

機関番号：10101

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007-2010

課題番号：19049001

研究課題名（和文） 金属ナノ構造を用いた光局在場の創製と光化学反応への応用

研究課題名（英文） Fabrication of metal nanostructure for the enhancement of optical fields and their applications for the control of photochemical reactions

研究代表者

三澤 弘明 (MISAWA HIROAKI)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号：30253230

研究成果の概要（和文）：我々は、照射された光を高効率に分子に吸収させる「光の有効利用」という新しい概念を光化学の研究に導入した。光と分子を強く結合させ、光の有効利用を可能にする光反応場として、局在プラズモン共鳴によって高い光電場増強効果を示す金属のナノ構造体に着目した。金属ナノ構造が示す光電場増強効果は、分子の光励起を高効率に誘起し、微弱な光によるフォトリソ材料の空間選択的な 2 光子重合反応を実現した。また、金ナノ構造を配列した酸化チタン電極を用いた光電気化学測定により、可視・近赤外光を光電変換できることも明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We proposed the concept of “effective utilization of photons” in photochemistry for an increase in excitation probability. Metallic nanostructures showing near-field enhancement effects induced by localized surface plasmon resonance, which act as photochemical reaction fields, are focused on. We have verified the two-photon photopolymerization of negative photoresists on the closely spaced gold nanoparticles irradiated by a weak incoherent light source. We also demonstrated an efficient plasmonic photoelectric conversion by visible to near-infrared light using electrodes, in which gold nanoblocks were elaborately arrayed on the surface of a TiO₂ single crystal.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	35,600,000	0	35,600,000
2008 年度	44,500,000	0	44,500,000
2009 年度	43,500,000	0	43,500,000
2010 年度	25,700,000	0	25,700,000
総計	149,300,000	0	149,300,000

研究分野：光化学

科研費の分科・細目：材料化学・機能材料・デバイス

キーワード：金属ナノ構造、局在表面プラズモン、フォトニック結晶、レーザープロセッシング

1. 研究開始当初の背景

光の波長より小さなサイズの金や銀などの金属ナノ微粒に光を照射すると、局在表面プラズモン共鳴 (LSPR) が誘起され、光電場を回折限界よりも遥かに小さい領域に局在化できることが見出された。LSPR は、金属ナノ微粒表面近傍において入射光電場強度の数桁倍に及ぶ光電場増強を誘起し、表面増強ラマン散乱 (SERS) などの光学効

果を示すとともに、その光電場増強現象を利用してバイオセンシングや高密度記録デバイスなどをはじめとした応用研究などへの展開も進められつつある。従来、LSPR の研究には、金属の粗い表面や化学的に合成された金属ナノ微粒を基板上に配列するボトムアップ的手法が用いられてきた。そのため、光電場増強の物理・化学的描像や微粒間における共鳴現象の本質を定量的に議論する

ことが困難であり、その詳細な原理・基礎物理・化学的性質は未だ解明されていないものが多かった。

2. 研究の目的

本研究では、光の局在および高い光電場増強を誘起する金属ナノ構造の設計を明らかにし、その構造を新奇ナノ光化学反応場と位置づけ、種々の光化学反応へ適応して光機能材料を構築するとともに、構造設計の最適化から光化学反応の選択率制御を達成する反応場を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 従来明らかにされていない光電場増強の物理・化学的描像の解明や光電場を微小空間に束縛、閉じ込めて分子系と強く相互作用させる機能を有する光一分子強結合反応場を構築するために、本研究では、半導体微細加工技術を駆使して固体基板上に金属ナノ構造体周期構造を精緻に作製し、計測や光化学反応の実験に使用する方法論を用いる。作製した構造基板の分光特性や2光子発光計測による光電場増強効果を追跡する。

(2) LSPR バンドを精緻に制御して、SERSの電磁的な増強機構の解明やナノギャップ効果について検討する。

(3) 金属構造体上においてカチオン性光重合反応を行い、金属ナノ構造中の光電場強度分布を可視化する。本研究では、ナノギャップ金属構造による光重合反応を基盤として、光電場増強の物理的描像、および構造体に結合した分子系による光化学反応過程を実験的に明らかにするとともに、構造設計の最適化を導き出す。特に、微弱な光源による多光子反応を試みる。

