芽研究 (2016 年度) において、シミュレーションに基づいて球面グリッドの間隔を最適化した RFA により、 $E/\Delta E=1100$ を達成していた [2]。このエネルギー分解能は、PEH には利用できる値であるが、ARPES にとっては十分とは言えない。そこで我々は、さらにエネルギー分解能を高める方法のシミュレーションから研究を開始した。

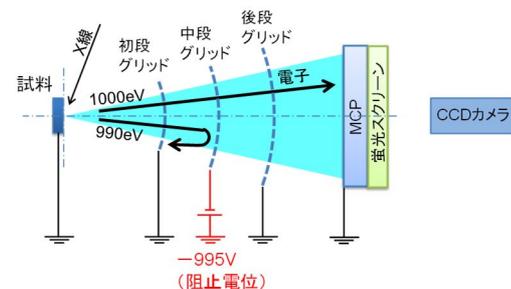


図 1 RFA の概略図

4. 研究成果

RFA のエネルギー分解能を予測するため、電子軌道計算によるシミュレーションを行った。このシミュレーションは、研究分担者の松下 (奈良先端大教授) が行った。電子軌道計算には、電子が進行する空間における 3 次元の電位計算が必要になる。RFA では、エネルギー分解能に寄与

する電子は、図1に示す中段グリッド(阻止グリッド)において大幅に減速される(運動エネルギーがゼロに近づく)ため、阻止グリッド近傍の電位を特に詳細に計算する必要がある。そこで我々は、阻止グリッド近傍の電位を1 μm 精度で計算した。様々な阻止グリッドで計算した結果、ある厚みの金属ドームに多数の円筒穴を開けたグリッド(以下、円筒穴グリッドと呼ぶ)を用いることにより、10,000を超える高いエネルギー分解能が予測された。例えば、100 μm 厚のドームに60 μm の穴を開けた場合、 $E/\Delta E=14,500$ が予想された[2]。前述の挑戦的萌芽研究で開発したRFAの阻止グリッドにはワイヤーマッシュを用いたが、その10倍以上のエネルギー分解能である。そこで本研究では、円筒穴グリッドを用いた高分解能RFAの開発を進めた。

前述のような仕様の円筒穴グリッドを、我々が必要とする $\pm 50^\circ$ 以上の光電子取込角(図1の水色部分の角度)で製作することは容易ではない。このグリッド製作は、研究分担者の水野(早稲田大学教授)が進めた。機械加工による方法からナノインプリントの技術を応用した方法、あるいは3Dプリンターを利用する方法まで様々な方法を検討し、試験製作を繰り返した。3Dプリンターは将来的には有望な方法と考えられるが、10cm近くの大きさの半球ドームという比較的大きな物体を印刷することができ、かつその中に微小な円筒穴を作り込める解像度を持つプリンターは、我々の調査ではまだ存在しないようであった。そのような中、研究期間の後半において、化学的加工と機械加工を組み合わせる方法による製作の目途が立ち始めた。製作例を図2に示す。 $\pm 52^\circ$ の角度範囲に渡って50 μm の円筒穴が70 μm の間隔で開けられており、穴の総数は約80万個に及ぶ。部分的に穴が貫通していない領域があるため引き続き改善が必要であるが、完成は目前の段階まで来ている。この円筒穴グリッドを用いたRFAの評価結果は後半で報告する。

円筒穴グリッドの開発を進める一方、SPRING-8の軟X線ビームラインBL25SUにおいて、RFAを備えた実験ステーションを構築した(図3)。科研費挑戦的萌芽研究(2016年度)ではRFAの評価測定のみを目的とした簡易装置を用いたが、新たに構築したのは、基板上でのグラフェン等の原子層の生成といった試料準備を行うための真空槽も備えた実験ステーションである。2020年6月現在、本実験ステーションは共同利用に提供されている。本研究における円筒穴グリッドのRFAの評価実験は、この実験ステーションで行った。

