

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K04982

研究課題名(和文) 積層型メタルスリットアレイ構造の擬似誘電体的性質を利用したテラヘルツ光制御

研究課題名(英文) THz wave control using quasi-dielectric properties of the stacked metallic slit arrays

研究代表者

徳田 安紀 (Tokuda, Yasunori)

岡山県立大学・情報工学部・教授

研究者番号：80393502

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：金属板に周期的に溝を切ったメタルスリットアレイは、そのスリット周期より波長が長い電磁波に対して、たとえ、体積のほとんどを金属が占めていても、あたかもガラスのような誘電体とみなせる。さらに、その等価屈折率はスリットの周期と幅の比で決まり、原理的には1から までの全ての屈折率範囲で変えられる。

本研究では、この擬似的な誘電体を多段に積み重ねた構造の光学特性を理論と実験の両面から詳しく調べ、通常の誘電体多層構造とは異なった光学共鳴モードの特異な振舞いを見出し、その物理的メカニズムを解明した。得られた知見は、光波と電波の境界にあるテラヘルツ波を制御する新奇デバイスの創出に有用と考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光波と電波の境界領域の電磁波であるテラヘルツ波は、近年、その利用が活発に検討されている。しかしながら、安価で容易に加工できる光学材料が少ない。テラヘルツ領域で誘電体的な性質を示すサブミリオード周期のメタルスリットアレイは、安価な金属材料を使って容易に作製できるため、その積層構造が示す光学特性の解明は応用上大きな意味がある。また、近年注目されているメタマテリアルの一種でもあり、得られた成果は学術的にも興味深い。

量子井戸や超格子の人工半導体構造を用いて種々の重要な電子デバイスが生み出されてきたように、屈折率を自由に制御できる人工誘電体構造を用いて新たな光デバイスを生み出すための道を拓く研究である。

研究成果の概要(英文)：A metallic plate with periodically cut-through slits behaves similar to a dielectric under a metamaterial condition where the incident light wavelength is longer than the slit periodicity. Its effective refractive index is defined by the ratio of the slit periodicity to the slit width, and thus is, in principle, tunable over the entire range from 1 to only by control of the geometrical parameters.

In this work, the optical properties of the stacked structures composed of such quasi-dielectrics were investigated in detail experimentally and theoretically. The extraordinary behaviors of the optical resonance modes, which are different from those of the normal dielectric multilayered structures, were found out, and then the physical mechanisms underpinning the phenomena were clarified. The information obtained in this work must be useful for creation of the novel devices that control the terahertz waves.

研究分野：光・量子エレクトロニクス

キーワード：メタマテリアル メタルスリットアレイ 人工誘電体 テラヘルツ波

1. 研究開始当初の背景

波長より小さい構造体を周期的に配列した人工構造物として定義されるメタマテリアルは、負の屈折率を持つ材料の創製[1]や表面プラズモンポラリトンによる異常透過現象[2]などに代表されるように、基礎科学の観点からも応用技術の観点からも強い関心を集めていた。一方、光波と電波の境界領域に当たるテラヘルツ波は、未開拓の周波数帯の電磁波として、その利用に強い注目が集まっていた。そして、メタマテリアルをそのデバイス材料として利用することに期待がもたれ [3]、我々も研究を開始していた[4-6]。

金属板に貫通した溝を周期的に切ったメタルスリットアレイは、メタマテリアルの一種とみなせ、その体積のほとんどを金属が占めていても Rayleigh-Wood の回折限界以下の周波数領域で顕著な Fabry-Perot 的な光学共鳴を示し、疑似的な誘電体とみなせることが分かっていた[7-9]。さらに、その等価屈折率はスリット周期とスリット幅の比で決まることが示されていた[10]。