(4) 金属ナノ構造を有するマイクロメートルサイズの化学反応容器を作製し、容器内においてジアリールエテン分子の2光子フォトクロミック反応を誘起する。入射した光子数に対して反応した分子数を定量的に見積もり、作製した金属ナノ構造の2光子反応触媒としての有用性を明らかにする。

(5) 単結晶酸化チタン基板上に金ナノロッド構造をアレイ状に配置した金ナノロッド/酸化チタン電極を用いて、光電気化学測定により可視・近赤外波長領域における光電変換特性を検討する。また、近赤外光照射においても光電変換が実現される原理を追及するために、金ナノロッド/酸化チタン電極への光照射に基づいて生成する化学種を定量する。

(6) ナノギャップを有する金属ナノ構造体が光電場を数ナノメートルといった微小な領域に局在化させることが可能である特徴を利用して、金属ナノ構造体基板をフォトマスクとしてレジスト基板に密着させ転写露光を行う近接場リソグラフィ(ナノギャップリソグラフィ)技術の実証を行う。

4. 研究成果

(1) 局在表面プラズモン共鳴を精緻に制御するため、電子ビームリソグラフィ/リフトオフにより金属ナノ構造体を作製した。図1(a)-(d)に、作製した金ナノ構造の電子顕微鏡写真を示す。図1(a)は、サファイア基板上に一辺100 nm四方の金ナノブロック(厚み: 40 nm)を対角線上に7個連結させた金ナノチェーン構造であり、任意の形状のナノ構造を設計して作製することが可能である。図1(b)は、ガラス基板上にナノギャップを有して金ナノブロック構造を市松模様状に配列した金ナノ周期構造で、1つの金ナノブロック構造のサイズは、100 nm×100 nm×36 nm、ギャップ幅は各構造端からの距離で5.5 nmの設計とした。図1(c)はガラス基板上に、ナノギャップを有して2つの金ナノブロック構造(1つの金ナノブロック構造のサイズは、100 nm×100 nm×40 nm)を対角線上に配置したナノギャップ金2量体構造である。また、図2(d)は、ルチル型単結晶酸化チタン基板(0.05 wt% Nb ドープ)上に作製した金ナノロッド構造で、構造サイズ 240 nm×110 nm×40 nm、構造間距離は金ナノロッドの長軸方向で300 nm、および短軸方向で200 nmとした。

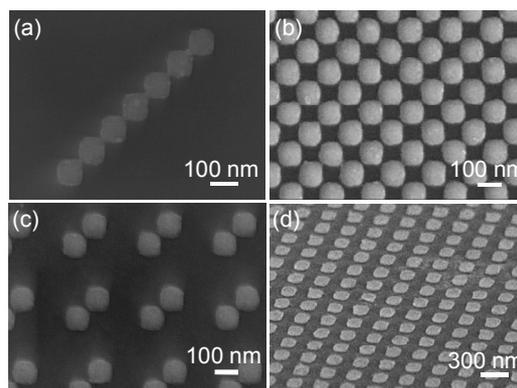


図1 金属ナノ構造の電子顕微鏡写真; 金ナノチェーン構造 (a), 金ナノ周期構造 (b), ナノギャップ金2量体構造 (c), 金ナノロッド構造体 (d)

本研究では、フェムト秒レーザーを励起光源とする顕微2光子発光計測法を用いて、ナノギャップ金構造が示す光電場増強効果について検討した。図2(b)に、さまざまなギャップ幅を有するナノギャップ金周期構造(図2(a))を8 μm四方の領域に作製し、2光子発光の発光強度マッピングを計測した結果を示す(照射レーザー光強度 1.3 kW/cm²)。本結果から、ギャップ幅が小さいほど発光強度が強くなることが明らかになった。特に、ギャップ幅が20 nm以上の金ナノ構造では、発光はほとんど観測されておらず、ギャップ幅が10 nm以下の構造になると、顕著な発光強度の増大が観測された。本結果は、高い光

