

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360035

研究課題名(和文)超短パルス光干渉加工による金属周期ナノ構造の創製と表面増強ラマン散乱法への応用

研究課題名(英文) Fabrication of periodic metal structure by interfering ultra-short pulse laser processing and application for surface-enhanced Raman spectroscopy

研究代表者

中田 芳樹 (Nakata, Yoshiki)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授

研究者番号：70291523

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,600,000円、(間接経費) 2,880,000円

研究成果の概要(和文)：超短パルス干渉レーザーを金属薄膜に照射しナノサイズ金属流動と固化= Solid-Liquid-Solid (SLS)プロセスを誘起することで、ナノウィスカーやナノドロップなどの特異な金属ナノ周期構造が形成される。これをプラズモニックデバイスに応用するために、空間フィルター及びSLMを用いたビーム整形による加工分布制御と3次元スキャン加工による大面積デバイス作製を行った。実際に表面増強ラマン散乱基板及びメタマテリアルの作製と特性評価を行った。また走査型・透過型電子顕微鏡による金属ナノ構造観察結果を踏まえ、FDTD法による電磁界シミュレーションを用い、レーザー照射時の電場増強効果を検証した。

研究成果の概要(英文)：Peculiar nano-sized and periodic metal structures such as nanowisker and nanodrop in matrix can be fabricated by interfering ultra-short pulse laser processing of metal thin film via nano-sized metal liquid flow and solidification, which is called as Solid-Liquid-Solid (SLS) process. To apply these structures to plasmonic devices, large area processing was performed with controlling of processing profile by spatial light filter and Spatial-Light-Modulator (SLM) devices, and with 3D scanning processing technique. The system was applied to fabricate Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS) substrate and MHA metamaterial, and their characters were examined. In addition, according to the observed results of nano-sized metal structures by scanning and transmission electron microscope, electro-magnetic field with laser irradiation was simulated by FDTD method, and the results proved the field enhancement effect.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：超短パルスレーザー 干渉加工 金属周期ナノ構造 ビーム整形 プラズモニクス 表面増強ラマン散乱 MHA FDTD

1. 研究開始当初の背景

(1) 超短パルスレーザー加工法は熱損傷や変質による劣化が無い手法として知られている。一方我々はこれまでに、金属薄膜に干渉超短パルスレーザーを照射してナノサイズ溶融金属の流体的挙動を誘起し、ナノウィスカーやナノドロップなどの特異な金属ナノ周期構造を形成した。このプロセスを Solid-Liquid-Solid (SLS) と命名し、Vapor-Liquid-Solid (VLS) やリソグラフィーなどスタンダードなナノ構造作製法より簡便で高性能な手法として開発を進めている。

(2) 金属ナノ構造はプラズモニクスを中心に多彩な応用がある。例えば表面増強ラマン散乱(SERS)測定では顕著な SERS 活性を有する。また、メタ材料はデザインされた金属ナノ周期構造で形成されている。これらの構造の多くはリソグラフィーや化学反応で作製されており、高度な装置群と技術が必要でコストや作製時間などの問題がある。これらを克服する新手法として、超短パルスレーザー干渉加工法は非常に有望である。実際に金属ナノ構造デバイスを作製する装置を構成し応用に用いる事で、簡便かつ高性能な手法になると考え研究を推進した。

2. 研究の目的

加工ビームをフラットトップ化する技術を開発し均一な面加工特性を得ることで、プラズモニックデバイス作製における大面積加工を可能にする。実際に SERS 基板及びメタ材料の作製と特性評価を行い、汎用性が高い加工法である事を実証する。また、走査型・透過型電子顕微鏡(TEM)による観察で3次元的な金属ナノ構造を明らかにし、これを元に FDTD (Finite-difference time-domain method)法による電磁界シミュレーションを行い、電界増強効果を検証する。

3. 研究の方法

- (1) ビーム整形・フラットトップビームの形成：①ビームプロファイルを反映した Spatial filter、②空間強度変調器(SLM)
- (2) 大面積金属ナノ周期構造の作製：3次元ターゲット自動スキャン装置を利用した多ショット加工による大面積加工を行う。
- (3) プラズモニクス応用①：SERS 活性サイトが百万個以上、10mm²に渡ってマトリクス状に均等配列した構造を作製し、SERS 活性を調べる。
プラズモニクス応用②：MHA(Metallic Hole Array)メタ材料を作製し透過スペクトル特性を評価する。
- (4) TEM 観察を用いた金属ナノ構造の3次元構造評価
- (5) FDTD 法による金属ナノ構造の電磁界解析

