

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 20 日現在

機関番号：14401

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：22109003

研究課題名（和文）構造共鳴を利用したテラヘルツ波メタマテリアルの作製と機能

研究課題名（英文）Terahertz metamaterials with the structural resonances

研究代表者

永井 正也（Nagai, Masaya）

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：30343239

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 116,400,000円

研究成果の概要（和文）：本計画研究では、半導体や誘電体などをベースにし、超微細インクジェット加工技術、化学エッチング技術など様々な駆使した2次元および3次元電磁メタマテリアルを作成した。そしてTHz領域の基礎特性を評価し、メタ原子としての応答や構造共鳴をもたらす多彩なTHz応答を明らかにした。そして電磁誘起透明化やスイッチング素子などTHz素子の実用化への道筋をつけた。またカイラル性を持つ電磁メタマテリアル界面での表面波など、負の屈折以外の新しいメタマテリアル特有の現象を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We fabricated various two- and three-dimensional electromagnetic metamaterials based on the dielectrics and semiconductors using novel techniques such as the ultra-fine inkjet processing, chemical etching, and laser machining, and so on. We evaluated their optical properties and clarify the exotic characteristics of THz metamaterials induced by the structural resonances. We also demonstrated the electromagnetic induced transparency, THz switching element, THz element, and surface wave along the interface of the metamaterial with the chirality.

研究分野：光物性

キーワード：メタマテリアル テラヘルツ 電磁波 非線形光学 表面波

1. 研究開始当初の背景

電磁気学を記述する上で重要なマクスウェル方程式では、誘電率と透磁率 μ によって媒質が特徴づけられる。1960年代末にロシアの Veselago が ϵ と μ の両者が負の場合(ダブルネガティブと呼ばれる)に何が起こるかを考察し、光が界面で「く」の字に曲がる負の屈折や、平板が集光レンズになるなどの特異な現象を理論的に予言した。普通の物質中では、電磁波の位相の進行方向を表す波数ベクトル k 、電場ベクトル E 、磁場ベクトル H が右手系をなすのに対し、ダブルネガティブな物質では左手系をなす。この際に位相の進行方向とエネルギーの流れの方向(ポインティングベクトル S) が逆で、いわゆる後進波となる。このような物質は自然界には存在しないが、1999年に英国の Pendry は電気回路からの類推により、電磁波の波長よりもかなり小さな金属リングに切れ目を入れた要素(分割リング共振器)が LC 共振により大きな磁氣的な応答を示し、さらに金属細線と組み合わせた人工構造によりダブルネガティブ即ち負の屈折が実現できることを理論的に示した。その直後に米国の Smith らによって、マイクロ波領域において負の屈折率が実現できることが実験的に示された。単にこの構造のスケールを小さくするだけでは光領域の負の屈折率は実現できないが、現在、構造の工夫と超微細加工技術により、2次元的ではあるが負の屈折率が実現されている。波長よりも十分小さな要素(メタ原子と呼ばれる)をうまくデザインして配列し、ダブルネガティブのみならず、有効誘電率や有効透磁率が自然界ではありえないような値をとる人工物質をメタマテリアルと呼ぶ。

2. 研究の目的

メタマテリアルは、まずマイクロ波領域における伝送線路系で実証実験がなされたあと、高い自由度より有利な単位要素の構造共鳴を利用したアプローチでテラヘルツ波領域、近赤外領域へと高周波化してきた。しかし残された問題として、メタマテリアル特有のデバイス応用に必須となる3次元メタマテリアルの構築、偏光制御メタマテリアルの基礎となる表面及び低次元波伝播特性の解明、さらにはメタマテリアルの創始者 Veselago が予想しながら未だに十分な実証がなされていない、逆チェレンコフ放射と逆ドップラー効果の直接的検証や非線形光学効果などの新現象の探索が挙げられる。ここで逆チェレンコフ放射とは、超光速で運動する荷電粒子からの放射光が通常とは逆方向(後方)に放射される現象であり、また逆ドップラー効果とは観測者に対して近づいてくる光源からの光が通常とは逆に低周波数シフトする現象である。