電場増強を示す金属ナノ構造の設計指針を示したと言える。

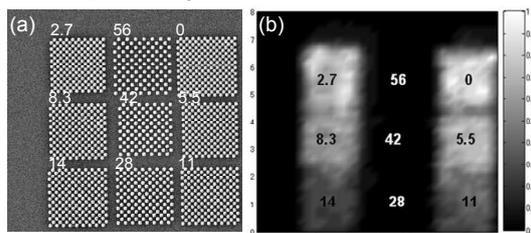


図 2 (a)さまざまなギャップ幅を有する金ナノ周期構造の電子顕微鏡写真、(b)2光子発光強度マッピング測定結果 (図中数字: 設計ギャップ幅)

(2) SERS の電磁的な増強機構およびナノギャップ効果について明らかにした。SERS 強度は、ラマン散乱に寄与する分子数、分子のラマン散乱断面積 (化学効果による見かけ上の断面積の増加分を含む)、入射場および散乱場における電場増強因子、そして入射したレーザー光強度に依存する。したがって、構造サイズやギャップ幅が変化するとプラズモン共鳴スペクトルも変化してしまうため、入射波長および散乱波長における LSPR の共鳴効率が変化し、結果として SERS 強度は LSPR バンドに大きく依存する。本研究では、実験で得られた SERS 強度を入射および散乱波長における LSPR バンドのエクステンション値で規格化すると、共鳴効率の変化による SERS 強度の変化を相殺することができることを明らかにした。これにより、図 3 に示すようにクリスタルバイオレット分子 (1×10^{-4} M) の 1173 cm^{-1} における SERS 強度は、ギャップ幅の減少に伴って顕著に増加し、実験で得られる SERS 信号からナノギャップ形成に基づく光電場の局在効果のみを抽出することに成功した。本結果は、(1)で示した金 2光子発光強度のギャップ幅依存性と密接に対応しており、光電場増強効果が深く関与していることを明らかにした。

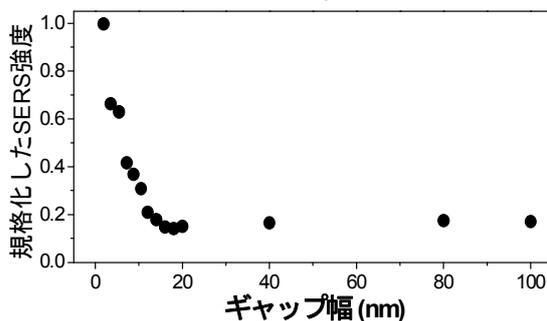


図 3 実験で得られたクリスタルバイオレット分子の SERS 強度 (1173 cm^{-1}) を入射および散乱波長における LSPR バンドのエクステンション値で規格化した SERS 強度のギャップ幅依存性

(3) 高い光電場増強効果を示すナノギャップ金ナノ構造体を光化学反応場として用い、カチオン性光重合反応により金属ナノ構造

の光電場強度プロファイルの可視化と微弱的による多光子反応を実証した。なお、重合開始剤の吸収波長は 400 nm 以下に存在し、 800 nm のレーザー光を照射した場合は、直接重合開始剤を 1 光子によって励起することは不可能であり、2 光子重合反応が進行すると考えられる。図 3(a)に波長 800 nm のフェムト秒レーザーパルス (2.1 kW/cm^2 , 80 MHz) を 0.01 s 間照射した後、現像を行った基板の電子顕微鏡写真を示す。図 3(a)右の時間領域差分法 (FDTD) により得られたナノギャップ金 2 量体構造の光電場強度プロファイルに従って、幅 5.5 nm のギャップ中のみ重合反応が進行したことが明らかになった。さらに、波長 $600 \sim 900 \text{ nm}$ のハロゲン光照射 (3 時間) でも、図 4(b)に示すように金周期構造のギャップ中に 2 光子重合反応が進行することが明らかになった。本結果は、レーザー光源を用いずに非線形光化学反応を達成した初めての例である。

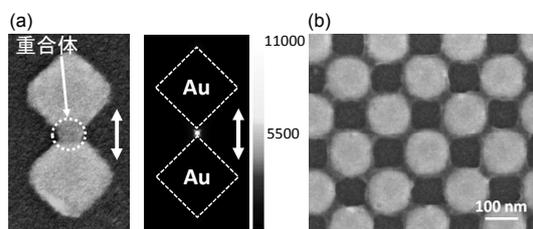


図 4 (a)ナノギャップ金 2 量体構造のギャップ中に形成した重合体の電子顕微鏡写真および FDTD による光電場強度プロファイル (図中矢印は偏光方向)、(b)ハロゲン光照射によって形成された金ナノ周期構造上の重合体の電子顕微鏡写真

