

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

📅 Wed. Sep 18, 2024 9:00 AM - 11:45 AM JST | Wed. Sep 18, 2024 12:00 AM - 2:45 AM UTC 🏢 A33 (TOKI MESSE 3F)

### [18a-A33-1~10] 3.11 Nanoscale optical science and near-field optics

Yusuke Kajihara(Univ. of Tokyo), Toshiyuki Kodama(Tohoku Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[18a-A33-1]

Fabrication and Demonstration of Single-Layer Surface-Normal Modulator using Organic Electro-Optic Material and Dimerized Metallic Grating

○Koto Ariu<sup>1</sup>, Go Soma<sup>1</sup>, Takuo Tanemura<sup>1</sup>, Yoshiaki Nakano<sup>1</sup> (1.The Univ. of Tokyo)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[18a-A33-2]

Photoisomerization Chain in Photochromic Microcrystals Array induced by Local Photoexcitation

○Ryuto Horie<sup>1</sup>, Kazuharu Uchiyama<sup>1</sup>, Kingo Uchida<sup>2</sup>, Hirokazu Hori<sup>1</sup> (1.Univ. of Yamanashi, 2.Ryukoku Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[18a-A33-3]

Investigation of controllable quasi-BIC modes in magneto-photonic crystals under external magnetic field

○Siyuan Gao<sup>1</sup>, Satoshi Iwamoto<sup>2</sup>, Yasutomo Ota<sup>1</sup> (1.Keio University, 2.RCAST, UTokyo)

◆ English Presentation

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[18a-A33-4]

Thickness dependence of thermally excited near fields on metal thin films

○KuanTing Lin<sup>1</sup>, Yinghui Liang<sup>1</sup>, Yusuke Kajihara<sup>1</sup> (1.Univ. Tokyo)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[18a-A33-5]

Partial erasure of nano-photoisomerization memory in photochromic crystals

○(D)Kohei Tsuchiyama<sup>1,2</sup>, Ryoichi Horisaki<sup>1</sup>, Kingo Uchida<sup>3</sup>, Hirokazu Hori<sup>4</sup>, Kazuharu Uchiyama<sup>4</sup> (1.Univ. of Tokyo, 2.JSPS Research Fellow, 3.Ryukoku Univ., 4.Univ. of Yamanashi)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[18a-A33-6]

Single Cell-Free DNA Detection Employing Metasurface Biosensors

○Masanobu Iwanaga<sup>1</sup>, Takashi Hironaka<sup>1</sup>, Naoki Ikeda<sup>1</sup>, Takehito Sugasawa<sup>2</sup>, Kazuhiro Takekoshi<sup>2</sup> (1.NIMS, 2.Univ. Tsukuba)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[18a-A33-7]

---

**SPRSensor with Prism Placed on the Line Connecting Light Source and Detector**

○Daehyun Kim<sup>1</sup>, Masato Tsujiguchi<sup>2</sup>, Naoki Fujita<sup>2</sup>, Kotaro Kajikawa<sup>1</sup> (1.Titech, 2.Nippon Electric Glass)

---

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[18a-A33-8]

**Microwave Frequency Conversion using Time-varying Magnetic Metamaterials**

○Toshiyuki Kodama<sup>1</sup>, Nobuaki Kikuchi<sup>2</sup>, Satoshi Okamoto<sup>3,4</sup>, Seigo Ohno<sup>5</sup>, Satoshi Tomita<sup>1,5</sup> (1.IEHE, Tohoku Univ., 2.Aita Univ., 3.IMRAM, Tohoku Univ., 4.CSIS, Tohoku Univ., 5.Dept. of Phys., Tohoku Univ.)

---

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[18a-A33-9]

**Background Suppressed IR Spectroscopy of Gas Molecules using Double Cylinder Metamaterial Absorber.**

○(M2)Kentarō Ito<sup>1,2</sup>, Takuo Tanaka<sup>1,2</sup> (1.Gakushuin Univ, 2.RIKEN)

---

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[18a-A33-10]

**Independent modulation of phase, intensity, and polarization by double-phase dielectric metasurface**

○Hiroto Omura<sup>1</sup>, Soki Hirayama<sup>1</sup>, Ryushi Fujimura<sup>2,1</sup>, Tsutomu Shimura<sup>1</sup> (1.IIS, Univ. Tokyo, 2.Utsunomiya Univ.)

---

# 有機電気光学材料と単層二量化金属格子を用いた垂直入射型光変調器の試作と実証 Fabrication and Demonstration of Single-Layer Surface-Normal Modulator using Organic Electro-Optic Material and Dimerized Metallic Grating

○(M2)蟻生高人<sup>1</sup>, 相馬豪<sup>1</sup>, 種村拓夫<sup>1</sup>, 中野義昭<sup>1</sup> (<sup>1</sup>東大院・工)

○Koto Ariu<sup>1</sup>, Go Soma<sup>1</sup>, Takuo Tanemura<sup>1</sup>, and Yoshiaki Nakano<sup>1</sup> (<sup>1</sup>The Univ. of Tokyo)

E-mail: koto.ariu@tlab.t.u-tokyo.ac.jp

## 1. 背景

超並列光通信、高密度インターコネク、光演算等への応用に向けて、高速かつ大規模な空間光変調器の実現が求められている。GHz を超える超高速動作が可能な有機電気光学(OEO: organic electro-optic)材料を用いた垂直入射型の光変調器は二次元集積化において有望であり、各種構造が提案・実証されている[1-4]。相互作用長が短い垂直入射型変調器では高効率化のために光共振器の利用が重要であるが、従来の共振器構造では OEO 材料塗布後の種々のプロセスにより材料特性が劣化し、本来の性能を十分に発揮できないという問題があった。今回、単層の金属格子上に OEO 材料を塗布しただけの簡易な構造に二量化手法を導入することで[5]、高 Q 値の共振型変調器を試作し、変調特性を実証した。

## 2. 構成と原理

Fig. 1(a), (b)に素子の断面構造と模式図を、Fig. 1(c)に作製したチップ写真と走査型電子顕微鏡像を示す。石英 (SiO<sub>2</sub>) 基板上に金 (Au) のサブ波長格子を形成し、OEO 材料 (JRD1[6]) を塗布した。Au 格子の間隔に摂動を加えた二量化構造を導入することで、格子に対し電界成分が垂直な光を入射すると、高い Q 値の共振が得られる。櫛歯型の Au 電極間に電圧を印加し、ポッケルス効果により共振波長をシフトさせることで、反射光の強度が高速に変調される。周期  $\Lambda=950$  nm、Au 格子厚  $d_1=50$  nm、OEO 膜厚  $d_2=500$  nm、摂動係数  $\delta=0.03$ 、OEO 材料屈折率  $n_{\text{OEO}}=1.84$  のとき、共振波長 1546 nm における光電界分布を Fig. 1(d)に示す。材料内で光電界と変調電界が強く重なり、効果的な変調が可能となる。

