

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(S)
研究期間：2009～2014
課題番号：21226003
研究課題名(和文)紫外プラズモニクスの開拓

研究課題名(英文)UV Plasmonics

研究代表者

河田 聡 (Kawata, Satoshi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30144439

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 153,400,000円

研究成果の概要(和文)：紫外光と金属ナノ構造との相互作用を利用して、紫外光をナノスケールの空間中に局在させ増強させるための方法論の確立と、その応用に関する研究を行った。プラズモニクスと呼ばれるこの分野は、ナノフォトニクスの主要なテーマのひとつとして世界中で研究がなされているが、その研究はこれまで可視域に限定されてきた。本研究では、金属材料として、新たに、アルミニウム、インジウムの特性に着目し、これらの金属をナノ構造化することで、プラズモニクスを紫外に拡張することに成功した。実現した紫外プラズモンを応用し、深紫外表面増強ラマン散乱、深紫外先端増強ラマン散乱、深紫外ラマン顕微鏡、紫外プラズモン増強・光触媒などを実現した。

研究成果の概要(英文)：This project aimed at investigating the science of plasmonics in the ultraviolet (UV) region. Using aluminum and indium, we have established techniques to control plasmon resonance from near UV to deep UV wavelength region. We have applied the achieved UV plasmons to DUV surface-enhanced Raman scattering, DUV tip-enhanced Raman scattering, DUV Raman microscopy and spectroscopy, UV plasmon-enhanced photocatalysis, and so on. The achievements contribute to diverse area of science and technologies from biotechnology to device engineering and nano-material science.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：紫外プラズモン 深紫外表面増強ラマン散乱 深紫外先端増強ラマン散乱 深紫外ラマン顕微鏡 紫外プラズモン増強・光触媒 アルミニウム インジウム 二酸化チタン

1. 研究開始当初の背景

金属ナノ構造中の自由電子と光子との相互作用の科学は、プラズモニクスとして知られ、ナノフォトニクスにおける主要な研究テーマとして、大きな注目を集めている。プラズモニック効果により光の局在性と増強性を高めることで、ナノ材料を観察するナノ顕微鏡（近接場ラマン顕微鏡）や、高感度化学センサー、感光材料が生み出されてきた。金や銀など貴金属は、最もよく使われるプラズモニック材料であるが、それらの金属がプラズモニックに振る舞う波長領域は可視光から近赤外にある。そのため、プラズモニクス研究は可視域に限定されてきた。しかし、プラズモニクス技術を紫外光と結びつけることで、材料科学やバイオテクノロジー、産業応用において多くの応用が見込まれる。本研究では、深紫外プラズモニック材料の探索や新たな原理開拓を通じて、プラズモニクスの波長域を紫外に拡張し、紫外光技術およびプラズモニクスの新たな応用を模索することで、広く科学技術および産業に貢献する。

2. 研究の目的

以下の3つのプロジェクトを遂行する。

- (1) 紫外域でプラズモニックな特性を示す金属の探索、および、それを用いたナノ構造の作製、深紫外域でのプラズモン共鳴の達成。
- (2) 紫外プラズモンの紫外表面増強ラマン散乱、および触媒作用増強への応用。半導体光触媒は、バンドギャップに相当する光エネルギーを吸収し電子正孔対を生成し、それが、水素エネルギー発生、有害物分解、表面改質等、種々の反応を進行させる。光触媒 TiO_2 のバンドギャップは紫外にある。紫外プラズモニクスを利用して、光触媒反応進行の効率化を試みる。触媒反応促進に最適なプラズモニック構造を研究し、ワイドバンドギャップ半導体光触媒の新たな可能性を拓く。
- (3) 深紫外域で動作する高分解能光学顕微鏡の構築、ワイドギャップ半導体や生体分子の紫外ナノイメージングおよびナノ分析技術を実現する。紫外共鳴ラマン分光法は、蛋白質等の生体分子における特定部位のダイナミクス解析に用いられているが、深紫外光によるサンプル変質の問題から、イメージングへの応用はほとんどなされていない。共鳴ラマン効果を利用すれば、高い感度でイメージングを行うことが期待できる。

3. 研究の方法

(1) 紫外プラズモニック構造の作製

貴金属に代わり、紫外でも金属として振る舞うアルミニウムを用いて、深紫外プラズモニック構造体を作製する。ナノ構造の大きさや形状を制御して、深紫外の波長領域においてプラズモン共鳴を実現する。アルミニウム以外の深紫外プラズモン材料を探索する。作製したプラズモニック構造体を使って、深紫外（波長 300 nm 以下）領域における表面増強ラマン散乱や光増感効果を実現する。