まず、RFAのエネルギー分解能を評価するため、金の4f内殻光電子スペクトルを測定した。図4(b)に、本研究で製作した図2の円筒穴グリッドを組み込んだRFAを用いて測定した光電子スペクトルを示す。励起光のエネルギーは700eVである。比較のため、科研費挑戦的萌芽研究(2016年度)で製作したワイヤーマッシュのRFAで測定した結果を図4(a)に示す。図4(a)のワイヤーマッシュのRFAのエネルギー分解能は $E/\Delta E=1100$ であったが、図4(b)のスペクトルでは光電子ピークの幅が明らかに細くなっており、分解能が向上していることがわかる。解析の結果、図4(b)の円筒穴グリッドのRFAの $E/\Delta E$ は約2000であることがわかった。この分解能の場合、BL25SUの下限の光エネルギーである120eVの放射光を用いると、約60meVのエネルギー分解能でARPESを行うことが可能となる。これは、電子状態の議論にとって許容できるレベルのエネルギー分解能と言える。また、BL25SUがカバーする光エネルギー範囲(0.12~2keV)の中で

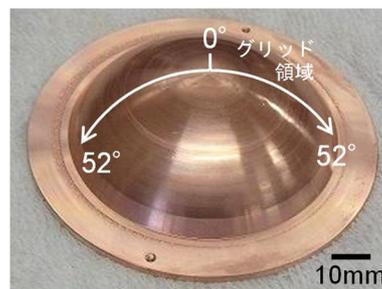


図2 製作した円筒穴グリッド



図3 SPRING-8 BL25SUのRFA実験ステーション

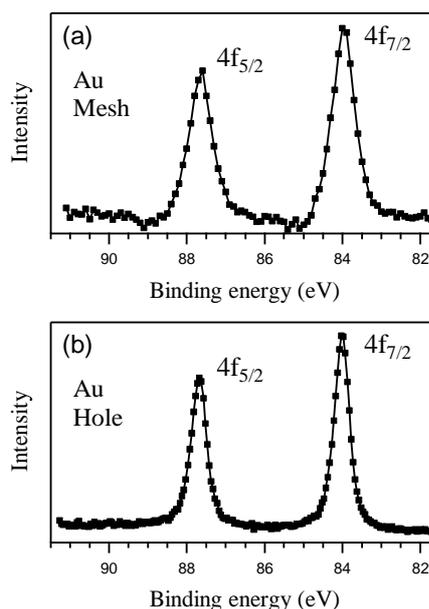


図4 金の4f内殻光電子スペクトルの測定結果。(a)ワイヤーマッシュのRFAで測定。(b)本研究で製作した円筒穴グリッドのRFAで測定。

も下限付近の光を用いることにより表面感性が高まるため、基板の表面に存在するグラフェン等の原子層の測定に有利となる。

製作した円筒穴グリッドの RFA が PEH に適用可能かどうかを評価するため、 MoS_2 単結晶を試料に用いて PEH のテスト測定を行った。我々は、ワイヤーメッシュの RFA では明瞭な光電子ホログラムが観測できることを確認していたが[2]、円筒穴グリッドではワイヤーメッシュと比較して電子の透過率が減少するため、光電子ホログラムが観測できるかどうかを確認する必要があった。まず、図 5(a)に、ワイヤーメッシュの RFA で測定した Mo 4p 内殻の光電子ホログラムを示す。用いた励起光のエネルギーは 700eV で、RFA で検出した光電子の運動エネルギーは $664 \pm 5\text{eV}$ であった。前述のように原子層の ARPES では表面感性が求められるが、基板との複合構造も解析する PEH では、このように比較的高い運動エネルギーが適している。トータルの測定時間は約 12 分であった。図 5(a)からわかるように、明瞭な光電子ホログラムが観測されている。ここで、光電子の取込角は $\pm 49^\circ$ である。次に、同じ測定時間で、円筒穴グリッドの RFA を用いて測定した結果を図 5(b)に示す。図 5(a)と遜色のない明瞭さで光電子ホログラムが観測できていることがわかる。図 5(b)に見られるリング状の影は、前述の円筒穴が貫通していない領域である。リング状の影はあるものの、図 5(a)と同じ光電子取込角が確保できていることから、円筒穴のグリッドが $\pm 49^\circ$ 以上の範囲に渡って製作できていることがわかる。以上の結果から、円筒穴グリッドが PEH に利用できることがわかった。