## 3. 測定結果

Au 電極間に印加する電圧を段階的に変えたときの反射スペクトルの測定結果を Fig. 1(e)、共振波長付近の拡大図を Fig. 1(f)に示す。比較のため、0 V のときの有限差分時間領域法による解析結果も示す。数値解析結果とよく一致し、600 以上の Q 値の共振を波長 1407 nm において得た。ポッケルス効果に基づく極性のある波長シフトが観測され、波長 1407.5 nm において 10%を超える消光比を実証した。今後 OEO 材料のポーリング条件の最適化を行うことで、高効率化が期待される。

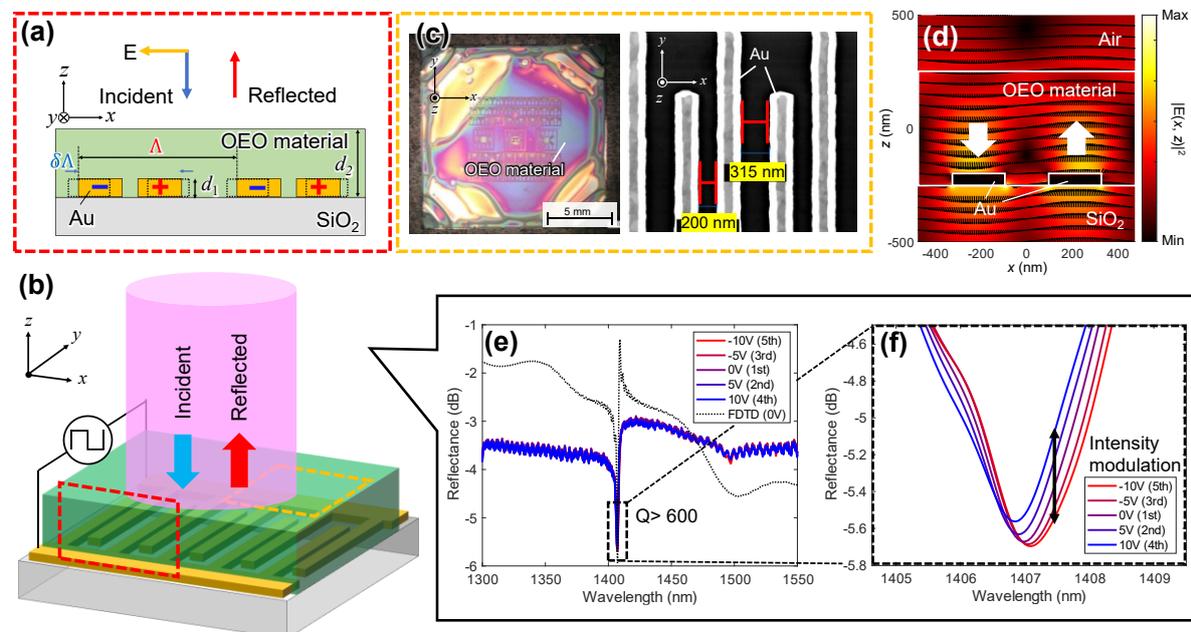


Fig. 1 (a) Cross-sectional and (b) schematic view of the modulator. (c) Photograph and a scanning electron microscopy image of the fabricated chip. (d) Electric field profile of the resonance at 1546 nm. (e) Measured and simulated reflection spectra under modulation ( $\Lambda=920$  nm,  $d_1=35$  nm,  $d_2=370$  nm,  $\delta=0.03$ ) (f) Magnified spectra around 1407 nm.

謝辞: 本研究の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究 (#03601、#08801)により実施された。  
参考文献: [1] Y. Kosugi *et al.*, *IEICE Electronics Express*, **13**, 1 (2016). [2] I. Benea-Chelmus *et al.*, *Nat. Commun.* **12**, 5928 (2021). [3] J. Zhang *et al.*, *APL Photon.*, **8**, 12, p. 121304 (2023). [4] H. Miyano *et al.*, *OECC/PSC*, TuD3-2 (2022). [5] Z. Li *et al.*, *Phys. Rev. B*, **106**, 125101 (2022). [6] W. Jin *et al.*, *J. Mater. Chem. C*, **4**, 3119-3124 (2016).

## フォトクロミック微結晶アレイ構造試料の 局所光励起による光異性化連鎖反応

### Photoisomerization Chain in Photochromic Microcrystals Array induced by Local Photoexcitation

山梨大工<sup>1</sup>, 龍谷大先端理工<sup>2</sup> ◯(M2)堀江 龍斗<sup>1</sup>, 内山 和治<sup>1</sup>, 内田 欣吾<sup>2</sup>, 堀 裕和<sup>1</sup>

Univ. of Yamanashi<sup>1</sup>, Ryukoku Univ.<sup>2</sup>, ◯Ryuto Horie<sup>1</sup>, Kazuharu Uchiyama<sup>1</sup>,

Kingo Uchida<sup>2</sup>, Hirokazu Hori<sup>1</sup>

E-mail: g23tz019@yamanashi.ac.jp

我々は、ジアリールエテンのフォトクロミック結晶におけるナノスケールでの光異性化現象に注目し、その動的記憶構造の特性評価及び応用可能性を探求している。近接場光励起を起点とする局所的な光異性化と機械的歪み生成の競合による連鎖的な光異性化反応を観察した[1]。

本研究では、単結晶内の3次元光異性化過程を2次元に展開し、偏光及び階層性の効果を加味した機能構造を形成することを目指し、近接場領域内に微結晶が隣接するアレイ構造試料を形成し、微結晶を局所励起した際の隣接微結晶間の選択的連鎖反応の測定を行った。経路形成過程を詳細に計測するために、透過近接場光計測の代わりに、光照射を伴わない局所電子状態計測（走査型トンネル分光法、STS）を採用した。（図1）。

直径約 100 nm のジアリールエテン微結晶を近接場光領域で近接させたアレイ構造試料を作製した。UV 光により全ての微結晶を着色状態にした後に、一つの微結晶に金コートしたプローブを近接させ、可視光を短時間照射してプローブ先端の電場増強により局所的な光異性化を行った。局所励起点付近の微結晶アレイについて、光異性化前後の局所電子状態を STS によって観測し、光異性化した微結晶が新たな近接場光源となって隣接微結晶の異性化を生む過程を計測した。

