

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：63903

研究種目：国際共同研究加速基金（帰国発展研究）

研究期間：2021～2023

課題番号：19K24684

研究課題名（和文）時間分解探針増強ラマン分光による時空間極限における原子層物質のフォノン計測

研究課題名（英文）Phonon Measurement of Atomic Layer Materials at Spatiotemporal Limits Using Time-Resolved Tip-Enhanced Raman Spectroscopy

研究代表者

熊谷 崇（Kumagai, Takashi）

分子科学研究所・メゾスコピック計測研究センター・准教授

研究者番号：30704796

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 43,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、低次元物質の物性において重要な役割を担っている格子振動（フォノン）を原子レベルで深く理解することを目的として、超高速時間分解測定を含む探針増強ラマン分光（TERS）の先端計測技術の研究開発を行った。独自に開発した超高真空・低温TERS装置を用いて、酸化物超薄膜やグラフェンナノリボン、単一フラーレン分子のフォノンを高感度に検出できることを示し、反ストークスラマン散乱スペクトルに基づいてナノスケールにおけるフォノン励起（局所加熱）現象の微視的機構を解明した。さらに、10フェムト秒の近赤外超短パルスレーザーと組み合わせることによって、ナノスケールのコヒーレントフォノン分光にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した原子レベルの空間分解能を持つ探針増強近接場分光は、物理化学や物性物理の分野において多様な応用が期待される。特に、超短パルスレーザーと組み合わせた超高速コヒーレントナノ分光は、従来の技術では困難であったナノスケールにおける超高速現象の探索を可能にする画期的な成果である。本研究では、単一分子接合や次世代の半導体材料として期待されている低次元物質の物性において重要なフォノンを超高速時間分解測定を含むTERSを用いて調べ、ナノスケールにおけるエネルギー輸送の微視的機構を解明した。これは分子エレクトロニクスや低次元物質に基づく新しいデバイスの設計と性能向上に寄与することが期待される。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to obtain an atomic-level understanding of lattice vibrations (phonons), which play a crucial role in the physical properties of low-dimensional materials, by developing advanced techniques in tip-enhanced Raman spectroscopy (TERS), including ultrafast time-resolved measurements. Using an ultra-high vacuum, low-temperature TERS system, we demonstrated that phonons in oxide ultrathin films, graphene nanoribbons, and single fullerene molecules could be detected with high sensitivity. Based on anti-Stokes Raman scattering spectra, the microscopic mechanisms of phonon excitation (local heating) at the nanoscale were elucidated. Furthermore, by combining this with 10-femtosecond near-infrared ultrashort pulse lasers, nanoscale coherent phonon spectroscopy was also successfully achieved.

研究分野：表面物理化学

キーワード：フォノン 低次元物質 探針増強ラマン分光 超高速ダイナミクス

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

単一原子・分子レベルで物質の構造、物性、ダイナミクスを直接観察する計測技術の開発は、物理化学や物性物理の分野における挑戦的な課題として過去に様々なアプローチで行われてきた。走査プローブ顕微鏡 (SPM) に基づく探針増強近接場分光は、不均一触媒、電気化学、半導体デバイスなどに深く関わる物質表面の構造、物性、化学反応、相転移をナノスケールで調べる手法として、2000年代から研究開発が進展してきた。特に、探針増強ラマン分光 (Tip-Enhanced Raman Spectroscopy : TERS) は、SPM の原子分解能イメージングと同時に、振動分光による化学分析を可能にする手法として注目されていた。TERS は超高真空、大気、溶液など様々な環境下で計測できるため、物理化学や物性物理だけでなく、生命科学も含む幅広い分野で応用が期待されている。加えて、非線形探針増強近接場分光を用いて超高速時間分解測定を行うことができれば、物質表面における複雑なダイナミクスを実空間・実時間で直接観察し、従来の技術では困難であったナノスケールにおける超高速現象の探索が可能になる。