2. 研究の目的

本研究の目的は、テラヘルツ周波数領域で擬似的な誘電体として働くサブミリオータ周期のメタルスリットアレイの積層構造の光学的性質を調べ、通常の誘電体多層膜とは異なった新たな物理現象を引き出し、その物理的メカニズムを解明し、テラヘルツ波を制御するデバイス創製につながる知見を得ることである。

3. 研究の方法

図 1(a)に、メタルスリットアレイ構造を示す。 h はスリット長、 d はスリット間隔、 w はスリット幅を示す。メタルスリットアレイの誘電体としての等価屈折率は d/w 、等価膜厚は hw/d で与えられる[10]。図 1(b)は、メタルスリットアレイでエアギャップ層を挟んだ二段構造の模式図である。 s はアレイ間の距離、 l はアレイ間の相対横ずれ量を示す。

本研究では、このような構造のテラヘルツ帯での光学特性を理論と実験の両面から調べた[11-13]。また、空気層を他の誘電体や別のメタルスリットアレイで置き換えた構造も調べた[14,15]。



図1 メタルスリットアレイ構造の模式図。(a) 単層、(b) 二段構造

理論検討は、時間領域有限差分 (FDTD: Finite-Difference Time-Domain) 法などを用いて行った。なお、金属部分は完全導体と仮定し、垂直入射に対する透過特性を調べた。実験検討では、試料を真鍮板のワイヤ放電加工を用いて作製し、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS: Terahertz Time-Domain Spectroscopy) を用いて透過スペクトルの測定を行った。

4. 研究成果

4-1 エアギャップをもつ二段型メタルスリットアレイ構造の透過特性

4-1-1 横ずれが無い場合 ($l=0$) の実験結果と計算結果 [11]

図 2 は、 d が $500 \mu\text{m}$ 、 h が $1000 \mu\text{m}$ で w が $150, 200$ および $270 \mu\text{m}$ の二段構造に対する $l=0$ の場合の透過スペクトルのエアギャップ依存性の TDS 測定結果である。どの場合も、 cd で決まる 0.6 THz の回折限界周波数 f_{RW} 以下で、顕著な Fabry-Perot 的な共鳴モードが観測されている。ピーク周波数の変化はエアギャップ幅が約 $300 \mu\text{m}$ 以上ではどの場合もほぼ同じである。しかし、約 $300 \mu\text{m}$ 以下では、モードの消失や減衰がみられ、スリット幅に対してその様相は異なっている。なお、スリット幅の増大に対して透過ピーク幅が広がるのは、共鳴条件が甘くなるためであり、 d/w で与えられるメタルスリットアレイの等価屈折率が小さくなることに対応している。

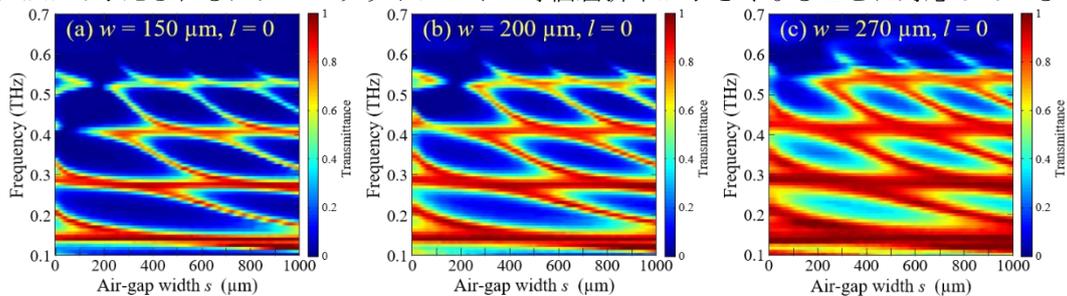


図2 透過スペクトルのエアギャップ s 依存性 ($l=0$) の TDS 測定結果

図 3 は、同等の構造に対する FDTD シミュレーション結果である。ここで、共鳴モードを、ギャップがない場合、すなわち厚さが $2000 \mu\text{m}$ の単層のスリットアレイに対する共鳴モード次数 m を用いて D_m で表した。実験では D_0 モードは観測されなかったが、全てのスリット幅に対して FDTD 計算結果は TDS 測定結果を極めてよく再現していることが分かる。なお、約 $300 \mu\text{m}$ 以下でのモード消失を含む共鳴モードの特異な振舞いについては後述する。

