

Oral presentation | 3 Optics and Photonics : 3.11 Nanoscale optical science and near-field optics (formerly 3.12)

📅 Thu. Sep 21, 2023 1:00 PM - 6:00 PM JST | Thu. Sep 21, 2023 4:00 AM - 9:00 AM UTC | 📍 A309 (KJ Hall)

[21p-A309-1~18] 3.11 Nanoscale optical science and near-field optics (formerly 3.12)

Masanobu Iwanaga(NIMS), Miyata Masashi(NTT), Shunsuke Murai(Kyoto Univ.)

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[21p-A309-1] [Young Scientist Presentation Award Speech] Demonstration of Metalens-integrated MPPC improves the photon detection efficiency

○Sou Uenoyama¹, Ryosuke Ota¹ (1.Hamamatsu Photonics K.K.)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[21p-A309-2] Jones-vector multi-plane light conversion using adjoint-optimized metasurfaces

○(D)Go Soma¹, Yoshiaki Nakano¹, Takuo Tanemura¹ (1.The Univ. of Tokyo)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[21p-A309-3] Nanophotonic polarization transducer in optical and THz frequency region

○Tomoki Kusaka¹, Fujikata Junichi² (1.Tokushima Univ., 2.Tokushima Univ. P-LED Inst.)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[21p-A309-4] Four-color-sorting metalenses for high-sensitivity RGB-NIR image sensors

○Masashi Miyata¹, Toshikazu Hashimoto¹ (1.NTT Device Technology Labs.)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[21p-A309-5] Tailoring coupling conditions of coupled qBIC-molecular vibration system on silicon metasurfaces

○Keisuke Watanabe¹, Hemam Rachna Devi¹, Masanobu Iwanaga¹, Tadaaki Nagao^{1,2} (1.NIMS, 2.Hokkaido Univ.)

📌 English Presentation

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[21p-A309-6] An electromechanical cantilever actuator with a high mechanical resonant frequency exceeding 1.5 MHz used for THz metamaterials

○Ying Huang¹, Taiyu Okatani¹, Yoshiaki Kanamori¹ (1.Tohoku Univ.)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[21p-A309-7] Unidirectional microwave radiation by a magnetochiral metamolecule

○Hiroyuki Kurosawa¹, Keisuke Itoh², Tetsuya Ueda¹ (1.KIT, 2.ITIM)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[21p-A309-8] Magneto-chiral metasurfaces at microwave frequencies

○Satoshi Tomita^{1,2}, Toshiyuki Kodama¹, Toshihiro Nakanishi³, Kei Sawada^{4,5} (1.IEHE, Tohoku Univ., 2.Dept. Phys., Tohoku Univ., 3.Kyoto Univ., 4.RIKEN, 5.Cornell Univ.)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[21p-A309-9] Structural design of chiral metamaterials with multiple optical activity peaks

○(M2)Kosuke Yunoki¹, Kenshin Matsuuchi¹, Atsushi Kihara¹, Masaaki Misawa², Hiroo Suzuki¹, Yasuhiko Hayashi¹, Takuo Tanaka^{3,4}, Kenji Tsuruta¹ (1.Okayama Univ., 2.Fukuoka Inst. Technol., 3.RIKEN, 4.Tokushima Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[21p-A309-10] Photoluminescence enhancement by surface lattice resonance controlled via nanoparticles packing factor in titanium (IV) oxide rectangular nanoparticle arrays

○(D)Makoto Higashino¹, Shunsuke Murai¹, Tanaka Katsuhisa¹ (1.Kyoto Univ.)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[21p-A309-11] Enhancement of Atomic-Layer Photoluminescence by Plasmon–Photon Hybrid Metasurfaces

○Masanobu Iwanaga¹, Xu Yang¹, Vasilios Karanikolas¹, Takashi Kuroda¹, Yoshiki Sakuma¹ (1.NIMS)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[21p-A309-12] Optical properties and luminescence control of Ag/TiO₂ stacked nanoantennas using out-of-plane quadrupole resonance

○TienYang Lo¹, Shunsuke Murai¹, Katsuhisa Tanaka¹ (1.Kyoto Univ.)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[21p-A309-13] Controlling fluorescence of donor-acceptor molecules by Mie resonance of silicon nanoparticles

○Keisuke Ozawa¹, Hiroshi Sugimoto¹, Minoru Fujii¹ (1.Kobe Univ.)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[21p-A309-14] Observation of the topological corner state in a kagome lattice consisting of magnetically coupled LC resonators

○Kenichi Yatsugi¹, Shrinathan Esakimuthu Pandarakone¹, Hideo Iizuka¹ (1.Toyota Chukin)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[21p-A309-15] Waveguide length dependence of the lasing threshold for distributed feedback lasers with organic crystals

○(M2)Haruyuki Fukase¹, Inada Yuhi¹, Yamao Takeshi¹, Hotta Shu¹ (1.Kyoto Inst. Technol.)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[21p-A309-16] Scanning Tunneling Spectroscopy in photoisomerization process of photochromic crystal

○(M1)Ryuto Horie¹, Kazuharu Uchiyama¹, Kingo Uchida², Makoto Naruse³, Hirokazu Hori¹ (1.Univ. of Yamanashi, 2.Ryukoku Univ., 3.The Univ. of Tokyo)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[21p-A309-17] Observation of insulator-to-metal transitions for individual VO₂ nanoparticles

○Jun Nishida¹, Kazutaka Nishikawa², Yohishide Watanabe², Takashi Kumagai¹ (1.Inst. Mol. Sci., 2.Toyota Tech. Inst.)

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[21p-A309-18] Observation of CuPc monolayer by Polarization-Tunable Photoinduced Force Microscopy

○(M2)Takaaki Yamada¹, Yasuhiro Sugawara¹ (1.Osaka Univ.)

メタレンズ一体型 MPPC による受光性能向上の実証

Demonstration of Metalens-integrated MPPC improves the photon detection efficiency

浜ホト中研 ○上野山 聡, 大田 良亮

Hamamatsu Photonics K.K.

E-mail: so.uenoyama@hpk.co.jp

Single Photon Avalanche Diode (SPAD) がアレイ状に配列された MPPC は微弱光検出器として広く知られ、Lidar や高エネルギー物理学などの分野へ応用されている。一方、クロストーク抑制のために各 SPAD の境界に形成されているトレンチ領域は低感度領域でもある。これまで我々は石英基板上に SPAD と同じ数、大きさのメタレンズを作製し、トレンチ領域への入射光を有効領域に集光し、MPPC の性能向上を実証してきた[1]。しかし、外部振動によりメタレンズと SPAD の相対位置がずれることで安定的に感度増強ができない課題があった。本発表では「メタレンズ一体型 MPPC」を実現し、安定的に入射光子を有効領域に導くことで受光感度向上を目指した。

Fig.1 に示すメタレンズの有無を比較した Photon Detection Efficiency (PDE) マップの結果から、トレンチ領域に向かう入射光子をメタレンズにより有効領域に導くことを実証できた。

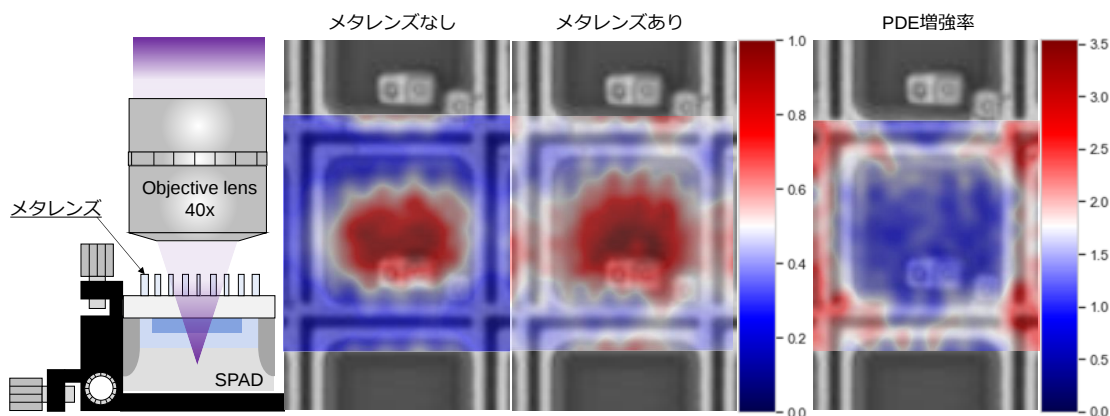


Fig.1 Photon Detection Efficiency Map comparing with and without the metalens

Fig.2 に示すメタレンズの有無で Coincidence Time Resolution (CTR) を比較した結果から、メタレンズにより CTR が 54 ps 向上し、光検出器の時間分解能の向上も実証した。発表中ではメタレンズ一体型 MPPC の一連の評価結果を報告する。

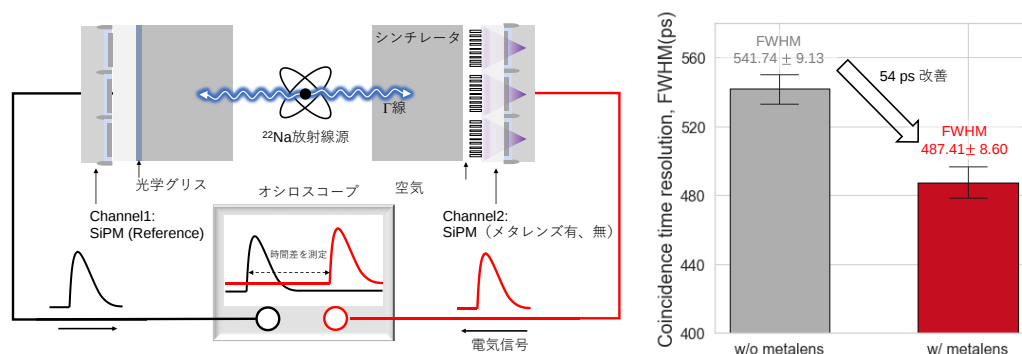


Fig.2 Experimental set-up and Coincidence Time Resolution results

[1] S. Uenoyama and R. Ota, *ACS Photonics*, **8** (6), 1548-1555 (2021)

随伴最適化メタサーフェスによるジョーンズベクトル多面光波変換 Jones-vector multi-plane light conversion using adjoint-optimized metasurfaces

○(D)相馬豪, 中野義昭, 種村拓夫 (東大院・工)

○Go Soma, Yoshiaki Nakano, Takuo Tanemura (The Univ. of Tokyo)

E-mail: soma@hotaka.t.u-tokyo.ac.jp

背景: 多面光波変換は, 自由空間伝搬と位相板による波面変換を繰り返すことにより実現される多入力多出力の一括モード変換を表す. 現在までに自由空間, 多モードファイバー, 多ポート光導波路等の空間モードの分離/多重が実証されてきた[1, 2]. しかし, これらの多面光波変換はスカラーのモードに作用するものであり, ジョーンズベクトル(すなわち, 偏波)を直接操作することはできなかった. 本稿では, 位相板の代わりに複屈折分布を有するメタサーフェスを用いたジョーンズベクトル多面光波変換を提案し, 随伴法によるメタサーフェスの最適化設計手法を示す. さらに, シミュレーションによりこれらの実証を行う.