(4) 直径 $30 \mu\text{m}$ 、高さ $45 \mu\text{m}$ の PDMS 容器を図 1(c)に示すようなナノギャップ金 2 量体構造 (ギャップ幅: 5.5 nm) 上に配置し、ジアルールエテン分子 (10 mM) の炭酸プロピレン溶液を容器内に注入した。構造上に波長 800 nm のフェムト秒レーザービーム (80 MHz) を照射してジアルールエテン分子の 2 光子開環反応を誘起し、吸収スペクトル測定により反応を追跡したところ、波長 570 nm に極大を有するジアルールエテン分子の開環体の吸収スペクトルが、光照射時間の増加とともに減少した。また、図 5 に金属ナノ構造に相互作用した光子数 (構造が無い場合は入射光子数) に対する反応した分子数をプロットするが、入射光偏光条件が金 2 量体構造に対して平行 (L-mode) な条件、垂直 (T-mode) な条件、および構造が無い条件のいずれにおいても反応した分子数は光子数に対して 2 次の非線形応答を示し、ジアルールエテンの 2 光子開環反応がナノギャップ構造の存在下で効率的に進行していることが明らかになった。なお、本実験系における反応の増強率は 102 倍と見積もられた。図 5 の偏光方向の違いによる反応分子数の差は、ナノギャップ (活性点) において反応した分子数を示していること

から、本触媒のターンオーバー数 (TOF、照射条件: 74.2 W/cm^2) を見積もることができ、 $6.6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ と求められた。したがって、ナノギャップ金構造は2光子反応を促進する高効率な光触媒として作用していることが明らかになった。

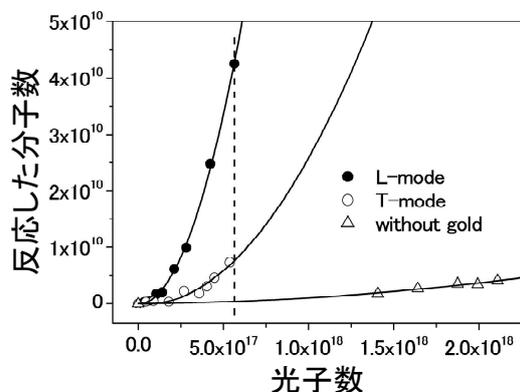


図 5 ナノギャップ金 2 量体構造に相互作用した光子数 (構造が無い場合は入射光子数) に対する反応した分子数

(5) 図 1(d) に示した金ナノロッド/酸化チタン電極、対極に白金電極、参照電極に飽和カロメル電極を用いて三極式光電気化学計測システムにより、光電変換特性を検討した。図 6(a) に無偏光・偏光照射条件における金ナノロッド構造体のプラズモン共鳴スペクトル、図 6(b) に光電流のアクションスペクトルを示す。これらのスペクトルから、いずれの光照射条件においても光電流アクションスペクトルはプラズモン共鳴スペクトルの形状と同様の応答を示すことが明らかになった。また、図 6(d) に示した内部量子効率の波長依存性から、内部量子効率はプラズモン共鳴波長において 10~15% と比較的高い値を示し、光アンテナ構造による光捕集効果だけでなく、光電場増強効果が光電流の発生に寄与していることが示唆された。以上の実験結果と電子ドナー分子を含まない電解質水溶液のみで光電流が 200 時間以上安定に観測されていることなどから、プラズモン共鳴に基づく増強された近接場光が金の内殻電子を励起することにより電子・正孔対が形成され、励起された電子は酸化チタンの伝導電子帯に電子移動し、正孔は酸化チタンの表面準位にトラップされ、水から電子を受け取ることで光電流が観測されると考察される。実際に、光照射した金ナノロッド/酸化チタン電極から酸素と過酸化水素が化学量論的に発生していることが明らかになり、可視・近赤外光照射による水の酸化反応を実証することに成功した。したがって、本結果は可視・近赤外光照射による太陽電池のみならず、人工光合成系への展開も可能であることが明らかになった。