ラマン分光は、固体物質の格子振動 (フォノン) を調べる手法として広く用いられてきた。フォノンは次世代の半導体材料として期待される低次元物質の物性においても重要である。特に、低次元物質のフォノンは熱現象において本質的な役割を担い、熱伝導特性に大きな影響を与える。熱制御は基礎科学と産業技術の両面から重要な課題で、巨視的な熱現象については熱力学や熱工学として学問体系が確立しており、多くの計測法も開発されている。しかしながら、低次元物質において重要となるナノスケールの熱現象についてはよく理解されていなかった。その一因として、熱現象を原子・分子レベルで直接観察できる計測法が十分に発達していないことが挙げられる。ナノスケールにおける熱現象は、フォノンの概念に基づいて量子力学的に記述され、その熱現象を理解するためには、物質の各フォノンモードの占有数を観測することが必要となる。これに対して、ラマン分光はストークス・反ストークス散乱の計測を通じて、各フォノンモードの占有数を定量できるユニークな手法であり、巨視的な計測ではラマン温度計として応用されている。通常のラマン分光では、空間分解能が光の回折限界によって数百ナノメートルに制限され、原子レベルでフォノンの計測を行うことはできないが、TERS を応用することによってナノスケール、さらには原子スケールで局所的な熱現象を調べることが可能となる。さらに、TERS と超短パルスレーザーを組み合わせることで、フォノンの局所的な非平衡ダイナミクスを直接観測し、低次元物質におけるエネルギー輸送と散逸の微視的機構を原子レベルで調べる先進的な計測技術の開発を提案した。

### 2. 研究の目的

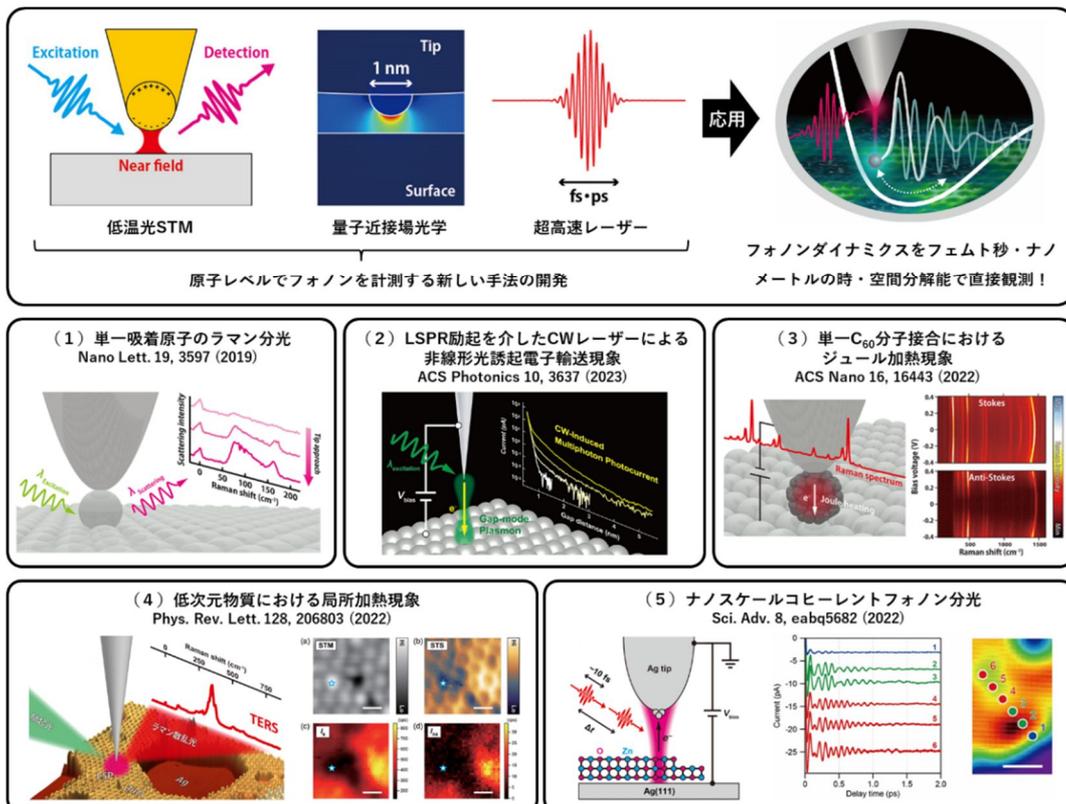
本研究は、原子レベルの空間分解能を持つ超高真空・低温走査トンネル顕微鏡 (UHV-LT-STM) に基づく TERS を用いて、単一分子や低次元物質の反ストークスラマン散乱を高感度に検出することで、局所的なフォノン励起と緩和の微視的機構を詳細に調べ、さらに超短パルスレーザーと組み合わせ、フェムト秒・ナノメートルの時・空間分解能でのフォノンダイナミクスを直接捉えることを目的とした。これによって、従来の技術では空間平均に埋もれて捉えることのできなかったナノスケールの熱現象や局所的な超高速フォノンダイナミクスを観測し、その微視的機構や空間的・時間的な不均一性を深く理解することで、ナノスケールのフォノンエンジニアリングにつながる成果の創出を目標とした。