(2) 光触媒反応のプラズモニック増強

光触媒 TiO_2 の薄膜上に、アルミニウムナノ構

造を形成する。紫外光のプラズモニック増強効果によって、触媒反応が促進することを確認する。

(3) 紫外高解像度光学顕微鏡の構築と分子イメージング

サンプルの電子遷移準位に応じてラマン励起波長を選択できる紫外波長可変光源、紫外分光器、紫外検出器を組み合わせ、紫外域で高い空間分解能を実現する分光イメージングシステムを構築する。ワイドギャップ半導体や核酸・蛋白質を試料として、紫外共鳴ラマン分光イメージングとその応用開拓を行う。

紫外光域で動作する近接場光学顕微鏡を開発する。アルミニウムを用いた近接場プローブを開発し、プローブの増強特性および散乱特性評価を行う。

4. 研究成果

(1) 深紫外局在表面プラズモン共鳴の実現と制御 (Taguchi, et al., Appl. Phys. Lett., 2012)

本研究では、アルミニウムのナノ粒子アレイを作製し、そのプラズモン共鳴スペクトルを測定した (図1)。直径 40 nm のアルミニウムナノ粒子を作製し、波長 270 nm に局在モードプラズモン共鳴ピークを確認した。また、異なる直径のアルミニウムナノ粒子を作製し、深紫外プラズモン共鳴が波長 270 nm から 340 nm に得られることを確認した。波長 270 nm は核酸塩基の吸収帯に相当する。この波長領域でプラズモン共鳴を実現したことは、深紫外プラズモン共鳴を利用した生体分子の高感度検出の実現を拓く成果である。

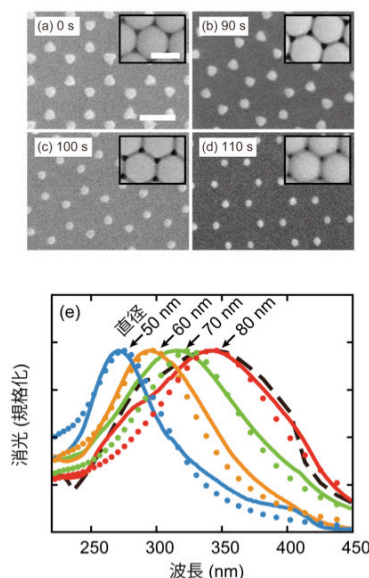


図1 (a)–(d) 作製したアルミニウムナノ粒子アレイ。マスク加熱時間はそれぞれ 0, 90, 100, 110 秒。挿入図は、加熱した後のビーズマスク。スケールバーは 300 nm。(e) 作製したアルミニウムナノ粒子の消光スペクトル。

アルミニウムのナノ粒子の作製は、次の方法で行った。石英基板上にナノビーズを六方最密に自己配列化させ、基板ごと電子レンジで加熱すると、ビーズが配列を保ったまま膨張し、その結果、ビーズ同士の間隙が縮小する。ビーズマスクの上からアルミニウムを真空蒸着して、ビーズの間隙を鋳型としたアルミニウムナノ粒子アレイを得た。電子レンジの加熱時間を調節することによって、ビーズの間隙が変化することを利用して、様々なサイズのアルミニウムナノ粒子を簡便に得られる。新しいアルミニウムナノ粒子作製法として特許出願した。

(2) アルミニウムナノ粒子の構造制御によるプラズモン共鳴のさらなる短波長化 (齊藤, 他, 日本金属学会誌, 2013)

本研究ではアルミニウムナノ構造の高さ方向アスペクト比を変化させてプラズモン共鳴のさらなる短波長化を行った。ナノ構造の幅を一定にして高さを変化させると、共鳴波長が顕著にブルーシフトすることを見だし、直径 28 nm、厚さ 15 nm という最小構造において、244 nm の深紫外光領域に共鳴ピークを得ることに成功した。深紫外における共鳴効果を用いた分子検出のためには、波長 300 nm 以下でプラズモン共鳴を分子に合わせて自在に制御する技術が重要となる。本成果は、バイオセンシング、光触媒、太陽電池の光電子変換材料、ワイドギャップ半導体、青色発光素子のなど、紫外プラズモニクスを利用した広範囲にわたる応用を拓くと考えられる。

