

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760043

研究課題名(和文) 表面波・放射波複合光伝導アンテナのテラヘルツ波応答

研究課題名(英文) Surface waves on photoconductive antennas and radiation in the terahertz range

研究代表者

高野 恵介 (Takano, Keisuke)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センタ・助教

研究者番号：70583102

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：微細構造によって光学応答が設計されたメタマテリアルによって、これまでに無い光学特性を持った素子が提案されるようになってきた。受動的な素子だけでなく、光源にも応用することができる。本研究で、テラヘルツ波光源に導入したメタマテリアル構造上の電磁波伝搬と放射スペクトル制御の可能性を示した。テラヘルツ波放射光伝導アンテナにメタマテリアル要素を導入し、光源との相対的な位置関係によって放射スペクトルが制御できることを示した。またメタマテリアルを要素とする光伝導アンテナからのテラヘルツ波の放射偏光やスペクトルが、金属構造上のテラヘルツ波の伝搬を時間領域で追うことで説明できることを示した。

研究成果の概要(英文)：Novel optical devices have been developed by using metamaterials whose optical properties are designed by artificial sub-wavelength structures. The metamaterials are applied to not only passive devices but also light sources. The possibility to control propagation of terahertz waves and radiation spectra by the metamaterial elements is demonstrated. The polarization of the terahertz radiation can be designed by time-domain propagation of the terahertz pulses on the electrodes. The radiation spectra can be tuned by controlling the coupling between the terahertz source and sub-wavelength resonators.

研究分野：テラヘルツ波工学

キーワード：メタマテリアル 光伝導アンテナ テラヘルツ波工学

1. 研究開始当初の背景

光伝導アンテナは比較的高効率にテラヘルツ波(波長 30 μm から 3 mm 程度の電磁波)を発生・検出できる素子である。光伝導アンテナは光伝導性の基板上に作られた数ミクロン幅のギャップを持つ電極対からなる。電極にバイアス電圧をかけておき、ギャップ部分にレーザー光を照射して基板表面のキャリアを励起する。生成されたキャリアは電極間の電圧によって加速され、電極に電流が流れる。励起レーザーにフェムト秒パルスレーザーを用いた場合には、パルス幅がサブピコ秒程度でテラヘルツ領域に中心周波数を持つ電磁波パルスが放射される。一方でフェムト秒パルスで生成されるキャリアが、ギャップ部分に入射するテラヘルツ波によって加速されるときに流れる電流を検出することで、光伝導アンテナはテラヘルツ波の検出素子にもなる。また、光伝導アンテナはフォトミキサとしても動作し、複数波長のレーザー光からなる光ビートを入射させることで、単色テラヘルツ波の光源ともなる。光伝導アンテナは光・テラヘルツ波変換を行うことができる素子で、種々のテラヘルツ波の用途に向けて偏光を制御できる電極構造を持ったものや、電極にダイオードを装荷して非線形な応答を示すものなどの開発が進んでいる。

2. 研究の目的

2000 年代初頭に電磁波の波長に比べて十分に小さい微細構造によって、媒質の屈折率を自在に制御したメタマテリアルの概念が提案、実証された。共振型と呼ばれるメタマテリアルは、微小な共振器の集合からなり、共振で生じる位相変化が屈折率設計に利用される。波長に比べて微小な共振器は屈折率設計だけでなく、光源のスペクトル設計やセンシング応用に有用である。本研究で光伝導アンテナにメタマテリアルを導入し、電極上を伝搬するテラヘルツ波と、偏光特性を含む放射スペクトル制御の手法を提案する。

3. 研究の方法

近年の技術開発により、インクジェット工法で作製できる素子の大きさは、テラヘルツ帯で動作する素子を作れるまでになっている。金属ナノインクの基板上への直接描画という簡便な工程で数ミクロン幅の金属線を作製できる。インクジェット工法によって種々の光伝導アンテナを作製して、その特性を測定する。

