

令和 4 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02630

研究課題名(和文) シリコン誘電体ミー共振器における多重極子の選択制御と赤外メタサーフェス素子

研究課題名(英文) Selective control of multipole in Silicon Mie resonator and infrared metasurface devices

研究代表者

高原 淳一 (Takahara, Junichi)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：90273606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：単結晶シリコンを用いたメタサーフェスとよばれる非常に薄い平面光学素子のための光波の制御方法に関する研究を行い、以下の成果を得た。1) 高感度の屈折率検出器や誘電体のみによる完全吸収体を実現、2) ミー共振による熱光学効果によりシリコンの有効非線形屈折率がバルクの10万倍以上に増強されることを見出し、これを光・光スイッチング素子へ応用、3) 酸化バナジウムの金属絶縁体相転移を利用した新しい原理の光変調素子の提案。これらは高感度の赤外光検出器、全光スイッチング素子、適応型放射冷却素子などに応用できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、ムーアの法則に沿った電子集積回路の性能向上が限界にきており、シリコンフォトニクスと光インターコネクションによる低消費電力化が求められている。本成果はシリコンをベースとしているため低損失で、シリコンフォトニクスとの整合性も良い。熱光学効果による光・光スイッチングは縦型の能動シリコンフォトニクス素子への新しい展開が期待できる。本成果はこれまでほとんど活用されてこなかった磁気双極子や四重極子を利用した具体的な素子の動作を実証したことで、学術的に意義があるだけでなくバイオセンシングや赤外光検出器などの応用にも新たな道を拓くといえる。

研究成果の概要(英文)：We conducted research on a light wave control method for a very thin planar optical element called a metasurface using single crystal silicon, and obtained the following results. We have found that 1) a highly sensitive refractive index detector and a complete absorber using only a dielectric are realized, 2) the effective nonlinear refractive index of silicon is enhanced by 100,000 times of the bulk due to the photothermal effect by Mie resonance. Applying this to optical / optical switching elements, and 3) proposal of optical modulation elements with a new principle using metal-insulator phase transition of vanadium dioxide. These can be applied to high-sensitivity photodetectors, all-optical switching elements, adaptive radiative cooling elements.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：メタマテリアル メタサーフェス ミー共振 シリコン 二酸化バナジウム 多重極子 完全吸収体

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

メタ材料やメタサーフェス (metasurface; MS) の研究は主に金属を用いたプラズモニック MS が用いられてきた。近年、誘電体のみで構成された誘電体メタサーフェス (誘電体 MS) が提案され、メタレンズとよばれる波長以下の薄さのフラットレンズの研究が世界的に進展している。誘電体 MS はプラズモニック MS と比べて損失が少なく、高効率の透過型デバイスができる。また誘電体 MS を用いた多様なベクトルビームの高効率発生が報告され薄型で高い機能性を持つ。

誘電体 MS は高屈折率媒質 (Si, TiO₂ など) からなるナノ構造をメタ原子とする。共振器サイズと入射光の波長が同程度になるとミー共振 (Mie resonance) によって散乱場が共鳴的に増強される。一般にこの共振モードは多重極子 (multipole) の重ね合わせにより記述される。共振器のサイズが光の波長と同程度の場合には、電気双極子 (Electric Dipole; ED) と磁気双極子 (Magnetic Dipole; MD) が支配的となる。誘電体 MS ではミー共振器を利用して光の散乱・吸収を制御するので、共振器形状やそのサイズの変化に対する多重極子のふるまいの解明が重要となる。

これまでメタ原子のサイズを変えて多重極子の共振波長を制御してきた。しかし単純にサイズを変えるだけでは全てのモードで共振波長が変化するために、デバイス設計は極めて困難である。また、プラズモニック共振器と異なり、ミー共振器の電磁場は共振器内部に強く閉じ込められており、外部との結合が弱いために形状による制御も効果が限定的である。ミー共振器に特化した光機能を発現させる技術を確立する必要がある。

我々はミー共振器に金属 Cr キャップ層を付加することにより ED の周波数のみを赤方変位させ、MD の共振波長と一致できることを見出し、これを利用して構造色の彩度を向上させた。これをヒントに「ミー共振器に異種材料を付加することで ED だけでなく MD、電気四重極子 (Electric Quadrupole; EQ)、磁気四重極子 (Magnetic Quadrupole; MQ) などの多重極子を独立に制御できないか」と考えた。