4. 研究成果

(1) ビーム整形・フラットトップビームの形成

①フェムト秒レーザー(Cyber Laser Ifrit)のビームプロファイルは図1中で示すように、非対称かつ不規則な分布がある。これに対し spatial filter の透過率分布(図1左)は点対称に設計する必要があるため、ビームセンターを含めた縦横方向のプロファイルが共にフラットに近づく中間値を設計値に用いた。ピークを含む peak to valley(PV)値(ピークを含む縦方向、幅 2.4mm)は 0.35 から 0.26 に改善しており、簡便な手法として利用出来る。

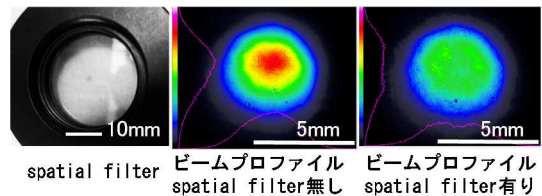


図1 spatial filter によるフラットトップ化

②空間強度変調器(SLM)と偏光ビームスプリッターを組み合わせ、空間的なフィルタリングを行った。元のビームプロファイル及びピーク値に対するフラットトップ部の値、SLM の強度変調特性を入力し、SLM コントロール用画像を計算し出力するプログラムを作成した。SLM のダメージ閾値を考慮し、ビーム径を2倍に拡大している。元のビームプロファイルは図2左のように非対称かつ不規則な形状があり、これをピーク値×0.7の強度でフラットトップ化すると図2中のように不規則なビーム形状となる。右は矩形に整形した場合であり、隙間の無い多ショット加工が可能である。PV 値は 0.21 であり、ショット毎のプロファイル揺らぎが不均一残存の主因であった。これを解決する方法にはレーザーの安定化、同一箇所マルチショット加工による平均化などがあり、前者を新規研究テーマとして継続中である。

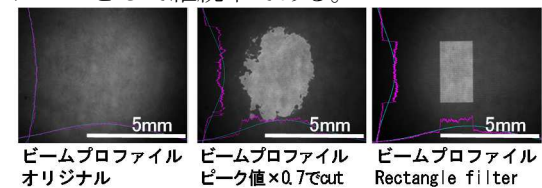


図2 空間強度変調 SLM によるビーム整形

(2) 大面積金属ナノ周期構造の作製

超短パルスレーザー干渉加工装置に PC 制御ターゲット 3次元駆動装置を組み合わせ、多ショットで大面積加工が可能な装置を構成した。下記の SERS 基板作製では、50Hz の繰り返し周波数の場合約 5 分間で 10mm²を全面加工した。これは、元来の繰り返し周波数 1kHz を用いると 15 秒に短縮される。さらに、加工条件最適化やレーザーの高出力化によって大幅に短縮する事も可能である。

(3) プラズモニクス応用

①SERS 基板の作製と SERS 信号測定

厚さ 50nm の金薄膜をシリカガラス基板に蒸着し、10mm² 全面に渡って SERS 活性サイトを作製した(fluence: 77 mJ/cm²)。その間隔は 3.4μm であり、計算上最大で 860 万個存在する。図 3 左の全体図では周期構造による回折の色が見える。主構造はナノドロップである(ドロップ径~200nm、高さ~1μm)。

図 4 は pyridine 溶液(12mol/l)に He-Ne レーザー(λ=632.8nm)を照射して得たラマン散乱信号及び SERS 信号の測定結果である。図より、SERS 信号は Raman 散乱信号と比較しておよそ 60 倍に増加した。さらに、987, 1027 cm⁻¹ のラマンバンドは、SERS 測定では 1007, 1029 cm⁻¹ にそれぞれシフトした。これらは SERS 特有の結果であり、作製した基板に SERS 活性能が有ると結論づけられた。

