

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：82108

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22109007

研究課題名（和文）プラズモン共鳴型光波メタマテリアル表面の創製技術の開発

研究課題名（英文）Development of the fabrication technology for optical meta-surfaces of the plasmonic resonance type

研究代表者

迫田 和彰（Sakoda, Kazuaki）

独立行政法人物質・材料研究機構・先端フォトニクス材料ユニット・ユニット長

研究者番号：90250513

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 115,700,000円

研究成果の概要（和文）：(1)極微MIM（金属/誘電体/金属）共振器アレイの作製技術の開発と、これを利用した磁気双極子遷移や第2高調波発生の増強効果の実証。(2)メタ表面の分散制御による動的ビーム走査の実現。(3)インピーダンス制御に基づく光の完全吸収の実現。(4)ナノインプリント法によるメタ表面の量産技術の確立と波長選択的熱放射赤外光源への応用，および，炭酸ガス濃度計の低消費電力化。(5)光の波長よりも薄いメタマテリアル偏光子や蛍光増強基板の開発。(6)光ディラックコーンの生成条件の解明と電子波ディラックコーンへの拡張。以上の研究成果は40報の学術論文や36件の招待講演などで公表した。

研究成果の概要（英文）：(1) We developed the fabrication technology for ultra-small MIM (metal/insulator/metal) resonator arrays and demonstrated the enhancement of magnetic-dipole transition and second harmonic generation. (2) We achieved the dynamic beam steering by controlling the dispersion of meta-surfaces. (3) We achieved the perfect light absorption by impedance control. (4) We developed a mass production technology of meta-surfaces by nano imprinting, applied it to the fabrication of wavelength-selective thermal IR emitters, and achieved the reduction of energy consumption for a carbon dioxide gas sensor. (5) We developed meta-surfaces for enhancing luminescence and metamaterial polarizers thinner than the wavelength of light. (6) We clarified the condition to generate optical Dirac cones and extended this analysis to electronic Dirac cones. We published these achievements as 40 journal papers and 36 invited talks.

研究分野：光物性物理学

キーワード：メタマテリアル プラズモン 共振器 メタ表面 磁気双極子遷移 ディラックコーン 近赤外分光  
高調波発生

### 1. 研究開始当初の背景

Yablonovitch によるフォトニック結晶の概念の提唱(1987年)やEbbesenによる微小ホール光の異常透過(1998年)など、光の波長あるいはそれ以下の長さのスケールで屈折率が変調された構造物の光学特性が盛んに研究されてきた。フォトニックバンドギャップや局在電磁モード、擬位相整合、小さな群速度による各種光学過程の増強、異常な屈折現象、新しいタイプの微小光学回路など、数々の新現象が発見された。

さらに近年、主として金属材料から成り、光の波長よりも小さな構造物を基本要素とするメタ材料が大きな注目を集めている。負の実効的屈折率を利用して、解像度の限界を打ち破る「完全レンズ」等、従来にはない数多くの光学現象が提案され、主としてマイクロ波領域で実験検証が進んでいる。また、メタ材料は実効的屈折率の空間分布の自由な設計を可能にするので、光線光学に「透明マント(クローキング)」(Pendry, 2006年)などの新しい可能性を開いた。近赤外から可視の光波領域の試料作製も精力的に試みられているが、作製すべき構造の小ささが障害となって未だ満足できるレベルには到達していない。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、物質・材料研究機構に設置されたナノテクノロジー融合センターと先端フォトニクス材料ユニットのもつ高度ナノ成長・ナノ加工技術を活用して、可視から近赤外までの光波領域で機能するメタ材料の創製技術を開発する。具体的には、分子線エピタキシー、MOCVD、スパッタリング、真空蒸着、電子線リソグラフィ、集束イオンビーム加工、フォトリソグラフィ、各種エッチングなどの既存技術に加えて、比較的大面積の試料を再現性よく作製可能なナノインプリンティング技術も新たに導入して最先端の試料作製に取り組む。作製対象としては、物質・材料研究機構でこれまでに極めて大きな局所電場増強効果を実証した、金属/極薄誘電体/金属の3層導波路構造からなるトレンチ型ナノ共振器を単位構造として、これを2次元的に最適配置した反射型メタ表面を当面の検討対象とする。特異的な光伝搬制御を可能とする負の屈折率実現のために、RCWA法や有限要素法などを利用した試料設計を行う一方、単位構造の電磁共鳴に着目した半解析的手法を開発して、局所状態密度の増大や光の群速度の低下を利用した線形および非線形光学現象の増強効果も詳しく検討する。さらに、メタ表面を利用した新型赤外光源や指向性光波アンテナなどの応用を目指す。