提案手法: Fig. 1(a)に提案するジョーンズ行列多面光波変換の構成を示す. m 番目のモードの入力ジョーンズベクトル $\mathbf{a}_0^{(m)}(x, y)$ は, 自由空間伝搬 $F_{n,n-1}$ とメタサーフェスによるジョーンズ行列 $\mathbf{J}_n(x, y)$ (ただし, $n = 1, \dots, N$) の乗算を N 層繰り返すことで以下のジョーンズベクトルに変換される.

$$\mathbf{a}_{N+1}^{(m)}(x, y) = F_{N+1,N} \mathbf{J}_N(x, y) \dots F_{2,1} \mathbf{J}_1(x, y) F_{1,0} \mathbf{a}_0^{(m)}(x, y)$$

メタサーフェスはメタアトム[Fig. 1(b)]と呼ばれるサブ波長構造を二次元状に配列したものである[3]. 各メタアトムによる光波変換は Fig. 1(b)に示す行列により表されるが, 形状を適切に設計することで, 任意の位相変化 φ_x, φ_y と回転角度 θ が実現できる[4]. メタアトムのパラメータ最適化には, 随伴法を用いる[5]. まず, 順伝搬により n 層目のメタサーフェスの入射側でのジョーンズ行列 $\mathbf{a}_n^{(m)}(x, y)$ を求めた後, 所望の出力ジョーンズベクトル $\mathbf{b}_{N+1}^{(m)}(x, y)$ を逆伝搬させることで, 各層での出射側でのジョーンズベクトル $\mathbf{b}_n^{(m)}(x, y)$ を計算する. $\mathbf{b}_n^{(m)\dagger} \mathbf{J}_n \mathbf{a}_n^{(m)}$ の値から全パラメータの勾配を一括で求め, 値を更新する. 収束するまでこのプロセスを繰り返すことで, 最適な $\mathbf{J}_n(x, y)$ を求める.

結果: 一例として, 2 層のメタサーフェスを用いたジョーンズ行列ホログラフィの生成をシミュレーションした結果を Fig. 1(c)に示す. 所望の画像が生成されており, 提案手法の有効性が確認された.

まとめ: ジョーンズベクトル多面光波変換の提案及びシミュレーションによる実証を行った.

謝辞: 本研究の一部は, 文部科学省科学研究費補助金の助成(#21K18168)により実施された.

参考文献: [1] G. Labroille *et al.*, Opt. Express **22**, 15599 (2014). [2] T. Tanemura *et al.*, in Proc. OFC'22, M11.6 (2022). [3] A. Arbabi *et al.*, Nat. Nanotechnol. **10**, 937 (2015). [4] G. Soma *et al.*, Optica **10**, 604 (2023). [5] S. Molesky *et al.*, Nat. Photonics **12**, 659 (2018).

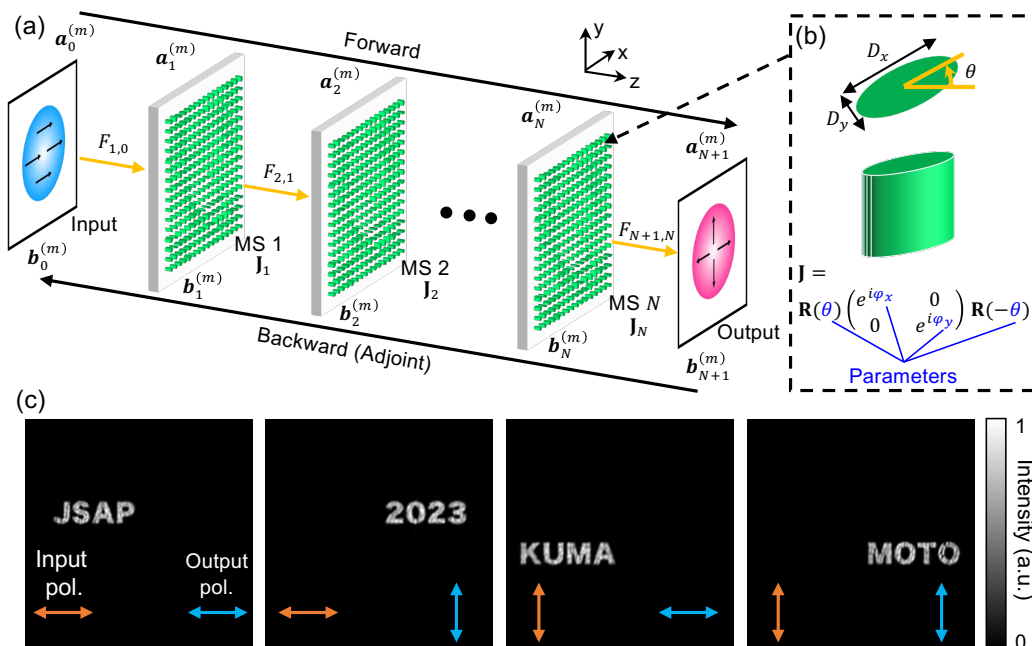


Fig. 1 (a) Schematic of proposed Jones-matrix multi-plane light conversion. (b) Top view (Top), 3D view (Middle), and Jones matrix of a meta-atom. (c) Simulation result of Jones matrix holography.

光・THz 周波数領域におけるナノフォトニック偏光変換器 Nanophotonic polarization transducer in optical and THz frequency region

徳島大学 ○(M1) 日下智貴, 藤方潤一

Tokushima Univ. ○Tomoki Kusaka and Junichi Fujikata

E-mail: k.tomki.1234@gmail.com

1. はじめに

近年、IoT ネットワークの急速な普及に伴い、高速・大容量の光・THz 融合通信技術が期待されている。これらの要求を満たすために、高性能なナノフォトニックデバイスが報告されている。中でも、メタマテリアルを用いた多機能偏光スイッチなどのナノフォトニックデバイスが報告されてきている [1]。しかし、高透過率、広帯域、一方向性の全てを満足するデバイスの実現には課題があるのが現状である。

本研究では、メタスプリットリング共振器構造をベースとした偏光変換メタマテリアルを、光波長領域および THz 周波数領域で数値解析した。そして、光と THz の両周波数領域において、高透過率かつ広帯域な偏光変換特性を検証した。

2. 計算方法

光周波数帯と THz 帯で機能し、直線偏光 (LP) を円偏光 (CP) に高い透過率と広い帯域幅で変換するメタスプリットリング偏光変換器 (m-SRRPC) を FDTD 法により検討した。単層メタサーフェスは $1/4$ 波長板として機能するが、電気的応答における周波数分散が大きく、動作帯域が制限される。本研究では、隣接するメタサーフェス間でファブリペロー的な干渉を形成することにより、広帯域かつ周波数分散の小さい偏光操作と高透過率の実現可能性を検討した [1]。図 1 は、屈折率 1.53 のポリマー誘電体層の両面に、2 つの金からなる分割リング共振器 (SRR) を配置したユニットセル構造である。このメタマテリアルの伝送特性および位相変換特性を解析した。

3. 結果と考察

図 2、図 3 は、偏光角が 45° 傾いた LP 波を垂直に入射させた場合のシミュレーション結果である。共振周波数 (波長) 帯は、光周波数帯が $1.4\mu\text{m} \sim 2.8\mu\text{m}$ 、THz 帯が $240\text{GHz} \sim 310\text{GHz}$ である 2 種類の m-SRRPC 構造を最適化した。m-SRPC の性能を定量的に評価するため、透過率 T と電界振幅 (透過光の平行成分 $|E_x|^2$ 、垂直成分 $|E_y|^2$) の 2 乗、遠視野位相分布を解析した。

図 2 に示すように、光波長 $1.4\mu\text{m} \sim 2.8\mu\text{m}$ 、THz 周波数 $240\text{GHz} \sim 310\text{GHz}$ において、それぞれ約 0.9 という高い透過率が得られている。また、波長 $1.4\mu\text{m} \sim 2.8\mu\text{m}$ の $|E_x|^2$ および $|E_y|^2$ についても、同じ 0.2 の大きさが得られている。遠視野領域の位相分布は、図 3 (a)、(b) において、光波長帯と THz 周波数帯の両方で均一な放射状の位相分

布を示す。また、位相角度分布は右回り円偏光 (RCP 波) と一致していることを検証した。従って、LP 波を広帯域で高い透過率を持つ RCP 波に変換できることがわかる。

4. まとめ

本研究では、メタマテリアルを用いたナノフォトニックデバイスを FDTD 法を用いて検討し、光と THz の周波数領域で高透過率かつ広帯域な m-SRPC を実現した。その結果、入力偏光角度が 45° の場合、入力 LP 波の偏光が RCP 波に変換されることを検証した。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 (JP22H01555, JP23H00274) の助成を受けたものである。

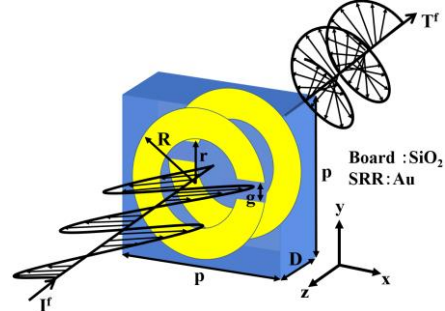


Fig. 1 Schematic diagram of a meta-split ring polarization converter (m-SRRPC).

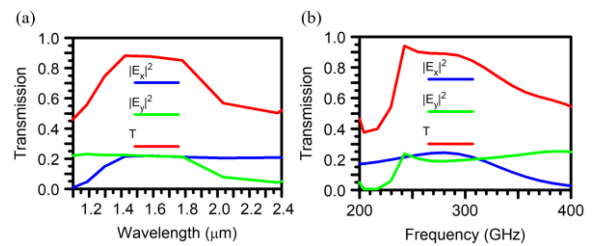


Fig. 2 Transmittance and electric field intensity for (a) optical and (b) THz frequencies.

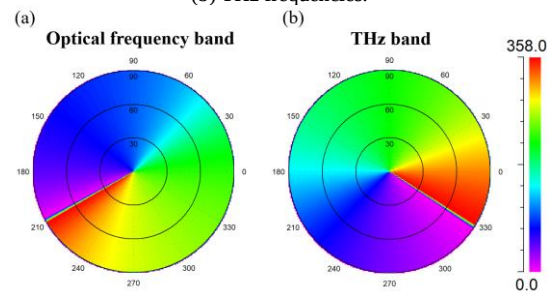


Fig. 3 Far-field phase distributions for (a) optical frequency and (b) THz frequency.

参考文献

[1] C. Liu et al., npj Computational Materials 5, 93 (2019).