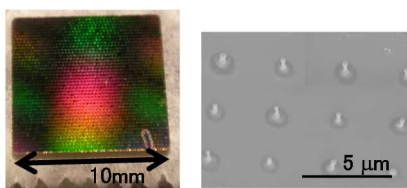


図 3 SERS 測定用基板と金ナノドロップ

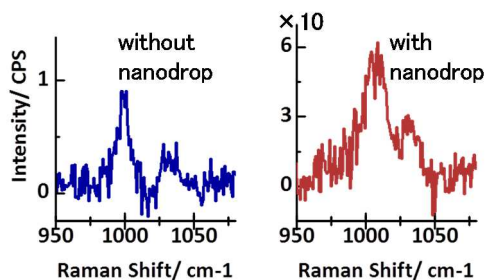


図 4 pyridine 溶液のラマン散乱信号と SERS 信号

②MHA の作製と透過スペクトル測定

厚さ 100nm の金薄膜をシリカガラス基板に蒸着し、周期 1.93μm の正方格子 MHA を作製した(fluence: 116 mJ/cm²) (図 5 左)。透過スペクトルを見ると、青線で示した理論値(Phys. Rev. B 58, 6779 (1998))とほぼ同じ波長で MHA 構造由来の透過ピークが見られた。透過率は開口部の数で増加が可能である。

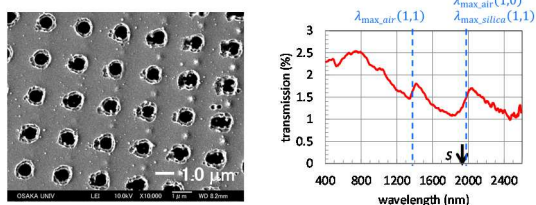


図 5 Au 正方格子 MHA と近赤外域透過スペクトル

(4) TEM を用いた金属ナノ構造の 3 次元構造評価

図 6 は本手法で作製した金ナノウイスカーの走査型電子顕微鏡(SEM)像である。解像度は数十 nm 程度であり、より詳細な構造観察と結晶構造を知るために TEM 測定を行った。

通常の TEM による観察を行った所、ジュール熱による昇温でナノウイスカー構造が破壊されたため、液体窒素を用いた冷却 TEM(加速電圧 200kV)による測定を行った。サンプルを FIB で厚さ 100nm にスライスし、3 次元構造を測定した。図 7a は全体像であり、中空バンプの中央にナノウイスカーが直立している。バンプの最薄部は 7nm である。ナノウイスカーの体積は 0.011mm³ (0.21pg)、バンプは 0.025mm³ (0.49pg)である。この部分に相当する加工前の薄膜体積は 0.074mm³ であり、その 51%は干渉加工時に蒸発やドロップレットとして離脱している。図 7c,d の拡大図では、格子面間隔 2.36, 2.04 Å の構造が見られ、face-centered-cubic (fcc)構造が形成されている事が分かる。b の部位の selected-area electron diffraction (SAEA)像では、(111)(220)(131)からの回折が見える。以上から、ナノウイスカーは金のナノ多結晶から構成されており、これは化学的手法で作製される金ナノロッドが単結晶になりがちな事と対照的である。ここで、単結晶より多結晶金属の方が強度において 100 倍強いという報告も有り(Nat. Mat. 4 525 (2005))、プラズモニクデバイスに加えて electromechanics への応用も考えられる。ナノウイスカーの頂点曲率半径は 4.0nm であり、化学的手法で作られる金ナノロッドの半分程度となっている。図 7d の拡大図では双晶構造も見られる。

以上から、本手法は化学的合成法と全く異なる特徴的な金属ナノ構造が作製できる事が分かった。さらに本手法ではナノウイスカーが自動的に配列しているためナノ構造同士の付着や融合の恐れが無く、配列・固定などの操作も不要であり、溶液洗浄も不要、大気中での高速加工が可能であるなど、従来の手法とは一線を画す事が確認された。