(3) インジウムを用いた深紫外プラズモン (Kumamoto, et al., ACS Photonics, 2014)

インジウムが、深紫外波長域でアルミニウム同様、低損失なプラズモニック金属として有効であることを示した (図 2)。インジウムナノ粒子構造を作製し、その表面に堆積したアデニン薄膜の深紫外共鳴ラマン散乱を測定した。その結果、インジウムがあることでアデニンの深紫外共鳴ラマン散乱が増強することを確認した。アルミニウムに加えてインジウムが紫外域でのプラズモン材料として使えることを明らかにした本成果は、紫外プラズモニクスにおける材料選択の幅を広げ、応用上重要な意味を持つ。

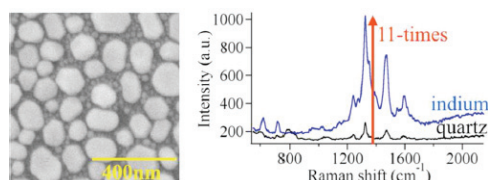


図 2 (a) インジウム蒸着基板の電子顕微鏡画像と (b) インジウム蒸着基板上と合成石英基板上に作成したアデニン薄膜の深紫外 ($\lambda=266\text{nm}$) 励起共鳴ラマン散乱スペクトル。

(4) 深紫外先端増強ラマン散乱 (Taguchi, et al., J. Raman Spectrosc., 2009)

ラマン増強度を高めるためのプラズモニックプローブの金属ナノ構造を研究した。シミュレーションから、プローブ先端においてプラズモン共鳴を得るためには、プローブ表面のグレイン構造が重要な役割であることを示した。また、グレイン同士が連結せずに、ナノギャップを介して離散的に分布すると、増強が飛躍的に高まることを示した。先端増強ラマンにおける離散粒子の集合的効果を議論したのは、本研究が初めてである (投稿中)。以上の知見に基づいて、アルミニウムのマルチグレイン構造を作製した。離散マルチグレイン構造を使って、アデニン分子の表面増強ラマン散乱を測定し、増強効果を確認した。

(5) 紫外プラズモニクスによる光触媒反応の増強 (Honda, et al., Appl. Phys. Lett., 2014; Honda, et al. J. Phys. D: Appl. Phys., 2015)

本研究では、アルミニウムナノ粒子のプラズモン共鳴効果を利用して、ワイドギャップ半導体である TiO_2 の光触媒反応を増強することに成功した (図 3)。 TiO_2 表面にナノ粒子リソグラフィ法を用いてナノ構造を作製し、その上にメチレンブルー色素を塗布して、触媒反応速度が加速する様子をモニタした。紫外光 260–340 nm 照射下でメチレンブルーの吸光度の時間変化を測定した。図 3 は異なるサイズのアルミニウムナノ粒子 (直径 28, 34, 80 nm) がある時、およびアルミニウムがない場合の、メチレンブルーの吸光度の時間変化である。メチレンブルーが触媒反応によって分解されるため、吸光度は単調減少しており、分解速度はアルミニウムがある場合が速い。単一粒子あたりの反応速度はナノ粒子のサイズに依存して変化し、最大で 14 倍の反応速度改善を確認した。反応速度の波長依存性を測定したところ、シミュレーション

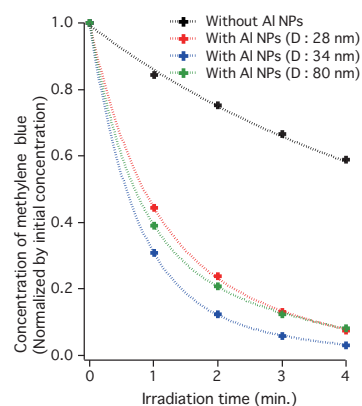


図 3 アルミニウムを用いた光触媒反応の速度向上。黒線は TiO_2 のみ、赤青緑線はそれぞれ直径 28, 34, 80 nm のナノ粒子を用いた。直径 34 nm のナノ構造近傍において 14 倍の反応速度改善が見られた。