2. 研究の目的

本研究は単結晶 Si (c-Si) をベースとしたミー共振器に異種材料のキャップ層等を付加することにより多重極子を制御する方法を確立し、それを赤外メタサーフェス素子へ応用することを目的とする。キャップ層の形状や材料を変えた場合の効果を探索する。また、金属絶縁体相転移材料である二酸化バナジウム (VO₂) を用いて赤外素子の光学特性の動的制御を行う。これにより多重極子工学 (Multipole Engineering) の確立を目指す。

3. 研究の方法

はじめに図 1 に示す誘電体 MS において FDTD 法などの電磁界シミュレーションに加えて多重極子分解 (multipole decomposition analysis; MDA) により c-Si 誘電体メタ原子中の多重極子のふるまいを理論的に解明する。特にキャップ層の形状や材料、膜厚、誘電率に対する多重極子の系統的なスペクトルマップを作成する。キャップ層材料には金属や誘電体の他にも金属絶縁体相転移材料である VO₂ も検討し、温度変調による動的な MS を設計する。

スペクトルマップをもとに c-Si をベースとした誘電体 MS の構造を設計し、可視、近赤外 (900-1200nm) および中赤外 (2~20 μ m) で動作する素子を設計する。設計においては透過、反射および吸収スペクトルを数値的に求め、フィードバックしながら構造を最適化する。また、入射角度依存性についても理論的に研究を行う。

設計に基づいて SOQ (Silicon on Quartz) 基板を用いて c-Si のミー共振器をアレイ化し、電子ビーム露光とドライエッチングなどの微細加工により誘電体 MS 素子を作製する。また、キャップ層材料に VO₂ を用いて、温度により光学特性をスイッチングできる赤外 MS を作製する。またこれと並行して、近赤外顕微画像と分光スペクトル取得のための FT-IR システムの整備を行う。これを用いて反射・透過率スペクトルを計測する。

以上により多重極子の静的および動的な制御原理を確立するとともに、これを応用した多様な光学素子の動作を実験により実証する。特に ED, MD の縮退状態や EQ, MQ などの四重極子を利用した光機能の確立を通して多重極子工学の確立をめざす [1]。

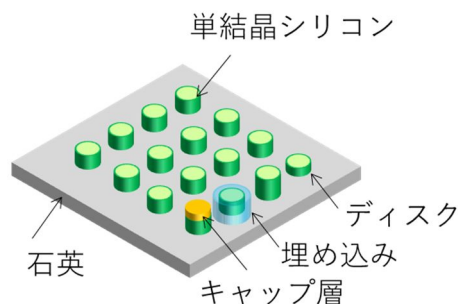


図 1 c-Si MS におけるメタ原子への付加構造による多重極子の制御

4. 研究成果

(1) 磁気双極子を用いた高感度屈折率センシング

誘電体 MS のミー共振器における多重極子の共振波長はメタ原子の周囲の屈折率に敏感であることから、MS 上の液滴などに対する屈折率センシングに応用できる。先行研究により Si-MS

のセンシング感度はプラズモニックセンサーで達成されたトップデータにはおよばないものの、高い安定性が得られる点が評価されており、さらなる高感度化が期待されている。誘電体 MS は ED と MD の感度を比較すると、電場の浸み出しが大きい ED の方が MD より高感度であるとされてきた。我々は薄いディスク型誘電体 MS の研究において、この常識に反して MD の感度の方が ED に比べて大きく、高い値 ($S=385\text{nm}/\text{RIU}$) をとることを実証した (図 2) [2]。この値は既存の MS 型センサーの中でも最高性能を示す電磁誘導透過効果 ($S=289$) や Quasi-bound states in the continuum (QBC) 効果において報告されている値 ($S=326$) をも上回る [2]。また、性能指数 (FOM) も 160 という高い値が得られている。これはメタ原子を薄いディスク型にすることで MD の電場の外部への浸みだしが増大することによる。本成果はシリコンフォトニクスでプラズモニックセンサーに匹敵する高感度と再現性の高さを両立したバイオセンサーへの応用が期待される。