### 3. 研究の方法

我々の過去の研究で、UHV-LT-STM と組み合わせた TERS を用いて、低次元物質のフォノンモードをおよそ 1 nm の分解能で計測できることを報告していた【Nano Lett. 19, 5725 (2019)】。しかしながら、TERS を用いて反ストークススペクトルを高感度かつ再現性良く計測し、局所的な熱現象に関わる微視的機構を調べる研究はこれまで行われていなかった。本研究では、単一原子・分子レベルの TERS 計測の感度と再現性を向上させることを目的として、独自に開発を進めてきた収束イオンビーム (FIB) を用いた探針の加工技術【Nano Lett. 19, 3597 (2019)】を洗練し、さらに STM を利用して探針先端の原子レベルの構造を in-situ で制御することにより、原子レベルにまで局在したプラズモン場の最適化を試みた。また、我々の過去の研究で報告した通り、TERS では STM 接合の局在表面プラズモン共鳴 (LSPR) および測定試料の電子共鳴に励起波長を合わせることで、巨大なラマン増強作用が得られることがわかっている【Nano Lett. 19, 5725 (2019)】。そのため、より多くの励起波長を利用できるように、連続発振 (CW) 固体レーザーを追加で導入した。加えて、既存の TERS 装置に 10 フェムト秒の近赤外超短パルスレーザーを組み込むことで、超高速時間分解測定が可能なシステムを構築した。実験試料には、表面科学的な手法によって金属単結晶表面上にエピタキシャル成長させた酸化亜鉛超薄膜【J. Phys. Chem. C 118, 27428 (2014)】および、on-surface polymerization によって作製したグラフェンナノリボン【Phys. Rev. Lett. 121, 047701 (2018)】を用いた。加えて、TERS による反ストークスラマン分光のモデル系として、単一フラーレン ( $C_{60}$ ) 分子の計測を行った。

### 4. 研究成果

UHV-LT-TERS を用いて、酸化物超薄膜、グラフェンナノリボン、単一  $C_{60}$  分子の計測を行った。フォノンの計測だけでなく、STM 接合の LSPR 励起が引き起こす特徴的な現象についても研究を行った。以下に代表的な成果について、その概要を説明する。



代表的な研究成果の概要

( 1 ) 単一吸着原子のラマン分光【ACS Nano 17, 10172 (2023)】

TERS で原子レベルの感度と空間分解能が原理的に得られることを示すため、STM のアトムマニピュレーションを用いて Ag(111) 表面に吸着した単一 Ag 原子を形成し、10 K で測定を行った。単一 Ag 原子に局在した振動モードを観測することに成功し、およそ 2 Å の空間分解能でラマン散乱強度の分布を計測できることを示した。さらに、Ag 探針を表面上の単一 Ag 原子へと近づけ、量子点接触を形成する過程を TERS でモニターする実験を行い、量子点接触を形成する直前で単一 Ag 原子に局在した振動モードに由来する TERS 強度が増大することを見出した(量子点接触の形成は STM 電流および単一 Ag 原子に局在した振動モードの変化として観測される)。探針 - 試料間距離依存性の精密な計測から得られた知見に基づき、サブナノメートルスケールのキャビティ(ピコキャビティ)に閉じ込められたプラズモン場の特性について深い理解を得ることを目的として、Max Planck Institute for the Structure and Dynamics of Matter の共同研究者と共に時間依存密度汎関数理論に基づく電磁場シミュレーションを行った。その結果、STM 接合のピコキャビティにおける原子レベルの構造に由来する極端な光電場の増強を再現し、量子点接触を形成する際にプラズモンのモードが変化することを示唆する結果が得られた。これらは、従来のナノオプティクスの限界を突破し、原子レベルの光学現象を観測・制御する新しい科学技術の創出につながる重要な成果である。

