

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K19077

研究課題名（和文）ハイパボリックフォトンクス～双曲導波光学の基礎とバルクナノ光配線への応用

研究課題名（英文）Hyperbolic Photonics

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） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：ハイパボリックメタマテリアル（HMM）とよばれる一軸性異方光学媒質は双曲型の分散関係を持ち、誘電体と異なる特殊な伝搬特性を示す。HMMの導波モードに関する研究を行い、以下の成果を得た。1）HMM中のバルク伝搬波は有効媒質近似で扱われてきたが、近似では説明できないモードを見出し、これを表面プラズモン結合モードの対称性で分類した。また、近似の限界を明らかにした。2）HMMの光共振器では共振波長がサイズに依存しない構造を理論的に提案した。これは光共振器の概念に変革を迫るものである。これによりHMM光共振器をメタ原子とする新しいメタマテリアルを実現できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光通信容量の飛躍的増大により、光信号を処理する電子デバイスの消費電力の大きさが問題となっており、すべて光を用いた集積フォトニックデバイスが必要とされている。光には回折限界があるために、光波長の1/2以下の空間（およそ200nm）に光を閉じ込めて伝送させることはできない。このために光デバイスも回折限界の制限を受け、微細化ができない問題がある。200nmは現在の電子集積回路の素子が10nm以下であることを考えると非常に大きいといえる。本成果により波長の制約を受けない光導波路や光共振器ができるので、光波長の制約を受けない光デバイスを実現でき、光通信の省電力化に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：A uniaxial anisotropic optical medium called a hyperbolic metamaterial (HMM) has a hyperbolic dispersion relation and exhibits special propagation characteristics different from a dielectric. We conducted research on propagation modes of HMM and obtained the following results. 1) Bulk propagating waves in HMMs have been treated by the effective medium approximation, but we found a mode that cannot be explained by the approximation and classified them by the symmetry of the surface plasmon coupling mode. Moreover, the limit of approximation was clarified. 2) It was theoretically proposed that the resonant wavelength of the HMM optical resonator does not depend on the size. This is a revolution in the concept of optical resonators. This makes it possible to realize a new metamaterial using HMM optical resonators as metaatoms.

研究分野：ナノフォトニクス

キーワード：メタマテリアル プラズモニクス ハイパボリックメタマテリアル 光共振器 金属・絶縁体転移 二酸化バナジウム

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

プラズモニクスでは金属と誘電体の界面を伝搬する表面波である表面プラズモン・ポラリトン (SPP) を利用して、光の回折限界以下のナノ空間への光の強い閉じ込めが実現されてきた。なぜ SPP は回折限界を超えられるのだろうか？その起源は波数空間 (k 空間) でみると明快である。誘電体の光の分散関係は k 空間における等周波数面 (equifrequency surface) でみると球面あるいは回転楕円体である。これらは k 空間で閉じているから、 k 空間で有界 (bounded) である。一方、図 1 (a) に示すように SPP のような表面波 (エバネッセント波) の等周波数面は通常の (3 次元) k 空間ではなく、虚数軸をもつ (2 次元) k 空間で定義される。なぜなら金属は可視光域で誘電率 ϵ の実部が負となる負誘電体 ($\text{Re}[\epsilon] < 0$) であるので、負誘電体中の光は必ず少なくとも一つの k 成分がエバネッセント波となるからである。この 2 次元 k 空間において誘電体および負誘電体の等波数面は、それぞれ一葉性および二葉性双曲面 (ハイパボリック面) となる (図 1 (a))。両双曲面は 2 次元 k 空間で非有界 (unbounded) であり、等周波数面の形が開く。このとき境界条件から波数に上限なく無限に大きな波数をとれるので、波長を小さくでき、回折限界の制約がなくなる。