4. 研究成果

(1) 卍型光伝導アンテナの偏光特性

卍型の構造は、鏡像対称性を持たないキラルな構造である。卍型の金属構造の配列によって光学活性を持つ薄膜の報告がある。図 1(a) のような卍型構造を作製し、放射されるテラヘルツ波の放射偏光スペクトルを測定

した。各電極は GaAs 基板上に作製されている。図 1 (a) のように、1 回折れの卍型アンテナ、2 回折れの卍型アンテナについてそれぞれ折れ方向が逆の構造を作製した。また参照用に十字型のアンテナも作製した。

これらのアンテナから放射されるテラヘルツ光の楕円率スペクトルを図 1 (b) に示す。卍型の折れ方向によって楕円率が反転する。これらの偏光特性は、電極中央で励起されるテラヘルツ波パルスが、電極上を外側へと伝搬しながら、エネルギーを放射していく過渡的な応答を追うことで説明できる。電極上を伝搬する時間領域でのテラヘルツ波パルスの制御によって、放射偏光をある程度設計することが可能である。

(2) メタアトム装荷光伝導アンテナによる放射抑制と増強

光源の近傍に共振器を配置することで、放射スペクトルに影響が与えられる。図 2 (a) のようにダイポール型の光伝導アンテナ近傍に C 字型の分割リング共振器を配置したときに放射されるテラヘルツ波スペクトルを、時間領域差分シミュレーションで調べた。分

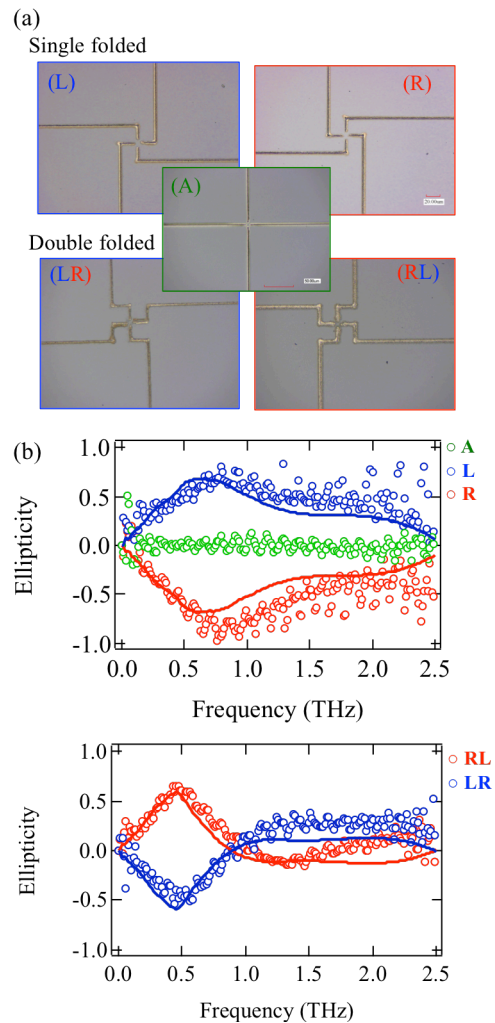


図 1 卍型光伝導アンテナの顕微鏡写真と放射テラヘルツ波の楕円率スペクトル。

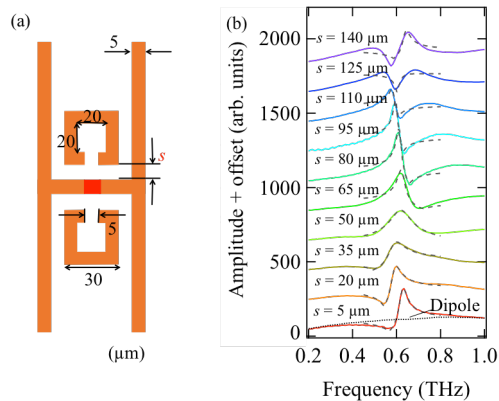


図 2 メタアトム装荷光伝導アンテナの(a)シミュレーションモデルと(b)放射スペクトルの計算結果.