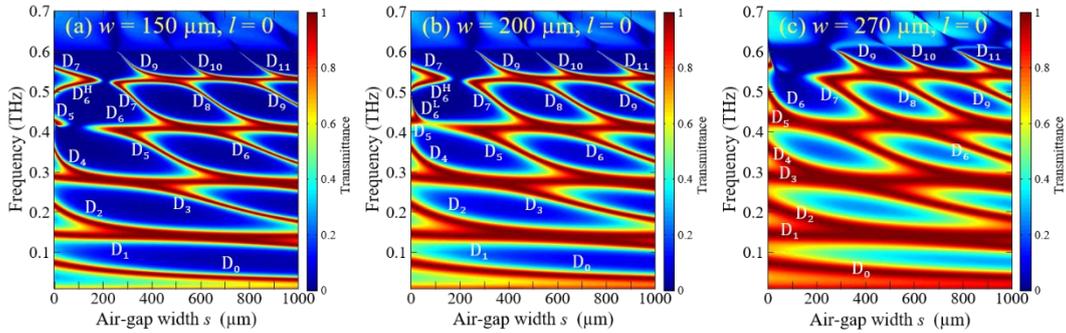


図3 透過スペクトルのエアギャップ s 依存性 ($l=0$) の FDTD 計算結果

4-1-2 半周期ずれの場合 ($l=d/2$) の実験結果と計算結果 [11,12]

図4は、アレイが相対的に半周期ずれた場合 ($l=250\ \mu\text{m}$) の w が $150\ \mu\text{m}$, d が $500\ \mu\text{m}$, h が $1000\ \mu\text{m}$ に対する透過スペクトルのエアギャップ依存性の TDS 測定結果と FDTD 計算結果である。ずれない場合と同様に、一見、両者は極めてよく一致しているように見える。

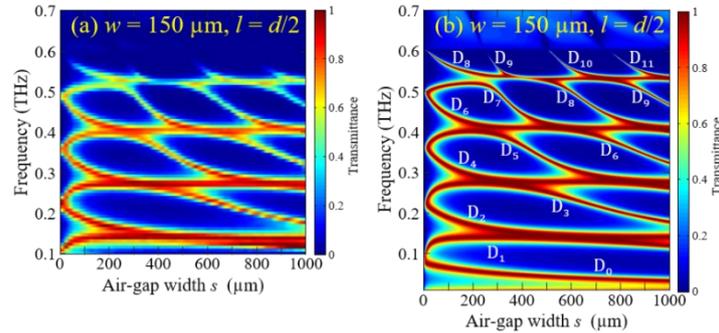


図4 透過スペクトルのエアギャップ s 依存性 ($l=250\ \mu\text{m}$). (a) TDS 測定, (b) FDTD 計算

しかし、図5(a)に示すように実験では光学パスが遮断されるはずの $s=0$ においても強い透過モードが観測された。この原因は、アレイを密着させても、実際はわずかな隙間が存在し、そこを縫って光は表面プラズモンポラリトンとして伝搬するためと考えられ、図5(b)に示した $s=10\ \mu\text{m}$ に対する FDTD 計算結果と非常によく一致した。