そこで当該計画研究では、テラヘルツ周波数領域における構造共鳴を有するメタマテリアルの有利さを生かし、これらの問題の解決

を目指す。誘電体、金属、半導体など広い範囲の素材を用いてメタマテリアルを作製するとともに、負の屈折以外の新しいメタマテリアル特有の現象についても研究を行う。

3. 研究の方法

(1) メタマテリアルの設計と作製

これまでに研究されているメタマテリアルは、テラヘルツ領域においても殆どが平面(2次元)構造である。しかし、将来の多様なデバイス応用を考えると3次元のバルクメタマテリアル開発は必須である。そこでメタマテリアル用の素材として高誘電率物質の微粒子に注目し、低吸収ホスト媒質中に分散させる方式で、3次元ランダム構造の等方的負の屈折率物質を世界で初めて作製する。また金属メタマテリアルについては、金属薄膜のレーザー加工および超微細インクジェット(Super-fine Ink-jet, SIJ)加工を併用して、2次元及び準3次元金属メタマテリアルを作製する。金属メタマテリアルの3次元化については、金属薄板から構成要素をレーザー加工で大量に切り出し、それをテラヘルツ帯で透明な媒質中にランダムに分散させる新しい方法で実現する。以上のメタマテリアルの設計には、電磁物性物理の知識と高精度のシミュレーションが必要でこれらに対応可能な計算手法の開発を行う。

(2) 表面及び低次元伝播波の特性解明

メタマテリアルは、誘電率(ϵ)と透磁率(μ)を自由に制御するものであるが、さらに、ギリシャ文字の ϵ_0 のような要素構造では、電場-磁場が直接結合した物質が構成できる。この結合定数(κ)も含めると、 $-\mu$ の広大なパラメータ空間で物質を制御でき、電磁波伝播の制御の自由度も非常に大きくなる。これらに関連する現象について理論的、実験的研究を行う。

(3) 未実証現象の実験的検証と新現象探索

メタマテリアル特有の非線形光学効果現象を研究するなど、未解明現象の探索を行う。

4. 研究成果

(1) メタマテリアルの設計と作製

簡便に3次元メタマテリアルを構築するために、テラヘルツ領域で大きな屈折率を持ち損失の比較的小さい TiO_2 微小球に着目した。誘電体球中の Mie 共鳴によって生じる球内部で回転する変位電流によって、球に実効的な磁気双極子を持たせられる。十分に大きな誘電率を持つ材料で球を作れば有効的に負の透磁率を得られる。さらに電氣的応答との結合によって負の屈折を実現することも可能となる。そこで金属メッシュ中に TiO_2 微小球を周期的に配置させることで2次元の負の屈折率メタマテリアルを作製した。テラヘルツ時間領域分光法により透過スペクトルを測定したところ、 TiO_2 球の密度の増大に伴い予想される周波数に透過のピークが現れた。これより電氣的応答と磁氣的応答が結合するこ

とで、負の屈折率が実現されたと考えられる。この TiO_2 微小球を等方的メタ材料に展開するために、 TiO_2 微小球をベンゼン中に分散した 3 次元系について予備的な測定を行い、透磁率の 1 からのずれを確認した。

テラヘルツ波領域のメタ材料を用いた光学素子を実現するには 3 次元構造の構築が不可欠である。磁気的な応答の発現は基板上的分割リング共振器が最も有力であるが、磁場ベクトルが共振器と垂直方向でなければ磁気的な応答は発現しない。そこで透明なプラスチックシート上に 2 次元の分割リング共振器を構築し、この 2 次元メタシートを積層させた構造を構築した。これはブロック状の人工媒質を作成できることから、あらゆる偏光成分での実験が可能となる。磁場ベクトルが分割リングを貫く偏光配置ではシャープな吸収ピークがいくつか見られ、これらは別の偏光配置では発現しない。これらは数値計算の結果から磁気応答と同定された。