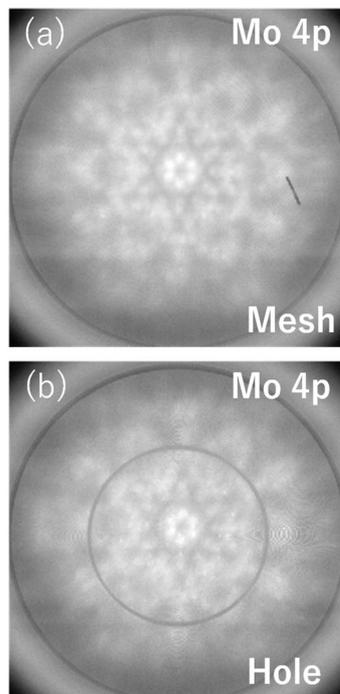


図5 MoS_2 の Mo 4p 内殻光電子ホログラムの測定結果。(a) ワイヤーメッシュの RFA で測定。(b) 本研究で製作した円筒穴グリッドの RFA で測定。

本研究の目標は、PEH と ARPES を同じ分析器で行うことであった。そこで、円筒穴グリッドを組み込んだ RFA を用いて ARPES のテスト測定を行った。用いた試料は、PEH の測定と同じく MoS_2 単結晶である。励起光のエネルギーは 150eV に設定した。この場合、前述の金の光電子スペクトルの結果から、RFA のエネルギー分解能 (E) は約 70meV と期待される。光のエネルギー分解能は 30meV に設定したため、光電子分光の全エネルギー分解能は約 76meV ということになる。図 6 に、円筒穴グリッドの RFA で測定した MoS_2 の価電子帯バンド構造の等エネルギー面マッピングの測定例を示す。フェルミ準位から 2.6eV の結合エネルギーにおける $\pm 50\text{meV}$ のエネルギー幅の強度を積分したものである。図 6 からわかるように、明瞭なバンド構造が、いくつもの Brillouin ゾーンに渡って観測できている。約 76meV のエネルギー分解能は十分とは言いがたいが、少なくとも電子状態の議論に最低限必要なレベルのエネルギー分解能での ARPES が RFA で可能であることが確認できた。

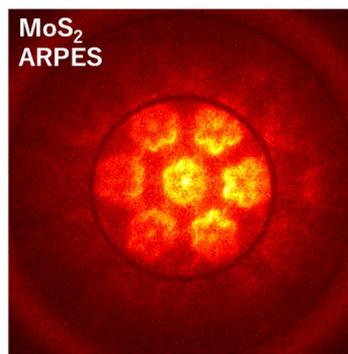


図6 MoS_2 の ARPES 測定の結果。本研究で製作した円筒穴グリッドの RFA を用いた。

以上のように、我々は本研究の目標であった PEH と ARPES を行うことが可能なディスプレイ型分析器の開発に成功した。円筒穴グリッドの開発では、 $\pm 50^\circ$ 以上の球面全体に渡る穴加工を行った後に、いかに球面形状を保つかが最大の課題であったが、この課題はクリアすることができた。残念ながら今回の研究期間内で製作した円筒穴グリッドには穴が貫通していない領域（リング状の影）があったため、SPRING-8 の共同利用に提供できるまでには至らなかったが、今後、製作プロセスを改善することにより、全範囲に渡ったグリッド製作が可能になると考えている。一方、RFA のエネルギー分解能に関しては、実験で得られた値は $E/\hbar\omega \sim 2000$ であるのに対し、理論的な予測値は 10,000 を超えている[2]。この原因については、一つには球面グリッド電極の表面ポテンシャルが、表面汚染などの要因で不均一であることが考えられる。前述のように、RFA では阻止グリッドの近傍で光電子が大幅に減速される。そのような低速の電子が阻止グリッドの表面ポテンシャルの影響を受けることは容易に想像できる。実際、我々が本研究で調査したところ、グリッド表面に金蒸着を行うことによりエネルギー分解能が改善する傾向が見られた。しかしながら真空蒸着の場合、グリッドの円筒穴の内壁までを均一にコーティングすることはできない。今後、コーティング方法の開発が必要になると考えている。二つ目に考えられる