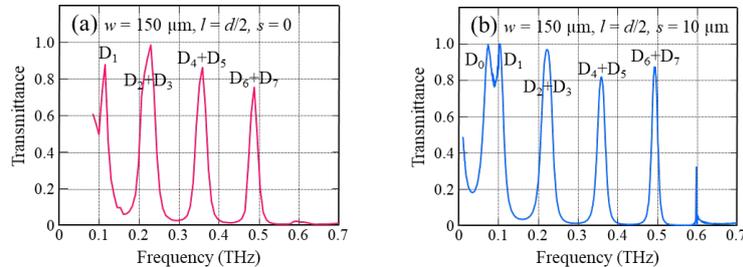


図5 透過スペクトル ($l=250\ \mu\text{m}$) の(a) TDS 測定 ($s=0$)と(b) FDTD 計算 ($s=10\ \mu\text{m}$)

4-1-3 偶数次モードのブルーシフトとスペクトル異常 [11,12]

ここでは、上で述べたモード消失に関する偶数次モードのブルーシフト現象について記す。図6は、 $h=1000\ \mu\text{m}$, $d=500\ \mu\text{m}$, $w=100\ \mu\text{m}$ の二段構造に対する透過スペクトルのエアギャップ依存性の計算結果である。 f_{RW} 以下で強い共鳴モードがみられるが、 f_c で示した周波数以上で4次モードと6次モードはエアギャップが広がるにつれブルーシフトしていることが分かる。125と220 μm 付近でみられるモード消失は、ブルーシフトした4次と6次の偶数次モードが、それぞれ、上の5次と7次の奇数次モードとぶつかり、破壊的な干渉によって生じている。

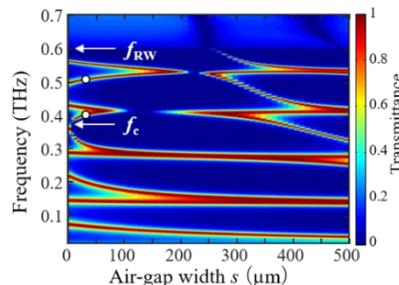


図6 透過スペクトルのエアギャップ s 依存性 ($l=0, w=100\ \mu\text{m}$)

ここで、この偶数次モードのブルーシフトに対する臨界周波数 f_c は

$$f_c = c/2(d - w) \quad (1)$$

で表されることを示した。この f_c に対応する臨界波長を λ_c とすると、(1)式は、

$$\lambda_c/2 = d - w \quad (2)$$

と書き替えられ、ブルーシフトが生じるためには、共鳴波長の半分がメタルで上下を挟まれた導波路部分に収まる必要があることを意味する。

さらに、図7(a)に、わずかにギャップを開いた状態 ($s = 0.4 \mu\text{m}$) のいろいろな w に対する透過スペクトルを示す。矢印で示したように、 w が10から250 μm のスペクトルにおいて異常なディップがみられた。図7(b)は、(1)式と図7(a)のスペクトルから読みとったディップ周波数をプロットしたもので、全ての w の値に対して極めてよく一致していることが分かる。これより、異常なディップは偶数次モードのブルーシフトに起因していることが分かった。

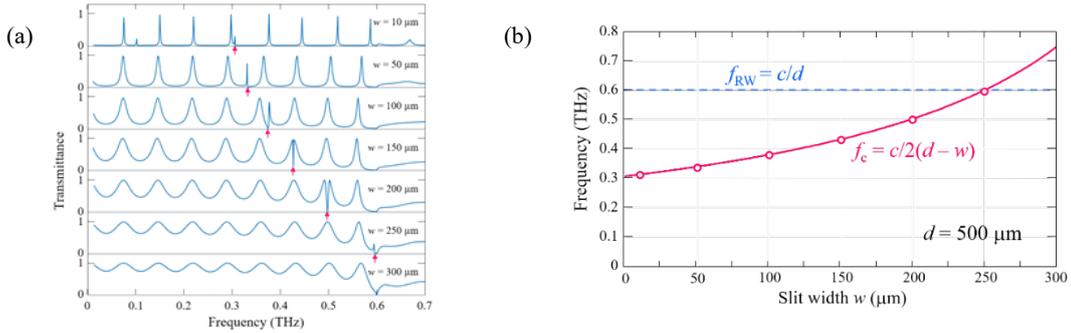


図7 (a) 透過スペクトルのスリット幅 w 依存性 ($s = 0.4 \mu\text{m}$) と (b) f_c のスリット幅 w 依存性

また、図8(a)は、 s が0.4 μm の場合の透過スペクトルをいろいろな横ずれ量 l に対して計算した結果である。矢印で示したように l が100 μm までのスペクトルで異常なディップがみられた。ここで、横ずれを考慮した臨界周波数は、(1)式を拡張して