( 2 ) CW レーザーによる LSPR 励起を介した非線形光誘起電子輸送現象【ACS Photonics 10, 3637 (2023)】

この研究では、STM 接合の LSPR 励起で発生する空間的に閉じ込められた強い光電場を介した CW レーザーによる非線形光誘起電子輸送を観測した。これまでの非線形光学効果の研究では、通常、時間的に閉じ込められた超短パルスレーザーが用いられていたが、この研究では CW レーザーによる新たな非線形光学現象を探索した。実験は FIB で作製した Ag 探針と Ag(111) 表面を用いたプラズモニック STM 接合で行った。この STM 接合に CW レーザーを照射し、通常のトンネル領域よりも離れた探針 - 表面間距離で光誘起電流を選択的に観測した。その結果、光誘起電流の大きさは入射するレーザー強度に対して非線形な応答を示し、多光子過程による現象であることを明らかにした。非線形光誘起電子輸送の電流 - 電圧特性、探針 - 試料表面間距離やレーザー波長および強度に対する依存性を詳細に調べた。非線形光誘起電子輸送を記述する理論的なモデルに基づいて実験結果を再現し、微視的な機構について詳細な理解を得た。これは、CW レーザーを用いた探針増強非線形近接場分光という新しい計測技術の開発につながるものであり、LSPR による非線形光学効果に新たな知見を与える重要な成果である。

( 3 ) 単一 C<sub>60</sub> 分子接合におけるジュール加熱現象【ACS Nano 16, 16443 (2022)】

この研究は、TERS の反ストークスラマン散乱を精密に計測することによって、ナノスケールの熱現象に関する微視的な知見を得ること目的とした。具体的には、単一 C<sub>60</sub> 分子接合において電子 - フォノン相互作用を介した励起現象(ジュール加熱)を観測した。実験では、STM の分子マニピュレーションによって探針先端に取り付けた単一 C<sub>60</sub> 分子を、いくつかの異なる単結晶表面へと近づけ、単一分子接合を形成した。続いて、STM のバイアス電圧を変化させながら、TERS のストークス・反ストークススペクトルを計測した。その結果、バイアス電圧が C<sub>60</sub> の各振動モードのエネルギー(閾値)を超えると、対応する反ストークスピークの強度が増大することが観測された。これは電子が分子を通過する際に、非弾性相互作用を通じて分子振動を励起し、エネルギー輸送が起きていることを明確に示している。また、接触する電極(金属表面)に依存して、振動励起とその脱励起過程に明確な違いがあることを明らかにし、異なる電極物質が分子の電子状態や熱的特性に与える影響を詳細に議論した。これらは、分子エレクトロニクスの分野にお

ける長年の課題である単一分子接合における熱現象を深く理解する上で重要な結果であり、ナノスケールにおけるエネルギー輸送機構とその制御に関する新たな知見が得られた。将来的には分子エレクトロニクスデバイスの設計と性能向上に寄与することが期待される。

(4) 酸化亜鉛超薄膜における局所的なフォノン励起【Phys. Rev. Lett. 128, 206803 (2022)】

この研究は、Ag(111)表面にエピタキシャル成長させた数原子層の酸化亜鉛(ZnO)超薄膜においてTERSの反ストークスラマン散乱を観測し、STM接合のLSPR励起およびトンネル電流による局所的なフォノン励起(加熱現象)を調べた。TERSの励起波長をSTM接合のLSPR共鳴および2原子層のZnO薄膜の電子共鳴に対応する633 nmに合わせることで、強いラマン散乱を得られることを利用し、ストークス・反ストークス散乱スペクトルを計測した。局所的なフォノン励起を調べるために、ストークス・反ストークス散乱強度比の温度依存性とバイアス電圧依存性を詳細に調べた。加えて、走査トンネル分光(STS)と組み合わせた計測によって、局所的なフォノン励起はZnO超薄膜の伝導帯にトンネル電子が注入されると効率的に起こることを見出し、共鳴トンネル過程を経由したフォノン励起の微視的機構を明らかにした。さらに、STSとTERSの反ストークス散乱強度のイメージングを行うことで、ZnO薄膜における不均一なフォノンの励起が、局所的な電子状態と相関していることを明らかにし、さらに局所的な電子-フォノン相互作用に関する情報をおよそ2 nmの空間分解能で抽出できることを示した。