原因は、分析器内での磁場の存在である。阻止グリッド近傍で減速された電子は、微弱な磁場であってもその軌道が容易に影響を受け、エネルギー分解能が低下すると考えられる。今後、磁場シールドを強化するなどの対策が必要と考えている。

上記のように改善すべき点はまだ多くあるが、それらを丁寧に解決していくことにより、高分解能 RFA は近い将来、確実に実用化できると我々は考えている。本研究により、構造と電子状態の測定が RFA という一つの分析器で可能であることを実証できた意義は大きい。今後も引き続き開発を続け、物性研究の新たな手法として形にしたい。

<引用文献>

- [1] T. Matsushita, F. Matsui, H. Daimon, and K. Hayashi, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* **178-179**, 195 (2010).
- [2] T. Muro, T. Ohkochi, Y. Kato, Y. Izumi, S. Fukami, H. Fujiwara, and T. Matsushita, *Rev. Sci. Instrum.* **88**, 123106 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Matsushita Tomohiro, Muro Takayuki, Matsui Fumihiko, Happo Naohisa, Hosokawa Shinya, Ohoyama Kenji, Sato-Tomita Ayana, Sasaki Yuji C., Hayashi Kouichi	4. 巻 87
2. 論文標題 Principle and Reconstruction Algorithm for Atomic-Resolution Holography	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 061002 ~ 061002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.061002	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 Muro Takayuki, Ohkochi Takuo, Kato Yukako, Izumi Yudai, Fukami Shun, Fujiwara Hidenori, Matsushita Tomohiro	4. 巻 88
2. 論文標題 Wide-angle display-type retarding field analyzer with high energy and angular resolutions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 123106 ~ 123106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4990769	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 Kamibayashi Takumi, Kuwae Hiroyuki, Shoji Shuichi, Mizuno Jun	4. 巻 10
2. 論文標題 Fabrication of Hole-Patterned Self-Standing Curved Film Using Large-area Spherical Soft UV Imprint Lithography	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging	6. 最初と最後の頁 E17-002-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5104/jiepeng.10.E17-002-1	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 Matsushita Tomohiro, Muro Takayuki, Matsui Fumihiko, Happo Naohisa, Hayashi Kouichi	4. 巻 59
2. 論文標題 Data processing for atomic resolution holography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 020502-1 ~ 10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4b3a	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 Kinoshita Toyohiko, Muro Takayuki, Matsushita Tomohiro, Osawa Hitoshi, Ohkochi Takuo, Matsui Fumihiko, Matsuda Hiroyuki, Shimomura Masaru, Taguchi Munetaka, Daimon Hiroshi	4. 巻 58
2. 論文標題 Progress in photoelectron holography at SPring-8	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 110503-1~11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab4d28	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 松下智裕	4. 巻 62
2. 論文標題 L1正則化を用いた光電子ホログラフィーによるドーパントの原子配列解析	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本結晶学会誌	6. 最初と最後の頁 17~25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5940/jcrsj.62.17	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13件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 Takayuki Muro, Yasunori Senba, Haruhiko Ohashi, Tomohiro Matsushita, Toyohiko Kinoshita, Shik Shin
2. 発表標題 Microbeam ARPES and high-resolution RFA: Newly developed photoemission stations at soft-x-ray beamline BL25SU of SPring-8
3. 学会等名 International Workshop on Trends in Advanced Spectroscopy in Materials Science (TASPEC) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Muro, Yasunori Senba, Haruhiko Ohashi, Tomohiro Matsushita, Toyohiko Kinoshita, and Shik Shin