$$f_c = c/2(d - w - l) \quad (3)$$

で与えられることを示した。図8(b)で、黒丸はスペクトルから読み取ったディップの周波数をプロットしたものであり、(3)式の曲線と極めてよく一致していることが分かる。

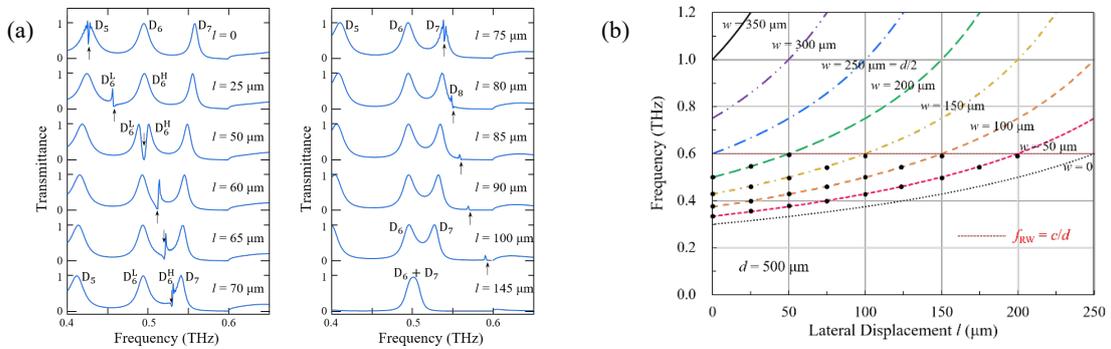


図8 (a) 透過スペクトルのアレイ間の横ずれ量 l 依存性 ($s = 0.4 \mu\text{m}$) と (b) f_c の横ずれ量 l 依存性

4-2 メタルスリットアレイ間への誘電体の挿入効果 [14]

図9(a)のようにメタルスリットアレイ ($h = 1000 \mu\text{m}$, $d = 500 \mu\text{m}$, $w = 150 \mu\text{m}$) 間に、屈折率 n_p が1.4で1枚の厚さが約100 μm のコピー用紙を複数枚挿入した構造に対して透過スペクトルを測定した。比較のために、図9(b)のように同じ枚数のコピー用紙をスペーサとして用いて、エアギャップに対するスペクトルも測定した。

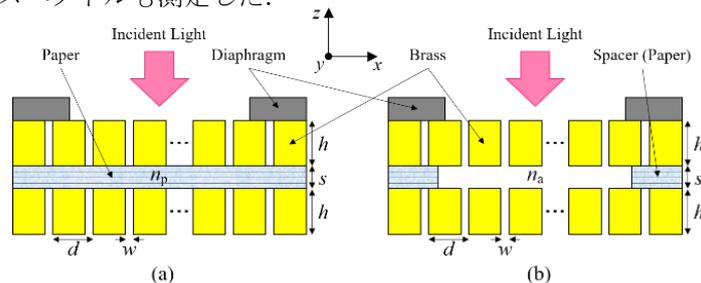


図9 実験系の断面図。中間層は(a)コピー紙 (屈折率 $n_p = 1.4$) と(b)エアギャップ (屈折率 $n_a = 1.0$)