### 3. 研究の方法

反射型メタ表面は、ナノ加工技術を用いて矩形突起を透明基板上に作製した後、金や銀

などの薄膜を成膜して作製する。この方法によれば、光機能層の埋込みの工夫により、磁場と電場の増強効果を独立に観測できる。

初年度は、メタ表面の作製技術の確立に加えて、近赤外域での特性評価技術の確立に力を注ぐ。2年度目以降は、メタ表面特有の電磁場制御機能を検証する。具体的には、磁気双極子遷移の選択的増強、非線形光学効果の増強、表面分散の改変による発光制御、および、メタ表面のインピーダンス制御を検討する。さらに、産業応用への試みとして、ナノインプリント技術による反射型メタ表面の量産性の検証と、メタルパッケージされた赤外発光デバイスの試作を行う。

### 4. 研究成果

(1) 光ディラックコーン：フォトニック結晶やメタ材料などの周期的な構造物のブリルアンゾーンの原点に、直線的で等方的な分散関係(光ディラックコーン)を形成する方法を発見した(雑誌論文[15,16,19,22])。k・P摂動法と群論を組合せた理論解析で、モードの偶然縮退により光ディラックコーンを生成する対称性の組合せを完全に解明した(雑誌論文[13])。ディラック点で実効屈折率がゼロになることから、種々の新規な光学現象の実現が期待できる。

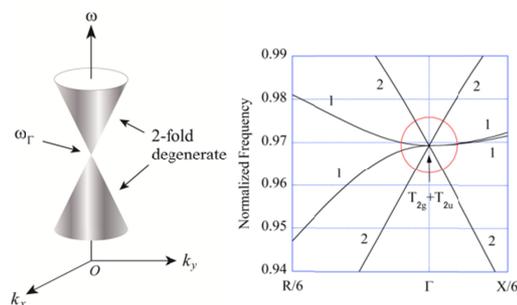


図1 (左)  $C_{6v}$  対称なフォトニック結晶に生じる2重ディラックコーン (右)  $O_h$  対称な場合の数値計算による実証。

メタ表面のディラック点では、電磁波の進行方向が入射光の偏光で制御できることを見出した。外部光による励起過程をグリーン関数法で定式化することにより、ディラックコーンと外部光の結合強度と選択則、およびスラブ内での伝搬特性を完全に解明した(雑誌論文[8])。

上述の手法を周期変調された2次元量子井戸の電子準位の解析に拡張し、伝導電子のサブバンドにディラックコーンが形成できることを見出した。これにより、極端に小さな有効質量や大きな易動度等、高性能な電子デバイスの開発につながる特異な物性の実現が期待される。

(2) ナノインプリント法：将来の極微小・超高速・極低エネルギー光信号処理素子として、プラズモニクス、メタ材料等ナノフォ

トニクス素子の作製には極微細・大面積加工が不可欠であり、ナノインプリント技術が期待されている。今回、プラズモン・カラーフィルタにこの技術を適用し、従来の電子線描画と比較して大面積を短時間プロセスで実現し、大幅なスループット改善を実現した。最大 10mm 角の色純度に優れた RGB カラーフィルタを実現し、プラズモン現象を利用した吸収型でないカラーフィルタのため高出力光源にも対応可能であることを実証した。