このような双曲型等周波数面はプラズモニック導波路 (負誘電体光導波路) が回折限界をもたないことの原理的根拠である [1]。我々が提唱した双曲面の図は Nature Physics 誌の表紙を飾ることもなった [2]。一方、ハイパボリック・メタマテリアル (Hyperbolic Metamaterial: HMM) として知られる一軸性異方媒質も双曲等周波数面をもつことが知られている [3]。図 2 に負誘電体 (金属)・誘電体多層膜からなる Type II HMM の構造を示す。ここで、多層膜の膜厚は波長より十分小さいので有効媒質近似 (Effective Medium Approximation: EMA) のもとで有効誘電率を計算すると、光学軸に垂直方向に負誘電体となり、等周波数面は一葉性双曲面となる [3]。これを図 1 (b) に示す。ここで興味深いのは上記の 2 次元 k 空間ではなく、「3 次元実 k 空間」で等周波数面が双曲面となる点である (図 1 (b))。このような特異な双曲型分散関係は実験によっても確認されている [4]。実 k 空間で双曲面をもつことは、プラズモニック導波路のような表面波を利用せずとも、導波路中のバルク導波モード (bulk propagation mode) が回折限界をもたず、ナノ光導波路が実現できることを意味する。

HMM による負屈折や超解像レンズ (ハイパーレンズ) の研究は多数行われているが、エキゾチックな光学特性のみが注目される傾向にある [3]。このためバルク導波モードを光導波路や光共振器などの通常のフォトニックデバイスへ展開する研究は世界的にみても進んでいないが、これは導波光学や光集積回路の分野に革新をもたらすと考えられる。そこで、双曲面をキーワードとして静的な双曲導波光学の基礎を確立し、これに動的な発光制御を融合させてハイパボリックフォトニクスともいべき新しい分野を拓きたいと考え、本研究の着想にいたった。本研究では球と双曲面という k 空間でのトポロジーの違いを指導原理として、新しい光集積回路素子への応用に挑戦する点に挑戦的研究の意義がある。

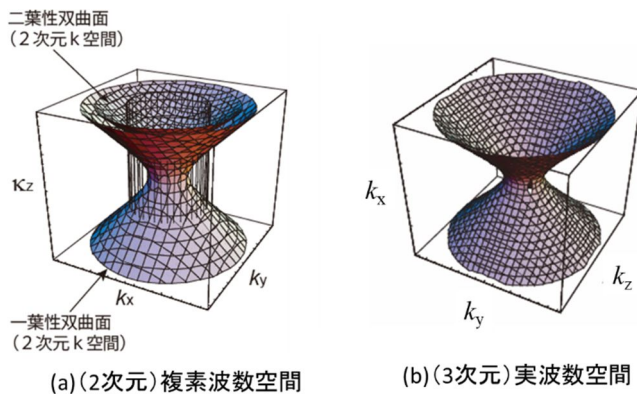


図 1 等周波数面: (a)負誘電体・誘電体界面の 2 次元 k 空間、(b)HMM の 3 次元 k 空間。等周波数面は 3 次元 k 空間で一葉性双曲面となる [1,2]。

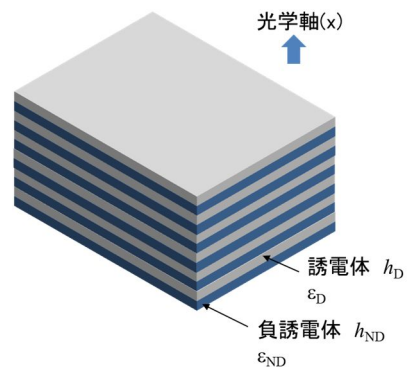


図 2 Type II HMM: 負誘電体 (金属) と誘電体の多層膜。矢印は光学軸。

2. 研究の目的

本研究の目的は、誘電体と負誘電体とのハイブリッド多層膜構造である HMM における双曲等周波数面を利用して、強い光閉じ込め効果と低損失を兼ね備える新しい原理のサブ波長光導波路を実現し、これを回折限界以下の光伝送や放射制御に応用することを目的とする。球面から双曲面という波数空間におけるトポロジカルな変化が、導波特性や放射に大きな影響をおよぼすことが期待できる。これにより双曲等周波数面を利用する新しいフォトニクス、いわばハイパボリックフォトニクスの基盤を確立する。

3. 研究の方法

はじめに HMM 光導波路中のバルク導波モードについて EMA を超えて微視的な観点から解析し、高波数領域 ($k/k_0 > 10$) でのふるまいを原理的に解明することを目標に研究をすすめた。これは k 空間で非有界とはいっても EMA が近似理論である以上、図 1 (b) に示す双曲面はどこかで飽和することが予測されるからである。デバイス設計上は多層膜をどの程度の周期にすれば双曲面とみなせるかが重要である。