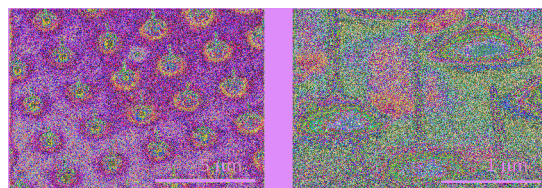


図 6 金ナノウイスカーの SEM 観察像

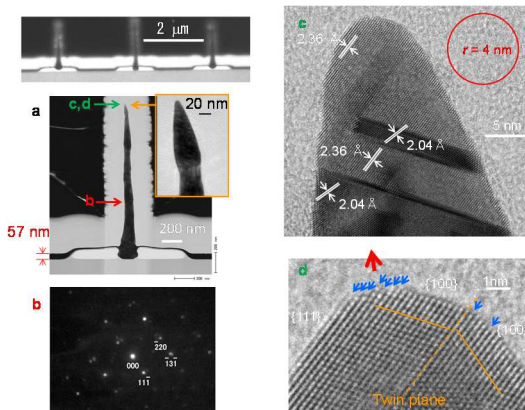


図 7 金ナノウイスカーの冷却 TEM 観察像

(5) FDTD 法による金属ナノ構造の電磁波応答解析

本手法で作製される金ナノ構造と電磁波の相互作用について、FDTD法を用いたシミュレーションを行った。図8左一段目から空気のみ、左二段目は金ナノウィスカー周期構造、左三段目は金ナノドロップ($d=100\text{nm}$)周期構造、左四・五段目は $d=200\text{nm}$ の場合である。右一段目は金ナノ構造のモデル説明図、右二段から五段目はそれぞれ左の構造を水中に配置した場合であり、SERS測定条件を近似している。四段目までは波長 632.8nm 、五段目は 532nm の平面波 CW 光源を直上から照射し、それぞれで最大局在電場が得られる時刻を図示した。図より、ナノウィスカーは金薄膜との接合部分で 1.8 倍(1.06/0.59)の増強効果がある。直径 100, 200nm のナノドロップ部分では 3.2, 5.2 倍の増強効果がある。水中の場合、ウィスカー部分の中央ほどで 4.5 倍から 4.7 倍の増強効果が得られている。波長を 532nm に変えた場合は全く異なる。

このように本手法で作製される金属ナノ構造によって電界増強効果が得られ、またその増強倍率は金属ナノ構造の形状及び周辺物質の誘電率、光源の波長で変化する事が分かる。これらを調整する事で SERS 活性などを最大化出来ると思われる。

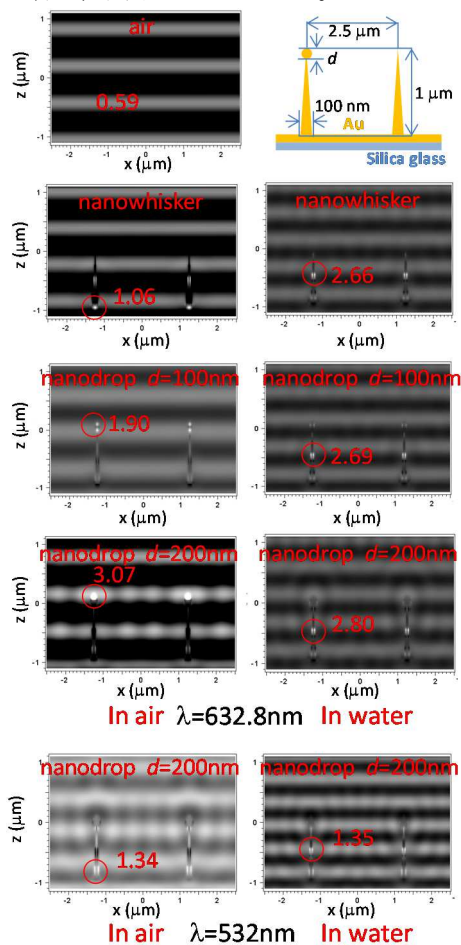


図8 金ナノウィスカー・ナノドロップのFDTDによる電場解析

5. 主な発表論文等

(研究代表者、分担者、連携研究者に下線)
(雑誌論文) (計 19 件)

(1) Kazuma Momoo, Yoshiki Nakata, Noriaki Miyanaga, Generation of new nanostructures in designed matrix by interfering femtosecond laser processing, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 5243, 2012, pp. 82431E
DOI 10.1117/12.909819

(2) Yoshiki Nakata, Kazuma Momoo, Noriaki Miyanaga, Takuya Hiromoto, Generation of sharp and periodic structure by interfering femtosecond laser processing, Proc. LPM2011, 査読無, Vol. 1, 2011, pp. 170-170

(3) Yoshiki Nakata, Kazuma Momoo, Noriaki Miyanaga, Takuya Hiromoto, Simulation and experimental results of periodic surface nano-texturing by interfering femtosecond laser, Proc. ALT' 19, 査読無, Vol. 1, 2011, pp. 64-64