図 10(a)の赤の実線は、挿入枚数 N に対する透過スペクトルを示す。また、黒の点線は対応したエアギャップに対する透過スペクトルを示す。図 10(b)と 10(c)は、それぞれ、横軸に挿入枚数 N をとったコピー用紙とエアギャップに対するスペクトルマップである。どちらの場合も、 f_{RW} の 0.6 THz 以下で強い Fabry–Perot 的な共鳴モードが観測された。しかし、図 10(b)のコピー用紙を挟んだ構造では 0.45 THz 以上のモードは強く減衰していることが分かる。

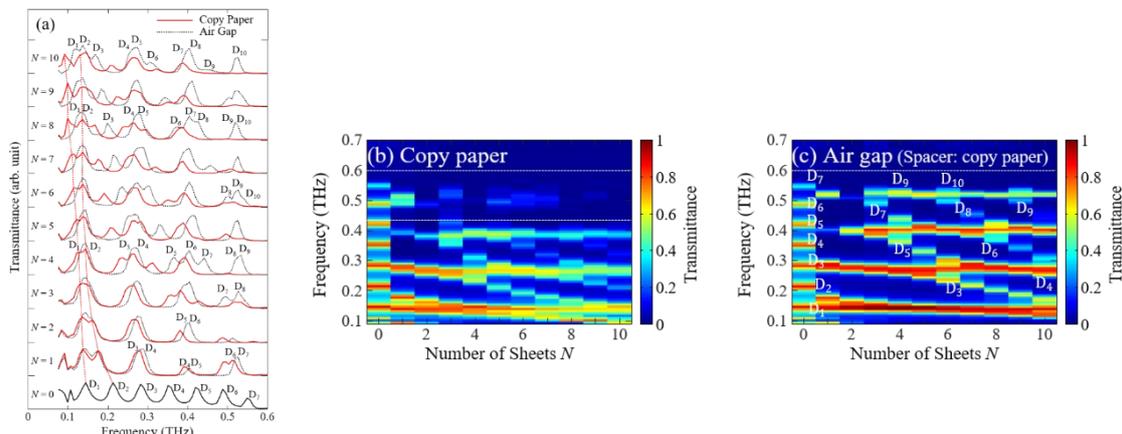


図 10 透過スペクトルの測定結果. (a)挿入枚数 N に対する透過スペクトル. (b)コピー用紙挿入に対するスペクトルマップと(c)エアギャップに対するスペクトルマップ

この実験結果を理解するために、等価な構造に対して透過スペクトルを計算した。図 11(a)はメタル部以外は全て空気 ($n_a = 1.0$) の場合、図 11(b)は挿入実験に対応するスリット間のみが誘電体 ($n_p = 1.4$) の場合のスペクトルマップである。

図 11(a)の計算結果は、図 10(c)のエアギャップに対する実験結果とよく合っている。ここで、 $s = 100$ と $200 \mu\text{m}$ 付近のモード消失は、それぞれ、 D_5 モードとブルーシフトした D_4 モード、および D_7 モードとブルーシフトした D_6 モードとの干渉による。一方、コピー用紙の挿入に対応した図 11(b)の計算結果を見ると、0.43 と 0.60 THz の間でのモードの振舞いは非常に複雑になっている。これは、内側のスリット端での回折限界周波数が $c/n_p d$ の 0.429 THz に下がったことによる。すなわち、0.429 THz 以下ではどちらのスリット端でも回折は生じないので通常の共鳴特性が観測されるが、0.429 と 0.600 THz の間では内側のスリット端で回折が生じるため、アレイの間の領域では回折波が干渉し、複雑な透過特性を示したと考えられる。しかし、図 10(b)の実験結果で 0.45 THz 以上のモードは強く減衰している。これは、実験試料の構造ばらつきにより回折条件が乱れているためと考えられる。