今後は、偏光特性に伴う光異性化経路の変化について検証し、さらにナノスケールでの光電融合デバイスへの応用を検討する。

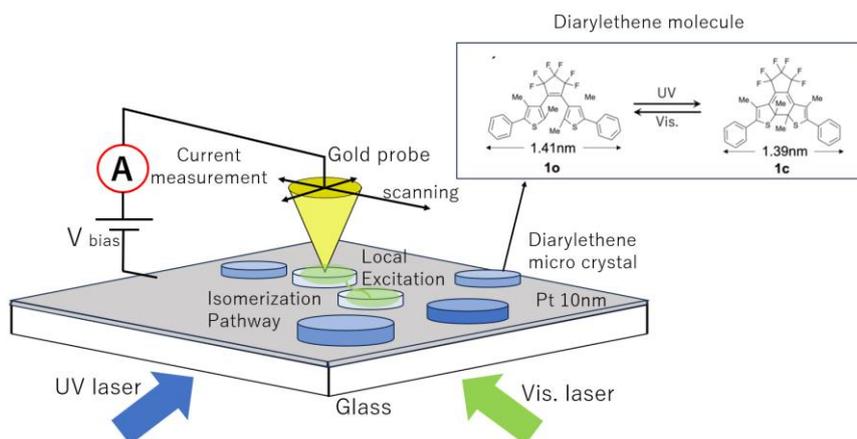


Fig.1 Scanning tunneling spectroscopy on locally photoisomerized photochromic microcrystals array.

[1] Y. Arakawa, et al., *Communications Materials* **5**, 23 (2024)

## 磁気フォトニック結晶における外部磁場下で制御可能な Quasi-BIC モードの検討

### Investigation of tunable quasi-BIC modes in magneto-photonic crystals under external magnetic field

慶應理工<sup>1</sup>, 東大先端研<sup>1</sup>, <sup>○</sup>高 思源<sup>1</sup>, 岩本 敏<sup>2</sup>, 太田 泰友<sup>1</sup>

Keio Univ.<sup>1</sup>, RCAST, the Univ. of Tokyo.<sup>2</sup> <sup>○</sup>Siyuan Gao<sup>1</sup>, Satoshi Iwamoto<sup>2</sup>, Yasutomo Ota<sup>1</sup>

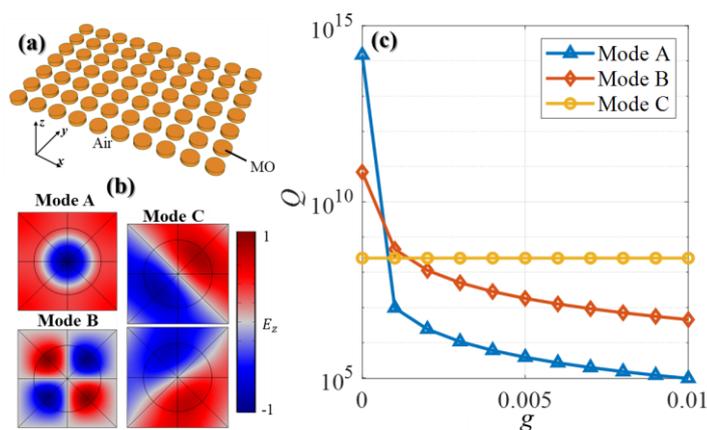
Email: gaosy@keio.jp

Bound states in the continuum (BIC) have garnered significant attention in photonics due to their ability to confine light without radiative losses [1]. Symmetry-protected BIC modes in photonic crystals (PhCs) are found at high symmetric points in momentum space and collapsed down to quasi-BIC states after breaking certain symmetry in the structure [2]. Such transitions to quasi-BIC modes can be induced by various types of perturbation to PhCs, such as phase-change in the host material [3], electric current [4] and heat [5]. However, these approaches often accompany large resonance frequency shifts, additional losses and slow response. An external stimulus that induces quasi-BIC modes with less side effect and faster response will be promising for broad applications. In this correspondence, we explore the influence of external magnetic field on a 2D magneto-PhC that supports BIC modes under zero magnetic field. We found that the magnetic field turns some BIC modes to quasi-BIC modes and controls their Q factors.

Figure 1(a) shows the PhC structure investigated in this work, which is a square array of two-dimensional photonic crystal with  $C_{4v}$  symmetry, composed of a magneto-optical material. We numerically analyzed the structure with FEM simulations. First, we identified BIC modes under zero magnetic field, as shown in Fig. 1(b). Mode A and Mode B are BIC modes located at  $\Gamma$  point, satisfying  $C_{4v}$  symmetry. Mode C comprises two degenerate BIC modes found at K point, oscillating orthogonally to each other, and each satisfying  $C_{2v}$  symmetry. Applying magnetic field along  $x$  axis ( $B_x$ ) introduces non-zero off-diagonal components in the permittivity tensor of the MO material, represented as  $\bar{\epsilon} = [\epsilon, 0, 0; 0, \epsilon, ig; 0, -ig, \epsilon]$ . With  $B_x$ , significant decreases of  $Q$  were observed for mode A and B with  $C_{4v}$  symmetry as shown in Fig. 1(c). This phenomenon could be attributed to the magnetic field induced breaking of spatial symmetry for the wavefunction of the BIC modes, leading to their coupling to free space continuum. Notably, mode C remains unaffected by the in-plane magnetic field, presumably due to the nature of its wavefunction. Note that none of the BIC modes was transformed to quasi-BIC modes with magnetic field along  $z$  direction. A more detailed discussion will be extended in the presentation.

**Acknowledgements:** This work was supported by JST FOREST (JPMJFR213F), JST CREST (JPMJCR19T1) and KAKENHI (24K7582, 22H00298, 22H01994, 22K18989), Iketani Foundation, Nippon Sheet Glass Foundation, Mizuho Foundation for the Promotion of Science.

**References:** [1] D. C. Marinica, et al., Phys. Rev. Lett. 100, 183902 (2008). [2] A. C. Overvig, et al., Phys. Rev. B 102, 035434 (2020). [3] M. Wuttig, et al., Nature Photonics 11, 465–476 (2017). [4] H. Zhang, et al., ACS Photonics 6 (9), 2205–2212 (2019). [5] R. Aleksandrova, et al., Langmuir 30 (39), 11792–11801 (2014).



**Figure 1.** (a) Schematic of the investigated magneto-PhC. (b) Electric field ( $E_z$ ) distribution of the three BIC modes investigated. (c)  $Q$  factors extracted from the eigenmode simulations, with increasing off-diagonal component in the permittivity tensor, corresponding to the increase of  $B_x$ .