(5) ナノスケールコヒーレントフォノン分光【Sci. Adv. 8, eabq5682 (2022)】

この研究は、UHV-LT-TERSと近赤外超短パルスレーザーとを組み合わせた超高速非線形分光を開発し、ナノスケールのコヒーレント分光の実験を行った。具体的には、780 nm、10 fsのパルスレーザーをSTM接合に照射することで発生する非線形光誘起トンネル電流を精密に計測する技術を確認し、それによってLSPR励起に伴う電子とフォノンのコヒーレントダイナミクスを観測する実験を行った。まず、FIBで作製したAg探針とAg(111)表面のSTM接合のLSPRの超高速ダイナミクスを計測し、ポンプ-プローブ法による干渉自己相関測定からおよそ20 fsの位相緩和寿命を抽出した。続いて、3原子層のZnO薄膜では、超短パルス励起によるプラズモニック場が電子共鳴を介したコヒーレントフォノンを励起することを見出した。STMの電子分光、TERS、そして超高速ナノ分光を同時に計測することで、局所的な電子状態、結合状態、そしてフォノンダイナミクスの相関をおよそ2 nmの空間分解能で観測できることを示した。これによって、固体物性において重要な電子-格子相互作用やその非平衡ダイナミクスを原子レベルで直接調べることが可能になると期待される。

以上の成果に加え、グラフェンナノリボンの計測にも取り組んだ。論文発表には至っていないが、TERSの計測を行うことができおり、今後も局所的なフォノンダイナミクスの研究を継続したいと考えている。また、ナノスケールのフォノン計測の新しい手法として、探針増強中赤外近接場分光の開発にも取り組んだ。赤外分光は、物質の構造や化学分析だけでなく、フォノンを含む様々な固体物性を調べることでできる有用な手法である。しかし、従来の赤外顕微分光では、光の回折限界という物理的な制約によって、その空間分解能はマイクロメートルのオーダーに留まってしまふ。我々は、この限界を打ち破り、ナノスケールで赤外顕微分光を計測できる技術の開発にも取り組んだ。これによって、シングルナノメートルスケールの単一タンパク質から赤外振動スペクトルの計測【Nano Lett. 24, 836 (2024)】や、二酸化バナジウムナノ粒子の絶縁体-金属相転移の直接観察に成功した【J. Phys. Chem. C 127, 16485 (2023)】。加えて、開発した装置は、可視・近赤外ポンプ-中赤外プローブ時間分解測定も行うことができる。これによって、物質の電子励起に伴うフォノンダイナミクスをナノスケールで直接調べることができ、低次元物質の研究へ応用していく予定である。

## 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 6件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Shuyi Liu, Martin Wolf, Takashi Kumagai	4. 巻 128
2. 論文標題 Nanoscale Heating of an Ultrathin Oxide Film Studied by Tip-Enhanced Raman Spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 206803
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.128.206803	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 該当する
1. 著者名 Borja Cirera, Martin Wolf, Takashi Kumagai	4. 巻 16
2. 論文標題 Joule Heating in Single-Molecule Point Contacts Studied by Tip-Enhanced Raman Spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 16443-16451
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsnano.2c05642	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 該当する
1. 著者名 Shuyi Liu, Adnan Hammud, Ikutaro Hamada, Martin Wolf, Melanie Mueller, Takashi Kumagai	4. 巻 8
2. 論文標題 Nanoscale coherent phonon spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eabq5682
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.abq568	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 該当する
1. 著者名 Liu Shuyi, Franco P. Bonafe, Appel Heiko, Rubio Angel, Wolf Martin, Takashi Kumagai	4. 巻 17
2. 論文標題 Inelastic Light Scattering in the Vicinity of a Single-Atom Quantum Point Contact in a Plasmonic Picocavity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 10172 ~ 10180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsnano.3c00261	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 Kazutaka Nishikawa, Jun Nishida, Masamichi Yoshimura, Keiichi Nakamoto, Takashi Kumagai, Yoshihide Watanabe	4. 巻 127
2. 論文標題 Metastability in the Insulator-Metal Transition for Individual Vanadium Dioxide Nanoparticles	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 16485 ~ 16495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.3c02151	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 Chenfang Lin, Faruk Krecinic, Hiroko Yoshino, Adnan Hammud, Anlian Pan, Martin Wolf, Melanie Mueller, Takashi Kumagai	4. 巻 10
2. 論文標題 Continuous-Wave Multiphoton-Induced Electron Transfer in Tunnel Junctions Driven by Intense Plasmonic Fields	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 3637 ~ 3646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.3c00714	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