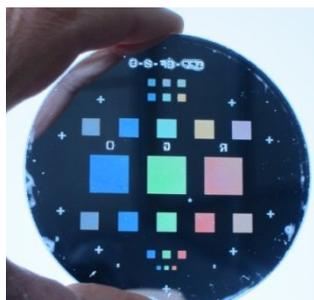


図2 ナノインプリントによるプラズモン・カラーフィルタの加工例：最大 10mm 角 RGB, インプリント時間：1min

CO<sub>2</sub> センサは熱放射光源と 2 波長検出器から構成されているが、光源の発する幅広い波長の赤外光の内、ごく一部の光しか利用しないため、効率が低い。本研究では、CO<sub>2</sub> 濃度計測に必要な波長 4.26 μm と 3.95 μm の赤外光をほぼ完全黒体放射し、その他の波長の放射を極力抑制したメタ表面熱放射光源を UV ナノインプリント法にて作製した。実際に CO<sub>2</sub> センサに応用し、測定時の光源電力の低減を実証した。(雑誌論文[1,6])

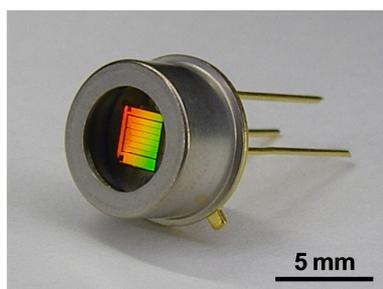


図3 ナノインプリント法により作製した CO<sub>2</sub> センサ用メタ表面熱放射光源

(3) インピーダンス制御：増強分光に有用な新規メタ表面の開発を実施し、プラズモン共鳴とフォトニック導波路共鳴がハイブリッドした固有モードをもつプラズモン・フォトニックメタ表面を創製し、その特性を系統的に解明した(雑誌論文[2])。

このメタ表面の共鳴モードには放射率がほぼ 100% であるモードが複数存在し、それらを活用することにより、波長選択的に量子エミッター(蛍光分子)からの放射(蛍光)を増強できることを実証し、平坦なシリコン基板と比較して、蛍光強度として数百倍の増

強が観測され、サブナノメートルオーダーの極低濃度の分子溶液から短時間の準備と測定時間で分子検出が可能であることも示した(雑誌論文[2,3,5,9])。

光波領域のメタ表面は高精度のナノ加工を前提とするが、UV ナノインプリント法を導入することにより高スループットかつ大量にメタ表面を作製する技術も確立した。これにより、このメタ表面を分子センシング用の基板として近い将来、実用に展開することも期待できる段階に達した。

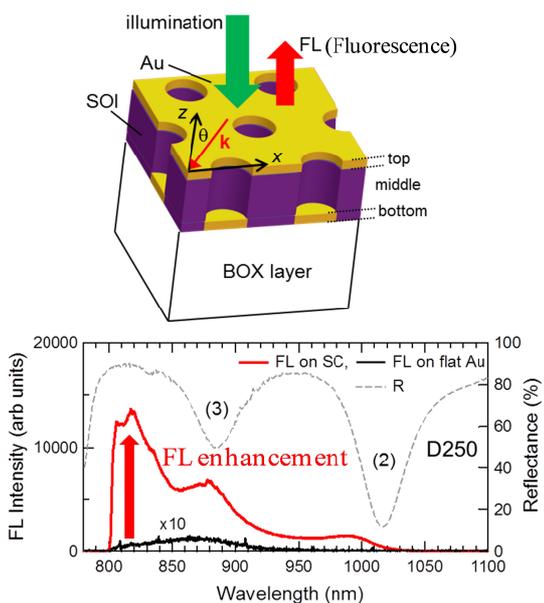


図4 プラズモン・フォトニックメタ表面の概念図(上) 蛍光増強の一例(下) 赤線：メタ表面上からの蛍光、黒線：Si 基板上からの蛍光

(4) 偏光子など：また、メタ表面構造による偏光子、波長板、円二色性素子の光学素子設計を提示し(雑誌論文[18]) UV ナノインプリント法による大面積素子の作製を進めた。

典型的なフォトニックメタ材料であるフィッシュネットメタ材料における固有モード解析に成功し、有効光学定数によって解釈されていた光学応答を固有モードによって系統的に解明し、その学理的基礎を確立した(雑誌論文[10,20])。

(5) 極微 MIM 共振器アレイ：電子線リソグラフィやナノインプリントリソグラフィの手法により、MIM(金属/誘電体/金属)型の微小共振器を基板上に多数配列した、極微 MIM 共振器アレイを開発した。誘電体層に Er 原子をスパッタリングで導入し、発光スペクトルを Er 原子の埋め込み深さの関数として計測することで、磁氣的パーセル効果による磁気双極子遷移の増強を実証した。