高感度 RGB-NIR イメージセンサの実現に向けた 4 色分離メタレンズ

Four-color-sorting metalenses for high-sensitivity RGB-NIR image sensors

NTT 先端集積デバイス研, [○]宮田 将司, 橋本 俊和

NTT Device Technology Labs., [○]Masashi Miyata, Toshikazu Hashimoto

E-mail: masashi.miyata@ntt.com

近年, Red-Green-Blue (RGB) の 3 色に加えて, 生体情報の取得等において有益な近赤外光 (NIR) を同時に取得するイメージセンサが研究開発されており[1], 1 枚の画像がもつ情報量の拡張が進められている. 現在提案されている RGB-NIR イメージセンサは, 4 色の吸収型カラーフィルタを画素毎にそれぞれ集積することで実現される. そのため, センサ総受光量は最大でも入射光量の 25% となり, センサ感度に制約がある. このようなフィルタ起因の制約を打破する方法として, フィルタの代わりに透過型カラーソータを採用するセンサ構成が挙げられ, その効果は RGB イメージセンサにおいて実証されている[2-4]. 今回我々は, 上記カラーソータの概念を RGB-NIR イメージセンサへ適用すべく, R・G・B・NIR の 4 色を画素スケールで分類する 4 色分離メタレンズの設計と計算による評価を行ったので報告する.

Fig. 1(a)は, 提案するメタレンズの光学機能の概略である. メタレンズは, 光を波長 (色) に応じて分類し, 異なる 4 画素の中心へ集める機能をもつ. Fig. 1(b)は, 設計したメタレンズとセンサの概略である. メタレンズは, 我々の以前の成果である 3 色分離メタレンズ[4]を 4 色分離へ拡張することで実現した. なお, メタ原子として 3 種類の基本形状をもつ TiO_2 ナノポスト (高さ: 1250 nm, 周期: 280 nm) を採用した. 画素サイズは $1.68 \mu\text{m}$ とした.

Fig. 2(a)は, 計算によって求めた R・G・B・NIR の各中心波長におけるメタレンズアレイの焦点面での光強度分布である. どの波長においても, ターゲットとする画素への明瞭な集光の様子が観測された. Fig. 2(b)は, 計算によって求めた各画素の受光スペクトルである. なお受光強度は, 4 画素あたりに入射する光強度で規格化した. またグラフ中の黒点線は, 従来のフィルタ構成における受光量の上限を示す. 各スペクトルは対応する色の波長帯でそれぞれピークをもっている. さらに各ピークは, フィルタ構成の上限 25% を大幅に超えており, 従来

より高感度な受光性能であることがわかる. 本発表では, 本構成における画質およびノイズ耐性についても議論する予定である.

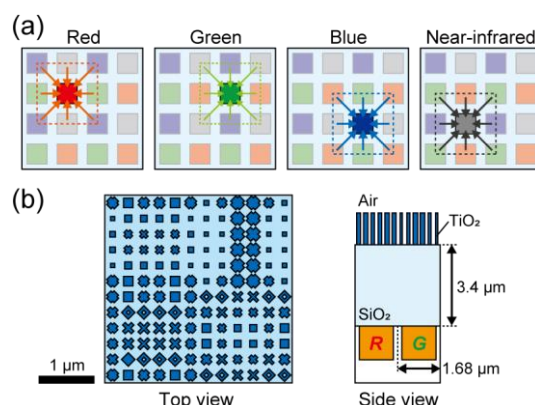


Fig. 1. (a) Schematics of four-color sorting and focusing on a sensor pixel array. (b) Unit cell of a metalens-based RGB-NIR image sensor.

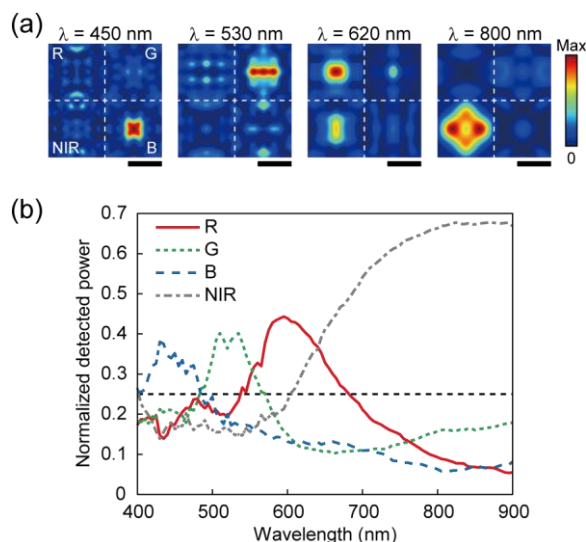


Fig. 2. (a) Simulated focal plane intensity profiles of a metalens array. Scale bars, $1 \mu\text{m}$. (b) Simulated spectral responses of pixel detectors. The horizontal dashed line shows the 0.25 theoretical limit of a color-filter-based approach.

References

1. Y. Monno *et al.*, IEEE Sens. J., **19**, 497–507 (2019).
2. S. Nishiwaki *et al.*, Nature Photon. **7**, 240–246 (2013).
3. M. Miyata *et al.*, ACS Photon. **6**, 1442–1450 (2019).
4. M. Miyata *et al.*, Optica **8**, 1596–1604 (2021).

シリコンメタサーフェスを用いた準 BIC-分子振動結合系の結合条件制御

Tailoring coupling conditions of coupled qBIC-molecular vibration system on silicon metasurfaces

物材機構¹, 北大² ○渡邊 敬介¹, ヘマム ラチナ デヴィ¹, 岩長 祐伸¹, 長尾 忠昭^{1,2}NIMS¹, Hokkaido Univ.², °Keisuke Watanabe¹, Hemam Rachna Devi¹, Masanobu Iwanaga¹, and Tadaaki Nagao^{1,2}

E-mail: watanabe.keisuke@nims.go.jp

微量分子の検出および識別に有用な表面増強赤外吸収の高感度化には、ナノスケールの電場増強効果の利用に加え、ナノ構造由来の共鳴モードの放射ロスを適切に制御することが重要である [1]。しかしながら、従来の金属材料を用いた表面プラズモン共鳴の放射ロスの制御には、複雑な構造設計指針が必要であるだけでなく [2]、放射ロスの制御量に限界がある。その点で、誘電体ナノ構造は吸収ロスが小さく、放射ロスの可変性において大きな利点がある。特に、近年その応用範囲の広さで注目を集めている Bound state in the continuum (BIC) 条件においては、単位胞の対称性をわずかに破るだけでその共鳴モード (準 BIC モード) の放射ロスを大きく制御できるため [3]、中赤外域に存在する分子振動との結合においてもその結合条件を大きく制御できるものと予想される。

本研究では、SOI (Silicon-on-Insulator) 基板を用いたシリコンベースの全誘電体メタサーフェスを製作し、準 BIC モードと PMMA 分子の C=O 伸縮振動モードとの結合を報告する。ここでは厚さ 400 nm のシリコン層に、2 本の平行ロッドからなるナノ構造アレイを形成した。上下のロッドの長さをそれぞれ $L + 2\Delta L$ 、 $L - 2\Delta L$ と変化させることで構造の対称性を破り放射ロスを制御した。図 1(a)に、異なる非対称パラメータ $\alpha = 2\Delta L/L$ を変化させたときの透過スペクトルを FTIR により測定した結果を示す。 α の増大に伴って透過変化量と線幅がともに増大した。ここで、 α を変化させても上下のロッドの体積の和は一定に保たれており、共鳴波長はほぼ一定であった。次に、メタサーフェス上に PMMA を 111 nm スピンコートし、同様に透過スペクトルを測定した結果を図 1(b)に示す。PMMA の C=O 振動モードと準 BIC モードとの結合によりモード分裂が生じた。反交差特性の観測結果から Rabi 分裂幅を評価すると、およそ $\alpha < 0.27$ では準 BIC-PMMA 結合系は強結合条件、それ以外では弱結合条件を満たすことがわかった。以上から、 α のみを変えることにより容易に結合条件が制御できることを示した。さらに、異なる α における増強分子シグナルを評価すると、これが最大となる α の条件が存在することもわかった。以上の結果は、金属を用いない全誘電体材料の高感度な表面増強赤外分光への可能性を示すものと考えられる。

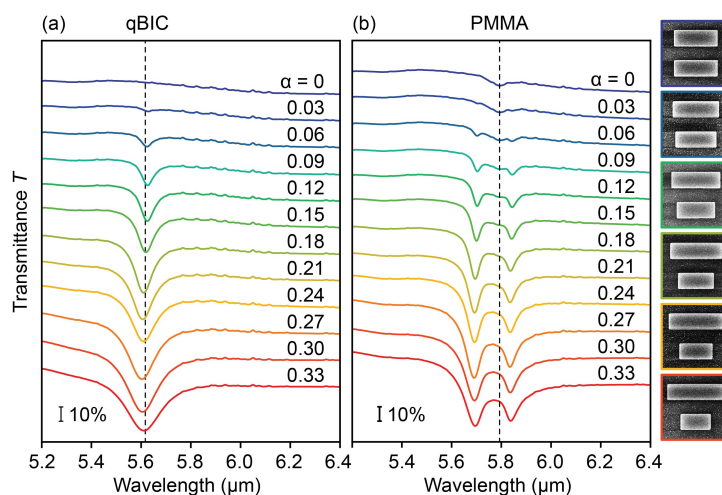


Figure. 1 Silicon metasurfaces at quasi-BICs. Experimental transmission spectra of the bare (a) and PMMA-coated metasurfaces (b) with different α . The spectra are vertically shifted for clarity. The insets show the SEM images of the measured metasurfaces with $\alpha = 0-0.33$ from top to bottom, respectively.

参考文献: [1] R. Adato et al., Nat Commun **4**(1), 2154 (2013). [2] J. Wei et al., ACS Appl Mater Interfaces **11**(50), 47270 (2019). [3] K. Watanabe et al., Nanophotonics **12**(1), 99 (2023).

An electromechanical cantilever actuator with a high mechanical resonant frequency exceeding 1.5 MHz used for THz metamaterials

Tohoku Univ.^{1, *} Ying Huang¹, Taiyu Okatani¹, and Yoshiaki Kanamori¹
E-mail: huang.ying.p3@alumni.tohoku.ac.jp

I. Introduction. To further develop terahertz (THz) technologies that are potential in the upcoming application field beyond-5G, electromechanically reconfigurable metamaterial (MM) that can dynamically manipulate the transmission of THz waves is of interest ^[1]. In this study, we optimized the operational speed of our prior work, a reconfigurable ladder-shaped MM (LS-MM) based on micro electromechanical systems (MEMS) cantilever switches ^[2]. The mechanical resonant frequency (f_{mr}) of the cantilever was further experimentally increased by using a dimple structure. The mechanical response and transmittance were evaluated by using a microsystem analyzer MSA-400 and a THz time-domain spectrometer.