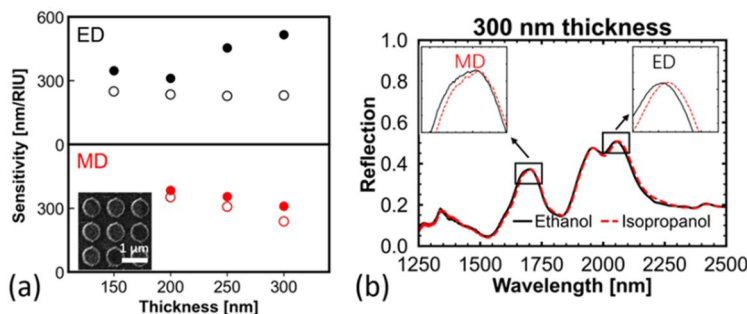


図 2 ディスク型 c-Si メタ原子 (厚さ 300nm) による (a)ED、MD の高感度化と (b)近赤外反射スペクトル [2]

(2) 縮退臨界結合による可視域での誘電体完全吸収体

誘電体 MS において ED と MD が縮退した状態をホイヘンスメタサーフェス (Huygens MS; HMS) とよぶ。HMS を利用すると放射損失と材料固有の損失の値を一致させることで完全吸収体 (Perfect Absorber; PA) を実現できることが知られており、縮退臨界結合 (Degenerate Critical Coupling; DCC) とよばれている [3]。本研究のように材料に c-Si を用いる場合は固有損失が小さすぎるため、放射損失と整合をとることが難しく、特定の波長 (480nm) のみでしか PA を実現することができなかった。

我々は理論的にミー共振器を誘電体に埋め込む埋め込み型誘電体メタ原子を提案し、これにより放射損失を増大させることで可視～近赤外の全域において PA を実現できる系統的方法を提案し、これを実験的に実証した (図 3 (a),(b)) [4]。さらに、DCC 法を四重極子にも拡張し、これまでの DCC より Q 値の高い PA を理論的に提案した。楕円型ミー共振器中の MQ と EQ の四重極子を用いて PA を実験により実現した (図 3 (c),(d)) [5]。本成果は赤外光検出器の高感度化や透明な放射冷却素子などに応用できる。

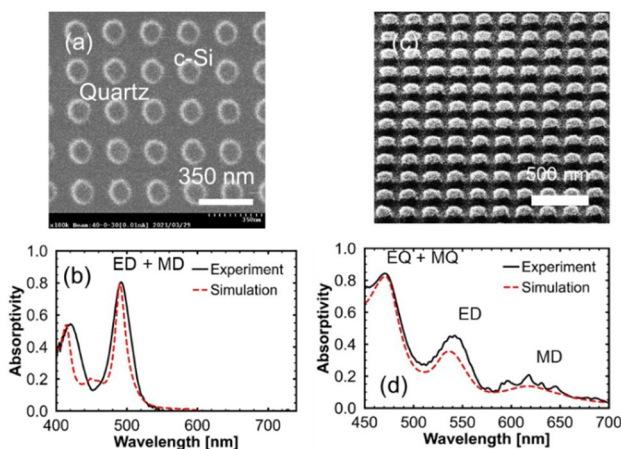


図 3 DCC による PA : (a)円筒型 MS の構造と (b)ED/MD による PA、(c)楕円型 MS の構造と (d)EQ/MQ による PA [4,5]

(3) 熱光学効果による有効非線形光学定数の増大と光スイッチングへの応用

連続レーザー光を c-Si の直方体型ミー共振器 (図 4 (a), (b)) に照射して、その散乱光スペクトルを実験的に調べた。その結果、パワーが $10^5\text{W}/\text{cm}^2$ の光ビームをあてると散乱光強度が飽和する非線形光学散乱がおきることを見出した (図 4 (c)) [6,7]。これはバルク Si の 10 万分の 1 という極めて低いパワーである。また、この非線形散乱は線形な直線から正にずれる場合 (superlinear) と負の方向に飽和する場合 (sublinear) の 2 種類があり、共振器のサイズにより変化することもわかった。これはミー共振において光の一部が共振器内に強く閉じ込められるために数百におよぶ急激な温度上昇が起き、熱光学効果によって屈折率が変化し、散乱強度が直線から大きくずれることにより非線形性が増強されることが明らかになった。一方で、光共振器の体積が $0.001\mu\text{m}^3$ と小さ