(4) Yoshiki Nakata, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, Kazuma Momoo, Interfering ultraviolet femtosecond laser processing of gold thin film and prospect of shortest period, APEX, 査読有, Vol. 5, 2012, pp. 102703
DOI 10.1143/APEX.5.102703

(5) Daisuke Nakamura, Tetsuya Shimogaki, Kota Okazaki, Mitsuhiro Higashihata, Yoshiki Nakata, Tatsuo Okada, Growth of periodic ZnO nano-crystals on buffer layer patterned by interference laser irradiation, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 8607, pp. 860703
DOI 10.1117/12.2002961

(6) Yoshiki Nakata, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, K. Momoo, Metamaterials fabricated by interfering fs laser processing with different combinations of laser and target parameters, Proc. LPM 2012, 査読無, Vol. 1, 2012, pp. 199-199

(7) Yoshiki Nakata, Keiichi Murakawa, Kenji Sonoda, Kazuma Momoo, Noriaki Miyanaga, Takuya Hiromoto, Design of interference pattern in ultra-short pulse laser processing, Appl. Phys. A, 査読有, Vol. 112, 2013, pp. 191-196
DOI 10.1007/s00339-012-7239-1

(8) Yoshiki Nakata, Kazuma Momoo, Noriaki Miyanaga, Takuya Hiromoto, Kunio Tsuchida, Organized metamaterials comprised of gold nanoneedles in a lattice generated on silicon (100) wafer substrates by interfering femtosecond laser processing, Appl. Phys. A, 査読有, Vol. 112, 2013, pp. 173-177
DOI 10.1007/s00339-012-7236-4

(9) Yoshiki Nakata, Keiichi Murakawa, Kenji Sonoda, Kazuma Momoo, Noriaki Miyanaga, Design of interference pattern using coherent beams configured as a six-sided pyramid, Appl. Opt., 査読有, Vol. 51, 2012, pp. 5004-5010
DOI 10.1364/AO.51.005004

(10) Yoshiki Nakata, Noriaki Miyanaga, Kazuma Momoo, Takuya Hiromoto, Solid-liquid-solid process for forming free-standing gold nanowhisker superlattice by interfering femtosecond laser irradiation, Appl. Surf. Sci., 査読有, Vol. 274, 2012, pp. 27-32
DOI 10.1016/j.apsusc.2013.02.042

(11) 中田芳樹, 松葉良生, 村川恵一, 宮永憲明, コヒーレントビーム干渉パターンとのデザインと金ナノウィスカーマトリクス構造の作製, レーザー研究, 査読有,

Vol. 41, 2013, pp. 811-815

(12) Yoshiki Nakata, Yoshiki Matsuba, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, Fabrication of 2D and 3D metal nanostructure in matrix by interfering ultrashort laser processing, Proc. EMN, 査読無, Vol. 1, 2013, pp. 40-40

(13) Yoshiki Nakata, Yoshiki Matsuba, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, Simulation and experimental results of periodic surface nano-texturing by interfering femtosecond laser, Proc. ALT' 13, 査読無, Vol. 1, 2013

(14) Daisuke Nakamura, Tetsuya Shimogaki, Yuki Muraoka, Shihomi Nakao, Kousuke Harada, Mitsuhiro Higashihata, Yoshiki Nakata, Hiroshi Ikenoue, Tatsuo Okada, Effect of laser irradiation on ZnO nanocrystal growth by nanoparticle-assisted pulsed laser deposition, Proc. LPM 2013, 査読無, Vol. 1, 2013, pp. 58-58

(15) Daisuke NAKAMURA, Tetsuya SIMOGAKI, Kota OKAZAKI, Mitsuhiro HIGASHIHATA, and Tatsuo OKADA, Growth Control of ZnO Nano-Crystals by Multi-Beam Interference Patterning, J. Las. Mic./Nanoeng., 査読有, Vol. 8, 2013, pp. 206-209

(16) Yoshiki Nakata, Yoshiki Matsuba, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, Fabrication of plasmonic device by interfering femtosecond laser processing, Proc. LPM 2013, 査読無, Vol. 1, 2013, pp. 193-193

(17) Yoshiki Nakata, Takuhiro Matsuyama, Sho Miyamoto, K. Murakawa, Noriaki Miyanaga, New technique for the fabrication of plasmonic device, Proc. FLAMN, 査読無, Vol. 1, 2013, pp. 46-46