## 金属薄膜上の熱励起近接場の膜厚依存性

### Thickness dependence of thermally excited near fields on metal thin films

東大生研<sup>○</sup>林冠廷, 梁穎慧, 梶原優介

Univ. Tokyo, Kuan-Ting Lin, Yinghui Liang, and Yusuke Kajihara

E-mail: [kuanting@iis.u-tokyo.ac.jp](mailto:kuanting@iis.u-tokyo.ac.jp)

Reducing the size of electronic devices boosts the number of components on a chip, thereby improving computing power and speed. According to theory, long-wave infrared (LWIR) electromagnetic (EM) waves, with wavelengths of 10–25  $\mu\text{m}$  are generated by free electrons and extend up to about 100 nm on material surfaces [1]. When the separation between materials, particularly metals, is less than 100 nm, LWIR evanescent waves greatly enhance heat transfer. As metal thickness decreases below 20 nm, properties like conductivity and dielectric function change. However, precisely measuring the intensity of these thermal evanescent waves in such thin films is quite challenging. Our research investigates the correlation between the intensity of thermal evanescent waves and the thickness of ultra-thin metal films using a passive LWIR scattering-type scanning near-field optical microscope (s-SNOM) [2] and theoretical calculation.

Figure 1(a) illustrates the schematic view of the near-field detection, where a tungsten probe tip scatters the thermal EM waves on the Au film, which are then collected by a confocal microscope of the LWIR s-SNOM. Six different thicknesses of Au thin films ( $t = 6.5, 8.3, 11.7, 14.3, 19.3,$  and  $50.0$  nm) were prepared using ion-beam sputtering on  $\text{SiO}_2$  substrates. Fig. 1(b) displays the near-field signals for thicknesses of 50.0 and 8.3 nm, selected for demonstration purposes. Scanning was conducted by moving the tip across the  $\text{SiO}_2/\text{Au}$  boundaries at room temperature, with a scan speed of 1 s per 100 nm step. The detected near-field signals on the Au films are attributed to EM evanescent waves induced by the thermal motion of conduction electrons [3]. Averages of 60-point data were obtained from near-field signals on Au thin films of different thicknesses, providing insights into the relationship between near-field intensity and film thickness (Fig. 1(c)). Significantly decreased near-field signals are observed when the thickness is below 15 nm, with cracks appearing in the thin films when the thickness is less than 11.7 nm, limiting the movement of conduction electrons due to the crack structure. In this study, we present a theoretical model to match the experimental results.

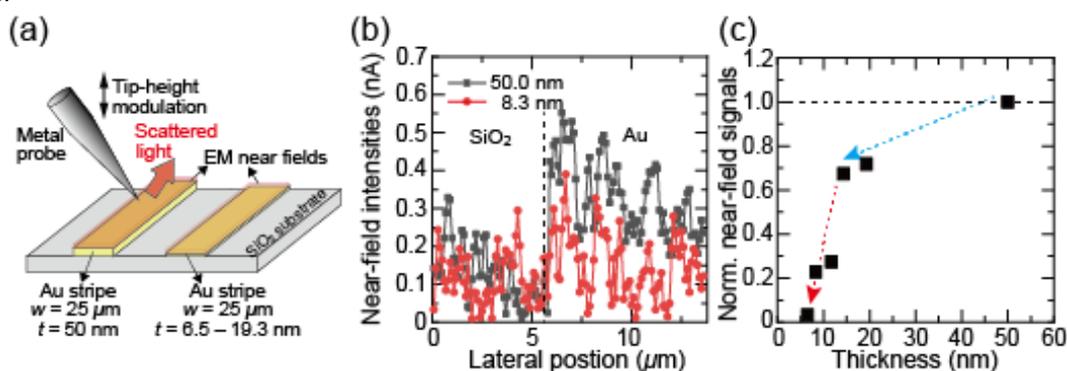


Fig. 1 (a) Schematic view of the near-field detection on ultra-thin Au films deposited on a  $\text{SiO}_2$  substrate. (b) Near-field intensity profiles obtained from Au/ $\text{SiO}_2$  samples. (c) Averages of 60-point near-field intensity for various Au thicknesses.

#### Reference:

- [1] K. Joulain, J.-P. Mulet, F. Marquier, R. Carminati, and J.-J. Greffet, *Surf. Sci. Rep.*, **57**, pp. 59–112 (2005)
- [2] K. Lin *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **88**, p013706 (2017).
- [3] S. Komiyama, *Journal of Applied Physics*, **125**, p010901 (2019)

# フォトクロミック結晶におけるナノ光記憶の部分的消去と再構成

## Partial erasure of nano-photoisomerization memory in photochromic crystals

○(DC) 土山 晃平<sup>1,2</sup>, 堀崎 遼一<sup>1</sup>, 内田 欣吾<sup>3</sup>, 堀 裕和<sup>4</sup>, 内山 和治<sup>4</sup>

1. 東大院情理, 2. 学振特別研究員(DC1), 3. 龍谷大理工, 4. 山梨大工

○(DC) Kohei Tsuchiyama<sup>1,2</sup>, Ryoichi Horisaki<sup>1</sup>, Kingo Uchida<sup>3</sup>, Hirokazu Hori<sup>4</sup>, Kazuharu Uchiyama<sup>4</sup>

1. Univ. of Tokyo, 2. JSPS Research Fellow(DC1), 3. Ryukoku Univ., 4. Univ. of Yamanashi

E-mail: kohei-tsuchiyama655@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### 緒言

半導体の微細加工技術の進展は近年の情報処理技術の発展を牽引してきた。しかし、物理的限界に直面し、成長が停滞することが懸念されている(ムーアの法則の破綻)。そこで、半導体などの電子系による計算の表現に限らず、他の物理系の特性を生かし、計算を実現する手法に注意が向けられている。特に、光計算と呼ばれる計算の実現に光を用いる手法は、高速性や低エネルギー性の観点から、有力な手法の一つとして活発な研究がされている[1]。

しかし、光計算用の光学デバイスの未発達性から、現在までに実現された計算機能は限られており、従来の電子系計算機と比較して能力に大きな制約がある。そのため、さらなる光計算用の機能デバイスの開発とそれに伴う高度な機能の実現が期待されている[2]。

実現が望まれる機能の一つとして光情報の記憶がある。しかし、光情報を長時間かつ高密度に保存することは、光の回折限界により技術的に難しい課題である。これに対し、近接場光を用いることで、フォトクロミックジアリアルエテン結晶にナノメートルスケールで情報を記憶させる手法が提案された[3]。フォトクロミックジアリアルエテン分子は異なる周波数の光照射により可逆的な光異性化を示す。この先行研究[3]においては、経路を追加形成する場合に、ナノメートルスケールの情報が排他的に保存されることが実験により示され、情報の記憶についての特性が明らかにされた。さらに、情報の消去を伴う異性化特性に着目し、消去の有無が光相関に与える影響が計測された[4]。しかし、この計測では、励起点の固定と初期化ができていなかった。これは異なる条件での消去特性の比較のために欠かせない。

本研究では、フォトクロミック結晶の部分的な記憶消去特性についてさらなる検討を行う。具体的には、光励起点を固定した上で、記憶の消去に対応する UV 光の照射の時間を変化させ、さまざまな記憶の消去の度合いを調整する。また、各測定の間初期化を行う。そして、各測定で得られた構造変化について比較検討を行う。