このため理論研究では HMM をコアにもつスラブ型光導波路中を伝搬する導波モードの解析を近似解析理論、数値計算、電磁界シミュレーションを用いて系統的に行うと共に、プロット理論を用いて EMA を超えた領域での解析解を導出した。材料には金 (Au) / 二酸化シリコン (SiO_2) からなる多層膜をコアとし、波長は応用を考慮して典型的な光通信波長 (1550nm) とした。EMA による近似解析解を厳密な数値解析から得られた導波路モード解と比較した。また、実験研究では Au/ SiO_2 多層積層の光導波路を実際に作製し、FTIR を用いて中赤外域における顕微反射分光測定を行った。これにより有限幅を持つ HMM が共振器として動作することを確認した。

一般に HMM の興味深い特性の多くは損失があると隠されてしまうので、低損失の HMM を実現することは応用上きわめて重要といえる。そこで低損失化のための誘電体材料の検討を行った。その結果、誘電体をベースとした酸化チタン (TiO_2) / SiO_2 の多層膜が 8 ~ 10 μm の中赤外域において低損失 HMM として実験に適することがわかった。そこで次に $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 多層膜の光共振器の電磁界シミュレーションを行うことで、HMM 光共振器中でバルク導波モードが示す共振特性を計算した。

4. 研究成果

(1) 主な成果

1-1 HMM 光導波路

HMM をコアにもつスラブ型光導波路の解析から、図 1 に示すように等価屈折率 (n_{eff}) が高い領域に新たな伝搬モードを見出した (点線)。このモードは EMA の近似解析解には表れないので、有効誘電率として平均化されないミクロ構造を反映していると考えられる。

一般にスラブ型プラズモニク導波路には長距離伝搬モード (Long-Range Surface Plasmon: LRSP) と短距離伝搬モード (Short-Range Surface Plasmon: SRSP) の 2 種類が存在することが知られている。また、ギャップ型プラズモニク導波路にはギャップが小さい場合にはギャップ表面プラズモンモード (Gap Surface Plasmon: GSP) のみが伝搬する (図 4 (a))。今回見出した新しいモードは HMM を構成する要素である金属・誘電体界面における GSP モードと LRSP または SRSP との結合モードであることがわかった。図 4 (b) に示すように、この 2 つのモードはミクロな界分布の対称性を反映している。ここでは金属中の偶モードを LG mode、奇モードを SG mode と名付けている。HMM のナノ光導波デバイスへの応用においては、このようなミクロな電磁場分布を考慮する必要があることがわかる。HMM の研究ではこれまで EMA による平均化された取り扱いが主流であったが、本研究により微視的な導波モードが重要であることがわかった。

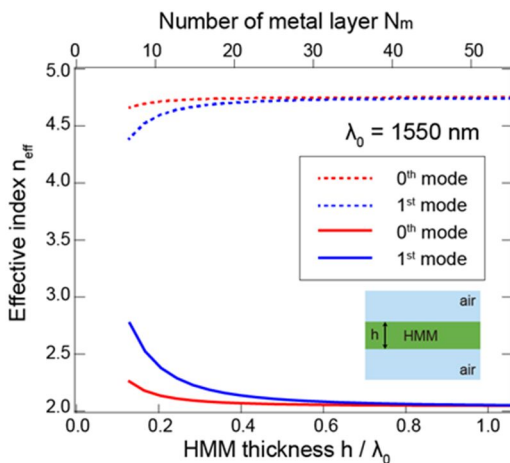


図 3 HMM コア光導波路の伝搬モードの膜厚依存性 (波長 1550nm) 挿入図: HMM コア光導波路[5]

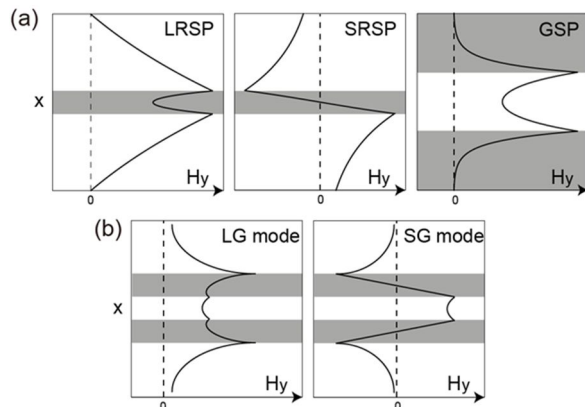


図 4 HMM 中のバルク伝搬モードの磁場分布: (a) スラブ型およびギャップ型プラズモニク導波路の結合モード、(b) LG mode と SG mode [5]。