(18) Yoshiki Nakata, Yoshiki Matsuba, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, Change of interference pattern using fundamental and second-harmonic wavelengths by phase shift of a beam, Appl. Phys. A, 査読有, 2014, published online
DOI 10.1007/s00339-014-8361-z

(19) 中田芳樹, 島田直人, 松葉良生, 村川恵一, 宮永憲明, 超短パルスレーザー干渉加工法と近年の進展, レーザ加工学会誌, 査読有, Vol. 21, 2014

[学会発表] (計 40 件) (招待講演 8 件)

(1) 中田芳樹, Generation of superfine structure smaller than 10 nm by topdown technique, 平成 23 年度第 1 回エクストリームフォトニクスセミナー, 2011 年 4 月 21 日, 理化学研究所

(2) Yoshiki Nakata, Kazuma Momoo, Noriaki Miyanaga, Takuya Hiromoto, Generation of sharp and periodic structure by interfering femtosecond laser processing, The 12th International Symposium on Laser Precision Microfabrication, 2011 年 6 月 10 日, 高松国際会議所

(3) Yoshiki Nakata, Kazuma Momoo, Noriaki Miyanaga, Takuya Hiromoto, Generation of new meta-materials by interfering femtosecond laser processing with phase shift and amplitude difference between the beams, 2011 IQEC / CLEO Pacific Rim Conference, 2011 年 8 月 30 日, Sydney Convention and Exhibition Centre

(4) Yoshiki Nakata, Kazuma Momoo, Noriaki Miyanaga, Takuya Hiromoto, Simulation and experimental results of periodic surface nano-texturing by interfering femtosecond laser, 19th International Conference on Advanced Laser Technologies (招待講演), 2011 年 9 月 4 日, Golden Sands (Bulgaria)

(5) Yoshiki Nakata, Kazuma Momoo, Noriaki Miyanaga and Takuya Hiromoto, Designing of interference pattern in ultra-short pulse laser processing, 11th international conference on laser ablation, 2011 年 11 月 18 日, Playa del Carmen México

(6) Kazuma Momoo, Yoshiki Nakata, Noriaki Miyanaga, Generation of new nanostructures in designed matrix by interfering femtosecond laser processing, SPIE Photonics West 2012, 2012 年 1 月 24 日, Moscone convention center, San Francisco, USA

(7) 中田芳樹, 村川恵一, 桃尾一馬, 宮永憲明, レーザ干渉加工における位相・振幅制御によるメタマテリアルの直接作製, 2012 年春季第 59 回応用物理学関係連合講演会, 2012 年 3 月 15 日, 早稲田大学早稲田キャンパス

(8) Keiichi Murakawa, Yoshiki Nakata, Noriaki Miyanaga, Fabrication of new designed structure in lattice by interfering femtosecond laser processing, 8th Asia Pacific Laser Symposium (APLS), 2012 年 5 月 28 日, Huangshan, China

(9) 中田芳樹, 村川恵一, 宮永憲明, 干渉レーザー加工法に基づいた新規メタマテリアル構造の作製方法, 次世代ナノ技術シンポ「メタマテリアル・プラズモニクデバイスの最近の進展」(招待講演), 2012 年 6 月 22 日, 東京

(10) Yoshiki Nakata, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, Kazuma Momoo, Metamaterials fabricated by interfering femtosecond laser processing with different combinations of laser and target parameters, Laser Precision Microfabrication (LPM), 2012 年 6 月 14 日, Washington, USA

(11) 村岡佑樹, 杉江達朗, 間部秀毅, 東皇三洋, 中村大輔, 中田芳樹, 岡田龍雄, レーザを利用した周期構造 ZnO ナノ結晶の作製, 第 65 回電気関係学会九州支部連合大会, 2012 年 9 月 25 日, 愛媛大学

(12) ZnO バッファ層のレーザー処理を利用した ZnO ナノ結晶の成長制御, 中尾しほみ, 村岡佑樹, 杉江達朗, 間部秀毅, 東皇三洋, 中村大輔, 中田芳樹, 岡田龍雄, 応用物理学九州支部学術講演会, 2012 年 12 月 1 日, 佐賀大学

(13) 中田芳樹, 松葉良生, 村川恵一, 宮永憲明, プラズモニクス応用に向けた超短パルスレーザー干渉加工法の開発, エクストリームフォトニクス研究会, 2012 年 12 月 21 日, 理研東京事務所