に基づくアルミニウムナノ粒子の散乱効率の波長依存性に一致した。このことから、反応速度の向上が局在表面プラズモンの効果によるものであると結論づけた。

さらに、傾斜蒸着法を応用してアルミニウムナノ粒子の数密度を高め、 TiO_2 光触媒反応のさらなる増幅を試みた。その結果、有機物分解量において最大2倍、反応速度について10倍の増強を観測した。高密度アルミニウムナノ粒子構造は、傾斜蒸着法を用いて作製した。蒸着速度と厚みをコントロールすることで、20-60 nm のナノ粒子を大面積に渡り一度に作製する技術を確立した。傾斜蒸着法は簡便であり、紫外プラズモンを使ったデバイス作製に貢献すると考えられる。

(6) 細胞の深紫外共鳴ラマン分析及びイメージング (Kumamoto, et al., *Biomed. Opt. Express*, 2011; Kumamoto, et al., *J. Biomed. Opt.*, 2012)

核酸塩基と芳香族アミノ酸は、深紫外波長域に電子遷移に起因する吸収を示す。従って、これらの分子から構成される核酸分子と蛋白質分子は、深紫外共鳴ラマン散乱を用いて、生体内において感度よく選択的に観察できることが期待される。本研究では、深紫外ラマン分光顕微鏡を開発し、細胞の共鳴ラマン散乱分光イメージングを行なった。

励起光源としてアルゴンイオンレーザーの第二高調波 (波長 244 nm 及び 257 nm) を用いた。試料からのラマン散乱光は、焦点距離 500 mm の深紫外分光器と深紫外の感度を増感させた冷却 CCD カメラを用いて測定した。深紫外では広視野かつ高開口数の対物が利用できないため、イメージングを行う時は、ビームスキャンではなくサンプルを走査した。

HeLa 細胞を波長 257 nm で励起し、深紫外ラマンイメージングを行った (図4)。波長 257 nm は、核酸塩基の吸収にほぼ一致するため、共鳴ラマン散乱を高効率で励起・検出できる波長である。さらに、深紫外領域では、自家蛍光とラマン散乱のスペクトルの波長が完全に分離されるので、蛍光バックグラウンドのないラマンスペクトルが得られた。HeLa 細胞の深紫外ラマン散乱イメージングの結果、核小体と細胞質とが高いコントラストで得られ、細胞内のアデニンとグアニンの分布を再現できた。

深紫外励起では、共鳴する物質のラマン散乱断面積が増強されると同時に、それらの物質が紫外光によって変質し、問題となる。深紫外照明下での生体分子の変質メカニズムを調べるために、波長 244 nm で照明された細胞内の核酸塩基と芳香族アミノ酸のラマ

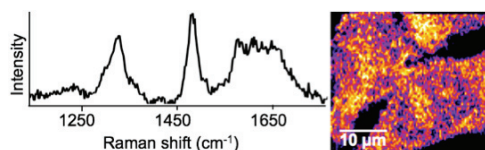


図4 HeLa 細胞の (a) 深紫外ラマン散乱スペクトルと (b) 1490cm^{-1} の核酸塩基バンドのラマン強度画像。

ンスペクトルを経時観察した。細胞への励起光の照射時間を変えてラマン散乱強度を測定した結果、深紫外光に長時間照射された細胞では、核酸塩基と芳香族アミノ酸が変性し、アモルファスカーボンが生成されることがわかった。核酸塩基と芳香族アミノ酸の変性速度と照射強度との関係を計測し、核酸塩基では線形関係であるのに対し、芳香族アミノ酸では非線形な関係であることがわかり、照射強度の増加により、芳香族アミノ酸だけが加速的に変性することがわかった。

深紫外共鳴ラマン散乱による生体分析・イメージングの成果は、深紫外励起における生体分子の極微量分析やナノイメージング実現に繋がる重要な知見である。

(7) グラフェンと MoS_2 の紫外ラマン分光分析 (Liu, et al., *Carbon*, 2015; Liu, et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2015)

次世代の先端デバイスの材料として期待されている物質には、深紫外に吸収帯を持つ物が多く存在する。本研究では、単層グラフェンと単層二硫化モリブデンの深紫外ラマン分光分析を行なった。グラフェンと二硫化モリブデンは、いずれも高いキャリア移動度を有し、次世代の電子デバイス材料として注目されている。

深紫外 (波長 257nm、266nm)、紫外 (波長 354nm)、可視 (波長 532nm)、近赤外 (波長 785nm) の励起光を用いて、単層グラフェンと単層二硫化モリブデンのラマンスペクトルを測定した。その結果、単層グラフェン、単層二硫化モリブデン共に、深紫外励起では紫外・可視・近赤外励起とは異なるラマンスペクトルを示すことがわかり、単層グラフェン、単層二硫化モリブデンの共鳴散乱特性、延いては電子状態の理解のために、深紫外ラマン分光分析が有用であることがわかった。