メタ材料中の伝搬に伴う位相シフトを利用する場合には 3 次元的なメタ材料構造が必要だが、2 次元構造でもテラヘルツ波制御のための多様な応答が得られる。テラヘルツ領域において透明なプラスチック材料にナノインプリント工法による金属回折格子構造を構築することで、ワイヤーグリッド偏光子（一種の極めて異方的な平面メタ材料と見做せる）を作製した。ナノインプリント工法により 100nm 程度の周期の金属ワイヤー配列が得られ、テラヘルツから紫外にわたる波長で良好な偏光子としての性質が得られる。従来の市販品と比べて、極めて安価で高性能かつフレキシブルな偏光子が作製できた。

テラヘルツ波に応答するメタ材料構造は近年著しく発達した超微細インクジェット (Super-fine ink-jet, SIJ) 工法で十分に作製できる。これは金属細線の 2 次元パターンだけでなく、3 次元的に金属細線を積み上げることもできる。そこで垂直方向に金属構造を積層させることで、垂直入射にもかかわらず磁場ベクトルが U 字構造共振器を貫く配置が構築した。透過測定より 0.9 THz 付近に磁気的な共鳴構造が現れた。

この SIJ 工法を活用したデバイスとしてフェムト秒レーザーを励起源とする半導体光伝導アンテナからのテラヘルツ波放射を実証した。特定の共振周波数を有するメタ原子をこの光伝導アンテナに装荷すると放射スペクトルと偏光特性がメタ原子の固有モードに起因して大きく変化する。さらに分割リング共振器のギャップ部へのフェムト秒レーザーパルスの照射によって、電氣的にこのギャップを閉じてメタ原子の共振を消失させると、放射されるテラヘルツ波のスペクトルと偏光特性が大きく変化するを明らかにした。

また円型メタアトム光伝導アンテナを作製し、発生した放射テラヘルツ波の偏光を調べ

た。発生したテラヘルツ波放射の楕円率 (ellipticity) は円と逆円で符号が逆になっている。この偏光特性は、金属線上を伝搬するテラヘルツ波パルスとその自由空間への放射をモデル化することで、説明が可能である。

構造共鳴を利用したメタ材料は本質的に狭帯域だが、自らのネガ構造が自らと等しいという構造を持つ自己補対金属構造では広帯域で応答する。チェッカーボード構造は最も単純な自己補対構造の一つだが、理想的なパターンは金属正方形の接触部の面積が 0 となるので、完全な自己補対チェッカーボードパターンを作ることはできない。そこで印刷技術を用いて金属正方形同志のつながりを制御すると、チェッカーボードを構成する金属正方形が接触/非接触の近傍で複素透過率が劇的に変化する様子を観測した。さらに金属チェッカーボード構造を電子線リソグラフィによって精密に制御した場合にも、波長の 1/1000 の程度の構造変化で、接触・非接触により、相補的なスペクトルに突然変化した。したがってチェッカーボード構造の応答は、微小な接触部の電気伝導性に支配されている。これは一般の表面インピーダンスを持った 2 次元構造におけるパビネの原理で理論的に説明できる。自己補対にごく近いチェッカーボードパターンは、金属正方形が、シート抵抗によってブリッジされた構造と見なせる。金属正方形の接触部がごく小さくなり、その部分の抵抗値が増大してあるシート抵抗の値 ($Z_0/2 \approx 188 \Omega$) をとると、チェッカーボードの金属部と開口部それぞれからの散乱波が打ち消し合い、外部に出られなくなる。そのために 50% のジュール損失が生じる。テラヘルツ領域においては、金属はほとんど完全導体として振る舞うが、自己補対にごく近いチェッカーボード構造を持たせることで、広帯域に電磁波を吸収させることができる。これらの知見は、テラヘルツ用ポロメータの高感度化などに有用であると考えられる。また、金属正方形の接触の割合がランダムさを持つ場合で、接触している正方形の割合が 50% のチェッカーボードパターンで周波数依存性の非常に少ない透過特性が得られた。この場合 50% のエネルギーは、散乱として失われる。 $Z_0/2$ のシート抵抗でブリッジしたチェッカーボードパターンと、接触の割合が 50% のチェッカーボードパターンの間には、透過、反射、エネルギー損失で極めて類似の性質が存在する。