II. Fabrication and measurement. Figure 1 shows SEM images of the device fabricated by using the surface machining technique. A 0.5-mm-thick quartz substrate was used. Leads that provide drive voltage were embedded under a 0.42- μm -thick SiO_2 film to avoid electrical short-circuit; then a 2D gold LS-MM was formed on the surface layer. Finally, a MEMS actuator array was formed to align the split-bar of the LS-MM. A suspended Au beam with a dimpled tip was fabricated as shown in Fig.1 (b). Figure 2 shows the mechanical response of the fabricated cantilever measured in the air. The peak magnitude of the oscillation velocity was found at 1.54 MHz, which is the f_{mr} of the cantilever.

III. Conclusions. An LS-MM-based MEMS device operating at the THz range was successfully fabricated. The cantilever actuator experimentally oscillates with a f_{mr} of 1.54 MHz.

A part of this work was supported by JST, CREST Grant Number JPMJCR2102, Japan, and JSPS KAKENHI Grant Number JP22J11158.

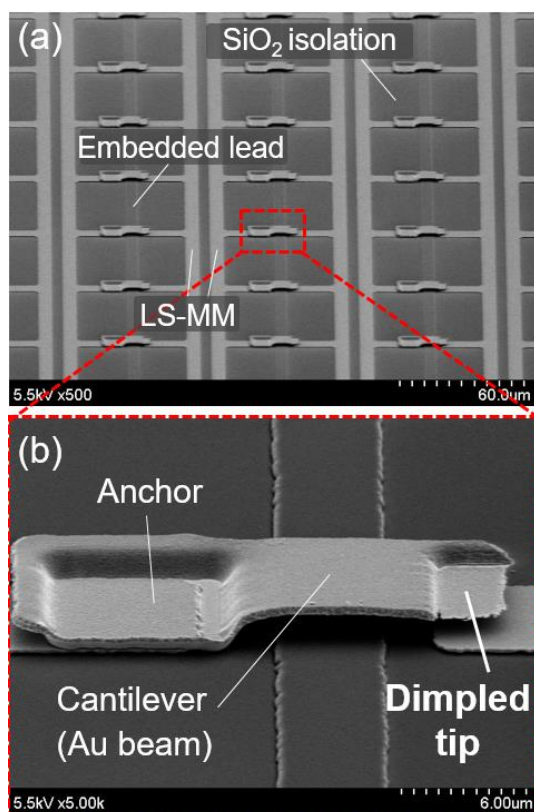


Fig. 1. SEM images of fabricated LS-MM-based MEMS device. Zoom-in view of the (a) array and (b) one-unit cell.

Reference: [1] Y. Huang *et al.*, Sci. Rep. **10**(1), 20807 (2020). [2] Y. Huang *et al.*, the 83rd JSAP Autumn meeting, 23p-A101-10, 03-552 (2022).

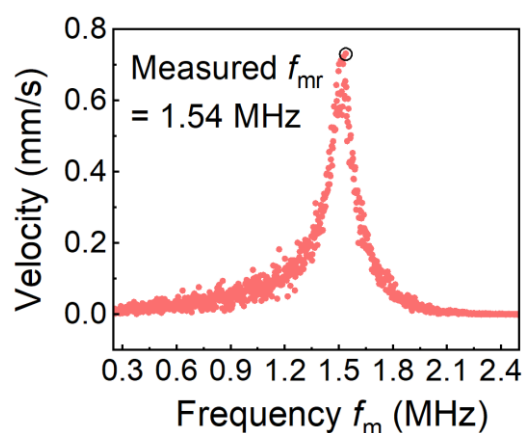


Fig. 2. Measured mechanic response (velocity) of the fabricated cantilever.

磁気カイラルメタ分子による一方向マイクロ波放射

Unidirectional microwave radiation by a magnetochiral metamolecule

京都工繊大¹, 宮城県産業技術総合センター²

○黒澤 裕之¹, 伊藤 桂介², 上田 哲也¹

Kyoto Inst. Tech.¹, ITIM²

°Hiroyuki Kurosawa¹, Keisuke Itoh², Tetsuya Ueda¹

E-mail: kurosawa-hiroyuki@kit.ac.jp

磁性とカイラリティが同時に存在することで時間と空間対称性が破れ、それらの結合により磁気カイラル(magnetochiral,以下 MCh)効果という無偏波の電磁波に対する方向依存複屈折(2色性)が発現する。我々はこれまでに、高 Q 値を持つ誘電体共振器モードと磁性体の強磁性共鳴をメタ分子内で誘起し、静磁場を印加することでそれらの干渉効果を精密に制御した結果、巨大な MCh 効果が発現することを実験と数値計算の両面から確かめた[1]。MCh 効果は、方向依存 2 色性として観測されるが、キルヒホッフの法則によれば、物質の吸収率と放射率は等しい。したがって、一方向のみへの電磁波の放射として MCh 効果を観測することもできるはずである。今回、MCh 効果を持つメタ分子によりマイクロ波を一方向へ放射させることに成功したので報告する。

図 1 に今回調べたメタ分子の模式図を示す。フェライトロッドを中心に、その周囲に高屈折率誘電体キューブが配置されている。このとき、ロッドの長手方向に沿って空間的にねじりながらキューブを配置することにより系にカイラリティを与えた。このメタ分子を、その長手方向を導波管(WR-187)の導波方向に沿うように挿入し、外部から dc 磁場を印加する。ロッドの中心部分にはアンテナを挿入するための孔があり、その孔の中心に磁気双極子を配置し、導波管の Port1 および 2 へ放射されるパワーを数値計算により評価した(図 2)。その結果、誘電体共振器の共振周波数近傍で一方向の Port へ強くマイクロ波が放射されることが分かった。

当日は、実験結果も交えながら MCh 効果による一方向マイクロ波放射について詳細に議論する予定である。

[1]: H. Kurosawa *et al.* Opt. Express **30**, 37066-37075 (2022). 謝辞：本研究は NEDO 官民による若手研究者発掘支援事業(22101009-0)の支援を受けました。

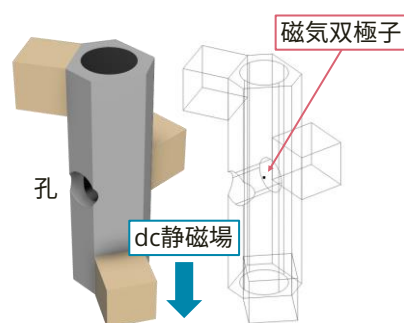


図 1 MCh メタ分子の模式図。

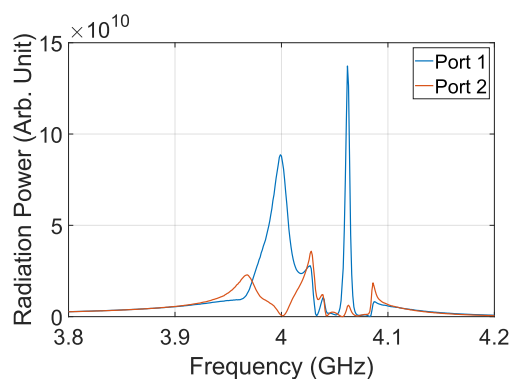


図 2 MCh メタ分子による Port1(青), 2(赤)への放射パワースペクトルの計算結果。

マイクロ波領域での磁気カイラルメタ表面

Magneto-chiral metasurfaces at microwave frequencies

東北大高教機構¹, 東北大理², 京大工³, 理研 SPring-8⁴, コーネル大 CHESS⁵

○ 富田 知志^{1,2}, 児玉 俊之¹, 中西 俊博³, 澤田 桂^{4,5}

Tohoku Univ.¹, Kyoto Univ.², RIKEN³, Cornell Univ.⁴

○ Satoshi Tomita¹, Toshiyuki Kodama¹, Toshihiro Nakanishi², Kei Sawada^{3,4}

E-mail: tomita@tohoku.ac.jp

対称性の破れは物理学及び応用物理学における基礎的な興味のひとつである。時間反転対称性と空間反転対称性が同時に破れた系、すなわち磁気光学効果と光学活性が共存する媒質では、光学的磁気カイラル (MCh) 効果が発現する。光学的 MCh 効果は、光の偏光方向には依存せず、進行方向に依存して振幅透過係数が変化する現象で、方向依存複屈折と呼ばれる。MCh 効果は非相反なマジックミラーをもたらす、光にとっての人工的ゲージ場を実現するため注目を集めている。これまで我々は3次元構造のメタ材料を用いることで、マイクロ波領域での光学的 MCh 効果を増強できることを示してきた^[1,2]。しかし応用を考えると、2次元構造のメタ表面が望まれる。そこで今回、2次元 MCh メタ表面に関して理論的に探索した。

磁性体スラブの表裏両面に金属凹構造^[3]を貼り付けた二重凹 MCh メタ表面を形成した。周期境界条件を用いて二重凹を2次元的に並べた。磁性体は磁性ガーネットを想定した。10GHz 帯のマイクロ波の透過を有限要素法の COMSOL Multiphysics と RF モジュールで数値的に計算した。

図 1(a) は、500mT の直流磁場下にある MCh メタ表面の透過係数スペクトルの計算結果である。赤線で示す T^+ は表から裏への透過、青線で示す T^- は裏から表への透過に対応する。 T^+ と T^- の差分をプロットしたものを図 1(b) に示す。16.3GHz では約 10% の透過係数差が現れている。これは二重凹構造のみ、もしくは磁性体スラブのみでは現れないことから、光学的 MCh 効果に起因すると考えられる。

図 1(c) には 16.3GHz での表面電流を可視化している。赤と青の矢印は、それぞれ表面と裏面での表面電流を表す。表面と裏面に跨るループ電流の存在が見て取れる。このループ電流が磁性体スラブと相互作用することで、光学的 MCh 効果が増強されていると考えられる。二重凹構造による光学活性は、クーンモデルと呼ばれるトイモデルで記述できる。講演では、光学的 MCh 効果を説明するために拡張されたクーンモデルを紹介する。

数値計算の初期段階での黒澤裕之博士による助言に感謝する。この研究は JST-CREST (JPMJCR2102) および科研費 (23K13621) で支援されている。

参考文献: [1] Tomita et al., Phys. Rev. Lett. 113, 235501 (2014). [2] Tomita et al., J. Phys. D: Appl. Phys. 51, 083001 (2018). [3] Kim et al., Scientific Reports 4, 5864 (2014).