金属トレンチ構造の構造共鳴によって、電子挙動の非対称性に由来する 2 次非線形分極の増大が期待できるとの予測のもと、銀 MIM 共振器アレイで形成された金属メタ表

面を作製し、反射光に第2高調波が表れることを実験的に証明した。平坦な銀-石英ガラス界面と比べて、銀 MIM メタ表面では数百倍の SHG 強度が観測された。

また、直径 100nm 程度の銀スプリットリング共振器構造を、比較的安価で量産可能な微小球リソグラフィ法で作製することに成功した。作製された銀スプリットリング共振器は、光波長域で、且つ1個のリングでも磁気共鳴が生じることを光散乱実験で明らかにし、光メタマテリアルの単位構造になることを証明した。(雑誌論文[21])

スプリットリング共振器の磁気共鳴波長について、LC 回路モデルを用いた理論を構築し、微小球リソグラフィ法で作製した試料の実測値と比較して良い一致を得た。その上で LC 回路モデルによる理論から、構造の小型化による磁気共鳴波長の短波長化に限界があることを予測した。(雑誌論文[14])

(6) メタ表面の分散制御：ナノサイズのホールを光が通過する際に、光の速度がナノ構造体形状で変化する現象を利用して、波長毎に透過角を変えたり、液晶の配向を利用してビームの進行方向を制御できる素子を開発した。(雑誌論文[12])

#### 5. 主な発表論文等

{雑誌論文}(計40件)

- [1] H. T. Miyazaki, T. Kasaya, H. Oosato, Y. Sugimoto, B. Choi, M. Iwanaga, and K. Sakoda, Ultraviolet-nanoimprinted packaged metasurface thermal emitters for infrared CO<sub>2</sub> sensing, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 査読有, Vol.16, 2015, 035005/1-4. DOI: 10.1088/1468-6996/16/3/035005.
- [2] M. Iwanaga and B. Choi, Heteroplasmon hybridization in stacked complementary plasmo-photonic crystals, *Nano Letters*, 査読有, Vol. 15, 2015, 1904–1910. DOI: 10.1021/nl054755d
- [3] M. Iwanaga, B. Choi, H. T. Miyazaki, Y. Sugimoto, and K. Sakoda, Large-area resonance-tuned metasurfaces for on-demand enhanced spectroscopy, *Journal of Nanomaterials*, 査読有, Vol. 2015, 2015, 507656/1-7. DOI: 10.1155/2015/507656
- [4] S-Q. Li, P. Guo, D. B. Buchholz, W. Zhou, Y. Hua, T. W. Odom, J. B. Ketterson, L. E. Ocola, K. Sakoda, R. P. H. Chang, Plasmonic-photonic mode coupling in indium-tin-oxide nanorod arrays, *ACS Photonics*, 査読有, 1 巻, 2014, 163-172. DOI: 10.1021/ph400038g
- [5] B. Choi, M. Iwanaga, T. Ochiai, H. T. Miyazaki, Y. Sugimoto, and K. Sakoda, Subnanomolar fluorescent-molecule sensing by guided resonances on nanoimprinted silicon-on-insulator substrates, *Applied Physics Letters* 査読有, Vol. 105, 2014, 201106/1-5. DOI: 10.1063/1.4902424
- [6] H. T. Miyazaki, T. Kasaya, M. Iwanaga, B. Choi, Y. Sugimoto, and K. Sakoda, Dual-band infrared metasurface thermal emitter for CO<sub>2</sub> sensing, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, Vol.105, 2014, 121107/1-4. DOI: 10.1063/1.4896545
- [7] S-Q. Li, W. Zhou, D. B. Buchholz, J. B. Ketterson, L. E. Ocola, K. Sakoda, R. P. H. Chang, Ultra-sharp plasmonic resonances from monopole optical nanoantenna phased arrays, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, 103 巻, 2014, 231101/1-5. DOI:10.1063/1.4881323
- [8] K. Sakoda, Polarization-dependent continuous change in the propagation direction of Dirac-cone modes in photonic crystal slabs, *Phys. Rev. A*, 査読有, 90 巻, 2014, 013835/1-8. DOI: 10.1103/PhysRevA.90.013835
- [9] B. Choi, M. Iwanaga, H. T. Miyazaki, K. Sakoda, and Y. Sugimoto, Photoluminescence-enhanced plasmonic substrates fabricated by nanoimprint lithography, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS* 査読有, Vol. 13, 2014, 023007/1-6. DOI: 10.1117/1.JMM.13.2.023007
- [10] M. Iwanaga, First-Principle Analysis for Electromagnetic Eigen Modes in an Optical Metamaterial Slab, *Progress in Electromagnetics Research* 査読有, Vol. 132, 2014, 129–148. DOI: 10.2528/PIER12071202
- [11] T. Itoh, Y. S. Yamamoto, H. Tamaru, V. Biju, N. Murase, Y. Ozaki, Excitation laser energy dependence of surface-enhanced fluorescence showing plasmon-induced ultrafast electronic dynamics in dye molecules, *Phys. Rev. B*, 査読有, 87 巻, 2013, 235408/1-6, DOI: 10.1103/PhysRevB.87.235408
- [12] T. Matsui, T. Nomura, A. Miura, H. Fujikawa, N. Ikeda, D. Tsuya, H. T. Miyazaki, Y. Sugimoto, M. Ozaki, M. Hangyo, K. Asakawa, Wavefront control by stacked metal-dielectric hole array with variable hole shapes, *Opt. Express*, 査読有, 21 巻, 2013, 6153. DOI: 10.1364/OE.21.006153
- [13] K. Sakoda, Proof of the universality of mode symmetries in creating photonic Dirac cones, *Opt. Express*, 査読有, 20 巻, 2012, 25181-25194. DOI: 10.1364/OE.20.025181
- [14] T. Okamoto, T. Otsuka, S. Sato, T. Fukuta, and M. Haraguchi, “Dependence of LC resonance wavelength on size of silver split-ring resonator fabricated by nanosphere lithography”, *Optics Express*, 査読有, Vol.20, 2012, 24059-24067. DOI: 10.1364/OE.20.024059
- [15] K. Sakoda, Double Dirac cones in triangular-lattice metamaterials, *Opt. Express*, 査読有, 20 巻, 2012, 9925-9939. DOI: 10.1364/OE.20.009925
- [16] K. Sakoda, Dirac cone in two- and three-dimensional metamaterials, *Opt. Express*, 査読有, 20 巻, 2012, 3898-3917. DOI: 10.1364/OE.20.003898