(14) レーザを利用した ZnO ナノ・マイクロ構造体の作製と応用, 中村大輔, 下垣哲也, 岡崎功太, 村岡佑樹, 杉江達朗, 東皇三洋, 中田芳樹, 岡田龍雄, レーザ学会第 438 回研究会, 2012 年 12 月 19 日, 愛媛大学

(15) 超短パルスレーザー干渉加工における新展開-プラズモニクス応用に向けて-, 中田芳樹, 松葉良生, 村川恵一, 宮永憲明, レーザ学会第 438 回研究会, 2012 年 12 月 19 日, 愛媛大学

(16) Daisuke Nakamura, Tetsuya Shimogaki, Kota Okazaki, Mitsuhiro Higashihata, Yoshiki Nakata, Tatsuo Okada, Growth of periodic ZnO nano-crystals on buffer layer patterned by interference laser irradiation, SPIE Photonics West, 2013 年 2 月 4 日, San Francisco

(17) 中田芳樹, 松葉良生, 村川恵一, 宮永憲明, 超短パルスレーザー干渉加工法: プラズモニクスへの応用, 電気学会光量子デバイス研究会, 2013 年 3 月 8 日, 松江(島根)

(18) 中田芳樹, 松葉良生, 村川恵一, 宮永憲明, レーザ干渉加工における位相・振幅制御によるメタマテリアルの直接作製 2(招待講演), 第 60 回応用物理学

- 関係連合講演会(春期), 2013年3月29日, 神奈川工科大学
- (19) 村岡佑樹, 杉江達朗, 下垣哲也, 東島三洋, 中村大輔, 中田芳樹, 岡田晴敏, バッファ層のレーザーパターンニングによる ZnO ナノウォールのパターン成長, 第60回応用物理学会春季学術講演会, 2013年3月29日, 神奈川工科大学
- (20) Yoshiki Nakata, Takuhiro Matsuyama, Sho Miyamoto, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, New technique for the fabrication of plasmonic device (招待講演), Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies, 2013年6月24日, St. Petersburg, Russia
- (21) Yuuki Muraoka, Tatsuro Sugie, Tetsuya Shimogaki, Mitsuhiro Higashihata, Daisuke Nakamura, Yoshiki Nakata, Tatsuo Okada, Controlled Growth of ZnO Nanocrystals Using Laser Interference Irradiation, CLEO Pacific Rim, 2013年7月4日, 京都
- (22) Yoshiki Nakata, Yoshiki Matsuba, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, New Evolution in Interfering Femtosecond Laser Processing, CLEO Pacific Rim, 2013年7月2日, 京都
- (23) Yoshiki Nakata, Yoshiki Matsuba, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, Fabrication of plasmonic device by interfering femtosecond laser processing, Laser Precision Microfabrication, 2013年9月25日, 新潟
- (24) Daisuke Nakamura, Tetsuya Shimogaki, Yuki Muraoka, Shihomi Nakao, Kousuke Harada, Mitsuhiro Higashihata, Yoshiki Nakata, Hiroshi Ikenoue, Tatsuo Okada, Effect of laser irradiation on ZnO nanocrystal growth by nanoparticle-assisted pulsed laser deposition, Laser Precision Microfabrication, 2013年9月23日, 新潟
- (25) Yoshiki Nakata, Yoshiki Matsuba, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, Design of interference pattern using coherent beams, Advanced Laser Technologies, 2013年9月16日, Budva, Montenegro
- (26) 村川恵一, 松葉良生, 中田芳樹, 宮永憲明, 干渉レーザー加工における多波長干渉パターンのシミュレーション, 74回応用物理学会秋期学術講演会, 2013年9月17日, 同志社大学
- (27) Yoshiki Nakata, Yoshiki Matsuba, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, Designing of meta-atoms in interfering femtosecond laser processing technique, 2013年10月7日, CLEO, Ischia, Italy
- (28) Yoshiki Nakata, Yoshiki Matsuba, Keiichi Murakawa, Noriaki Miyanaga, Plasmonic device fabricated by interfering femtosecond laser processing, CLEO, 2013年10月7日, Ischia, Italy
- (29) Yoshiki Nakata, Yoshiki Matsuba, Noriaki Miyanaga, Fabrication of 2D and 3D metal nanostructure in matrix by interfering ultrashort laser processing (招待講演), EMN Fall Meeting, 2013年12月7日, Orlando Florida, USA
- (30) 中田芳樹, レーザーエネルギー学: 光を自由に操作し、プラズモニクスやナノテクノロジーの実用化と高度化へ, 大阪大学未来戦略機構シンポジウム「Opt Osaka 2014 in Tokyo - 大阪大学の光科学100」, 2014年3月6日, 大手町サンケイプラザ
- (31) 中田芳樹, 島田直人, 松葉良生, 村川恵一, 宮永憲明, 東海林竜也, 坪井泰之, 超短パルスレーザー加工によるプラズモニクス構造の作製, 光・量子デバイス研究会, 2014年3月7日, 宮崎市民プラザ
- (32) 光励起による ZnO ナノ・マイクロ結晶の紫外レ-