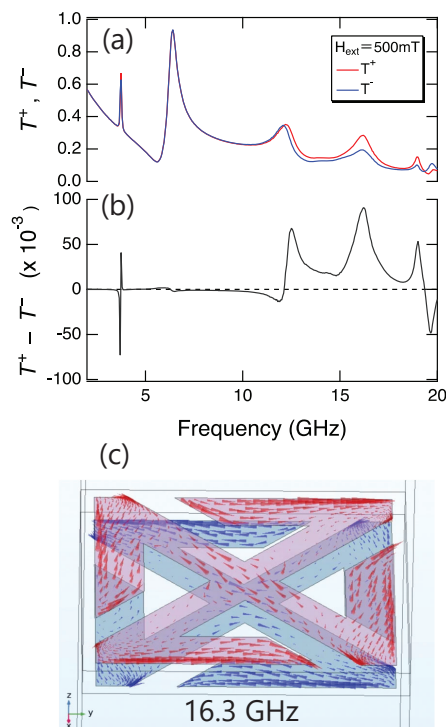


図 1: (a) 数値計算で得られた透過係数スペクトル、(b) T^+ と T^- の差分スペクトル、(c) 16.3GHz での表面電流。

複数の光学活性ピークを持つカイラルメタマテリアルの設計

Structural design of chiral metamaterials with multiple optical activity peaks

岡山大¹, 福工大工², 理研³, 徳島大⁴ ○(M2)柚木公佑¹, 松内健晋¹, 木原淳¹, 三澤賢明²,

鈴木弘朗¹, 林靖彦¹, 田中拓男^{3,4}, 鶴田健二¹

Okayama Univ.¹, Fukuoka Inst. Technol.², RIKEN³, Tokushima Univ.⁴ ○K. Yunoki¹, K. Matsuuchi¹,

A. Kihara¹, M. Misawa², H. Suzuki¹, Y. Hayashi¹, T. Tanaka^{3,4}, and K. Tsuruta¹

E-mail: tsuruta@okayama-u.ac.jp

・まえがき

生命体の構成と生理機能を担うアミノ酸の多くには光学異性体が存在し、左右円偏光に対して吸収度が異なる円二色性を持つ。分子振動に起因する振動円二色性(VCD)測定によりアミノ酸の立体構造の決定が可能となるが、その測定のためには複雑な光学系や多量のサンプルが必要であり簡易な測定を妨げている。我々は最近、金属ナノ構造を集積したメタマテリアルを用いて、簡易な測定系でも高感度にVCD測定が可能となることを報告した^[1]。さらに、ナノサイズの金パッチ構造をずらして融合した二量体構造により、入射偏光方向を変えるだけで左右円偏光を発現させる新規メタマテリアルを考案した^[2]。これによりセンシング時における測定誤差の低減や測定時間を短縮できる。しかし、異なる構造の分子や、より複雑な分子構造の同定には、複数種類の分子結合に対するVCD応答測定が必要である。本研究では長方形の金パッチを用いたカイラルメタマテリアルを提案する。構造の対称性を崩すことで、異なる波数にピークを持つようになり、複数種類の分子振動に起因する光学活性応答を検出でき、それにより異種のキララル分子識別等が可能になると期待できる。

・結果

図1に、本研究で提案するメタマテリアルのユニットセルを示す。一边が990 nmと1140 nmの長方形金パッチを重ね合わせた構造である。図2は、有限要素法によるメタマテリアルの局所光学応答のシミュレーション結果とそれぞれのピークにおける局所光学活性分布図を示す。図2より、y/x偏光照射によって光学活性の符号が逆転し、局所的左/右円偏光の選択的発生が、2つの波数帯(1400 cm⁻¹付近および1500 cm⁻¹付近)で起こることがわかる。

・まとめ

本研究では、y/x偏光に応じたスペクトル変化のみでVCD応答が測定可能で、かつ、2つの局所光学活性ピークを持つ新規メタマテリアル構造を設計した。複数の波数帯で赤外吸収スペクトルを確認できるようになることで、特定分子の検知精度向上とともに、異なる分子や複雑な分子構造の識別にも繋がると考えられる。講

演では、試作した構造によるキララル分子の実測結果も報告する予定である。

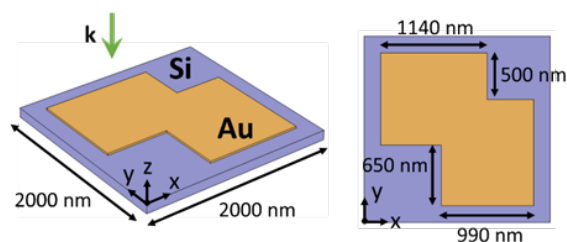


Figure 1: Unit cell of the proposed metamaterial.

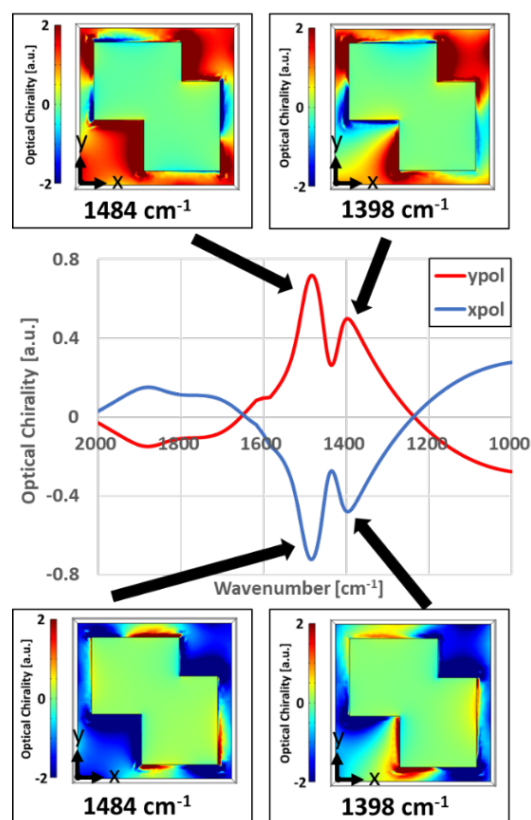


Figure 2: Optical chirality spectra and local optical activity distributions of the designed metamaterial.

参考文献

- [1] T. Iida, A. Ishikawa, T. Tanaka, A. Muranaka, M. Uchiyama, Y. Hayashi, K. Tsuruta, Appl. Phys. Lett. **117**, 101103 (2020).
- [2] 松内, 木原, 三澤, 田中, 鶴田, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 22p-A101-8.

矩形酸化チタン(IV)ナノ粒子アレイにおける 粒子の空間充填率を介した表面格子共鳴の制御と発光増強

Photoluminescence enhancement by surface lattice resonance controlled
via nanoparticles packing factor in titanium (IV) oxide rectangular nanoparticle arrays

京大院工, [○](D)東野 真, 村井 俊介, 田中 勝久

Kyoto Univ. [○]Makoto Higashino, Shunsuke Murai, Katsuhisa Tanaka

E-mail: murai@dipole7.kuic.kyoto-u.ac.jp

【緒言】

Surface lattice resonance (SLR) は、周期的に並んだ個々のナノ粒子における共鳴が光回折を介して共振した光学状態であり、発光材料と組み合わせることで、発光強度の増強や指向性の制御を実現できる。特に、高屈折率誘電体ナノ粒子の Mie 共鳴を構成要素とする SLR (Mie-SLR) は、光損失を材料選択によって低減できる点や、電気モードと磁気モードの両方が光学応答に関与する点から、近年積極的に研究されている[1]。

Mie 共鳴の多極性に由来する光学応答の 1 つに、Kerker 効果がある。Kerker 効果は、電極分極と磁気分極から生じる散乱場の干渉により、前方あるいは後方散乱が完全に抑制される特異的な散乱現象である。

SLR を利用した Kerker 効果は、Lattice-Kerker 効果として知られている[2]。とりわけ、電気-磁気 SLR 間の干渉に基づく Lattice-Kerker 効果は、2つのモード交差が狭い波長・角度領域に限られるため、発光材料と組み合わせることで、単独の SLR に比べてより高度な指向性制御に基づいた発光増強の実現が期待できる。

以上を踏まえ、本研究では、可視域における SLR 同士のモード交差によって生じる Lattice-Kerker 効果を利用した発光増強の実証に向けて、矩形 TiO₂ ナノ粒子アレイの作製と光学特性の評価を行った。アレイ周期に対するナノ粒子の空間充填率を、矩形の長軸長さによって制御することで、電気モードと磁気モードが交差するように SLR の分散関係を調整した。アレイに塗布した発光層における発光増強度から散乱特性の評価を行い、Lattice-Kerker 効果の有無を検証した。

【実験】

SiO₂ ガラス基板上に、矩形 Ti ナノ粒子アレイをナノインプリント法によって作製し、900 °C で 10 分間の熱酸化を行うことで矩形 TiO₂ ナノ粒子アレイを得た。消光スペクトル測定から得た SLR の分散関係と、走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察の結果から、SLR のモード帰属を行った。色素分子としてクマリン 153 を含有したポリメタクリル酸メチル(PMMA)を矩形 TiO₂ ナノ粒子アレイに塗布し、アレイの表裏に放出される発光の放出角依存性を測定した。

【結果と考察】

矩形 TiO₂ ナノ粒子アレイの消光スペクトルの入射角依存性において、ナノ粒子の空間充填率の上昇に伴う入射角 0 °付近の分散関係の変化による、電気 SLR と磁気 SLR の交差を確認した。

アレイ前方および後方の発光増強度を、発光層の膜厚ごとに評価したところ、膜厚に依存せず電気 SLR と磁気 SLR の交差点で著しい発光増強が見られた。加えて、特定の膜厚に関して、アレイ前方の発光増強度が後方のそれを上回る結果が得られた (Fig. 1)。これは、Lattice-Kerker 効果と発光の結合を示唆する。

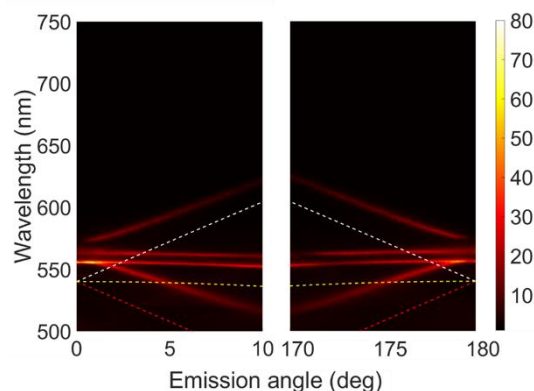


Fig.1 PL enhancement as a function of θ_{em} for TiO₂ nanoparticle array embedded in a PMMA layer containing 3 wt% Coumarin 153.