### 方法と結果

本研究では、上下ダブルプローブ走査型近接場光学顕微鏡 (SNOM) を用いた。まず、着色状態の試料の上面から局所光励起を行い、光異性化により経路形成を行う。そして、経路を通過した光子を試料下面に配したファイバースコープにより観測することで、経路の構造を SNOM 像として取得した。(Fig.1(a,b 右))

初期経路を形成し観測した後、同測定領域において UV 光を 0 分、10 分、15 分、30 分照射し経路消去を行う。各消去プロセスのあとに再

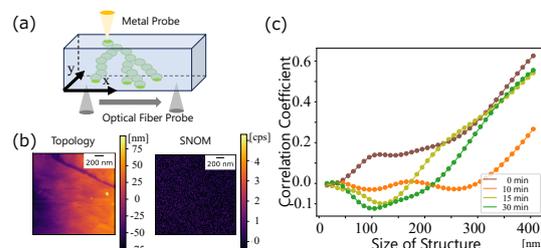


Fig. 1 (a) Saving nano-optical information and measurement with scanning nano-field optical microscope (SNOM). (b) Results of measurements. Left: Surface structure image by scanning tunnelling microscopy (STM). Right: Optical near-field intensity image by SNOM. (c) Change in correlation coefficient of optical near-field structure sizes in SNOM images before and after partial erasure.

び経路の再形成を伴う観測を行った。ただし、各消去実験の間に UV 光を長時間(30 分以上)照射し、試料を再び着色し、初期化を行った。Fig. 1(b)は測定結果の例である。

部分消去操作を行う前後の SNOM 像について、SNOM 像の各空間周波数に関する相関を求めた (Fig. 1(c))。異なる時間部分消去を行った場合に、どの程度の大きさの構造が消去されるかを表現している。構造が大きくなるにつれて、いずれの測定条件においても相関係数の値は大きくなった。これは大きい構造が波長オーダーの干渉パターンに由来することを示している。また、消去を全く行わない(0分/茶)の場合に対し、他の場合(10,15,30分/橙,薄黄,緑)は、特に微細な構造において相関係数が小さくなる傾向を示した。これは照射時間の変更により部分的な消去が実現されていることを示している。さらに、近接場光構造の大きさが約 150nm より小さい場合に相関係数が負となる領域が存在した。これは近接場光成分に対応するナノメートルスケール領域であり、消去前の構造が消去後の構造に影響を与えていることを示している。これは光異性化による経路消去にかかわらず、ナノサイズの構造情報が何らかの形(ひずみ等)で残っていることを示唆している。

### 結論

本研究では、フォトクロミック結晶における記憶消去の実現と検討に取り組んだ。ナノ光記憶領域において、履歴を伴う特異な振る舞いが見られた。また、今後の課題として、ナノメートルスケールの情報の残留・消失メカニズムの解明が挙げられる。

### 参考文献

- [1] K. Kitayama et al., APL Photonics, 4, 090901(2019).
- [2] D. A. B. Miller, Journal of Lightwave Technology, 35, 3, 346–396 (2017).
- [3] Y. Arakawa et al., Commun Mater, 5, 23 (2024).
- [4] Y. Arakawa et al., 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 21p-A404-17 (2022).

## メタ表面バイオセンサによる単一セルフリーDNA 検出

### Single Cell-Free DNA Detection Employing Metasurface Biosensors

物材機構<sup>1</sup>, 筑波大医<sup>2</sup> ○岩長 祐伸<sup>1</sup>, 弘中 孝史<sup>1</sup>, 池田 直樹<sup>1</sup>, 菅澤 威仁<sup>2</sup>, 竹越 一博<sup>2</sup>

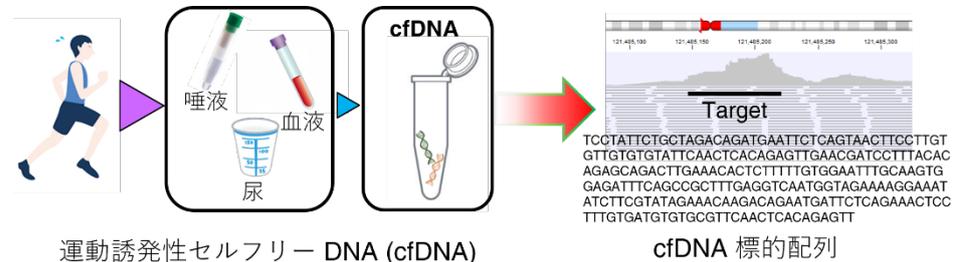
NIMS<sup>1</sup>, Univ. Tsukuba.<sup>2</sup>, °Masanobu Iwanaga<sup>1</sup>, Takashi Hironaka<sup>1</sup>, Naoki Ikeda<sup>1</sup>,

Takehito Sugasawa<sup>2</sup>, Kazuhiro Takekoshi<sup>2</sup>

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

多様な検出方法によるバイオセンサ研究が行われて久しい。酵素の着色反応を利用した検出法や光学スペクトルの共鳴シフト検出、蛍光標識を活用した検出法、電気化学的な検出法など枚挙に暇がない。それぞれの手法の高感度化にも様々な工夫が行われ、光信号の分画計測、蛍光信号の共鳴増強、化学増幅など多岐にわたる。DNA や RNA といった核酸検出の高感度化に関して、ポリメラーゼ連鎖反応 (PCR) 法がコロナ禍を経て広く知られるようになり、分画計測と組み合わせたデジタル PCR 法が核酸検出のゴールドスタンダードと現在みなされているが、その検出下限は約 10 copies/test である。通常の核酸検査として商業的に行われている定量 PCR 法は検出下限が 50 copies/test 前後であることが多い。

今回、メタ表面蛍光バイオセンサ [1-3] を用いて血液や唾液、尿に流出する DNA 断片であるセルフリーDNA (cfDNA) の検出を行った。cfDNA は極低濃度であることから、超高感度な検出が求められる対象である [4]。運動誘発性の cfDNA 配列 [5] を検出対象として、極低濃度域における実験を行った。図 1 に運動 (マラソン) 前後における検体採取 (左側)、次世代シーケンサーによる特異的な配列解析、同定 (右側) までを模式的に示している。図中の標的配列を対象として、短サイクルによる増幅反応を経て、メタ表面バ



**Figure 1.** Biopsy of practice-driven cfDNA. Left: Blood etc. was collected from marathon runners. Right: A specific DNA sequence was identified using a next-generation sequencer [5], which was the target in this study.

イオセンサシステムによって蛍光検出を行った。その結果、1 テスト液中に標的 cfDNA が 1 個と 0 個の場合を測り分ける究極的な検出性能に到達した [6]。これまで、この精度での単一 DNA 検出に成功した例を我々は認知していない。講演では、メタ表面バイオセンサを用いた単一 cfDNA 検出の詳細について述べる。

[1] M. Iwanaga, ACS Nano **14**, 17458 (2020).