分割リング共振器と、ダイポール部との間の距離を変えることで、両者の結合効率が変わる。狭帯域なスペクトルと、広帯域なスペクトルの二つが互いに相互作用しているとき、その結合の仕方によってスペクトルが非対称な形状となる。そのような二つのスペクトルの干渉は Fano 干渉と呼ばれている。分割リング共振器とダイポールアンテナの間隔 s を変えたときの放射スペクトルを図 2(b)に示す。間隔 s を変えることで、スペクトル形状が変化し、放射が抑制あるいは増強される。スペクトル形状は、Fano 干渉で生じるスペクトルを表す式

$$F(\omega) = A_0 + F_0 \frac{[q + 1(\omega - \omega_0)\Gamma]^2}{1 + [2(\omega - \omega_0)/\Gamma]^2} \quad (1)$$

によくフィットする。ここで A_0 , F_0 は定数, ω_0 , Γ は共鳴周波数と減衰定数, q は 2 つのスペクトルの結合を表す係数である。分割リング共振器が狭帯域なスペクトルを持ち、ダイポールアンテナが広帯域なスペクトルを持っている。両者の結合が最も強いときには 2 つの共振器は一体として振る舞い, $s = 50 \mu\text{m}$ に見られるように対称なスペクトル形状で放射が増強される。一方両者の結合が最も弱くなるときには $s = 125 \mu\text{m}$ に見られるように放射が抑制される。そのほかの場合には、非対称なスペクトル形状が現れる。相対位置によって 2 つの共振器の結合を制御することでスペクトルの制御を行うことができる。

(3) メタ分子を用いたテラヘルツ波伝送線路要素

テラヘルツ波の伝送線路中にメタアトムを導入することで、微小なフィルタ要素を構成することができる。低温成長 GaAs 上に光源と検出部となる 2 つの光伝導アンテナを形成し、その間を金属細線で接続する。テラヘルツ波は、金属細線上を Sommerfeld モードで光源部から検出部に伝搬する。このような細線導波路は Goubau 線として知られている。金属の導電ロスを生じるが、形状の簡便さに起因する自由度の高さから、短距離の伝送に

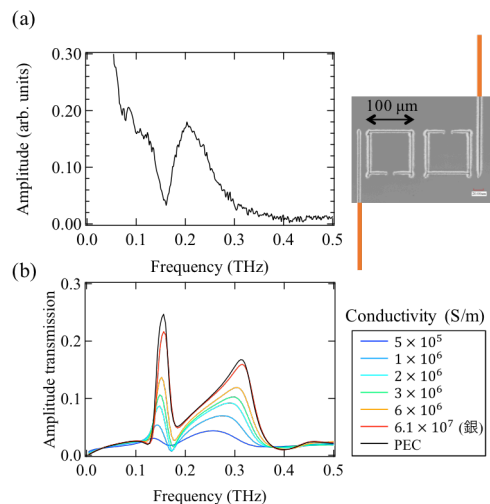


図 3 (a)LT-GaAs に形成したメタ分子バンドパスフィルタの顕微鏡写真とテラヘルツ波の伝送スペクトル. (b)構造を形成する金属の電気伝導度によるスペクトルの変化.

有用な方法である。この Goubau 線に分割リング共振器を単体あるいは複数個導入することで様々な伝送線路要素を設計できる。分割リング共振器を用いたバンドパス、バンドストップフィルタや、方向性結合器などの設計を行った。

図 3 は Goubau 線上に配置したバンドパスフィルタの例である。およそ 0.15 THz にピークを持つバンドパスフィルタとして振る舞う。しかし実際にインクジェット工法で作製したフィルタの伝送特性を測定したところ、図 3(a)のように設計した 0.15 THz にはバンドリジェクト特性が現れた。電磁場シミュレーションによって、実験で用いた金属線の電気伝導度が、バルクの銀の電気伝導度の 1/10 から 1/100 程度になっていることが示唆された。インクジェット工法では、金属ペーストで描画した後に焼結し、細線の導電性を得る。金属ナノ粒子間の空間や、焼結後の構造表面の粗さが、テラヘルツ波導波路上のエネルギーロスに顕著に影響を与えることが明らかとなった。