(2) 表面及び低次元伝播波の特性解明

カイラル媒質は旋光性や円偏光 2 色性などの光学活性を示し、Maxwell 方程式にはカイラル項として記述できる。自然界のカイラル媒質のカイラリティーは非常に小さいが、メタ材料によって数桁増強できる。実際に FDTD シミュレーションでは円偏光に対して特異な応答をするカイラルメタ材料

ル媒質が確認されている。そこでカイラルメタマテリアルと真空の境界に局在する表面電磁波がカイラリティーによってどのように影響を受けるかを調べた。全方向、あるいは面内方向に等方的なカイラリティーを入れると逆行波の存在領域は減少するのだが、面内の一方方向にのみカイラリティーを導入すると左手系表面波の領域が増え、また右手系と左手系の領域が小さいパラメータの変化で微妙に入り混じる様子を見出した。このような計算における新たな手法の開発として境界要素法を複素領域への拡張を行った。境界要素法は一般的な有限要素法に比べて次元が一つ下げられるものの、周期系では手法が複雑で簡便に使えない。そこで無限に広がっている方向に対して複素座標を用いた無反射領域を設定し、境界要素法がメタマテリアルに展開可能かどうかを解析した。その結果、ある周期では垂直入射が最大電場増強度を与えるが、2倍の周期ではむしろ斜め入射の方が大きくなる。この振る舞いを説明するためのモデルを現在検討している。この表面波をうまく活用した3次元複屈折物質が従来の素子と異なるアクロマート波長板となることを見出した。これは平行平板導波路を基にした人工媒質であり、吸収構造が単純かつ設計が容易で廉価で大面積の素子が可能となる。金属板に平行な偏光の電磁波を入射させると、電磁波は導波路中をTEモードとして伝搬する。このモードは遮断周波数以上の周波数で光速 c 以上の位相速度で伝搬する。一方で、金属板に垂直な偏光の電磁波が金属平行平板導波路に入射すると、金属板上に構造がある場合はTMモードとして伝搬する。この構造共鳴以下の周波数領域では位相遅延が生じる。TMモードの電場分布は金属板近傍で最大となるため、構造共鳴の寄与は大きい。しかしTEモードでは金属表面での電場成分が0であり、分散変化が生じない。このことから金属板間隔 d と構造の形状を最適化すれば、異なる偏光の位相を独立に制御することができる。このような人工媒質を実際に構築し、その複素透過率を測定したところ0.7から1.2THzの領域でアクロマート $1/4$ 板として動作することを確認した。

(3) 未実証現象の実験的検証と新現象探索
電子ビームに関連した現象では、スミス-パーセルテラヘルツ波放射の理論的研究も行った。スミス-パーセル効果とは、金属回折格子を電子パンチが通過するときに電磁波が発生する現象で、自由電子レーザー開発の観点で盛んに研究がなされている。ここで議論されている表面波は表面微細構造を有するメタ表面(デザイナー表面と)で存在する疑似表面プラズモンポラリトン(Spoof SPP)と本質的に同じものと気づき、自由電子レーザーとメタマテリアルの分野を結び付けることを試みた。領域外のレーザー総研李との共同研究の結果、Spoof SPPによりテ

ラヘルツ自由電子レーザーの発振特性を向上する方策を提案するとともに、負の屈折率メタマテリアルを表面回折格子の素材として用いた場合の、スミス-パーセルテラヘルツ波放射特性の理論的検討を行った。

また平面メタマテリアルにおける電磁誘起透明化現象を観測した。電磁誘起透明化現象とはほぼ同じ周波数にある電気双極子許容遷移と禁制遷移が結合すると結合モードの間に高い透過率の領域が生じる現象である。この領域では光の群速度が非常に遅くなり光と物質の相互作用が増強することから、原子系や励起子系などで様々な研究がなされてきた。そこで、古典的な系ではあるが電磁メタマテリアルでも電氣的共鳴と磁氣的共鳴を近接させることで同等の現象を引き起こせるのではないかと考えた。実験では1THzに共鳴周波数を持つ分割リング共振器2つとアンテナ構造を近接させた。入射光は分割リング共振器に対して垂直方向の波数ベクトルを持つために、直接的な結合はない。したがって半波長アンテナと垂直の偏光では分割リング共振器の孤立した共振が見られる。しかし半波長アンテナと平行の偏光では両者の結合で2つの共鳴が現れ、その間の周波数では透明になる。この領域はテラヘルツ時間領域分光より遅延のついた透過成分が見られることから、電磁誘起透明化による群遅延が生じたと考えられる。