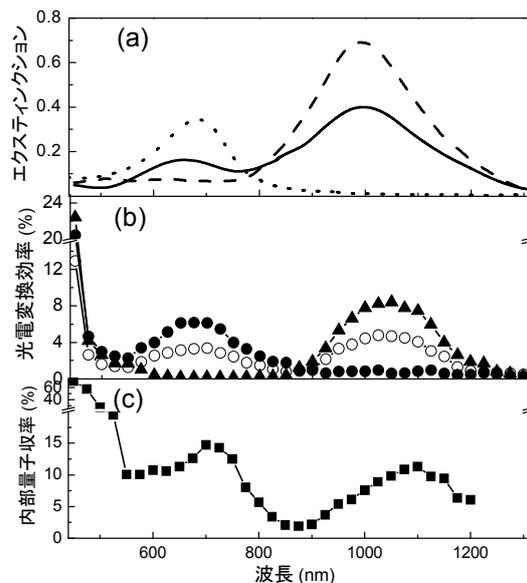


図 6 (a) 金ナノロッドのプラズモン共鳴スペクトル (実線: 無偏光照射条件, 点線: 偏光照射条件(横モード), 破線: 偏光照射条件(縦モード)), (b) 光電流アクションスペクトル (○: 無偏光照射条件, ●: 偏光照射条件(横モード), ▲: 偏光照射条件(縦モード)), (c) 内部量子効率の波長依存性 (無偏光照射条件)

(6) ガラス基板上に作製したナノギャップ金属構造体をフォトマスクとしてレジスト材料への密着露光を行い、ナノ空間選択的な2光子反応を誘起させることによってナノメートルサイズのパターンを形成させるナノ光リソグラフィの原理検証を行った。フォトマスクにはナノギャップ金 2 量体構造 ($80 \text{ nm} \times 80 \text{ nm} \times 36 \text{ nm}$ 、ギャップ幅: 4 nm) を用い、図 7(a) に示すようにポジ型フォトリソ (TSMR-V90LB, 膜厚 $\sim 70 \text{ nm}$, 東京応化工業(株)) をコートしたガラス基板 ($24 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$) に密着させ、波長 800 nm のフェムト秒レーザービーム (82 MHz) を任意の光強度・時間照射することにより密着露光を行った。図 7(b) に、 0.06 W/cm^2 のフェムト秒レーザービームをフォトマスクを通して 10 秒間照射し、現像後電子顕微鏡観察を行った結果を示す。 $\sim 10 \text{ nm}$ のサイズのレジストナノパターンがナノギャップ金 2 量体構造のギャップ位置に対応して縦と横方向に 360 nm 間隔で規則正しく形成されていることが明らかとなった。また、サイズや形状はばらついているが、最小で 5 nm のサイズのパターンが形成された。これらのパターンは、図 4(a) で示したナノギャップ金 2 量体構造のナノギャップ部位にのみ形成された光重合パターンと良好一致を示している。以上の結果は、プラズモン共鳴に基づいた光電場増強効果による局所的な2光子反応を用いれば、レジストパターンをナノギャップ幅のサイズまで小さくすることが可能であることを示しており、本手法がフォトリソ材料に対して 10 nm

以下の空間分解能でパターンングが可能なナノ光リソグラフィ技術に展開できることを示唆している。

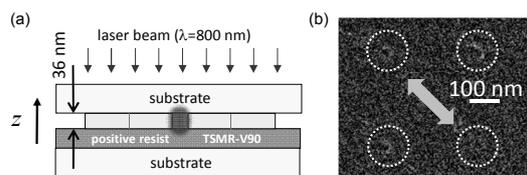


図7 (a)密着露光の略図, (b) フェムト秒レーザービーム (0.06 W/cm²) を10秒間照射し, 現像したフォトレジストパターンの電子顕微鏡写真 (図中矢印は照射直線偏光の偏光方向)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 1 件)