これらの成果は、先端デバイス材料の物性研究における深紫外プラズモニック分析技術の有用性を示している。

(8) UV イメージング分光装置の構築

① 広帯域紫外顕微共鳴レイリー散乱分光 (Honda, et al., *Appl. Phys. Express*, 2014)

紫外から可視に至る連続的な光源を用いて光吸収・散乱スペクトルを測定すると、対象としている半導体粒子のサイズ、電子エネルギー順位、欠陥密度を評価でき、光触媒反応のメカニズムを研究することができる。本研究では、半導体ナノ粒子のバンドギャップを単一レベルで分光学的に評価できる、広帯域紫外顕微共鳴レイリー散乱分光装置を開発した。紫外光は多くの光学素子にとって分散が大きく色収差が生じやすいため、広帯域光源による顕微分光はこれまで行われていなかった。本研究で作製したシステムは、紫外域の収差補正特殊レンズを導入し、紫外ブロードバンド顕微分光を世界で初めて実現した。本システムは単一のナノ粒子について、その粒子の形状とサイズ、深紫外から可視域に至る電子エネルギー状態を同時に測定することができ、解析時の統計的なばらつきが

ない。さらに、暗視野顕微鏡とスペクトル測定を位置精度よく切り替える機構を備え、通常の暗視野顕微鏡下では微弱で測定困難な半導体単一のナノ粒子からの散乱スペクトルを、顕微鏡下で位置を特定して測定することができる。TiO₂ ナノ粒子を測定した結果、直径~30 nm の粒子にくらべて 10 nm 以下の粒子のバンドギャップは約 0.5 eV 増大していることを見だし、半導体メゾスコピック系のサイズ効果の理論を実験的に検証した。これまでも半導体ナノ粒子のサイズ効果の測定は行われて来たが、アンサンブル平均にすぎなかった。開発した装置により、TiO₂ ナノ粒子のバンドギャップとサイズ効果の関連性を明らかとした。

② 紫外共鳴ラマン分光測定における生体試料光劣化の温度依存性の解明に向けた顕微クライオ装置の構築 (Yoshino, et al., *Anal. Sci.*, 2015)

本研究では紫外光による試料の劣化の原因を解明し、紫外分光イメージングの実現に繋げる目的で、顕微クライオスタットを組み込んだ顕微ラマン分光分析装置を構築した。この装置を用いて、紫外レーザー照射下における試料劣化の温度依存性をラマン分光測定した。バクテリオクロロフィル a を試料に、この分子の電子吸収帯に一致した 355nm の紫外 CW レーザーを用いて共鳴ラマン散乱信号の時間変化を測定した。室温に比べて 80K では、試料の劣化速度に約 5 倍の変化が観測された。この結果は、冷却することにより、紫外レーザー光による試料の劣化を回避しラマン分光の露光時間を増やすことが可能であることを示している。試料の分解速度の温度依存性はアウレニウスの式で記述することが可能で、活性化エネルギーは 1.4 kJ/mol となった。この値は分子の内部回転エネルギーに相当し、紫外光によって励起状態にある分子の結合が最終的に切断される過程で、熱による活性化のプロセスが含まれていることが示唆された。本成果は、環境の温度制御によって非破壊的な紫外共鳴ラマンイメージングが可能であることを示している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

(1) 解説論文 (すべて招待) (計 3 件)

① 齊藤結花 本田光裕, “紫外プラズモニクスから見たアルミニウム,” 軽金属 64, 106–110 (2014). DOI: 10.2464/jilm.64.106

② 田口敦清, “紫外はプラズモニクスのフロンティア?” 分光研究 59, 102-103 (2010).

URL: www.bunkou.or.jp/prints/prints_5902.html

③ N. Hayazawa, A. Tarun, A. Taguchi, S. Kawata, “Development of tip-enhanced near-field optical spectroscopy and microscopy,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 48, 08JA02 (2009).