このような構造において光を照射することで、金属共振器が持つQ値が劇的に変化する。結果として電磁誘起透明化現象で得られた群遅延をピコ秒の時間スケールで解消することが可能となる。これは新しい光スイッチや周波数変換を提案することができる。

テラヘルツ領域の新しい非線形効果としてBranly効果が挙げられる。これは20世紀初頭にラジオ波をアルミニウム粉体に集光、照射することで粉体同志が融合し電気伝導度が劇的に向上する現象で、電波検出器コヒーラーの原理としても知られている。偏光が制御された高強度THzパルス異なる充填率を持つアルミニウム微粒子や銅微粒子を照射することで、金属微粒子集合体のテラヘルツ領域の応答が制御できることを見出した。これは連結金属粒子間の電場増強によって生じる金属酸化膜のブレイクダウンを介した粒子の接着現象と理解される。この技術は高感度のシングルショットテラヘルツイメージャーやスイッチング素子、さらには金属ナノ構造にアシストされたソフトな加工技術としての可能性が考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計57件)

[1] F. Miyamaru, M. Kamijyo, K. Takano, M. Hangyo, H. Miyazaki, and M. Wada Takeda, "Characteristics and generation process of surface waves excited on a perfect conductor surface", Opt. Express **18**,

17576-17583 (2010)

[2] K. Akiyama, K. Takano, Y. Abe, Y. Tokuda, and M. Hangyo, "Optical transmission anomalies in a double-layered metallic slit array", *Opt. Express* **18**, 17876-17882 (2010)

[3] D. Li, Z. Yang, Y. Tsunawaki, M. R. Asakawa, M. Hangyo, S. Miyamoto, and K. Imasaki, "Improve growth rate of Smith-Purcell free-electron laser by Bragg reflector", *Appl. Phys. Lett.* **98**, 211503-1-3 (2011)

[4] K. Yatsugi, N. Matsumoto, T. Nagashima, and M. Hangyo, "Transport properties of free carriers in semiconductors studied by terahertz time-domain magneto-optical ellipsometry", *Appl. Phys. Lett.* **98**, 212108-1-3 (2011)

[5] X. Xiao, Wu Jinbo, F. Miyamaru, M. Zhang, S. Li, M. W. Takeda, W. Wen, and P. Sheng, "Fano effect of metamaterial resonance in terahertz extraordinary transmission", *Appl. Phys. Lett.* **98**, 011911 (2011)

[6] K. Takano, H. Yokoyama, A. Ichii, I. Iwamoto, and M. Hangyo, "Wire-grid polarizer sheet in the terahertz region fabricated by nanoimprint technology", *Opt. Lett.* **36**, 2665-2667 (2011)

[7] 萩行正憲, 高野恵介「テラヘルツ波メタマテリアル」, *OPTRONICS*. 63-67 (2011, 12)

[8] D. Li, M. Hangyo, Y. Tsunawaki, Z. Yang, Y. Wei, S. Miyamoto, M. R. Asakawa, and K. Imasaki, "Growth rate and start current in Smith-Purcell free-electron lasers", *Appl. Phys. Lett.* **100**, 191101-1-3 (2012)

[9] F. Miyamaru, M. Kamijyo, N. Hanaoka, and M. W. Takeda, "Controlling extraordinary transmission characteristics of metal hole arrays with spoof surface plasmons", *Appl. Phys. Lett.* **100**, 081112 (2012)

[10] K. Takano, Y. Yakiyama, K. Shibuya, K. Izumi, H. Miyazaki, Y. Jimba, F. Miyamaru, H. Kitahara, M. Hangyo, "Fabrication and performance of TiO₂-ceramic-based metamaterials for terahertz frequency range" *IEEE Trans. THz Sci. Tech.* **3**, 812-819 (2013).