[2] M. Iwanaga, Biosensors **11**, 33 (2021).

[3] M. Iwanaga, Biosensors **12**, 987 (2022).

[4] S. Cristiano, A. Leal, J. Phallen, J. Fiksel, V. Adleff, D. C. Bruhm, S. O. Jensen, J. E. Medina, C. Hruban, C. White, *et al.*, Nature **570**, 385 (2019).

[5] T. Sugasawa, S. Fujita, T. Kuji, N. Ishibashi, K. Tamai, Y. Kawakami, K. Takekoshi, Gene **12**, 676 (2021).

[6] M. Iwanaga, T. Hironaka, N. Ikeda, T. Sugasawa, and K. Takekoshi, Nano Lett. **23**, 5755 (2023).

## 光源と検出器を結ぶ軸上にプリズムを配置した表面プラズモン共鳴センサ

## SPR Sensor with Prism Placed on the Line Connecting Light Source and Detector

東工大<sup>1</sup>, 日本電気硝子<sup>2</sup> ○(M2) 金デヒョン<sup>1</sup>, 辻口 雅人<sup>2</sup>, 藤田 直樹<sup>2</sup>, 梶川 浩太郎<sup>1</sup>Tokyo Tech.<sup>1</sup>, Nippon Electric Glass<sup>2</sup>○(M2) Daehyun Kim<sup>1</sup>, Masato Tsujiguchi<sup>2</sup>, Naoki Fujita<sup>2</sup>, and Kotaro Kajikawa<sup>1</sup>

E-mail: kajikawa@ee.e.titech.ac.jp

図1(a)に示すクレッチマン配置を使った伝搬型の表面プラズモン共鳴 (Surface Plasmon Resonance: SPR) は、DNA やタンパク質等の生体由来分子のセンサに広く使われている。入射光は金薄膜が蒸着されたプリズム底面で反射し、そこでSPRが生じる。共鳴が生じる入射角 $\theta_r$ は、入射光の波長、プリズムの形状や屈折率、金薄膜の膜厚で決まる。一般に、入射角 $\theta$ の関数として反射光強度を測定するが、その際には、 $\theta-2\theta$ の精度の高い可動機構 (ゴニオメータ) が必要である。もし、図1(b)に示すように光源と検出器を結ぶ軸上にプリズムを配置し (「コリニア配置」と呼ぶ) SPRが利用できれば、入射角 $\theta = 90^\circ$ が自動的に満たされ、装置の小型化や低コスト化が可能となる。本研究は、コリニア配置の動作条件を求め、それが使えることの実証を目的とした。

まず、コリニア配置における共鳴条件を計算した。図2がプリズム付近の配置図である。頂角 $\alpha$ を持つ屈折率 $n$ のプリズム底面に50nm厚の金薄膜を蒸着した場合を考えた。入射光はコリメートされた $p$ -偏光の白色光であり、反射光は分光器で分光後に検出される。プリズムの高さを $H$ 、底面からの光軸の高さを $h$ として、 $h/H$ を計算した。結果を表1に示す。コリニア配置で共鳴条件を満たすためには、プリズムの屈折率 $n$ に対して、必要な頂角 $\alpha$ が異なることがわかる。つぎに、光軸の高さ $h$ を求めると、 $n = 1.5$ の場合には $h/H$ は0.24であり、小型のプリズム (例えば高さ $H = 1\text{cm}$ のプリズム) を用いる際には、ビーム径の小さい白色光を使わなければならない不便である。一方、 $n = 2.0$ の場合には $h/H$ は0.73と大きく、光学系の自由度が高くとれる。

$n = 2.0$ 、 $\alpha = 140^\circ$ のプリズムを用い、 $\theta = 90^\circ$ で水とエタノールの混合溶媒の屈折率と共鳴波長 $\lambda_r$ の関係を実験的に調べた。混合比により $\lambda_r$ が変化した。屈折率感度は約1000nm/RIUであった。この値は計算と一致しており、屈折率センサーとして良好に動作していることが確認できた。

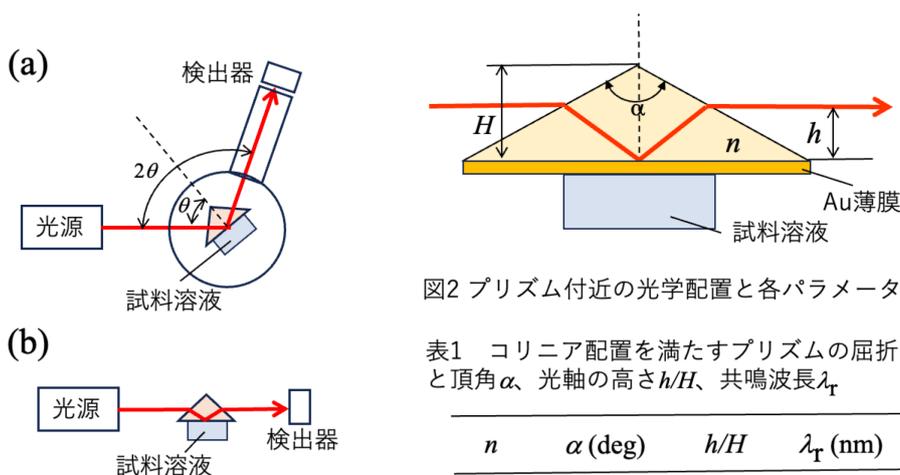


図2 プリズム付近の光学配置と各パラメータ

表1 コリニア配置を満たすプリズムの屈折率と頂角 $\alpha$ 、光軸の高さ $h/H$ 、共鳴波長 $\lambda_r$ 

$n$	$\alpha$ (deg)	$h/H$	$\lambda_r$ (nm)
1.5	90	0.24	630
2.0	140	0.73	610
2.5	150	0.83	580

図1 (a)一般のSPR光学系 (b)光源と検出器を結ぶ軸上にプリズムを配置したSPR光学系(コリニア配置)

## 時間変調磁性メタマテリアルを用いたマイクロ波周波数変換

### Microwave Frequency Conversion using Time-varying Magnetic Metamaterials

東北大高教機構<sup>1</sup>, 秋田大院理工<sup>2</sup>, 東北大多元研<sup>3</sup>, 東北大 CSIS<sup>4</sup>, 東北大院理<sup>5</sup>

○ 児玉 俊之<sup>1</sup>, 菊池 伸明<sup>2</sup>, 岡本 聡<sup>3,4</sup>, 大野 誠吾<sup>5</sup>, 富田 知志<sup>1,5</sup>

IEHE, Tohoku Univ.<sup>1</sup>, Akita Univ.<sup>2</sup>, IMRAM, Tohoku Univ.<sup>3</sup>, CSIS, Tohoku Univ.<sup>4</sup>,