- [1] S. Murai et al., *Adv. Opt. Mater.* **8**, 10902024 (2020)
[2] V. E. Babicheva et al., *Laser Photonics Rev.* **11**, 1700132 (2017)

プラズモン・フォトンハイブリッドメタ表面による原子層発光増強 Enhancement of Atomic-Layer Photoluminescence by Plasmon-Photon Hybrid Metasurfaces

物材機構 ○岩長 祐伸, 楊 旭, KARANIKOLAS Vasilios, 黒田 隆, 佐久間 芳樹

NIMS °Masanobu Iwanaga, Xu Yang, Vasilios Karanikolas, Takashi Kuroda, Yoshiki Sakuma

E-mail: iwanaga.masanobu@nims.go.jp

遷移金属ダイカルコゲナイト (TMDC) は単原子層でありながら、直接遷移型半導体の発光および電気伝導の特性を示す新材料として注目され、現在世界中で精力的に研究されている。発光を高輝度化するために人工ナノ構造に TMDC 原子層を転写する試みはこれまでも多数行われてきたが、数倍から数十倍の発光増強にとどまる結果がほとんどであり [1]、大きな増強効果を得る方法は確立できていない。また、一辺が 50 μm 程度の小片三角形試料を対象に測定した結果が多数報告されており、素子化に向けてより大面積の試料作製も課題となっている。

今回、化学蒸着法によりサファイア基板上に成長した WS_2 連続原子層膜をプラズモン・フォトンハイブリッド型のメタ表面に転写して、発光増強効果を検証した。図 1 は室温での測定結果の一例を示す。メタ表面上の発光強度は窒素ガスフロー下における 300°C、10 分間の高速熱アニーリング (RTA) 後が最大で (赤線)、転写直後 (灰色線) より約 3 倍であることを観測した。一方、平坦な金膜上に転写された WS_2 からは同じ測定条件下において有意な発光は観測されなかった (黒線)。図 1 の挿入左図は共焦点発光像 (一辺 1.1 mm 相当) を示しており、中央付近の白い正方形がメタ表面に対応している。転写膜の不均一性に起因する発光ムラはあるが、周囲の平坦金膜上の WS_2 と比べて、発光が明瞭に観測された。図 1 の挿入右図はプラズモン・フォトンハイブリッド型メタ表面の模式図を示している。シリコンスラブに円孔配列を導入し、金膜を 30 nm 垂直蒸着することによりこの構造を作製した。上下に分かれた金ナノ構造が相補的な形状をしていることが特徴であり、大きな光吸収率 (= 光放射率) を示す複数の共鳴状態をもつ [2]。その共鳴の 1 つが 640 nm 付近に位置し、発光増強に寄与した。640 nm 付近のピークは A 励起子、670 nm 付近のピークはトリオンによるものと解釈できる [3-5]。

講演では、転写膜質の改良について述べるとともに増強効果、発光寿命、共焦点発光像などの解析結果を報告し、パーセル効果についても議論する。

- [1] For example, S. Wang *et al.*, Nano Lett. **16**, 4368 (2016); S.R.K.C. Indukuri *et al.*, ACS Appl. Nano Mater. **3**, 10226 (2020).
- [2] M. Iwanaga and B. Choi, Nano Lett. **15**, 1904 (2015).
- [3] K.M. McCreary *et al.*, Sci. Rep. **6**, 35154 (2016).
- [4] T. Kuroda *et al.*, Phys. Rev. B **102**, 195407 (2020).
- [5] T. Aihara *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **61**, 071003 (2022).

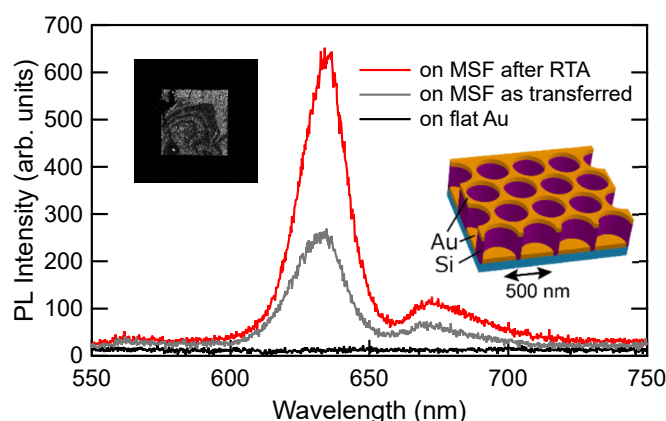


Figure 1. Measured photoluminescence (PL) spectra of TMDC monolayer on a plasmon-photon hybrid metasurface (MSF) after rapid thermal annealing (RTA) (red) and as transferred (gray). PL spectrum on flat Au is shown with black. PL was excited by 532 nm laser light. Inset (left) shows a confocal PL image of 1.1 mm $\times$ 1.1 mm area, where white square at the center corresponds to a MSF. The TMDC monolayer covered all the area in the image, but the PL was observed only on the MSF. Inset (right) illustrates the hybrid metasurface.

面外四重極子共鳴を利用した Ag/TiO₂ 積層ナノアンテナの光学特性と発光制御

Optical properties and luminescence control of Ag/TiO₂ stacked nanoantennas using out-of-plane quadrupole resonance

京大院工[○](D1) 羅 天易, 村井 俊介, 田中 勝久

Kyoto Univ. TienYang Lo, Shunsuke Murai, Katsuhisa Tanaka¹

E-mail: murai@dipole7.kuic.kyoto-u.ac.jp

【緒言】ナノアンテナはサブ波長サイズの金属ナノ粒子を周期的に配列させた構造体であり、ナノアンテナに光が照射されると、局在型表面プラズモン共鳴 (Localized Surface Plasmon Resonance: LSPR) と面内の光回折の同時励起により表面格子共鳴 (Surface Lattice Resonance: SLR) が誘起される。この共鳴モードによってアンテナ近傍に発現する増強電場は、周囲の光学応答を増強させる働きがあるため、微小光源や高感度センサーへの応用が期待されている。この構造を樹脂に埋入したナノアンテナシール[1,2]は、ナノアンテナを直接作製できない材料表面に対しても容易に脱着が可能であり、一枚のシールを何回でも繰り返し使えるといった利点がある。さらに、ナノ粒子が高分子材料に埋められているため、ナノアンテナシールを2枚重ねたり、基板上的ナノアンテナに重ねて貼ったりすることによって、ナノスケールで三次元集積した周期的な構造を構築できる[3]。

当研究室は2023年に面外四重極子共鳴特性を有するAgナノアンテナシールの開発に成功した[2]。そこで、本研究では、一般の面内双極子共鳴より更に高い品質係数を持つ面外カップリング効率の高い面外四重極子共鳴を利用し、吸収増幅層として用いられるTiO₂ナノアンテナ上にシールを積層することによって、指向性発光特性の向上を試みた。

【結果】Fig.1は、(a)TiO₂ナノアンテナ単体、(b)Agナノアンテナシール単体、(c)Ag/TiO₂積層ナノアンテナのTE偏光における入射角度依存の消光スペクトルを示す。積層前後では、下層のTiO₂ナノアンテナの共鳴特性の変化が見られなかったことに対し、上層のAgナノアンテナシールの四重極子共鳴特性は顕著に長波長側にシフトし、面内双極子の共鳴波長領域内に入り込むことが確認された。また、長波長側で励起された面内双極子共鳴は、積層前後にわたって、スペクトル上の変化が見られなかった。

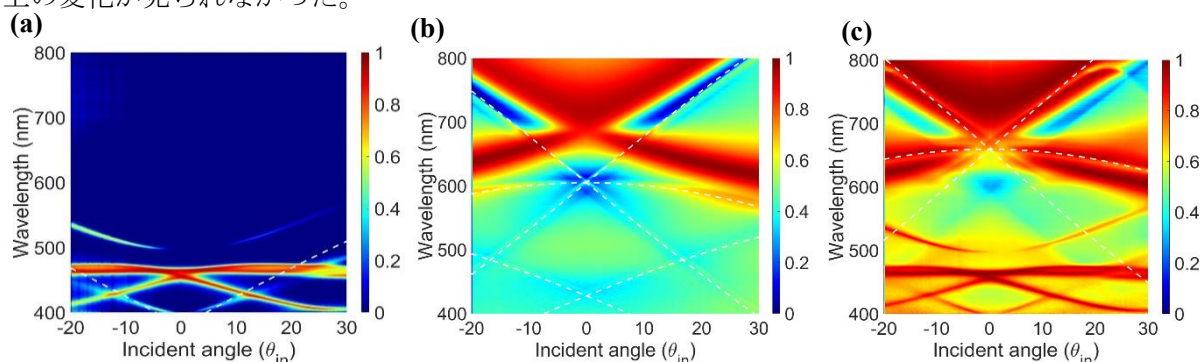


Fig. 1. Extinction spectra as a function of θ_{in} for the luminous layer with (a) TiO₂ nanoantenna, (b) Ag nanoantenna sticker, and (c) Ag/TiO₂ stacked nanoantennas on the top.

一方で、放射角度依存の発光増強スペクトルでは、積層前後にわたって、入射偏光間のモードの分散関係の逆転と、発光増強領域が低放射角内に局在するようになったことが確認された。これは、四重極子モード由来の導波路型モードがTiO₂ナノアンテナ層内に発現していると考えられる。【参考文献】[1] Agata *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 021110 (2021) [2] Lo *et al.*, *ACS Appl. Opt. Mater.* **1**, 870 (2023). [3] Murai *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **129**(18), 183101.

シリコンナノ粒子の Mie 共鳴によるドナー・アクセプタ分子の蛍光制御

Controlling fluorescence of donor-acceptor molecules by Mie resonance of silicon nanoparticles

神戸大学院工 〇(M1) 大沢 慶祐, 杉本 泰, 藤井 稔

Kobe Univ., 〇(M1) Keisuke Ozawa, Hiroshi Sugimoto, Minoru Fuji

E-mail: sugimoto@eedept.kobe-u.ac.jp

蛍光性ナノ粒子プローブは、バイオセンシング・イメージングへの応用が期待されている。特に光学的な共鳴を示すナノ粒子に蛍光分子を修飾した系で、共鳴による蛍光増強を利用した高感度化技術に関する研究が報告されている。さらに、蛍光増強・消光と蛍光分子間の Förster 共鳴エネルギー移動(FRET)を活用した高感度化技術に関する研究が進められている。当グループでは、可視域に共鳴を示すナノ粒子として、高い屈折率($n \sim 4$)を持つシリコン(Si)ナノ粒子の Mie 共鳴に着目した。これまでに、Si ナノ粒子コアに蛍光分子を修飾した複合ナノ粒子を開発し、Mie 共鳴によるパーセル効果と蛍光増強を実証している[1]。本発表では、Si ナノ粒子にドナー・アクセプタ蛍光分子を修飾し、Mie 共鳴による FRET の制御を試みた。

図 1(a)挿入図に示すように、Si ナノ粒子表面にドナー・アクセプタ分子(FITC・RITC)を修飾し(Si@(F,R))、顕微分光法で単一ナノ粒子の光学特性を評価した。図 1(a, c)に示す粒子の暗視野散乱スペクトルから、電気双極子(ED)、磁気双極子(MD)共鳴ピークが確認できる。また、図 1(b, d)に同一粒子の発光スペクトルを示す。励起波長はドナーの吸収波長である 488 nm である。図 1(b)において、FRET によるアクセプタの発光が確認できる。なお、直径 102 nm の粒子(図 1(a,b))は波長 500 nm 以上に共鳴を示さない。一方、分子の発光波長に Mie 共鳴を有する直径 140 nm の粒子(図 1(d))では、アクセプタの発光波長で強度が増大している。これは、粒子の MD 共鳴(図 1(c))のパーセル効果によるものであり、Si ナノ粒子の Mie 共鳴を制御することで、アクセプタの発光を選択的に増強することができることを示している。講演では、粒径の異なる粒子の実験結果について、パーセル効果とエネルギー移動レート・FRET 効率について、理論計算結果と併せて議論する。