(4) まとめ

テラヘルツ波の光源近傍あるいは伝送線路近傍に配置することによる、テラヘルツ波の制御方法について研究を行い、時間領域での偏光操作、テラヘルツ波のスペクトル変調や微小試料センシングに有用な知見を得た。また新たな展開として、インクジェット工法で用いる金属ナノインク自体からテラヘルツ波が放射されることも見いだしている。今後、さらに新たな光源やセンシング応用への展開を目指す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 19 件)

- [1] 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", *Optics Express*, 査読有, **22**, 2014, pp. 24787-24795.
- [2] R. Yahiaoui, K. Takano, F. Miyamaru, M. Hangyo, and P. Mounaix, "Terahertz metamolecules deposited on thin flexible polymer: design, fabrication and experimental characterization", *J. Opt.* **16**, 査読有, 2014, pp. 094014-1-6.
- [3] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, K. Takano, T. Fukushima, and M. Hangyo, "Investigation of fade-out mechanism of resonance modes in optical transmission using stacked metallic sub-wavelength slit arrays", *J. Appl. Phys.* 査読有, 2014, **115**, pp. 243104-1-7.
- [4] 高野恵介, 北原英明, 萩行正憲, テラヘルツ領域のメタマテリアルと応用, 日本赤外線学会誌 査読有, **24**, 2014, 14-22.
- [5] K. Irie, K. Takano, J. C. Young, K. Yamamoto, M. Tani, and T. Suzuki, "Spectral Characteristics of Photoconductive dipole antennas including photocurrent and receiving antenna effects," *Journal of Modeling and Simulation of Antennas and Propagation* 査読有, **1**, pp. 2015, 20-24.
- [6] Yuki Takebayashi, Takuya Konno, Shouhei Shimada, Fumiaki Miyamaru, John C. Young, Hideaki Kitahara, Keisuke Takano, Masanori Hangyo, and Takehito Suzuki, "Focusing Effect Measurements of Artificial Dielectric Multilayer Lens with Metal Rectangular Chips for Terahertz Wave Band," *Applied Physics A*. 査読有, **115**, 2014, pp. 501-508.
- [7] Takehito Suzuki, Hiroki Yonamine, Takuya Konno, John C. Young, Keisuke Takano, and Masanori Hangyo, "Parallel Plate Lens with Metal Hole Array for Terahertz Wave Band", *Applied Physics A*. 査読有, **115**, 2014, pp. 403-408.
- [8] Takehito Suzuki, Hiroki Yonamine, Takuya Konno, John C. Young, Kotaro Murai, Fumiaki Miyamaru, Keisuke Takano, Hideaki Kitahara, and Masanori Hangyo, "Analysis and Design of Concave Lens with Metallic Slit Array for Terahertz Wave Band," *Applied Physics A*. 査読有, **115**, 2014, pp. 495-500.
- [9] 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 Transactions on Terahertz Science and Technology* 査読有, **3**, 2013, pp. 812-819.
- [10] 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.* 査読有, **38**, 2013, pp. 4632-4635.
- [11] 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**, 査読有, 2013, pp. 111106-1-4.
- [12] Y. Jimba, K. Takano, M. Hangyo, and H. Miyazaki, "Extraordinary optical transmission through incommensurate metal hole arrays in the terahertz region" *J. Opt. Soc. Am. B* 査読有, **30**, 2013, 2476-2482.
- [13] K. Akiyama, K. Shibuya, K. Takano, Y. Abe, Y. Tokuda, and M. Hangyo, "Tuning the effective refractive index of a thin air gap region sandwiched by metallic metamaterials by lateral displacements" *J. Appl. Phys.* 査読有, **113**, 2013, pp. 243103-1-4.
- [14] 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.* 査読有, **102**, 2013, 221118-1-4.
- [15] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, T. Nishihara, K. Takano, T. Fukushima, and M. Hangyo, "Spectroscopic functions of multi-stacked metallic plates with modulated slit arrays", *Appl. Phys. Express* 査読有, **6**, 2013, pp. 062602-1-4.
- [16] Y. Tokuda, H. Takaiwa, K. Sakaguchi, Y. Yakiyama, K. Takano, K. Akiyama, T. Fukushima, and M. Hangyo, "Optical phased array functions in double-layered metallic plate systems with artificially modulated slit arrays", *Appl. Phys. Express* 査読有, **5**, 2012, pp. 042502-1-3.
- [17] Takehito Suzuki, Tomonari Suzuki, John C. Young, Keisuke Takano, Hideaki Kitahara, and Masanori Hangyo, "Analysis of artificial dielectric lens with metallic rectangular chips for terahertz wave band and physical explanation by periodic model," *Applied Physics A* 査読有, **109**,