- [17] K. Sakoda, Universality of mode symmetries in creating photonic Dirac cones, *J. Opt. Soc. Am B*, 査読有, 29 巻, 2012, 2770-2778. DOI: 10.1364/JOSAB.29.002770
- [18] M. Iwanaga, Photonic metamaterials: a new class of materials for manipulating light waves, *Science and Technology of Advanced Materials* 査読有, Vol. 13, 2012, 053002/1-17. DOI: 10.1088/1468-6996/13/5/053002
- [19] K. Sakoda, H-F. Zhou, Analytical study of two-dimensional degenerate metamaterial antennas, *Opt. Express*, 査読有, 19 巻, 2011, 13899-13921. DOI: 10.1364/OE.19.013899
- [20] M. Iwanaga, In-plane plasmonic modes of negative group velocity in perforated waveguides, *Optics Letters* 査読有, Vol. 36, 2011, 2504-2506. DOI: 10.1364/OL.36.002504
- [21] T. Okamoto, T. Fukuta, S. Sato, M. Hara-guchi, and M. Fukui, "Visible near-infrared light scattering of single silver split-ring structure made by nanosphere lithography", *Optics Express*, 査読有, Vol.19, 2011, 7068-7076. DOI: 10.1364/OE.19.007068
- [22] K. Sakoda, H-F. Zhou, Role of structural electromagnetic resonances in a steerable left-handed antenna, *Opt. Express*, 査読有, 18 巻, 2010, 27371-27386. DOI: 10.1364/OE.18.027371
- [学会発表](計146件)
- [1] T. Okamoto, T. Bando, B. Choi, M. Iwanaga, H. T. Miyazaki, K. Yamaguchi and M. Hara-guchi, "Second harmonic generation of reflective meta-surface with trench structures," 4th Japan-Korea Metamaterials Forum, 2014 年 12 月 23 日, 大阪大学(豊中)
- [2] M. Iwanaga, B. Choi, H. T. Miyazaki, Y. Sugimoto, and K. Sakoda, "Metasurface Engineering for Enhanced Emissions," The 4th Japan-Korea Metamaterials Forum, 2014 年 12 月 22 日, 大阪大学(吹田市)(招待講演)
- [3] Y. Sugimoto, Nanofabrication by imprint lithography process and its application to photonics devices, *Advanced Architectures in Photonics 2014 (AAP2014)*, TO26I (招待講演), 2014 年 9 月 21 日 24 日, Diplomat Hotel, Prague, Czech Republic
- [4] K. Sakoda, Isotropic Dirac cones in the Brillouin-zone center of photonic crystals and metamaterials, *SPIE Optics + Photonics 2014* (招待講演), 2014 年 8 月 21 日, サンディエゴ会議場(サンディエゴ)
- [5] 岩長祐伸, 「ナノインプリント法を用いた高精度サブミクロン金型の創製」第 14 回金型に関する研究助成者研究成果発表会, 2014 年 8 月 1 日, ホテルスプリングス幕張(千葉市)(招待講演)
- [6] M. Iwanaga, "Metasurface applications: New spectroscopic platforms and subwavelength optical devices," ICCES'14, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences 2014, 2014 年 6 月 13 日, Changwon, Korea(招待講演)
- [7] K. Sakoda, Design of photonic Dirac cone in the Brillouin-zone center of photonic crystal slabs, *PECS XI* (招待講演), 2014 年 5 月 13 日, 復旦大学(上海)
- [8] K. Sakoda, Nanophotonics studies based on modern optics and materials science, *International Workshop on Wave Functional Materials* (招待講演), 2013 年 11 月 9 日, 蘇州大学(中国・蘇州市)
- [9] K. Sakoda, Nanophotonics studies based on modern optics and materials science, *The R.R. Dasari Distinguished Lecture* (招待講演), 2013 年 8 月 19 日, インド工科大学(カンプール)
- [10] K. Sakoda, Mode-symmetry requirement for creating photonic Dirac cones in the Brillouin-zone center, *Progress in Electromagnetics Research Symposium 2013 in Stockholm* (招待講演), 2013 年 8 月 13 日, ストックホルム
- [11] 岩長祐伸, 「フォトニック・メタマテリアル: 現状と展望」日本フォトニクス協議会フォーラム定例会, 2013 年 7 月 24 日, ちよだプラットフォームスクエア(東京都千代田区)(招待講演)
- [12] K. Sakoda, Mode symmetries required for creating photonic Dirac cones in the Brillouin-zone center, *9th International Symposium on Modern Optics and its Application* (招待講演), 2013 年 6 月 27 日, バンドン工科大学(インドネシア・バンドン市)
- [13] K. Sakoda, Group theory for nanophotonics: Application to metamaterials and photonic crystals, *9th International Symposium on Modern Optics and its Application* (招待講演), 2013 年 6 月 24 日, バンドン工科大学(インドネシア・バンドン市)
- [14] M. Iwanaga, Transmission-Enhanced Bloch States in Stacked Uniaxial Metamaterials, *The First International Conference on Emerging Advanced Nanomaterials (ICEAN 2012)*, 2012 年 10 月 22 日, Brisbane. Australia (招待講演)
- [15] H. T. Miyazaki, Plasmon nanocavities - controlled gaps as optical antennas, *2012 Gordon Research Conference on Plasmonics*, (招待講演) 2012 年 6 月 12 日, Waterville (米国)
- [16] 田丸博晴, 界面だらけの波動科学としてのナノオプティクス, *日本光学会 ナノオプティクス研究グループ研究討論会 第 20 回記念シンポジウム* (招待講演), 2012 年 5 月 23 日, 慶応大学(日吉)
- [17] H. T. Miyazaki, K. Ikeda, and T. Kasaya, Controlled thermal emission of two-color polarized infrared light from arrayed plasmon nanocavities, *NATO-SFO Workshop on*