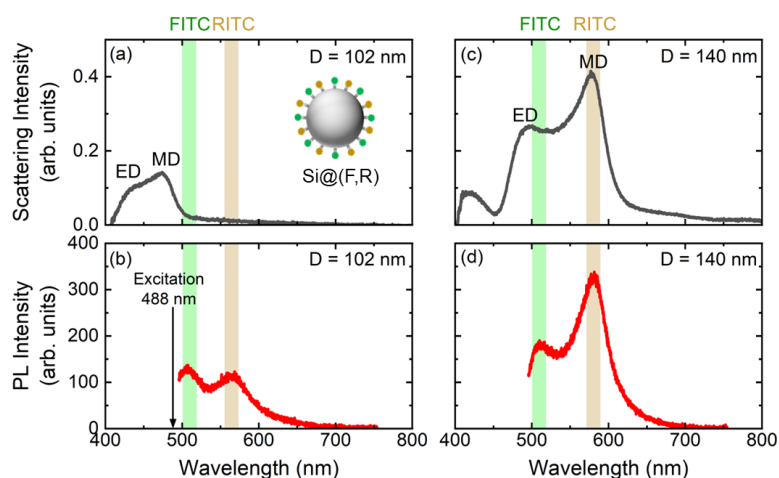
[1] M. Adachi, *et al*, Small 2023, 19,2207318

Figure1. (a,c) Scattering and (b,d) photoluminescence spectra of Si@(F,R) with diameters of 102 and 140 nm, respectively. Inset in (a) is a schematic illustration of Si@(F,R).

磁気結合した LC 共振器からなるカゴメ格子における トポロジカルコーナー状態の観測

Observation of the topological corner state in a kagome lattice consisting of magnetically coupled LC resonators

豊田中研¹, °矢次 健一¹, エサキムトゥ パンダラコン シリナータン¹, 飯塚 英男¹

Toyota Central R&D Labs., Inc.¹,

°Kenichi Yatsugi¹, Shrinathan Esakimuthu Pandarakone¹, Hideo Iizuka¹

E-mail: yatsugi@mosk.tytlabs.co.jp

高次トポロジカル絶縁体はトポロジカルコーナーモードを持つ性質から注目されている。中でも高次トポロジカル絶縁体としてカゴメ格子が知られている。また、磁気結合した LC 共振回路はワイヤレス電力伝送に用いられる。

本研究では、磁気結合した LC 共振器からなるカゴメ格子におけるトポロジカルコーナー状態を観測したので報告する[1]。図1に実験系の写真を示す。各基板上に銅配線をプリントすることで形成されたコイルと、基板上に実装されたコンデンサによって LC 共振器が形成されている。この基板がカゴメ格子状に配置されており、隣り合ったコイルが磁気結合している。ユニットセル内およびユニットセル間の基板の距離はそれぞれ $d_K = 13\text{ cm}$ および $d_J = 9\text{ cm}$ である。

図2にコーナーモード周波数で測定した LC 共振器のアドミタンスの空間分布を示す。3つのコーナーにおいて高いアドミタンスが観測された。すなわち、トポロジカルコーナー状態が確認された。さらに測定周波数を変えることで、カゴメ格子の3つの辺上で高いアドミタンスが観測されるトポロジカルエッジ状態も確認された。また、本システムではコイル間の距離を変えることでトポロジカル相とトリビアル相を切り替えることができ、トポロジカル相とトリビアル相のアドミタンス分布を比較した。最後にコーナーモードを用いたワイヤレス電力伝送特性を評価したので報告する。

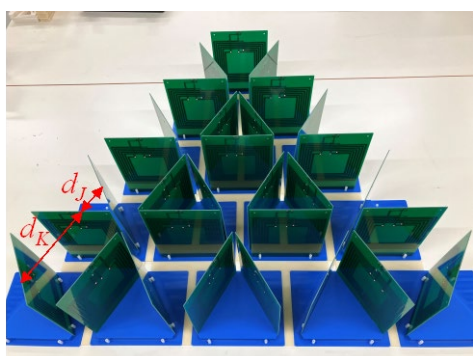


図1 カゴメ格子状に磁気結合した LC 共振回路

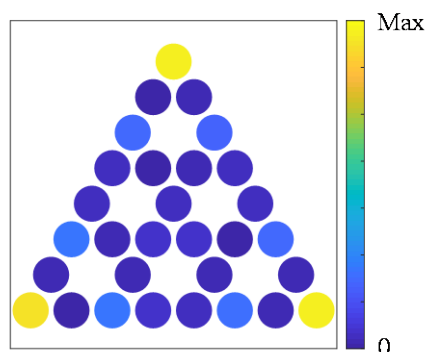


図2 コーナーモード周波数におけるアドミタンスの空間分布

[1] K. Yatsugi, et. al., Sci. Rep. **13**, 8301 (2023).

分布帰還型有機結晶レーザーの閾値に対する導波路長の影響

Waveguide length dependence of the lasing threshold

for organic crystal distributed feedback lasers

京工織大 [○](M2) 深瀬 晴之, 稲田 雄飛, 山雄 健史, 堀田 収

Kyoto Inst. Technol., [○]Haruyuki Fukase, Yuhi Inada, Takeshi Yamao, and Shu Hotta

E-mail: m2671018@edu.kit.ac.jp

【緒言】

当研究室では、有機結晶に回折格子を組み込んだ分布帰還型 (DFB) レーザーの発光特性を評価してきた。このようなレーザーの発振閾値を左右する要因として、有機色素をドーブしたポリマー膜を用いた DFB レーザーにおいて、発振閾値が励起面積に依存するという報告がある^[1]。これと類似し、有機結晶 DFB レーザーでも発振閾値が導波路長に依存すると期待される。本研究では、導波路長が連続的に変化する回折格子を有機結晶上に作製し、発振閾値の導波路長依存性を調べた。

【実験】

気相成長した有機材料 [P6T; Fig. 1 (a)] の単結晶を酸化膜付きシリコン基板上に貼り付け、鋭角が出るように結晶を切り取った。集束イオンビームとプラズマエッチングを組み合わせ^[2]、結晶表面に回折格子を作製した [Fig. 1 (b)]。スリットを通して線状にした Nd:YAG レーザーの第二次高調波 (波長 532 nm) を結晶平面に垂直に照射して結晶を励起した [Fig. 1 (b)]。ND フィルターを組み合わせることで励起光強度を決め、回折格子の溝方向に沿って被照射位置を移動させて導波路長を変えながら (97–184 μm) 発光スペクトルを測定した。励起光強度を変えて (1.8–3.3 mJ/cm^2) 測定を繰り返した。

【結果】

Fig. 2 (a) は幾つかの導波路長における、発光ピーク強度の励起光強度依存性を示す。導波路長 124–184 μm の範囲で、レーザー発振が観測された。そのうち導波路長 124–160 μm の範囲で、レーザー発振前後のピーク強度の対数を励起光強度に対してそれぞれ直線でフィットし、交点から発振閾値を決めた。それらを導波路長に対してプロットしたところ、発振閾値は導波路長の増加に伴い低下した [Fig. 2 (b)]。

【参考文献】

[1] E. M. Calzado et al., *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 223303 (2012).

[2] Y. Inada et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60**, 120901 (2021).

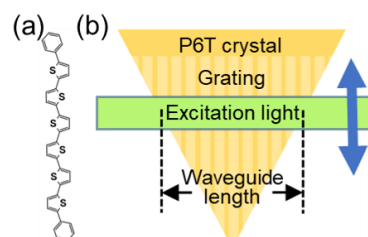


Figure 1. (a) Structural formula of P6T. (b) Schematic diagram of the emission measurement of the P6T crystal under photo pump at various waveguide lengths.

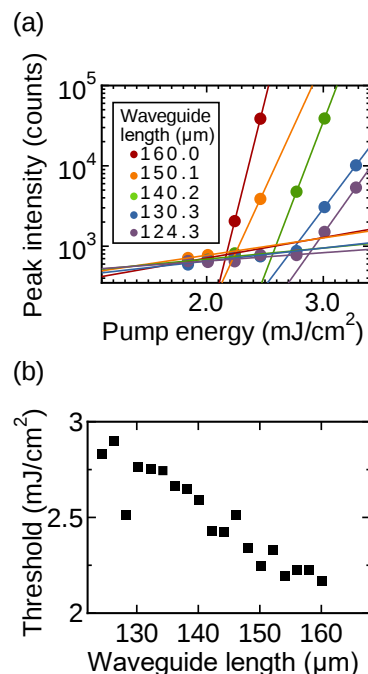


Figure 2. (a) Pump energy dependences of the emission peak intensity at several waveguide lengths. All dependences are not shown here to enhance visibility. (b) Waveguide length dependence of the lasing threshold. Each threshold was estimated from the intersection of the fitting lines for each dataset.