- 2012, pp. 825-830.
- [18] Takuya Konno, Takahiro Suzuki, John C. Young, Mikio Saigusa, Keisuke Takano, Hideaki Kitahara, Masanori Hangyo, and Takehito Suzuki, "Proposal and Analysis of Artificial Dielectric Lens with Metallic Corrugated Structures for Terahertz Wave Band," *Applied Physics A*, 査読有, **109**, 2012, pp. 1103-1108.
- [19] 高野恵介, 宮丸文章, 萩行正憲, メタマテリアルおよびメタアトムの特ラヘルツデバイスへの応用, レーザー研究 査読有, **40**, 2012, pp. 508-512.
- [学会発表] (計 26 件)
- [1] Keisuke Takano (Invited) "Terahertz response of randomly connected checkerboard patterns", The 4th Korea-Japan Metamaterial Forum, IT14 (Osaka, Japan, Dec. 22-24, 2014).
- [2] Masanori Hangyo (Invited), Keisuke Takano, Fumiaki Miyamaru, Riad Yahiaoui, Michael I. Bakunov, Hiroshi Miyazaki, "Two-dimensional metamaterials made of TiO₂ spheres in the terahertz region", *SPIE Photonics Asia 2014*, [9275-58], (Beijing, China, Oct. 9-11, 2014).
- [3] Yoku Tanaka, Keisuke Takano, Abdallah Chahadih, Abbas Ghaddar, Xiang-Lei Han, Francois Vaurette, Willie Padilla, Tahsin Akalin, Masanori Hangyo, "Terahertz properties of metallic checkerboard patterns and related structures" *SPIE Photonics Asia 2014*, [9275-9], (Beijing, China, Oct. 9-11, 2014).
- [4] Kenichiro Hanai, Keisuke Takano, Fumiaki Miyamaru, Makoto Nakajima, Masanori Hangyo, and Riad Yahiaoui, "A proposal of a terahertz wave absorber based on dielectric spheres", The 4th Japan-Korea Metamaterials Forum, P10, (Osaka University Dec. 22-24, 2014).
- [5] Yuzuru Tadokoro, Tomohiro Nishikawa, Keisuke Takano, Makoto Nakajima, and Masanori Hangyo, "Insulating-to-conducting transition of subwavelength copper spheres induced by terahertz field enhancement in native oxide layers", The 4th Japan-Korea Metamaterials Forum, P11, (Osaka University Dec. 22-24, 2014).
- [6] Motoki Asai, Hideaki Komiyama, Tomokazu Iyoda, Yuzuru Tadokoro, Keisuke Takano, Makoto Nakajima, and Masanori Hangyo, "Terahertz radiation from gold nano-rod arrays", The 4th Japan-Korea Metamaterials Forum, P12, (Osaka University Dec22-24, 2014).