1. Y.-W. Hao, H.-Y. Wang, Y. Jiang, Q.-D. Chen, K. Ueno, W.-Q. Wang, H. Misawa, H.-B. Sun, Hybrid states dynamics of gold nanorods/dye J-aggregate under strong coupling, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **50**, 1-6 (2011). (査読有)
2. K. Ueno, S. Takabatake, K. Onishi, H. Itoh, Y. Nishijima, H. Misawa, Homogeneous nano-patterning using plasmon assisted photolithography, *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 011107 (2011). (査読有)
3. L. Wang, W. Xiong, Y. Nishijima, Y. Yokota, K. Ueno, H. Misawa, G. Bi, J.-r. Qiu, Spectral properties and mechanism of instability of nanoengineered silver blocks, *Opt. Express*, **19**, 10640-10646 (2011). (査読有)
4. Y. Tanaka, H. Ishiguro, H. Fujiwara, Y. Yokota, K. Ueno, H. Misawa, K. Sasaki, Direct imaging of nanogap-mode plasmon-resonant fields, *Opt. Express*, **19**, 7726-7733 (2011). (査読有)
5. K. Imura, K. Ueno, H. Misawa, H. Okamoto, Anomalous light transmission from plasmonic capped nano-aperture, *Nano Lett.*, **11**, 960-965 (2011). (査読有)
6. S. Gao, K. Ueno, H. Misawa, Plasmonic antenna effects on photochemical reactions, *Accounts. Chem. Res.*, **44**, 251-260 (2011). (査読有)
7. Y. Yokota, K. Ueno, H. Misawa, Essential Nanogap Effects on Surface-Enhanced Raman Scattering Signals from Closely Spaced Gold Nanoparticles, *Chem. Commun.*, **47**, 3505-3507 (2011). (査読有)
8. Y. Yokota, K. Ueno, H. Misawa, Highly Controlled Surface-Enhanced Raman Scattering Analysis Chips Using Nano-Engineered Gold Blocks, *Small*, **7**, 252-258 (2011). (査読有)
9. Y. Nishijima, K. Ueno, Y. Yokota, K. Murakoshi, H. Misawa, Plasmon-assisted photocurrent generation from visible to near-infrared wavelength using a Au-nanorods/TiO₂ electrode, *J. Phys. Chem. Lett.*, **1**, 2031-2036 (2010). (査読有)
10. K. Ueno, S. Takabatake, Y. Nishijima, V. Mizeikis, Y. Yokota, H. Misawa, Nanogap-assisted surface plasmon nanolithography, *J. Phys. Chem. Lett.*, **1**, 657-662 (2010). (査読有)
11. Y. Yokota, K. Ueno, S. Juodkazis, V. Mizeikis, N. Murazawa, H. Misawa, H. Kasa, K. Kintaka, J. Nishii, Nano-textured metallic surfaces for optical sensing and detection applications, *J. Photochem. Photobio. A: Chem*, **207**, 126-134 (2009). (査読有)
12. L. Wang, Y. Nishijima, K. Ueno, H. Misawa, N. Tamai, Near-IR vibrational dynamics of periodic gold single and pair nanocuboids, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 053116 (2009). (査読有)
13. K. Ueno, S. Juodkazis, T. Shibuya, V. Mizeikis, Y. Yokota, H. Misawa, Nanoparticle-enhanced photopolymerization, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 11720-11724 (2009). (査読有)
14. N. Murazawa, K. Ueno, V. Mizeikis, S. Juodkazis, H. Misawa, Spatially selective non-linear photopolymerization induced by the near-field of surface plasmons localized on rectangular gold nanorods, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 1147-1149 (2009). (査読有)
15. K. Ueno, S. Juodkazis, T. Shibuya, Y. Yokota, V. Mizeikis, K. Sasaki, H. Misawa, Nanoparticle plasmon-assisted two-photon polymerization induced by incoherent excitation source, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 6928-6929 (2008). (査読有)

[学会発表] (計 1 1 7 件)

1. K. Ueno, Surface plasmon-assisted nanolithography with nanometric accuracy, SPIE Photonic West 2012, The Moscone Center, 2012年1月23日.
2. 石 旭、上野 貢生、三澤 弘明, 金ナノ粒子/酸化チタン単結晶電極の光電変換特性, 日本化学会第92春季年会, 慶應義塾大学, 2012年3月26日.
3. 上野 貢生、大西 広、伊藤 弘子、三澤 弘明, プラズモン局在光電場を用いた局所2光子光化学反応, 2011年光化学討論会, 宮崎観光ホテル, 2011年9月7日.
4. 西島 喜明、上野 貢生、小竹 勇己、村越 敬、井上 晴夫、三澤 弘明, 金ナノ構造/酸化チタン電極を用いたプラズモン電荷分離に基づく水の酸化反応, 2011年光化学討論会, 宮崎観光ホテル, 2011年9月6日.