フォトクロミック結晶における光異性化過程の走査トンネル分光計測 Scanning Tunneling Spectroscopy in photoisomerization process of photochromic crystal

山梨大工¹, 龍谷大理工², 東大情報理工³ ○(M1)堀江 龍斗¹, 内山 和治¹,
内田 欣吾², 成瀬 誠³, 堀 裕和¹

Univ. of Yamanashi¹, Ryukoku Univ.², The Univ. of Tokyo³, °Ryuto Horie¹, Kazuharu Uchiyama¹,
Kingo Uchida², Makoto Naruse³, Hirokazu Hori¹

E-mail: g23tz019@yamanashi.ac.jp

ジアリールエテンからなるフォトクロミック結晶のナノ光異性化に着目し、動的記憶構造としての特性評価と応用について研究している。着色結晶に可視波長の光近接場入力を加えると局所的な光異性化と機械的歪みの競合によって、ナノ光異性化反応の連鎖現象が生じることを明らかにした[1]。結晶の光異性化現象の評価・応用の新手法として、走査トンネル分光法による電子的計測に着目した。光異性化過程の計測は通常透過光計測を介して行われるが、光異性化が同時進行するため破壊的な計測となる。一方、光照射を伴わない電子特性計測でナノ光異性化を評価できれば、光異性化構造を保存した計測が可能になる。また、電子特性の光異性化による制御は、光電融合コンピュータの基本ブロックとなると期待される。

ジアリールエテンの微結晶を作製し、走査型トンネル顕微鏡(STM)を用いて電流電圧特性(I-V特性)の計測を行った。最初に UV 光により結晶を着色し I-V 特性を計測し、つづけて可視光を一定時間照射し透明化が進行する度に I-V 特性を計測し、光異性化に伴う電子特性変化を調べた。バイアス電圧 2 V でトンネル電流 1 nA の STM フィードバックを基準とすると、透明状態は低バイアス電圧領域に比較的高い電子状態密度を有することが明らかになった。同測定を連続して行い異性化評価の再現性を検証した。また、I-V 特性の計測に比べて高速化が期待できる特定のバイアス電圧近傍での微小交流電圧印加による微分伝導度計測を行い、2次元アレイ状での計測を異性化に合わせて多数回行う基盤を確立した。

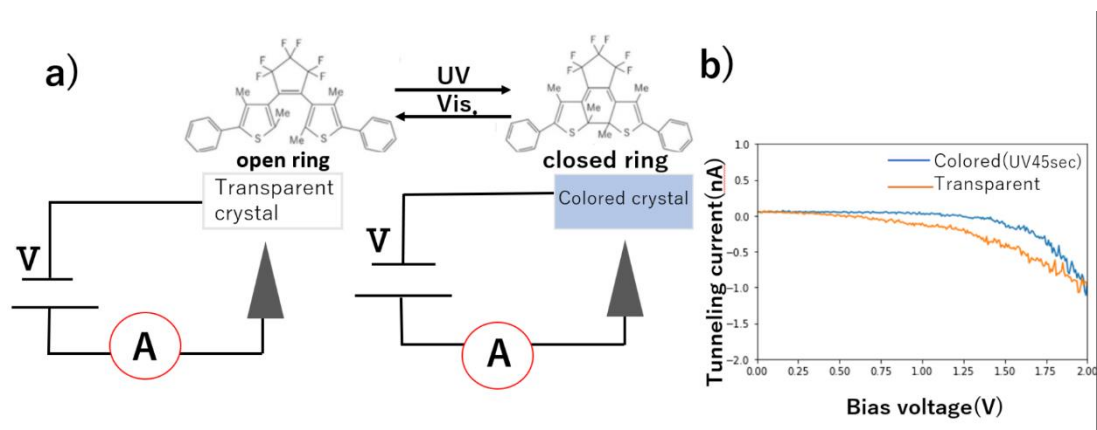


Fig. 1 a: Schematics of tunneling current measurements for photoisomerization in photochromic crystal. b: Tunneling current spectroscopy in photoisomerization process.

[1] K. Uchiyama, et al., *Scientific Reports* **12**, 19008 (2022)

二酸化バナジウムナノ粒子における絶縁体－金属相転移の一粒子観測

Observation of insulator-to-metal transitions for individual VO₂ nanoparticles

分子研¹, 豊田工大² ○西田 純¹, 西川 和孝², 渡邊 佳英², 熊谷 崇¹

Inst. Mol. Sci.¹, Toyota Tech. Inst.², ○Jun Nishida¹, Kazutaka Nishikawa², Yoshihide Watanabe²,

Takashi Kumagai¹

E-mail: nishida@ims.ac.jp

二酸化バナジウム(VO₂)は 65°C付近で絶縁体－金属相転移を起こすが、そのナノ粒子の相転移は薄膜やマイクロ単結晶における挙動とは大きく異なり、40°Cを超える大きなヒステリシスを示す。これは粒子体積が小さいことから、粒子中の核形成サイトの絶対個数が少ないことによるものと考えられている。一方で反射率測定・X線回折測定・ラマン散乱などのアンサンブル平均の測定では 10°Cにわたるなだらかな転移が観測されるが、その微視的な機構は明らかにされていなかった。そこで物質の局所的な光学伝導度に敏感な赤外散乱走査型近接場光顕微鏡(IR s-SNOM)に基づいて、VO₂ナノ粒子の絶縁体－金属相転移を一粒子毎に観測した(図 1a)。バナジウム薄膜を酸化して得られる直径 200 nm 以下のナノ粒子は室温では全て絶縁体である(図 1b)。温度を上げていくにつれて、各々の粒子が異なる温度で転移を示し、90°Cでは全ての粒子が金属に転移した(図 1c)。このことから、粒子毎の転移温度の不均一性がアンサンブル平均測定におけるなだらかな転移の起源であること、及び各粒子の転移は狭い温度幅で起こることを示した。また、粒子体積毎に転移温度を解析することで、大きな粒子ほど低温で転移しやすい傾向があることが分かった。さらに同一粒子の相転移を繰り返し降温・昇温サイクルで観測することで、サイクル毎に転移温度にばらつきがあることが明らかとなった。これらは VO₂ナノ粒子における確率的核形成プロセスを直接反映したものであり、VO₂ナノデバイスの動作に直接関連するのみならず、ナノスケールの準安定相の性質を理解・制御するためのモデル系となりうる。

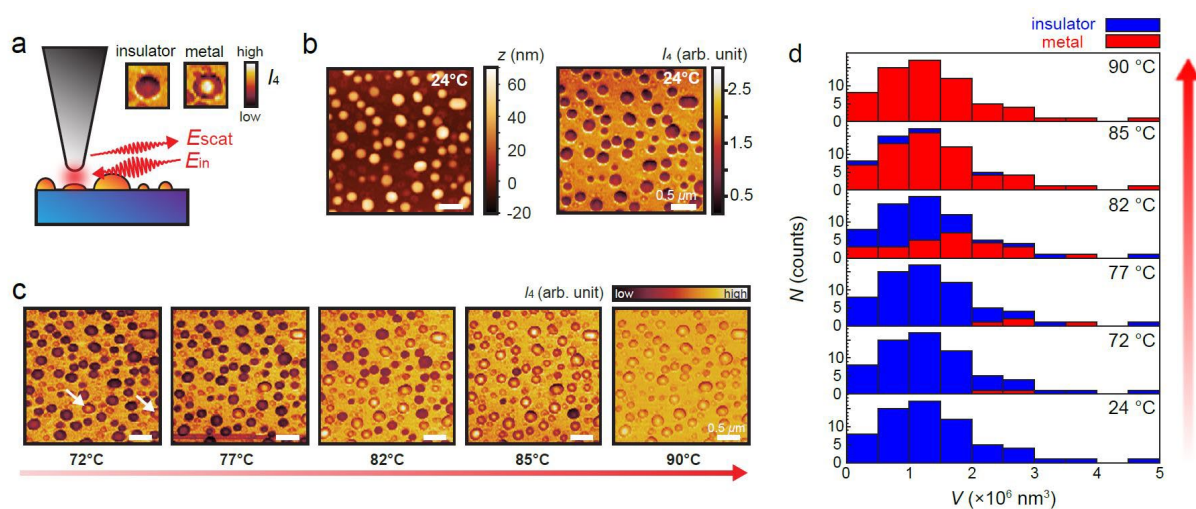


Figure 1. (a) IR s-SNOM scattering amplitudes for insulator and metallic nanoparticles. (b) Topography (left) and IR s-SNOM imaging (right) at room temperature. (c) Temperature-dependent IR s-SNOM imaging. (d) Size distributions of insulator/metallic nanoparticles at each temperature. Scale bar – 500 nm.

偏光可変光誘起力顕微鏡による銅フタロシアニン単分子膜の観察

Observation of CuPc monolayer

by Polarization-Tunable Photoinduced Force Microscopy

阪大院工 ○(M2) 山田 香昭, 菅原 康弘

Graduate School of Engineering, Osaka Univ., ○Takaaki Yamada, Yasuhiro Sugawara

E-mail: t.yamada.1031@ap.eng.osaka-u.ac.jp

【背景】光誘起力顕微鏡(PiFM)は、原子間力顕微鏡(AFM)をベースとし、探針-試料間への光照射で生じる局在場光の勾配を力として検出する装置である。そのため PiFM は、物質の光学特性を高分解能で測定することができる。我々は、これまで、光照射によるカンチレバーの光熱励振の影響を除去できる力検出方式としてヘテロダイン FM 方式を開発し[1-3]、また、試料表面の水分子層の影響を除去するとともに試料表面上の分子の表面拡散を防ぐために、超高真空・低温環境下で動作する PiFM[4]を開発し、光誘起力を高感度・高分解能に測定できるようにしてきた。最近、我々は、PiFM の応用として照射するレーザーの偏光状態を操作できる光学系を開発した。ここでは、この装置を用いて銅フタロシアニン分子を観察した結果について報告する。

【実験と結果】測定試料としては、基板温度 78K の Ag(100)表面に銅フタロシアニン分子を蒸着した後、200℃で 60 分加熱することで作製した銅フタロシアニン単分子膜を用いた。また、カンチレバーとしては、市販の金コート Si 探針を Ar スパッタリングしたものを用いた。レーザー光の偏光を P 偏光/および S 偏光としたときの銅フタロシアニンの光誘起力像を、それぞれ、図 2 および図 3 に示す。図から分かるように、P 偏光・S 偏光のどちらを用いても銅フタロシアニン単分子膜の PiFM 像を分子分解能で測定することができた。発表当日には、取得した画像のコントラストに関する情報を発表する予定である。

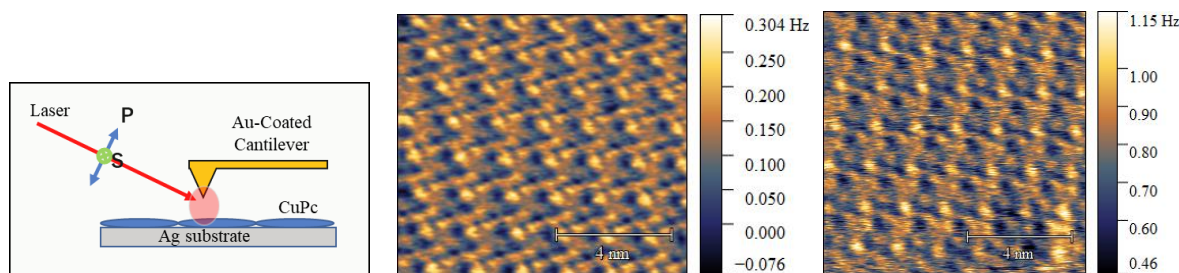


Fig.1 Polarization-Tunable PiFM.

Fig2. P-Polarization PiFM
image of CuPc monolayer.Fig3. S-Polarization PiFM
image of CuPc monolayer.

【参考文献】

- [1] J. Yamanishi, Y. Naitoh, Y. J. Li and Y. Sugawara, *Appl. Phys. Lett.*, **110**, 123102 (2017).
- [2] J. Yamanishi, Y. Naitoh, Y. J. Li and Y. Sugawara, *Phys. Rev. Appl.*, **9**, 024031 (2018).
- [3] J. Yamanishi, Y. Sugawara et al., *Nature communications*, **12**, 3865 (2021).
- [4] T. Yamamoto, Y. Sugawara, *Rev. Sci. Instrum.*, **94**, 033702(2023).