- Plasmonics(招待講演), 2012年5月10日, Paris(フランス)
- [18] 岩長祐伸, 日本学術振興会光エレクトロニクス第130委員会・第280回研究会, 2011年12月8日, 東京理科大学(東京都新宿区)(招待講演)
- [19] 迫田和彰, メタマテリアルのディラックフォトン, 第20回計算数理工学フォーラム(招待講演), 2011年3月30日, 愛知工業大学(名古屋市)
- [20] 迫田和彰, プラズモン共鳴型光波メタマテリアル表面の創製技術の開発, 第58回応用物理学関係連合講演会(招待講演), 2011年3月24日, 神奈川工科大学(厚木市)
- [21] H. T. Miyazaki, 他9名, Controlled thermal emission of infrared waves based on engineered metallic nanostructures, Metamaterials & Nanophotonics Symposium(招待講演), 2011年3月10日, 理研(和光)
- [22] H. T. Miyazaki and Y. Kurokawa, Plasmon Nanocavities: Controlled Gaps as Optical Antennas, 2010 MRS Fall Meeting, Symposium on Resonant Optical Antennas - Sensing and Shaping Materials(招待講演), 2010年12月1日, Boston(米国)
- [23] 迫田和彰, 極微プラズモン共振器, 第4回メタマテリアルワークショップ(招待講演), 2010年10月23日, 京都工芸繊維大学(京都)