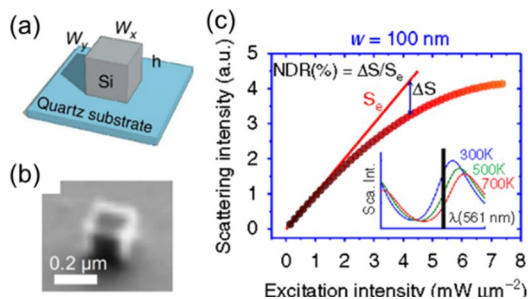


図 4 c-Si MS における有効非線形光学定数の増大 : (a)(b)キューブ型 MS、(c)散乱スペクトルの飽和現象 [6]

いために蓄えられる熱量は少なく、レーザーが OFF になると即座に基板へ放熱されるので、ナノ (10^{-9})秒オーダーの高速の応答がおきる。これにより波長 592nm の光を制御光として ON/OFF することで、543nm の信号光の散乱強度が変調される光・光スイッチングを実現した[6]。この結果は連続レーザー光のみで非線形光学素子ができることを示しており、パルス光が不要であり非線形光学に新たな展開が期待できる。

(4) VO₂ による光学スペクトルの制御

金属絶縁体相転移材料として知られる VO₂ の転移温度 T_c は 68 °C であり、室温では誘電体相、高温では金属相をとる。メタ原子に VO₂ 層を付加することで屈折率が温度により大きく変わることから、MS の光学特性を大きく変調できる。c-Si ミー共振器の上部または下部に VO₂ を置くことにより ED, MD の振幅と位相を温度により切り替えるメタ原子構造を提案した。これにより、 T_c の上下で MS 素子の透過、反射、吸収スペクトルをスイッチングする以下の成果を得た。

透過型素子では動的な HMS により 2π の位相の切り替えができることを理論的に提案し、光波の伝搬方向の偏向素子を提案した(図5)[8]。反射型素子では磁気ミラーと電気ミラーの可逆的切り替えができるメタ原子構造を提案した(図6)[9]。磁気ミラーは電気ミラーのように電場が表面でゼロとならず 2 倍に増強された電場が存在することから輻射制御への応用が期待できる。吸収型素子では透明な適応型放射冷却素子を提案し、実験により熱輻射のスイッチングを実証した(図7)[10]。これにより表面温度により放射冷却の効果を ON/OFF できるので、太陽電池などの表面に置くことで太陽電池の温度上昇を抑制し、効率を向上できる。

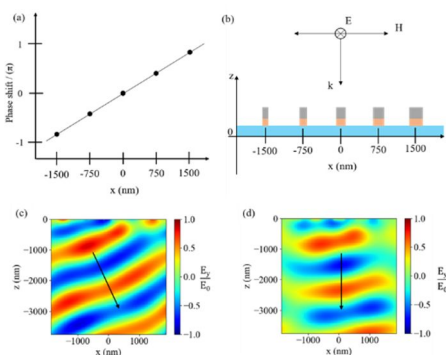


図5 動的HMSによる光偏向器[8]

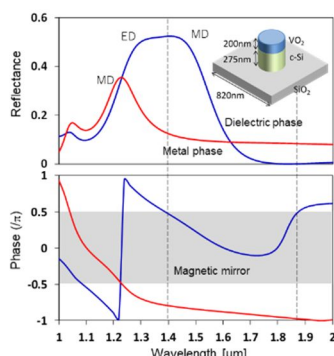


図6 磁気/電気ミラーの切り替え[9]

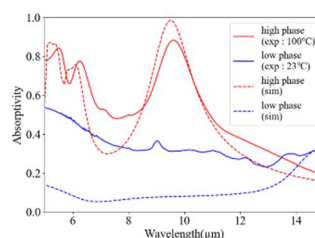


図7 輻射率の切り替えによる適応型放射冷却素子[10]