DOI: 10.1143/JJAP.48.08JA02

(2) 原著論文 (すべて査読有) (計 13 件)

④ H.-L. Liu, H. Guo, T. Yang, Z. Zhang, Y. Kumamoto, C.-C. Shen, Y.-T. Hsu, L.-J. Li, R. Saito, S. Kawata, “Anomalous lattice vibrations of monolayer MoS₂ probed by ultraviolet Raman scattering,” *Phys. Chem. Chem. Phys., Advance Article* (2015). DOI: 10.1039/C5CP01347J

⑤ H. Yoshino, Y. Saito, Y. Kumamoto, A. Taguchi, P. Verma, S. Kawata, “Temperature dependent photodegradation in UV-resonance Raman spectroscopy,” *Anal. Sci.* 31, 451-454 (2015). DOI: 10.2116/analsci.31.451

⑥ I. Maouli, A. Taguchi, Y. Saito, S. Kawata, P. Verma, “Optical antennas for tunable enhancement in tip-enhanced Raman spectroscopy imaging,” *Appl. Phys. Express* 8, 032401 (2015). DOI: 10.7567/APEX.8.032401

⑦ H.-L. Liu, S. Siregar, E. H. Hasdeo, Y. Kumamoto, C.-C. Shen, C.-C. Cheng, L.-J. Li, R. Saito, S. Kawata, “Deep-ultraviolet Raman scattering studies of monolayer graphene thin films,” *Carbon* 81, 807–813 (2015). DOI: 10.1016/j.carbon.2014.10.028

⑧ M. Honda, Y. Kumamoto, A. Taguchi, Y. Saito, S. Kawata, “Efficient UV photocatalysis assisted by densely distributed aluminum nanoparticles,” *J. Phys. D: Appl. Phys.* 48, 184006 (2015).

DOI: 10.1088/0022-3727/48/18/184006

⑨ M. Honda, Y. Saito, S. Kawata, “Individual TiO₂ nano-crystals probed by resonant Rayleigh scattering spectroscopy,” *Appl. Phys. Express* 7, 112402 (2014). DOI: 10.7567/APEX.7.112402

⑩ Y. Kumamoto, A. Taguchi, M. Honda, K. Watanabe, Y. Saito, S. Kawata, “Indium for deep-ultraviolet surface-enhanced resonance Raman scattering,” *ACS Photonics* 1, 598–603 (2014). DOI: 10.1021/ph500076k

⑪ M. Honda, Y. Kumamoto, A. Taguchi, Y. Saito, S. Kawata, “Plasmon-enhanced UV photocatalysis,” *Appl. Phys. Lett.* 104, 061108 (2014). DOI: 10.1063/1.4864395

⑫ 齊藤結花, 本田光裕, 渡邊晃一, 田口敦清, 宋怡健, 河田聡, “深紫外光増感作用を目的としたアルミニウムナノ構造のデザイン: 高さ制御によるプラズモン共鳴の短波長シフトの観察,” *日本金属学会誌* 77, 27–31 (2013).

URL: www.jim.or.jp/journal/j/pdf3/77/01/27.pdf

⑬ Y. Kumamoto, A. Taguchi, N.I. Smith, S. Kawata, “Deep ultraviolet resonant Raman imaging of a cell,” *J. Biomed. Opt.* 17, 076001 (2012). DOI: 10.1117/1.JBO.17.7.076001

⑭ A. Taguchi, Y. Saito, K. Watanabe, S. Yijian, S. Kawata, “Tailoring plasmon resonances in the deep-ultraviolet by size-tunable fabrication of aluminum nanostructures,” *Appl. Phys. Lett.* 101, 081110 (2012).

DOI: 10.1063/1.4747489

⑮ Y. Kumamoto, A. Taguchi, N.I. Smith, S. Kawata, “Deep UV resonant Raman spectroscopy for photodamage characterization in cells,” *Biomed. Opt. Express* 2, 927–936 (2011).

DOI: 10.1364/BOE.2.000927

⑭ A. Taguchi, N. Hayazawa, K. Furusawa, H. Ishitobi, S. Kawata, “Deep-UV tip-enhanced Raman scattering,” *J. Raman Spectrosc.* 40, 1324–1330 (2009). DOI: 10.1002/jrs.2287

[学会発表] (計 61 件)

招待講演 (計 11 件) のみ記載

① 熊本康昭, “深紫外顕微鏡,” 日本分光学会第 51 回夏季セミナー「超解像顕微鏡と分光イメージング」, 2015 年 9 月 3 日 (幕張メッセ, 千葉).

② S. Kawata, “Deep UV plasmonics,” *ICMAT*, 2015 年 6 月 28 日 (Singapore).