- [7] Boyoung Kang, Keisuke Takano, Makoto Nakajima, and Masanori Hangyo, "THz planar chiral metamaterials with asymmetric transmission", The 4th Japan-Korea Metamaterials Forum, P1(Osaka University Dec. 22-24, 2014).
- [8] Yuzuru Tadokoro, Keisuke Takano, Masanori Hangyo, "Transition From Insulating To Conducting States Induced by Intense Terahertz Pulse In Aggregate Of Metal Particles", IRMMW-THz 2014, T4/C-14.3 (Sep. 14-19, 2014, The University on Arizona, Tucson, AZ).
- [9] (Invited) Yoku Tanaka, Keisuke Takano, Abdallah Chahadih, Abbas Ghaddar, Xiang-Lei Han, Francois Vaurette, Tahsin Akalin, Fumiaki Miyamaru, Masanori Hangyo, "Terahertz property of nearly perfect self-complementary checkerboard patterns", 5th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, (Meta14), 1A-4 (Singapore, May 20-23, 2014).
- [10] Keisuke Takano (Invited), Yoku, Tanaka, Abdallah Chahadih, Abbas Ghaddar, Xiang-Lei Han, Francois Vaurette, Tahsin Akalin, Makoto Nakajima, and Masanori Hangyo, "Electromagnetic Properties of Nearly Self-Complementary Metasurfaces at Terahertz Frequency", The 8th International Conference on Photonics & Applications (ICPA-8) A-07. (Da Nang, Vietnam, Aug. 12-16, 2014).
- [11] Y. Tadokoro, K. Takano, M. Nakajima, and M. Hangyo, "Insulating-to-conducting state transition in dispersed aluminum powders by irradiation of high-field terahertz pulses," International Symposium on Frontier of Terahertz Science, TU-P19 (Okinawa Institute of Science and Technology, Okinawa, Japan, Aug. 5, 2014).
- [12] Boyoung Kang, Keisuke Takano and Masanori Hangyo, "THz Metamaterial Depending on the Handedness and Propagating direction of Circularly Polarization", International Symposium on Frontier of Terahertz Science, TU-P25 (Okinawa, Japan, Aug. 4-6, 2014).
- [13] Keisuke Takano, Yuichiro Okui, Hideaki Kitahara, Abdallah Chahadih, Abbas Ghaddar, Xiang-Lei Han, Francois Vaurette, Tahsin Akalin, Yudai Sekine, Makoto Nakajima, Masanori Hangyo, "Inductive-to-Capacitive transition of terahertz responses between a metal mesh and a metal cross-shape array through introduction of random cuts", 5th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, (Meta14), P27 (Singapore, May 20-23, 2014).