- ザー発振特性, 中村大輔, 下垣哲也, 中尾しほみ, 原田浩輔, 村岡佑樹, 東島三洋, 池上浩, 中田芳樹, 岡田龍雄, 光・量子デバイス研究会, 2014年3月7日, 宮崎市民プラザ
- (33) 松葉良生, 村川恵一, 中田芳樹, 宮永憲明, アボダイザー及びSLMを用いたビームのフラットトップ化, 第61回応用物理学会春期学術連合会, 2014年3月19日, 青山学院大学
- (34) 配列 ZnO ナノ結晶成長における基板の影響, 中尾しほみ, 村岡佑樹, 原田浩輔, 東島三洋, 中村大輔, 中田芳樹, 岡田晴敏, 2014年3月19日, 青山学院大学
- (35) 原田浩輔, 村岡佑樹, 中尾しほみ, 東島三洋, 池上浩, 中村大輔, 中田芳樹, 岡田晴敏, ZnO ナノウォールの作製とレーザー発振特性評価, 2014年3月18日, 青山学院大学
- (36) 中田芳樹, 島田直人, 松葉良生, 宮永憲明, 村川恵一, 超短パルスレーザー干渉加工の近年の進展 (依頼講演), 2014年5月28日, 大阪大学
- (37) Yoshiki Nakata, Naoto Shimada, Yoshiki Matsuba, Noriaki Miyanaga, Tatsuya Shoji, Yasuyuki Tsuboi, Fabrication of plasmonic devices by interfering fs laser processing, Laser precision Microfabrication, 2014年6月18日, リトアニア
- (38) Tetsuya Shimogaki, Kota Yamasaki, Yuki Kawahara, Shihomi Nakao, Kousuke Harada, Mitsuhiro Higashihata, Hiroshi Ikenoue, Yoshiki Nakata, Daisuke Nakamura, Tanemasa Asano, Tatsuo Okada, Effect of Laser Irradiation on the Properties of ZnO Thin Films and its Application to Selective-Growth of ZnO Nano /Microcrystals, Laser precision Microfabrication, 2014年6月18日, リトアニア
- (39) Yoshiki Nakata, Naoto Shimada, Yoshiki Matsuba, Noriaki Miyanaga, Tatsuya Shoji, Yasuyuki Tsuboi, Recent progress in interfering femtosecond laser processing (招待講演), Advanced laser technologies, 2014年10月6-10, Cassis, France
- (40) Yoshiki Nakata, Naoto Shimada, Yoshiki Matsuba, Noriaki Miyanaga, Keiichi Murakawa, Tatsuya Shoji, Yasuyuki Tsuboi, Fabrication and applications of periodic nanostructures formed by interfering femtosecond laser processing (招待講演), ICALEO, 2014年10月19-23, San Diego, USA

【図書】計1件, ただし表紙写真提供

Koji Sugioka, Ya Cheng, Pan Stanford publishing, Ultrafast Laser Processing: From Micro- to nanoscale, 2013

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中田 芳樹 (NAKATA, Yoshiki)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・准教授
研究者番号: 70291523

(2) 研究分担者

坪井 泰之 (TSUBOI Yasuyuki)
大阪市立大学・理学部・教授
研究者番号: 00283698

中村 大輔 (NAKAMURA Daisuke)
九州大学・大学院システム情報科学研究センター・准教授
研究者番号: 40444864

(3) 連携研究者

宮永 憲明 (MIYANAGA, Noriaki)
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授
研究者番号: 80135756