③ 熊本康昭, 齊藤結花, 田口敦清, 本田光裕, 河田聡, “深紫外プラズモニクスにおけるインジウムとアルミニウムの利用,” 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 11 日 (東海大学, 神奈川).

④ Y. Saito, S. Kawata, A. Taguchi, Y. Kumamoto, M. Honda, P. Verma, “Surface enhancement in UV with variety of nanostructures,” *SPIE Optics and Photonics*, 2014 年 8 月 19 日 (San Diego, USA)

⑤ A. Taguchi, S. Kawata, “DUV tip-enhanced Raman scattering for nano resonance Raman spectroscopy,” *The 44th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE-2014)*, 2014 年 1 月 7 日 (Snowbird, USA).

⑥ Y. Kumamoto, A. Taguchi, N. Smith, S. Kawata, “Deep-ultraviolet resonance Raman spectroscopy for biomolecular imaging and analysis in cells,” *The 44th Winter Colloquium on the Physics of Quantum Electronics (PQE-2014)*, 2014 年 1 月 7 日 (Snowbird, USA).

⑦ 熊本康昭, “深紫外共鳴ラマン散乱を利用した生体分析技術,” 応用物理学会関西支部平成 25 年度第 3 回講演会, 2013 年 2 月 28 日 (大阪大学, 大阪).

⑧ 熊本康昭, “紫外で顕微分光して見えるもの・わかること-半導体評価から生体分子分析まで,” 日本分光学会第 48 回夏季セミナー「顕微分光のパラダイムシフト」, 2012 年 9 月 7 日 (幕張メッセ, 千葉).

⑨ S. Kawata, “Near-field scanning Raman microscopy in deep UV,” *NFO-11* 2010 年 8 月 30 日 (Peking, China)

⑩ S. Kawata, “Deep UV plasmonics for nanoimaging and nano-analysis,” *FOM2010*, 2010 年 3 月 28 日 (Shanghai, China)

⑪ S. Kawata, “Plasmonics in UV for nano-imaging and analysis” *SPIE Plasmonics: Nanoimaging, Nanofabrication, and Their Applications V*, 2009 年 8 月 2 日 (San Diego, USA).

その他の講演 50 件 (海外 15 件、国内 35 件)

[図書] (計 2 件)

① Y. Ozaki and S. Kawata (ed.), “Far- and Deep-Ultraviolet Spectroscopy” (Springer, 2015, in press).

② N. Hayazawa, A. Tarun, A. Taguchi, K. Furusawa, “Tip-Enhanced Raman Spectroscopy,” in C.S.S.R. Kumar (ed.), “Raman Spectroscopy for Nanomaterials Characterization,” 445-476 (Springer, Berlin, 2012). DOI:10.1063/1.4747489

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 堆積パターンレイおよびその製造方法
発明者: 田口敦清, 河田聡, 齊藤結花

権利者: 理化学研究所

種類: 特許権

番号: 特願 2012-200228

出願年月日: 2012 年 9 月 12 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: 紫外近接場光学顕微鏡および先端増強ラマン分光顕微鏡法

発明者: 田口敦清, 早澤紀彦, 河田聡

権利者: 理化学研究所

種類: 特許権

番号: 特許第 5246667 号

出願年月日: 2009 年 6 月 12 日

取得年月日: 2013 年 9 月 27 日

国内外の別: 国内

[その他]

紫外プラズモニクスに関する国際ワークショップ (UPN2013) を大阪大学吹田キャンパス銀杏会館にて開催した (2013 年 10 月 28–29 日)。Van Duyne 教授 (Northwestern Univ.)、Moskovits 教授 (Univ. California, Santa Barbara)、川上養一教授 (京都大) をはじめ国内外の著名研究者 9 名を招待し (外国 7 名、国内 2 名)、13 講演、ポスター発表を行った。参加者 90 名、参画企業 8 社。

ホームページ

<http://lasie.ap.eng.osaka-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河田 聡 (KAWATA, Satoshi)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号:

(2) 研究分担者

齊藤 結花 (SAITO, Yuika)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90373307

田口 敦清 (TAGUCHI, Atsushi)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 70532109

熊本 康昭 (KUMAMOTO, Yasuaki)

大阪大学・大学院工学研究科

研究者番号: 30611727

庄司 暁 (SHOJI, Satoru)

電気通信大学・情報理工学研究科・准教授

研究者番号: 20437370