1-2 HMM 光共振器

$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ を用いて Type II HMM を実現する波長域を探索した。その結果、 SiO_2 は $\lambda_0 = 8-9\mu\text{m}$, TiO_2 は $\lambda_0 > 12.5\mu\text{m}$ において Reststrahlen Band の効果で負誘電体であることから、HMM の異方的有効誘電率を求めると、波長域 $\lambda_0 = 8-9\mu\text{m}$ において Type II HMM となることがわかる。それ以外の波長域では一軸性誘電体である。注目すべきことに、この「誘電体をベースとした」HMM

は有効誘電率の実部が負でありながら共振吸収ピークからずれているために虚部が小さく、通常の金属 HMM に比べて極めて低損失の HMM を実現することができる。

図5挿入図に示すような無限に長い直方体型 HMM 光共振器（幅 90nm、高さ 50nm）に直線偏光した白色光を光学軸方向に入射して、散乱スペクトルを計算した。図5に吸収断面積スペクトルの計算結果を示す。 $\lambda_0=8\sim 9\mu\text{m}$ において吸収ピークが観測された。これは系が Type II HMM となる波長域と一致しており、本構造が HMM の共振器であることを示している。また、それ以外の波長域において本媒質は誘電体であり、サイズが小さすぎるため共振モードは存在できない。このとき共振器のサイズは共振波長（ $8\mu\text{m}$ ）の 1/100 以下と極めて小さく、有効屈折率 ~ 100 であることがわかる。材料（ TiO_2 ）本来のバルク屈折率は2~3程度であるから、HMM 化により屈折率が非常に大きくなっていることがわかる。これは赤外線デバイスの超小型化へ応用できる。

図6に HMM 光共振器および通常の誘電体光共振器における共振周波数での最低次モードの電場分布を示す[6,7]。一般に誘電体共振器では最低次の共振モードは中央部に正弦関数ピークのある電場分布を示す（図6(b)）。これに対して、HMM の場合は図6(a)に示すようなX字型の電場分布が観測された。このような空間分布は金属 HMM においても報告があるが、本構造が双曲型の分散関係をもつ光共振器として動作することを示している[3]。このとき HMM 光共振器の共振周波数が共振器サイズに依存しない現象を見出した。この性質により共振波長がサイズに依存しない極めて小さな光共振器を実現することができる[8]。