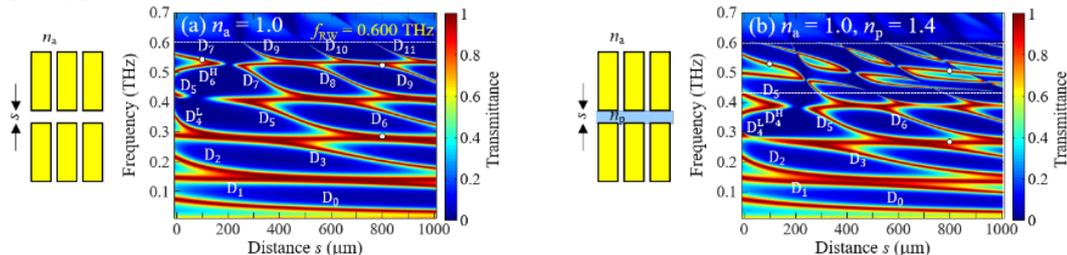


図 11 アレイ間距離 s に対する透過スペクトルマップの計算結果. (a) $n_a = 1.0$, (b) $n_a = 1.0$, $n_p = 1.4$

<参考文献>

- [1] J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett. **85**, 3966 (2000).
- [2] T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio, and P. A. Wolff, Nature **391**, 667 (1998).
- [3] 萩行正憲, 応用物理 **81**, 271 (2012).
- [4] Y. Tokuda, H. Takaiwa, K. Sakaguchi, Y. Yakiyama, K. Takano, K. Akiyama, T. Fukushima, and M. Hangyo, Appl. Phys. Express **5**, 042502 (2012).
- [5] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, K. Takano, T. Fukushima, and M. Hangyo, AIP Advances **2**, 042112 (2012).
- [6] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, T. Nishihara, K. Takano, T. Fukushima, and M. Hangyo, Appl. Phys. Express **6**, 062602 (2013).
- [7] B. Hou, J. Mei, M. Ke, W. Wen, Z. Liu, J. Shi, and P. Sheng, Phys. Rev. B **76**, 054303 (2007).
- [8] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, K. Takano, T. Fukushima, and M. Hangyo, J. Appl. Phys. **115**, 243104 (2014).
- [9] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, K. Takano, Y. Yamaguchi, and T. Fukushima, Appl. Phys. Express, **9**, 032201 (2016).
- [10] J. T. Shen, P. B. Catrysse, and S. Fan, Phys. Rev. Lett. **94**, 197401 (2005).
- [11] Y. Tokuda, K. Takano, K. Sakaguchi, K. Kato, M. Nakajima, and K. Akiyama, J. Appl. Phys. **123**, 183102 (2018).
- [12] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, S. Watanabe, K. Kato, K. Takano, M. Nakajima, and K. Akiyama, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 122004 (2019).
- [13] Y. Tokuda, K. Sakaguchi, Y. Yamaguchi, and K. Takano, AIP Advances **7**, 035209 (2017).
- [14] Y. Tokuda, K. Takano, K. Sakaguchi, K. Kato, M. Nakajima, and K. Akiyama, AIP Advances **8**, 095305 (2018).
- [15] Y. Tokuda, K. Takano, Y. Yamaguchi, K. Sakaguchi, and M. Nakajima, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 030306 (2017).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Y. Tokuda, K. Takano, K. Sakaguchi, K. Kato, M. Nakajima, K. Akiyama	4. 巻 8
2. 論文標題 Insertion effects of natural dielectric between artificial dielectrics formed by metallic sub-wavelength slit arrays	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 095305(10pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5043149	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 Y. Tokuda, K. Takano, K. Sakaguchi, K. Kato, M. Nakajima, and K. Akiyama	4. 巻 123
2. 論文標題 Waveguide resonance mode response of stacked structures of metallic sub-wavelength slit arrays	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 183102(8 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.5027301	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 Yasunori Tokuda, Keisuke Takano, Yuki Yamaguchi, Koichiro Sakaguchi, Makoto Nakajima	4. 巻 56