〔図書〕(計5件)

- [1] 杉本喜正, シーエムシー出版, メタマテリアルII, 2012年, 230 - 239

〔産業財産権〕

○出願状況(計4件)

名称: リフトオフ法, 超微細2次元パターンアレイおよびプラズモンデバイス  
発明者: 宮崎英樹, 笠谷岳士  
権利者: 物質・材料研究機構  
種類: 特許  
番号: 特願 2014-170264  
出願年月日: 平成 26 年 8 月 25 日  
国内外の別: 国内

名称: 円二色性素子  
発明者: 岩長祐伸  
権利者: 独立行政法人物質・材料研究機構  
種類: 特許  
番号: 特願 2010-276146  
出願年月日: 2010年12月10日  
国内外の別: 国内

○取得状況(計1件)

名称: Electromagnetic wave resonator and its fabrication process as well as electromagnetic wave generator  
発明者: Hideki Miyazaki, Hiroshi Miyazaki, and Hiroki Ebe

権利者: 物質・材料研究機構  
種類: 特許  
番号: US 8,872,503 B2  
出願年月日: 平成 23 年 3 月 2 日  
取得年月日: 平成 26 年 10 月 28 日  
国内外の別: 国外(米国)

名称: 電磁波共振器とその製造方法, およびそれを用いた電磁波発生素子  
発明者: 宮崎英樹, 宮崎博司, 江部裕基  
権利者: 物質・材料研究機構  
種類: 特許  
番号: 特許第 5682896 号  
出願年月日: 平成 23 年 3 月 2 日  
取得年月日: 平成 27 年 1 月 23 日  
国内外の別: 国内

〔その他〕  
ホームページ  
【電磁メタマテリアル】  
<http://www.metamate.net>  
【先端フォトニクス材料ユニット】  
<http://www.nims.go.jp/units/apm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

迫田和彰(SAKODA, Kazuaki)  
物質・材料研究機構・先端フォトニクス材料ユニット・ユニット長  
研究者番号: 90250513

(2) 研究分担者

岡本敏弘(OKAMATO, Toshihiro)  
徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・准教授  
研究者番号: 60274263

田丸博晴(TAMARU, Hiroharu)  
東京大学・工学系研究科・講師  
研究者番号: 30292767

(3) 連携研究者

杉本喜正(SUGIMOTO, Yoshimasa)  
物質・材料研究機構・先端フォトニクス材料ユニット・主席研究員  
研究者番号: 60415784

宮崎英樹(MIYAZAKI, Hideki)  
物質・材料研究機構・先端フォトニクス材料ユニット・グループリーダー  
研究者番号: 10262114

岩長祐伸(IWANAGA, Masanobu)  
物質・材料研究機構・先端フォトニクス材料ユニット・主任研究員  
研究者番号: 20361066