2. 発表標題 Soft x-ray photoemission stations at BL25SU of SPring-8: Microbeam ARPES and photoelectron holography using high-resolution retarding field analyzer
3. 学会等名 The 14th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS-14) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomohiro Matsushita
2. 発表標題 Three-dimensional atomic imaging of dopants using atomic resolution holography
3. 学会等名 The 14th International Conference on Electronic Spectroscopy and Structure (ICESS-14) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松下智裕、室隆桂之、横谷尚睦
2. 発表標題 光電子ホログラフィーの高精度シミュレーション
3. 学会等名 第32回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水野潤、上林拓海、桑江博之、庄子習一
2. 発表標題 Fabrication of Self-Standing Curved Film with Hole Patterns using Spherical Soft UV Imprint Lithography
3. 学会等名 学際・国際的高度人材育成ライフイノベーションマテリアル創製共同研究プロジェクト第2回公開討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Muro, Tomohiro Matsushita
2. 発表標題 High-resolution retarding field analyzer for photoelectron holography of individual chemical states at surfaces
3. 学会等名 The 34th European Conference on Surface Science (ECOSS34) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takayuki Muro, Yasunori Senba, Haruhiko Ohashi, Tomohiro Matsushita, Toyohiko Kinoshita, and Shik Shin
2. 発表標題 Microbeam ARPES and high-resolution RFA: Soft x-ray photoemission stations developed at BL25SU of SPring-8
3. 学会等名 The 40th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takayuki Muro, Yasunori Senba, Haruhiko Ohashi, Tomohiro Matsushita, Toyohiko Kinoshita, and Shik Shin
2. 発表標題 Soft x-ray microbeam ARPES and High-Resolution RFA: New Photoemission Endstations at BL25SU of SPring-8
3. 学会等名 Materials Research Meeting 2019 (MRM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 室隆桂之
2. 発表標題 SPring-8 BL25SUにおける軟X線マイクロビームARPES
3. 学会等名 第24回HiSOR研究会 最先端光電子分光で拓く量子物質科学研究に関するワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Matsushita, Naohisa Happo, Atsushi Kubota, Kazuo Tsutsui, Takayuki Muro, Koichi Hayashi
2. 発表標題 Analysis software for photoelectron holography and x-ray fluorescence holography
3. 学会等名 Symposium on 3D Active-site Science in London -3D Atomic-imaging Technologies from Materials to Biology- (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Matsushita, Takayuki Muro, Toyohiko Kinoshita, Kazuo Tsutsui, Takayoshi Yokoya, Fumihiko Matui, and Hiroshi Daimon
2. 発表標題 Dopant structure measurements using photoelectron holography and its analysis tools
3. 学会等名 The 40th International Conference on Vacuum Ultraviolet and X-ray Physics (VUVX19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Matsushita, Takayuki Muro, Kazuo Tsutsui, Takayoshi Yokoya
2. 発表標題 Three-dimensional dopant imaging in semiconductor crystals using photoelectron holography with chemical state identification
3. 学会等名 19th International Workshop on Junction Technology 2019 (IWJT2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomohiro Matsushita, Takayuki Muro, Takayoshi Yokoya
2. 発表標題 Mean free path and thermal vibration effects on photoelectron holography
3. 学会等名 14th International Conference on the Structure of Non-Crystalline Materials (NCM14) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究 分担者	松下 智裕 (Matsushita Tomohiro) (10373523)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授 (14603)	

6. 研究組織（つづき）

	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	水野 潤 (Mizuno Jun) (60386737)	早稲田大学・ナノ・ライフ創新研究機構・上級研究員（研究 院教授） (32689)	