2. 論文標題 Quasi-dielectric characteristics of stacked metallic metamaterials	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 030306 (4 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/JJAP.56.030306	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 Yasunori Tokuda, Koichiro Sakaguchi, Yuki Yamaguchi, Keisuke Takano	4. 巻 7
2. 論文標題 Multiple intersection properties of optical resonance modes in metallic	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035209(6 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4978616	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 Y. Tokuda, K. Sakaguchi, S. Watanabe, K. Kato, K. Takano, M. Nakajima, K. Akiyama	4. 巻 58
2. 論文標題 Marked effects of lateral displacement on the optical transmission properties of stacked artificial dielectric systems composed of metallic sub-wavelength slit arrays	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 122004(8 pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab5248	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12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 坂口浩一郎, 高野恵介, 加藤康作, 亀井大夢, 津野志奈, 渡辺将伍, 中嶋誠, 徳田安紀
2. 発表標題 積層型メタルスリットアレイの光学共鳴モードのブルーシフト特性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂口浩一郎, 加藤康作, 高野恵介, 渡辺将伍, 中嶋誠, 徳田安紀
2. 発表標題 2段メタルスリットアレイ構造における誘電体の挿入効果
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 徳田安紀, 坂口浩一郎, 渡辺将伍, 加藤康作, 中嶋誠
2. 発表標題 メタルスリットアレイ積層構造への誘電体挿入効果
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂口 浩一郎, 高野 恵介, 徳田 安紀
2. 発表標題 積層型メタルスリットアレイの光学共鳴モードの多重交差特性
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂口 浩一郎, 高野 恵介, 加藤 康作, 中嶋 誠, 徳田 安紀
2. 発表標題 積層型メタルスリットアレイの光学共鳴モードのTHz計測
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 徳田安紀, 加藤康作, 坂口浩一郎, 高野恵介, 中嶋誠
2. 発表標題 積層型メタルスリットアレイのTHz透過特性の測定
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 坂口 浩一郎, 山口 祐生, 高野 恵介, 中嶋 誠, 徳田 安紀
2. 発表標題 積層型メタルスリットアレイと誘電体多層膜との透過特性の比較
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂口 浩一郎、山口 祐生、高野 恵介、福嶋 丈浩、中嶋 誠、徳田 安紀
2. 発表標題 積層型メタルスリットアレイの光学共鳴モードの交差特性
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 徳田安紀, 高野恵介, 山口祐生, 坂口浩一郎, 中嶋誠
2. 発表標題 積層型メタルスリットアレイの透過特性
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山口 祐生, 妹尾 駿一, 三輪 健太, 坂口 浩一郎, 福嶋 丈浩, 徳田 安紀, 高野 恵介, 中嶋 誠
2. 発表標題 積層型メタルスリットアレイの疑似誘電体的性質
3. 学会等名 第67回電気・情報関連学会中国支部連合大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 渡辺将伍, 坂口浩一郎, 加藤康作, 佐藤希真, 平松大輝, 山下拓真, 中嶋誠, 徳田安紀
2. 発表標題 積層型メタルスリットアレイの透過特性に対する横ずれ効果
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺 将伍, 坂口 浩一郎, 徳田 安紀
2. 発表標題 人工誘電体メタルスリットアレイの積層構造の光学共鳴特性
3. 学会等名 第21回IEEE 広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

岡山県立大学情報工学部情報通信工学科光電子工学研究室 http://opt.c.oka-pu.ac.jp/

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
研究分担者	坂口 浩一郎 (Sakaguchi Koichiro) (10551822)	岡山県立大学・情報工学部・助教 (25301)	
研究分担者	高野 恵介 (Takano Keisuke) (70583102)	大阪大学・レーザー科学研究所・助教 (14401)	
研究分担者	加藤 康作 (Kato Kosaku) (40751087)	大阪大学・レーザー科学研究所・特任研究員 (14401)	