[11] T. Matsui, R. Takagi, K. Takano, and M. Hangyo, "Mechanism of optical terahertz-transmission modulation in an organic/inorganic semiconductor interface and its application to active metamaterials" *Opt. Lett.* **38**, 4632-4635 (2013).

[12] H. Suo, K. Takano, S. Ohno, H. Kurosawa, K. Nakayama, T. Ishihara, and M. Hangyo, "Polarization property of terahertz wave emission from

gammadion-type photoconductive antennas" *Appl. Phys. Lett.* **103**, 111106-1-4 (2013).

[13] K. Kan, J. Yang, A. Ogata, S. Sakakihara, T. Kondoh, K. Norizaawa, I. Nozawa, T. Toigawa, Y. Yoshida, H. Kitahara, K. Takano, M. Hangyo, R. Kuroda, and H. Toyokawa, "Radially polarized terahertz waves from a photoconductive antenna with microstructures" *Appl. Phys. Lett.* **102**, 221118-1-4 (2013).

[14] T. Sato, Y. Jimba, and H. Miyazaki, "Surface Electromagnetic Waves of Chiral Metamaterials Interfaces" *Transaction of the Materials Research Society of Japan*, **38**, (3), 493-496 (2013)

[15] K. Takano, F. Miyamaru, K. Akiyama, H. Miyazaki, M. W. Takeda, Y. Abe, Y. Tokuda, H. Ito, M. Hangyo, "Crossover from capacitive to inductive electromagnetic responses in near self-complementary metallic checkerboard patterns", *Opt. Express*, **22**, 24787-24795, (2014).

[16] K. Kamata, Z. Piao, S. Suzuki, T. Fujimori, W. Tajiri, K. Nagai, T. Iyoda, A. Yamada, T. Hayakawa, M. Ishiwara, S. Haraguchi, A. Belay, T. Tanaka, K. Takano, and M. Hangyo, "Spirulina-templated metal microcoils with controlled helical structures for THz electromagnetic responses", *Sci. Report* **4**, 4919, (2014).

[17] D. Li, Y. Wang, M. Hangyo, Y. Wei, Z. Yang, and S. Miyamoto, "Cherenkov radiation oscillator without reflectors" *Appl. Phys. Lett.* **104**, 194102 (2014).

[18] M. Nagai, N. Mukai, Y. Minowa, M. Ashida, J. Takayanagi and H. Ohtake, "Achromatic THz wave plate composed of stacked parallel metal plates", *Opt. Lett.* **39**, 146-149 (2014).

[19] F. Miyamaru, H. Morita, Y. Nishiyama, T. Nishida, T. Nakanishi, M. Kitano, and M. W. Takeda, "Ultrafast optical control of group delay of narrow-band terahertz waves", *Sci. Reports* **4**, 4346 (2014).

[20] M. Nagai, N. Mukai, Y. Minowa, M. Ashida, T. Suzuki, J. Takayanagi, and H. Ohtake, "Achromatic wave plate in THz frequency region based on parallel metal plate waveguides with a pillar array," *Opt. Express*, **23**, (4), 4641-4649 (2015).

〔学会発表〕(計 60 件)

[1] K. Takano, H. Suo, T. Nishida, F. Miyamaru, H. Sasaki, S. Ohno, T. Ishihara, and M. Hangyo, "Terahertz radiation from meta-atom-loaded photoconductive antennas" *The 2nd Japan-Korea Metamaterials Forum*, (Tsukuba, Japan, Jun. 28-30, 2012)

[2] 宮丸文章, “メタマテリアル研究におけるテラヘルツ波電磁波シミュレーション,” 応用物理学会テラヘルツ電磁波研究会研究主催・討論会「テラヘルツセンシング及びシミュレーション技術の進展」(2013年3月4日, 機械振興会館, 東京).

[3] 宮丸文章, “メタマテリアルによるテラヘルツ波の制御,” 第18回先端光量子科学アライアンスセミナー (2013年3月11日, 慶応義塾大学).

[4] F. Miyamaru, N. Sato, Y. Nishiyama, H. Morita, T. Nakanishi, M. Kitano, and M. W. Takeda, “Temporal control of terahertz waves with metamaterials,” International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science (May 24-28, 2013, Seattle, USA).