引用文献

- 1) T. Liu, *et al.*, “Multipole and multimode engineering in Mie resonance-based metastructures,” *Nanophotonics* 9(5) 1115 (2020).
- 2) R. Xu, and J. Takahara, “Highly sensitive and robust refractometric sensing by magnetic dipole of Si nanodisks,” *Appl. Phys. Lett.* 120, 201104 (2022).
- 3) X. Ming, X. Liu, L. Sun, and W. J. Padilla, “Degenerate critical coupling in all-dielectric metasurface absorbers,” *Opt. Express* 25, 24658 (2017).
- 4) R. Xu and J. Takahara, “Radiative loss control of an embedded silicon perfect absorber in the visible region,” *Opt. Lett.* 46(4), 805 (2021).
- 5) R. Xu and J. Takahara, “All-dielectric perfect absorber based on quadrupole modes,” *Opt. Lett.* 46(15), 3596 (2021).
- 6) Y.-S. Duh, Y. Nagasaki, *et al.*, “Giant photothermal nonlinearity in a single silicon nanostructure,” *Nature Commun.* 11:4101(2020).
- 7) Y.-L. Tang, *et al.*, “Mie-enhanced photothermal/thermo-optical nonlinearity and applications on all-optical switch and super-resolution imaging [Invited],” *Opt. Mater. Express* 11(11), 3608 (2021).
- 8) H. Takase and J. Takahara, “Switchable wavefront control using all-dielectric metasurface mediated by VO₂,” *Appl. Phys. Express* 14, 032007 (2021).
- 9) 川島一祥、高原淳一、「Si-VO₂ メタサーフェスによる近赤外動的磁気ミラー」第 69 回応用物理学会春季学術講演会 24a-E303-3、2022 年 3 月 24 日。
- 10) 高瀬博章、高原淳一、「VO₂ を用いた誘電体メタサーフェスにおける適応型放射冷却」第 68 回応用物理学会春季学術講演会 17a-Z05-7、2021 年 3 月 17 日。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Rongyang Xu, and Junichi Takahara	4. 巻 120
2. 論文標題 Highly sensitive and robust refractometric sensing by magnetic dipole of Si nanodisks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 201104-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0091862	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Guan-Jie Huang, Hao-Yu Cheng, Yu-Lung Tang, Ikuto Hotta, Junichi Takahara, Kung-Hsuan Lin, and Shi-Wei Chu	4. 巻 -
2. 論文標題 Transient Super-/Sub-Linear Nonlinearities in Silicon Nanostructures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2101711
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202101711	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 高原淳一	4. 巻 105
2. 論文標題 メタサーフェス～新しい平面光学素子の原理と 業化への展望～	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 39-46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yu-Lung Tang, Te-Hsin Yen, Kentaro Nishida, Junichi Takahara, Tianyue Zhang, Xiangping Li, Katsumasa Fujita, & Shi-Wei Chu	4. 巻 11
2. 論文標題 Mie-enhanced photothermal/thermo-optical nonlinearity and applications on all-optical switch and super-resolution imaging [Invited]	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 3608-3626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.431533	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Rongyang Xu and Junichi Takahara	4. 巻 46
2. 論文標題 All-dielectric perfect absorber based on quadrupole modes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 3596-3599
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.431398	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroaki Takase and Junichi Takahara	4. 巻 14
2. 論文標題 Switchable wavefront control using all-dielectric metasurface mediated by V02	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express (APEX)	6. 最初と最後の頁 032007-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abdd13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Rongyang Xu and Junichi Takahara	4. 巻 46
2. 論文標題 Radiative loss control of an embedded silicon perfect absorber in the visible region	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Letters	6. 最初と最後の頁 805-808
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OL.417438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yi-Shiou Duh, Yusuke Nagasaki, Yu-Lung Tang, Pang-Han Wu, Hao-Yu Cheng, Te-Hsin Yen, Hou-Xian Ding, Kentaro Nishida, Ikuto Hotta, Jhen-Hong Yang, Yu-Ping Lo, Kuo-Ping Chen, Katsumasa Fujita, Chih-Wei Chang, Kung-Hsuan Lin, Junichi Takahara & Shi-Wei Chu	4. 巻 11
2. 論文標題 Giant photothermal nonlinearity in a single silicon nanostructure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-020-1784	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tianji Liu, Rongyang Xu, Peng Yu, Zhiming Wang, and Junichi Takahara	4. 巻 -