Dept. of Physics, Tohoku Univ.<sup>5</sup>, ○Toshiyuki Kodama<sup>1</sup>, Nobuaki Kikuchi<sup>2</sup>,

Satoshi Okamoto<sup>3,4</sup>, Seigo Ohno<sup>5</sup>, Satoshi Tomita<sup>1,5</sup>

E-mail: tkodama@tohoku.ac.jp

負屈折率媒質や隠れ蓑のように誘電率 ( $\epsilon$ ) や透磁率 ( $\mu$ ) を空間的に制御するメタマテリアルに対して、 $\epsilon$  や  $\mu$  を時間領域で制御する時間変調メタマテリアルが関心を集めている。時間変調メタマテリアルでは、 $\epsilon$  や  $\mu$  の変調周期で入射電磁波の周波数が変換される。可視-近赤外光において  $\epsilon$  を制御する従来の手法に対して [1], マイクロ波において  $\mu$  を時間変調することを我々は提案している [2]。今回、伝送線路と強磁性金属パーマロイ ( $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$ ) から構成される時間変調磁性メタマテリアルを用いて、マイクロ波の周波数変換を直接観測したので報告する。

Fig. 1(a) にスパッタリング成膜とフォトリソグラフィーで作製した  $\mu$  時間変調メタマテリアルの光学顕微鏡像を示す。Fig. 1(b) は (a) の拡大図である。まず非ドープシリコン基板に厚さ 200 nm の金 (Au) で蛇行線路を作製する。次に蛇行線路を覆うように、厚さ 200 nm のガラス ( $\text{SiO}_2$ ) を成膜する。その上に、蛇行線路と垂直な方向に並行伝送線路 (CPW) を厚さ 200 nm の Au で作製する (Fig.1(a)(b) の赤色領域)。最後に厚さ 250 nm の  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  を蛇行線路と CPW が交差する領域に成膜する (Fig.1(b) の緑色領域)。

電磁石で 26.7 mT の外部磁場を  $-x$  方向に印加する。4.0 GHz のマイクロ波電流を CPW に流し、スペクトラムアナライザで分析した透過波を Fig. 1(c) の緑線で示す。CPW に流した信号が 4.0 GHz に見られる。ここで、蛇行線路に  $f_{\text{mod}}=10$  MHz の交流電流を流したときの透過波を (c) の青線で示す。4.0 GHz  $\pm$  10 MHz に変換波が得られている。また  $f_{\text{mod}}$  が 15 MHz, 20 MHz の場合も赤線と黒線で示すように、4.0 GHz  $\pm f_{\text{mod}}$  に変換波が得られている。この周波数変換は、蛇行線路から発生する  $x$  方向の  $f_{\text{mod}}$  の交流エルステッド磁場によって、 $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{80}$  の  $\mu$  が時間変調されたためと考えられる。

本研究は JST-CREST(JPMJCR 2102) によって支援されている。東北大の金森義明教授との有益な議論に感謝する。[1] Y. Zhou et al., Nat. Commun. 11, 1 (2020). [2] T. Kodama et al., PRAppl. 19, 044080 (2023), PRB. 109, 214419 (2024)

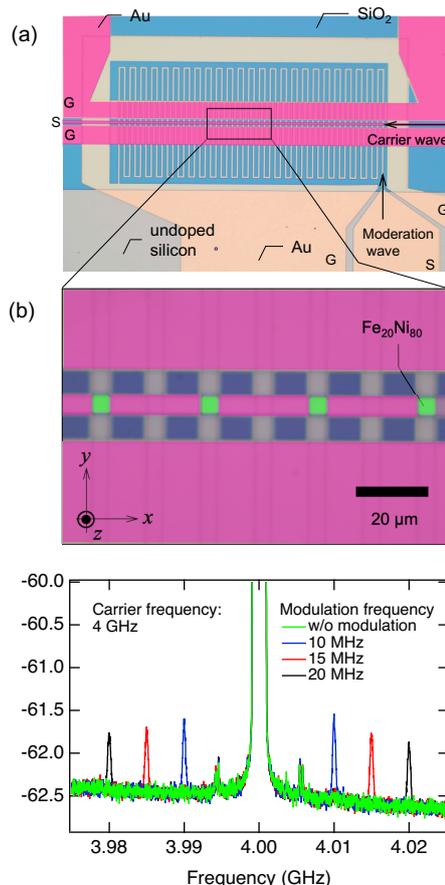


Fig 1: (a) Sample and (b) enlarged photograph. (c) Transmission spectra with various modulation frequencies.

**同軸 2 重シリンダーメタ材料吸収体を用いた  
背景光抑制赤外分光ガス検出**  
**Background Suppressed IR Spectroscopy of Gas Molecules  
using Double Cylinder Metamaterial Absorber.**

学習院大<sup>1</sup>, 理研<sup>2</sup> ◯(M2)伊藤 健太郎<sup>1,2</sup>, 田中 拓男<sup>1,2</sup>

Gakushuin Univ.<sup>1</sup>, RIKEN.<sup>2</sup>, ◯Kentaro Ito<sup>1,2</sup>, Takuo Tanaka<sup>1,2</sup>

E-mail: kentaro.ito@riken.jp

### 1. 研究背景・目的

疾病に由来する極微量のマーカ分子を呼気中から高感度に検出したいという要求がある。赤外分光法は分子識別能を有するため、有効な手法の一つであるが、ガス中の標的分子の量が少ないと、光吸収量が低くなって、分子からの信号が背景ノイズと比べて弱くなって、高感度な検出が困難であるという課題がある。

我々は、この問題を解決するために、特定の波長の赤外光を選択的に吸収するメタ材料を使用し、余計な背景光を抑制して信号対背景光比 (S/B) を高める方法を提案した[1]。

この手法では、透明誘電体を2枚の金属で挟んだ Metal-Insulator-Metal (MIM) 構造からなる光吸収体を利用する。この構造は特定の波長の赤外光を吸収するが、金属層間の誘電体部に標的分子が存在すると、MIM 構造と分子との共鳴相互作用によって分子情報を含む反射光が発生する。この反射光は MIM 構造によって抑制された背景光内に現れるので、S/B 比が改善される。

本研究ではこの MIM 構造として、新たに金製の同軸 2 重シリンダーで構成されるメタ材料吸収体を作製し、これを用いてガス吸収スペクトルの測定を行った。

### 2. 研究手法・実験結果

同軸 2 重シリンダー MIM 構造は、マスクレス露光装置、電子線加熱蒸着装置、反応性イオンエッチング装置等を用いて作製した。作製した構造の走査型電子顕微鏡像 (Scanning Electron Microscope; SEM) を図 1 に示す。

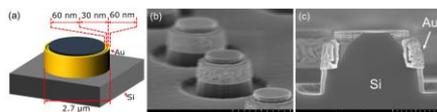


図 1 : (a) Schematic (b) Oblique SEM image (c) Cross-sectional SEM image.