[5] M. Hangyo, D. Li, Y. Tokuda, and K. Takano, “Versatile properties of 1D metal gratings and cut-through metal slit arrays,” The 3rd Korea-Japan Metamaterials Forum (Seoul, Korea, Jun. 26-28, 2013).

[6] 永井正也, “金属平行平板を用いたアクトマートTHz波長板とその応用”, 応用物理学会・テラヘルツ電磁波技術研究会「新しいテラヘルツ科学が映し出すテラヘルツ応用の展望」(名古屋大学, 2013年11月18日)

[7] M. Hangyo, “Various Plasmas in the Terahertz Region - Gases, Semiconductors, Superconductors, and Metamaterials -” International Symposium on Non-equilibrium Plasma and Complex-System Sciences (IS-NPCS) (Osaka, Japan, Feb. 26-28, 2014).

[8] 宮丸文章, “メタマテリアルを用いたテラヘルツ波の空間制御とテラヘルツパルスの時間制御,” International Symposium on Frontier of Terahertz Science (2014年8月6日, 沖縄科学技術大学院大学).

[9] K. Takano, Y. Tanaka, A. Chahadih, A. Ghaddar, X-L. Han, F. Vaurette, T. Akalin, M. Nakajima, M. Hangyo, "Electromagnetic Properties of Nearly Self-Complementary Metasurfaces at Terahertz Frequency" The 8th International Conference on Photonics & Applications (ICPA-8) (Da Nang, Vietnam, Aug. 12-16, 2014).

[10] M. Hangyo, K. Takano, F. Miyamaru, R. Yahiaoui, M. I. Bakunov, H. Miyazaki, "Two-dimensional metamaterials made of TiO₂ spheres in the terahertz region" SPIE Photonics Asia 2014, Beijing, China, Oct. 9-11, 2014.

[11] M. Nagai, “THz spectroscopy using a few-cycle circularly polarized THz pulses,” Fifth International Symposium on Terahertz Nanoscience (TeraNanoV), (Martinique, Dec. 1, 2014).

[12] K. Takano, "Terahertz response of

randomly connected checkerboard patterns" The 4th Korea-Japan Metamaterial Forum (Osaka, Japan, Dec. 22-24, 2014). IT14.

[13] M. Nagai, “Pulse shaping of the intense few-cycle terahertz pulses for nonlinear spectroscopy,” SPIE Photonic West, Ultrafast Phenomena and Nanophotonics XIX, (Feb. 8, 2015, San Francisco).

〔図書〕(計7件)

[1] 高野恵介, 萩行正憲 (図書), NIKKO Green MOOK 「プリントエレクトロニクスのすべて」第5章プリントエレクトロニクスの最先端開発「テラヘルツ領域における光学素子の形成」, (日本工業出版, 2012)

[2] 高野恵介, 宮丸文章, 萩行正憲 (図書), 「第12章 テラヘルツ領域のメタマテリアル」, 石原照也他監修「メタマテリアル II」, シーエムシー出版, 2012

[3] 高野恵介, 宮丸文章, 萩行正憲: 「メタマテリアル II」石原照也 他監修 (シーエムシー出版, 2012) 第12章 テラヘルツ領域のメタマテリアル pp. 122-135.

[4] 堀越智, 萩行正憲, 田中拓男, 高野恵介, 上田哲也著, 図解 メタマテリアル -常識を超えた次世代材料-, (日刊工業新聞社, 2013)

〔産業財産権〕

出願状況 (計1件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

萩行 正憲 (Masanori HANGYO)

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: 10144429

(平成26年10月25日逝去)

永井 正也 (Masaya NAGAI)

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号: 30343239

(平成26年10月25日まで研究分担者)

(2) 研究分担者

宮丸 文章 (Fumiaki MIYAMARU)

信州大学・理学部・准教授

研究者番号: 20419005

宮寄 博司 (Hiroshi MIYAZAKI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00134007

高野 恵介 (Keisuke TAKANO)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・助教

研究者番号: 70583102

(平成26年10月25日から研究分担者)