- [14] Boyoung Kang, Keisuke Takano, and Masanori Hangyo, "Asymmetric Transmission of Planar Chiral THz Metamaterials for Circularly Polarized Light", The 38th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves IRMMW-THz 2013, We3-5. (Mainz on the Rhine, Germany, Sept. 1 – 6, 2013).
- [15] Keisuke Takano, Tsubasa Nishida, Boyoung Kang, Hirofumi Sasaki, Fumiaki Miyamaru, Mitsuo W. Takeda, Willie Padilla, Masanori Hangyo, and Tahsin Akalin, "Terahertz radiation from meta-atom-loaded photoconductive antennas", International Workshop on Optical Terahertz Science and Technology 2013, Th2-14 (OTST 2013, Kyoto Terra, Japan, Apr. 1-5, 2013).
- [16] Keisuke Takano, Tsubasa Nishida, Boyoung Kang, Hirofumi Sasaki, Fumiaki Miyamaru, Mitsuo W. Takeda, and Masanori Hangyo "Terahertz radiation from photoconductive antennas modulated with split-ring resonators", International Symposium on Frontiers in THz Technology (FTT2012), Pos.2.7 (Nara, Japan, Nov. 26-30, 2012).
- [17] Y. Yakiyama, K. Takano, H. Kitahara, F. Miyamaru, M. I. Bakunov, and M. Hangyo, "Electromagnetic response of two-dimensional metamaterials constructed of a metal-mesh and dielectric spheres in the terahertz region", The Sixth International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials' 2012), pp. 454-456 (St. Petersburg, Russia, Sep. 17-22, 2012).
- [18] Keisuke Takano (Invited), Hiromasa Suo, Tsubasa Nishida, Fumiaki Miyamaru, Hirofumi Sasaki, Seigo Ohno, Teruya Ishihara, and Masanori Hangyo, "Terahertz radiation from meta-atom-loaded photoconductive antennas", The 2nd Japan-Korea Metamaterials Forum, pp.18-19 (Epcoc Tsukuba, Japan, Jun. 28-30, 2012)
- [19] 浅井 基希, 込山 英秋, 彌田 智一, 田所 讓, 高野 恵介, 中嶋 誠, 萩行 正憲, 超短パルスレーザー励起による金ナノロッドからのテラヘルツ波放射, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 (東海大学, 2015.3.11-14), (12p-A14-5).
- [20] 田中 翼, 高野 恵介, Abdallah Chahadiah, Abbas Ghaddar, Xiang-Lei Han, Francois Vaurette, Tahsin Akalin, 宮丸 文章, 中嶋 誠, 萩行 正憲, 自己補対近傍チェッカーボードパターンでのテラヘルツ応答, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 (東海大学, 2015.3.11-14), (13a-A14-5).
- [21] Boyoung Kang, Tomohiro Nishikawa, Yuzuru Tadokoro, Keisuke Takano, and Makoto Nakajima, "Improvement of THz imager with hybridization system of metamaterial and cholesteric liquid crystal", 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 (東海大学, 2015.3.11-14), (13a-A14-10).
- [22] 田所 讓, 西川 智啓, 高野 恵介, 中嶋 誠, 萩行 正 憲, サブ波長銅球集団における高電場テラヘルツ誘起コヒーラー, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会 (東海大学, 2015.3.11-14), (13a-A14-11).
- [23] 西川智啓, 田所讓, 高野恵介, 中嶋誠, 萩行正憲, コレステリック液晶を用いたテラヘルツイメージャーの開発, 2014 年秋期第 75 回応用物理関係連合講演会 20p-C6-4 (北海道大学, 2014 年 9 月 20 日)
- [24] 花井研一郎, 高野恵介, 宮丸文章, 中嶋 誠, 萩行正憲, Yahiaoui Riad, 誘電体球を用いたテラヘルツ波吸収体の提案, 2014 年秋期第 75 回応用物理関係連合講演会 18p-PA5-16 (北海道大学, 2014 年 9 月 20 日) .
- [25] 田所讓, 西川智啓, 高野恵介, 中嶋誠, 萩行正憲, サブ波長アルミニウム粒子集合体におけるテラヘルツ電場誘起絶縁/伝導転移, 第 25 回光物性研究会, II B-72, (神戸大学, 2014 年 12 月 12 日-13 日) .
- [26] 田所讓, 西川智啓, 高野恵介, 中嶋誠, 萩行正憲, 高強度テラヘルツ波パルスで誘起するコヒーラー効果, 応用物理学会・テラヘルツ電磁波技術研究会「テラヘルツ科学の進展と応用への展望」(大阪大学, 2014 年 11 月 25 日).

[図書] (計 2 件)

- 堀越智, 萩行正憲, 田中拓男, 高野恵介, 上田哲也, 「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 年 11 月)
- 石原照也 他監修, 高野恵介, 宮丸文章, 萩行正憲, メタマテリアル II 第 12 章 テラヘルツ領域のメタマテリアル pp. 122-135 (シーエムシー出版, 2012).

[その他]

<https://sites.google.com/site/ksktakra/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 恵介 (TAKANO, Keisuke)

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