2. 論文標題 Multipole and multimode engineering in Mie resonance-based metastructures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nanophotonics	6. 最初と最後の頁 1-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2019-0505	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Yusuke Nagasaki, Toshinori Kohno, Kazuki Bando, Hiroaki Takase, Katsumasa Fujita, and Junichi Takahara	4. 巻 115
2. 論文標題 Adaptive printing using V02 optical antennas with subwavelength resolution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 161105-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5109460	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計43件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 Junichi Takahara
2. 発表標題 Tunable Infrared Metasurface based on V02 for Anti-Counterfeiting and Adaptive Radiative Cooling
3. 学会等名 The 8th International Conference on Antennas and Electromagnetic Systems (AES) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junichi Takahara
2. 発表標題 Giant nonlinear scattering and narrowband perfect absorption in silicon metasurface
3. 学会等名 International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics (ICNN 2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高原 淳一
2. 発表標題 誘電体メタサーフェスによる光と熱の制御
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第42回年次大会 シンポジウム「ナノスケールの構造制御に基づく革新的フォトニクス」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高原 淳一
2. 発表標題 シリコンメタサーフェスにおける光熱制御と非線形性の増大
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会 光集積およびシリコンフォトニクス特別研 主催 シンポジウム「高密度 低消費電力短距離光インターコネクションに向けた光集積技術」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川島 一祥、高原 淳一
2. 発表標題 Si-V02メタサーフェスによる近赤外動的磁気ミラー
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Junichi Takahara
2. 発表標題 Switchable dielectric metasurface based on V02
3. 学会等名 A3 Forum Metamaterial Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Junichi Takahara and Ikuto Hotta
2. 発表標題 Multipole Engineering in Silicon Mie Resonator with Cap Layer
3. 学会等名 The 12th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高原淳一
2. 発表標題 誘電体メタサーフェスにおける最近の進展と産業化への展望
3. 学会等名 東京大学生産技術研究所 光物質ナノ科学研究センター 公開シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroyuki Ishimaru and Junichi Takahara
2. 発表標題 Near-IR concealed images by single crystalline Silicon Mie resonators
3. 学会等名 International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics (ICNN2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rongyang Xu and Junichi Takahara
2. 発表標題 All-dielectric perfect absorber of quadrupole modes by using cross-shaped Mie resonators
3. 学会等名 26th Microoptics Conference (MOC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川島一祥, 高原淳一
2. 発表標題 円筒型誘電体メタサーフェスにおける完全電気・磁気ミラーの切替
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高原淳一
2. 発表標題 誘電体メタサーフェスの基礎とバイオセンシングへの応用
3. 学会等名 フォトバイオ協議会 第13回 PhotoBIO ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高原淳一
2. 発表標題 誘電体ミラー共振器を用いたメタサーフェスとその応用
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサエティ大会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高原淳一、劉 天際
2. 発表標題 誘電体メタサーフェスと多重極子フォトニクス
3. 学会等名 電子情報通信学会 2020年総合大会(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高瀬博章, 高原淳一
2. 発表標題 VO2を用いたアクティブ誘電体メタサーフェスによる吸収率制御
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Junichi Takahara
2. 発表標題 Metasurface for color generation, IR emission and radiative cooling
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2019 (OPJ2019), Joint Symposia on Optics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junichi Takahara
2. 発表標題 Silicon Mie resonators for subwavelength color generation and multipole engineering
3. 学会等名 The International Symposium on Plasmonics and Nano-Photonics (iSPN2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高瀬博章、長崎裕介、高原淳一
2. 発表標題 アクティブ誘電体メタサーフェスを用いた自己適応型放射冷却素子
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 OPJ2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 高原淳一	4. 発行年 2020年
2. 出版社 R&D支援センター	5. 総ページ数 202
3. 書名 メタマテリアル、メタサーフェスの設計・作製と応用技術（分担執筆）	

1. 著者名 高原淳一（分担）、執筆者：54名、技術情報協会	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 508
3. 書名 メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用：3章6節”誘電体メタサーフェスを利用した高解像度、高彩度カラー生成とその応用”	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 輻射デバイス	発明者 高原淳一、高瀬博章、河野哲大	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-160258	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

シリコンナノ共振器により“10万倍”の巨大非線形光散乱を実現～シリコンの光・光スイッチへの応用に期待 https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2020/20201028_2

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------