5. K. Ueno, B. Wu, Y. Yokota, H. Misawa, Quantitative Analysis of Plasmon-Assisted Two-Photon Photochromic Reactions on Gold Nanoparticles, 6th Asian Photochemistry Conference 2010, Wellington, New Zealand, 2010年11月17日.
6. 上野 貢生, 吳 伯涛, 横田 幸恵, 三澤 弘明, プラズモン増強場における2光子フォトクロミック反応の定量測定, 2010年光化学討論会, 千葉大学, 2010年9月6日.
7. 池谷 伸太郎, 上野 貢生, 村澤 尚樹, 三澤 弘明, 制御されたナノギャップ金構造のプラズモン分光特性, 日本化学会第90春季年会, 近畿大学, 2010年3月27日.
8. 上野 貢生, 金属ナノ構造を用いた光局在場の創製と光化学反応への応用 (招待講演), 第57回応用物理学関係連合講演会, 東海大学, 2010年3月18日.
9. 池谷 伸太郎, 上野 貢生, 村澤 尚樹, 西島 喜明, 横田 幸恵, ビガンタス ミゼイキス, サウリウス ヨードカジス, 三澤 弘明, ナノギャップ金構造の散乱分光特性, 第70回応用物理学学会学術講演会, 富山大学, 2009年9月9日.
10. K. Ueno, S. Juodkasis, V. Mizeikis, Y. Yokota, S. Takabatake, S. Ikegaya, H. Misawa, Electromagnetic field enhancement effects on nano-engineered gold particles, XXIV International Conference on Photochemistry ICP2009, Toledo, Spain, 2009年7月21日.
11. H. Misawa, Photochemical reactions on gold nanoparticles, 215th ECS Meeting, San Francisco Hilton, 2009年5月25日.

[図書] (計12件)

1. K. Ueno, H. Misawa, Strong photon-molecule coupling fields for chemical reactions, Photochemistry, **39**, 228-255 (2011).
2. 上野 貢生, 三澤 弘明, 高効率な二光子励起を可能にする反応場の設計と作製, 高効率二光子吸収材料の開発と応用, 分担執筆 (シーエムシー出版 監修 渡辺敏行), 117-127 (2011).
3. 三澤 弘明, 上野 貢生, 光アンテナ搭載光電変換を利用した高効率太陽電池の開発, プラズモニクスデバイス開発最前線, 分担執筆 (エヌ・ティー・エス), 237-246 (2011).
4. K. Ueno, S. Juodkasis, V. Mizeikis, H. Misawa, Molecular Electronic and Related Materials-Control and Probe with Light, Transworld Research Network, 261-280 (2010).
5. 上野 貢生, 三澤 弘明, プラズモンナノ

材料の最新技術, シーエムシー出版, 138-145 (2009).

[産業財産権]

○出願状況 (計8件)

名称: フォトレジストパターンの作製方法

発明者: 上野 貢生, 三澤 弘明

権利者: 北海道大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2011/001192

出願年月日: 2011年3月1日

国内外の別: 外国

名称: 光電変換装置、光検出装置、及び光検出方法

発明者: 三澤 弘明, 西島 喜明, 上野 貢生, 村越 敬

権利者: 北海道大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2010/065052

出願年月日: 2010年9月2日

国内外の別: 外国

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ: <http://photomolecule.net/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三澤 弘明 (MISAWA HIROAKI)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号: 30253230

(2) 研究分担者

ヨードカジス・サウリウス (JUODKAZIS SAULIUS)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号: 80332823

(H20~H21: 連携研究者)

上野 貢生 (UENO KOSEI)

北海道大学・電子科学研究所・准教授

研究者番号: 00431346

(H20~H22: 連携研究者)

(3) 連携研究者

村澤 尚樹 (MURAZAWA NAOKI)

北海道大学・電子科学研究所・助教

研究者番号: 40455621

(H21~H22)