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Takashi Kumagai
2. 発表標題 Atomic-Scale Optical Spectroscopy at Surfaces
3. 学会等名 2022 DPG Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Kumagai
2. 発表標題 Atomic-Scale Optical Spectroscopy at Surfaces
3. 学会等名 JSAP-Optica-SPP Joint Symposia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Kumagai
2. 発表標題 Atomic-Scale Optical Spectroscopy at Surfaces
3. 学会等名 IMS-ICAT Joint Symposium of Surface Science for Catalysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Kumagai
2. 発表標題 Atomic-Scale Optical Spectroscopy at Surfaces
3. 学会等名 14th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '22 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Kumagai
2. 発表標題 Atomic-Scale Optical Spectroscopy at Surfaces
3. 学会等名 NanospecFY2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takashi Kumagai
2. 発表標題 Atomic-Scale Optical Spectroscopy at Surfaces
3. 学会等名 SPIE Optics and Photonics 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Kumagai
2. 発表標題 Nanomaterial characterization using infrared SNOM
3. 学会等名 Joint Workshop Fritz Haber Institute, Berlin (FHI) and Institute for Molecular Science, Japan (IMS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Kumagai
2. 発表標題 Exploring Atomic and Molecular Scale Structures and Dynamics by Tip-Enhanced Raman Spectroscopy
3. 学会等名 ISSPワークショップ「表面界面スペクトロスコピー2023」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takashi Kumagai
2. 発表標題 Atomic-Scale Spectroscopy in Plasmonic Tunneling Junction
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第44回年次大会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shuyi Liu, Martin Wolf, Akitoshi Shiotari, Takashi Kumagai
2. 発表標題 Tip-enhanced Raman spectroscopy of a single C60 molecule adsorbed on the Si(111)-7×7 reconstruction surface
3. 学会等名 第16回分子科学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akitoshi Shiotari, Melanie Mueller, Fabian Schulz, Adnan Hammud, Shuyi Liu, Jun Nishida, Takashi Kumagai, Martin Wolf
2. 発表標題 Toward atomic-scale scattering-type scanning near-field optical microscopy based on noncontact atomic force microscopy
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 Franco Bonafe, Shuyi Liu, Heiko Appel, Martin Wolf, Takahi Kumagai, Angel Rubio
2. 発表標題 Impact of atomistic structure and dynamics on inelastic light scattering in a plasmonic picocavity
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (Regensburg22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akitoshi Shiotari, Jun Nishida, Adnan Hammud, Martin Wolf, Takashi Kumagai, Melanie Mueller
2. 発表標題 Development of SNOM combining plasmonic picocavities with noncontact AFM
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (Dresden23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Vivien Sleziona, Faruk Krecinic, Natalia M. Sabanes, Fabian Schulz, Takashi Kumagai, Martin Wolf, Melanie Mueller
2. 発表標題 Probing hot electron dynamics in a metal nanotip with THz-STM
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (Dresden23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Henrik Wiedenhaupt, Shuyi Liu, Luis P. Lopez, Adnan. Hammud, Ikutaro Hamada, Fabian Schulz, Martin Wolf, Takashi Kumagai, Melanie Mueller
2. 発表標題 Nanoscale coherent phonon excitation via plasmon-matter interaction in ultrathin ZnO films
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (Dresden23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chengfang Lin, Melanie Mueller, Faruk Krecinic, Hiroko Yoshino, Adnan Hammud, Anlian Pan, Martin Wolf, Takashi Kumagai
2. 発表標題 Continuous-wave multiphoton-induced electron transfer in a biased tunnel junction driven by intense plasmonic fields
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (Dresden23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Fabian Schulz, Jun Nishida, Adnan Hammud, Shuyi Liu, Takashi Kumagai, Martin Wolf, Akitoshi Shiotari, Melanie Mueller
2. 発表標題 Towards STM-based atomic-scale scanning near-field optical microscopy
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (Berlin24) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Borja Cirera, Martin Wolf, Takashi Kumagai
2. 発表標題 Tip-enhanced Raman spectroscopy in plasmonic nanocavities: enhancement factors and applications
3. 学会等名 DPG Spring Meeting (Berlin24) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ラマン分光によって単一分子のジュール熱発生のミクロな仕組みを解明  
<https://www.ims.ac.jp/news/2022/10/1012.html>  
極微の時空間スケールで格子振動の量子ダイナミクスを観察  
<https://www.ims.ac.jp/news/2022/10/1026.html>  
赤外光で単一のタンパク質を見る新技術 - 未踏の超高感度・超解像赤外イメージングへの一歩 -  
<https://www.ims.ac.jp/news/2024/01/0110.html>

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	西田 純  (Nishida Jun)  (10907687)	分子科学研究所・メゾスコピック計測研究センター・助教   (63903)	

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