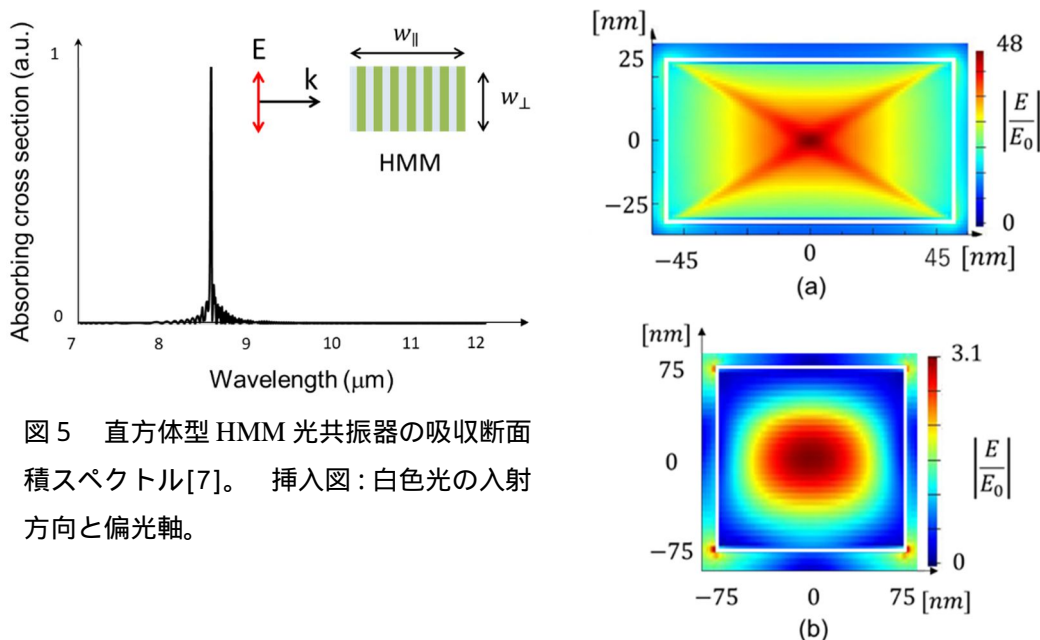


図5 直方体型 HMM 光共振器の吸収断面積スペクトル[7]。挿入図：白色光の入射方向と偏光軸。

図6 共振器中の電場分布：(a) HMM 光共振器（50nm×90nm）における X 字型の共振モード（ $\lambda_0=8.58\mu\text{m}$ ）、(b)シリコン光共振器（150nm×150nm）における正弦波型共振モード（ $\lambda_0=532\text{nm}$ ）。電場は入射電場強度で規格化している[6,7]。

(2) 国内外における位置づけとインパクト

近年、光のメタマテリアルの研究は負屈折率媒質などのバルクメタマテリアルから平面化がすすみ、メタサーフェス（メタ表面）に研究の中心が移行している。HMM はバルクメタマテリアルではあるが、現在でも世界的に研究が盛んに行われている系といえる[9]。本研究は EMA による近似が中心であった HMM 中の伝搬特性を表面プラズモンの結合モードとしてマイクロな視点から解明した点に特徴がある。また、HMM 光共振器を用いると共振波長が共振器のサイズに依存しない極めて小さな共振器が実現できることを理論的に提案した。これは応用上きわめて重要な成果であり、光共振器の概念に変革を迫るものである。これにより、HMM 光共振器自体をメタ原子とするような上位のメタマテリアル「メタメタマテリアル (meta-metamaterial)」を実現することができる。

(3) 今後の展望

本研究において HMM 光導波路および HMM 光共振器中のバルク導波モードのもつ興味深い特性を系統的に解明することができた。バルク導波モードはその空間分布を考慮すると、表面プラズモンの表面波よりもシリコン光導波路との接続が容易で、チップ内光インターコネクションとも整合性が高いと考えられる。

電子集積回路の微細化が極限まで進展していることに比べると、光集積回路の微細化は緩や

かであり、回折限界という物理的限界で止まっているように見える。フォトニクスが回折限界を超えるためには、原理的に図 1 に示すような双曲型分散関係の利用が不可欠である。しかし、プラズモニックデバイスは金属の持つ損失による、光閉じ込め効果と伝送損失のトレードオフの問題に苦しめられてきた。プラズモニック導波路は損失のために伝搬距離を長くとれないので、ナノ光集積回路の中で局所的なピンポイントでの利用が模索されている。その反動もあって、現在、無損失の高屈折率誘電体を用いた誘電体メタサーフェスの研究がブームとなり、誘電体のもつ磁気双極子の利用がすすんでいる[10]。しかし、原理的に誘電体は損失こそ小さくできるが回折限界を避けることは不可能であり、ナノフォトニクスの応用を考える場合に光の閉じ込め性能には限界があることを忘れてはならない。

本研究は萌芽期の研究として原理的な方向性を示すことはできたが、光集積回路の微細化に貢献するためにはさらに多くの研究が必要である。本研究のテーマである HMM は誘電体と負誘電体のハイブリッド系光学媒質であるから、二つの良いところ取りのできる可能性を秘めた新しい「バルク光学材料」といえる。今後は誘電体と負誘電体の二つを融合させ、双曲型分散関係をできるだけ低損失な系で実現するという戦略が重要である。負誘電体フォトニクスのプラズモニクスと従来の誘電体フォトニクスを融合させた「ハイパボリックフォトニクス (Hyperbolic Photonics)」の確立が必要である。