作製した同軸 2 重シリンダー MIM 構造の反射スペクトルをフーリエ変換型赤外分光顕微鏡を用いて測定した (図 2)。この結果から波長 2.5~6.0 μm の領域に MIM 構造による赤外吸収バンドが確認できた。

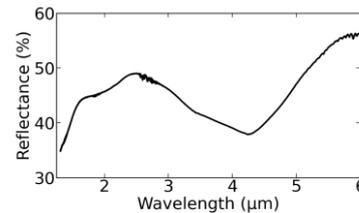


図 2 : Reflectance spectrum of MIM structure.

この同軸 2 重シリンダー MIM をサファイア窓でシールされたセル内にセットし、セルにそれぞれ窒素ガス、ブタンガス、二酸化炭素ガスを導入して、そのスペクトルを測定した結果が図 3 である。

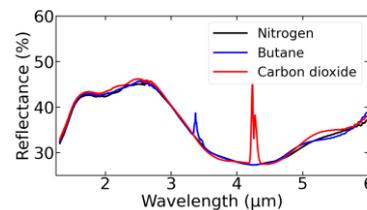


図 3 : Reflection spectra of the double cylinder metamaterial absorber with gases.

図 3 の測定結果よりブタン (吸収ピーク波長 3.4 μm) と二酸化炭素 (吸収ピーク波長 4.2 μm) において、それぞれの分子由来の信号を MIM 構造で抑制された背景光の中に明瞭に検出することができた。図 4 は二酸化炭素を濃度変化させながら測定した結果である。吸収バンド中に現れる分子信号の強度はガス分子の濃度に線形に応答した。

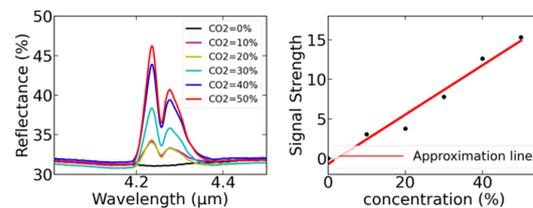


図 4 : CO<sub>2</sub> signals and its relationship to the concentrations.

### 参考文献

[1] D. S. Su, D.P. Tsai, T. J. Yen, T. Tanaka, ACS Sensors, 4(11), 2900-2907, (2019).

## 位相、強度、偏光を独立変調可能な ダブルフェイズ型誘電体メタサーフェス

Independent modulation of phase, intensity, and polarization  
by double-phase dielectric metasurface

東大生研<sup>1</sup>, 宇大工<sup>2</sup>, <sup>○</sup>大村 洸翔<sup>1</sup>, 平山 颯紀<sup>1</sup>, 藤村 隆史<sup>2,1</sup>, 志村 努<sup>1</sup>

IIS, Univ. Tokyo<sup>1</sup>, Utsunomiya Univ.<sup>2</sup>

<sup>○</sup>Hiroto Omura<sup>1</sup>, Soki Hirayama<sup>1</sup>, Ryushi Fujimura<sup>2,1</sup>, Tsutomu Shimura<sup>1</sup>

E-mail: omura@iis.u-tokyo.ac.jp

メタサーフェスとは、基板上にサブ波長サイズの構造（メタアトム）を配列することによって、光の位相、強度、偏光を空間的に変調（波面変調）することができる二次元的な光学素子である。近年、メタサーフェスは、メタレンズなどの応用を以ってカメラなどの光学製品を軽量化、省スペース化などさせる可能性があるとして注目が高まっている。

本研究の対象である誘電体メタサーフェスは、先行して研究されていた金属メタサーフェスと比べて、光との相互作用が小さいというようなデメリットはあるものの、原理的なロスがないというメリットにより盛んに研究されている。この分野の先行研究では、位相、強度、偏光のうち位相と強度、位相と偏光といった 2 つを独立に変調する研究は多く存在するが、3 要素の全てを独立に変調する研究はほとんど見られない。そこで、我々は空間位相変調器（SLM）を用いたデジタルホログラフィーなどで利用されるダブルフェイズの考え方を取り入れることで、位相、強度、偏光の 3 要素全てを独立変調可能な誘電体メタサーフェスを考案した[1]。今回は、2 種類のメタアトムから構成されるメタサーフェスが、SLM におけるダブルフェイズと同じように扱えるかについて、電磁場シミュレーションによる検証を行った結果を発表する。

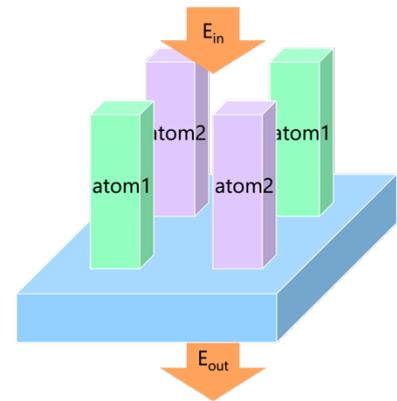


fig. 1 Diagram of the double-phase metasurface simulated in this study

[1]新原 寛太, 他, 第 68 回応用物理学会春季学術講演会,19p-Z08-10 (2021).

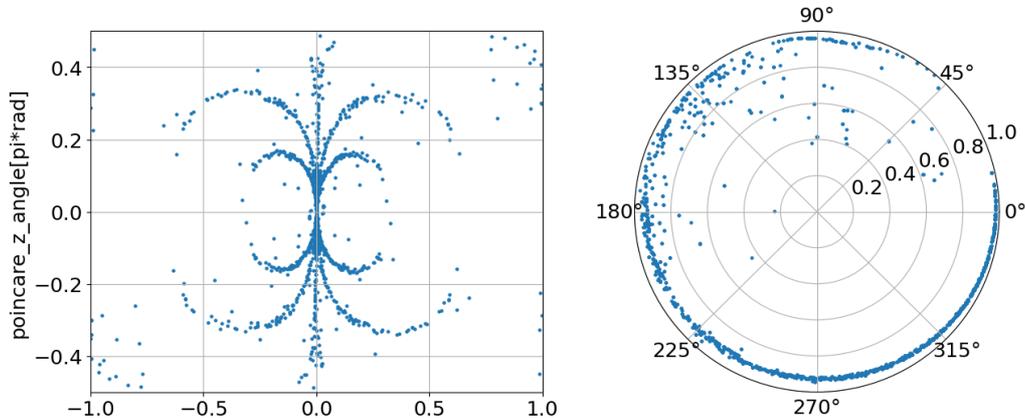


fig. 2 Simulation results of double-phase metasurface. The left panel shows a plane view of the Poincaré sphere. The right panel shows normalized intensity in radial and phase in declination.