< 引用文献 >

- [1] J. Takahara, *Plasmonic Nanoguides and Circuits*, ed. S.I. Bozhevolnyi, (Pan Stanford Publishing, 2009) Ch. 2.
- [2] M.S. Tame, K.R. McEnery, S.K. Özdemir, J. Lee, S.A. Maier and M.S. Kim, “Quantum Plasmonics” *Nature Phys.* 9, 329 (2013).
- [3] A. Poddubny, I. Iorsh, P. Belov, and Y. Kivshar, “Hyperbolic metamaterials” *Nature Photon.* 7, 948 (2013).
- [4] X. Yang, J. Yao, J. Rho, X. Yin, and X. Zhang, “Experimental realization of three-dimensional indefinite cavities at the nanoscale with anomalous scaling law” *Nature Photon.* 6, 450 (2012).
- [5] M. Higuchi and J. Takahara, “Plasmonic interpretation of bulk propagating waves in hyperbolic metamaterial optical waveguides” *Opt. Express* 26(2), pp.1918-1929 (2018).
- [6] 相良潤、高原淳一：「ハイパボリックメタマテリアル光共振器における光共振モードの X 型空間分布」, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会 10p-PB3-2 (東京工業大学) 2019 年 3 月 10 日.
- [7] 高原淳一、相良潤：「TiO₂/SiO₂ 積層型ハイパボリックメタマテリアル光共振器における特異な共振モード」, 電子情報通信学会 レーザー・量子エレクトロニクス研究会 (LQE) 信学技報 LQE2018-180, pp.171-174 (阪大中ノ島センター) 2019 年 1 月 18 日.
- [8] J. Sagara and J. Takahara, (in preparation).
- [9] O. Takayama and A.V. Lavrinenko, *J. Phys. Soc. Am B*, 36(8), F38 (2019).
- [10] J. Scheuer, “Optical Metasurfaces Are Coming of Age: Short- and Long-Term Opportunities for Commercial Applications”, *ACS Photonics* (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 高原淳一、相良潤 | 4. 巻 LQE2018-180 |
| 2. 論文標題 TiO ₂ /SiO ₂ 積層型ハイパボリックメタマテリアル光共振器における特異な共振モード | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 信学技報 | 6. 最初と最後の頁 171-174 |
| 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 Mai Higuchi and Junichi Takahara | 4. 巻 26 |
| 2. 論文標題 Plasmonic interpretation of bulk propagating waves in hyperbolic metamaterial optical waveguides | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Optics Express | 6. 最初と最後の頁 1918-1929 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1364/OE.26.001918 | 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 - |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件/うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 相良潤、高原淳一 |
| 2. 発表標題 ハイパボリックメタマテリアル光共振器における光共振モードのX型空間分布 |
| 3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 相良潤、高原淳一 |
| 2. 発表標題 TiO ₂ /SiO ₂ 超低損失ハイパボリックメタマテリアル共振器の数値解析 |
| 3. 学会等名 ナノオプティクス研究グループ 第25回研究討論会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高原淳一、相良潤 |
| 2. 発表標題 TiO ₂ /SiO ₂ 積層型ハイパボリックメタマテリアル光共振器における特異な共振モード |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会 レーザー・量子エレクトロニクス研究会 (LQE) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Junichi Takahara, Mai Higuchi and Jun Sagara |
| 2. 発表標題 Interaction of Infrared Light to Bulk Propagating Waves in Hypeboloc Metamaterial Optical Waveguide |
| 3. 学会等名 PIERS 2018 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 高原淳一 |
| 2. 発表標題 メタサーフェスによる光吸収・熱輻射制御の基礎と応用 |
| 3. 学会等名 産業技術総合研究所 第10回「光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点」/ 第7回電子光技術 合同シンポジウム (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 樋口舞衣、高原淳一 |
| 2. 発表標題 ハイパボリックメタマテリアル光導波路における有効媒質近似の適用限界 |
| 3. 学会等名 第15回プラズモニクスシンポジウム |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 樋口舞衣、高原淳一 |
| 2. 発表標題 中赤外域における誘電体ハイパボリックメタマテリアルの光学特性とその応用 |
| 3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 0PJ2017 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Mai Higuchi and Junichi Takahara |
| 2. 発表標題 Theoretical study about optical waveguide with hyperbolic metamaterials |
| 3. 学会等名 The 8th International Conference on Surface Plasmon Photonics (SPP8) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
| | | | |