

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04522

研究課題名（和文）狭帯域透過導波モード共鳴素子に関する研究

研究課題名（英文）Research on guided-mode resonance narrow bandpass filter

研究代表者

金高 健二（Kintaka, Kenji）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・研究グループ長

研究者番号：50356911

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：薄膜光導波路に設けられた周期構造により、空間中の伝播光と光導波路中の伝播光（導波モード光）が結合して生じる導波モード共鳴（GMR）を利用した狭帯域波長フィルタ素子を理論的・実験的に検討した。透過特性を示す素子として、誘電体多層膜基板上にGMR構造を積層集積した素子、2次元周期構造と直交偏光の導波モード光間の干渉を利用する素子を考案し、理論特性を明らかにした。また、誘電体多層膜基板上にGMR構造を積層集積した構造において、波長選択再起反射素子を新規に考案し実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

導波モード共鳴（GMR）に関する研究は、特に2000年代以降国内外で活発に実施されているが、反射型素子に関する研究がほとんどである。本研究では、数種類の新たな透過型GMR素子を考案し、理論実証した。どれも新規な構造であり、当該分野の発展に寄与するものと期待できる。さらに、本研究では特に、開口微小化を念頭に素子提案を行っており、少しずつ動作波長の異なるフィルタのアレイ集積化が容易であり、将来の超小型分光センサへの応用・実用化が期待できる。

研究成果の概要（英文）：A guided-mode resonance filters (GMRFs) consists of a grating with sub-wavelength period and a thin-film waveguide, and couple an incident free-space wave and guided waves. We have proposed and investigated new types of GMRFs for realization of narrowband-pass filters. One consists of a GMRF integrated on a dielectric multilayer substrate, and utilize an interference effect in a vertical resonator. The other consists of a two-dimensional grating on a transparent substrate, and utilize a destructive interference between two orthogonal guided modes. We have also proposed and demonstrated narrowband retroreflectors consisting of a GMRF integrated in a waveguide cavity resonator on a dielectric multilayer substrate.

研究分野：光波工学

キーワード：光集積回路 光導波路 導波モード共鳴 グレーティング 波長フィルタ 光共振器

1. 研究開始当初の背景

導波モード共鳴 (Guided-Mode Resonance : GMR) とは、薄膜光導波路に設けられた周期構造 (サブ波長グレーティング) により、空間中の伝搬光 (空間光) が光導波路の伝搬光 (導波光) に結合し、結合した導波光がグレーティングにより再び空間光へと放射されることで生じる光波の共鳴状態である。入射光 (空間光) の反射光/透過光に光導波路からの放射光が重畳されて干渉するが、導波光は離散的であり限られた条件でしか励振されないため、基本的な構造の素子においては狭帯域反射特性を示す。偏光依存性を有し、導波路やグレーティングの構造変更により帯域制御が比較的容易に実施可能なため、フィルタやミラー、偏光制御素子など種々の素子への応用に向けた研究開発が世界的に実施されている。これまでに実証されている GMR 素子は上記のように多くが狭帯域反射特性を示すものであるが、波長フィルタや分光などの応用においては狭帯域透過 (バンドパス) 特性が求められることも多い。狭帯域透過特性を示す GMR 素子も検討・報告されているが、課題も多くまだ実現化されていない。狭帯域透過型 GMR 素子の実現可能性を示せば、本学術分野の発展が期待できるだけでなく、応用可能性が広がり、分光装置などの小型軽量化に繋がるなど、産業界へのインパクトに繋がることを期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、GMR による狭帯域透過特性の実証を目的とする。

GMR は古くから知られている異常反射現象であるが、近年になっても光波挙動のメカニズムは十分には解明されておらず、もっぱら厳密結合波解析 (RCWA) を用いた数値シミュレーションに基づき、様々な特性が報告されてきている。数値シミュレーションに基づく手法では、経験と勘に左右され、実用的な素子の設計は困難である。一方我々の研究グループでは、これまでの集積光学分野の研究で培ったモード結合理論を GMR 素子の挙動解析に導入し、複素平面上で理解する解析手法を新たに考案することで、光波結合の様子を解明してきている。本研究では、透過型 GMR 素子の設計手法等を開発するとともに、実際に作製し特性評価を行うことで、狭帯域 GMR の実現可能性を理論的・実験的に検証する。

3. 研究の方法

(1) 透過型 GMR 素子の設計

本研究では、我々の研究グループが考案した、時間領域モード結合理論と空間領域モード結合理論を融合させた、時空間モード結合理論に基づく解析モデルを用いて素子設計を行った。また、設計した素子に対して、RCWA や有限差分時間領域 (FDTD) 法を用いた数値シミュレーションによる動作検証を行った。本研究では、特に作製許容誤差に注目すると共に、素子サイズ (開口サイズ) の微小化を検討し、現実的に作製可能な素子の設計を行った。

(2) デバイス作製と特性評価

上記で設計した素子に対し、実際に作製を検討した。光導波路構成材料としては、制御性や温度安定性の高い無機誘電体材料を用いた。成膜にはプラズマ CVD、反応性スパッタを用いると共に、必要に応じて外注を検討した。グレーティングパターンは電子ビーム描画と反応性ドライエッチングにより作製した。

作製した素子の評価には、波長可変レーザと光スペクトラムアナライザを用いた専用の評価光学系を構築して実施した。

4. 研究成果

(1) 透過型 GMR 素子の設計

上述のように、透明基板を用いた GMR 素子では、共鳴条件 (波長) においてのみ強い反射が得られる狭帯域反射特性となる。狭帯域透過特性を得るためには、共鳴条件以外では反射する必要があるので、反射基板を用いる構成を検討した。図 1 に共鳴波長 1540nm に対する素子設計例の断面構造を示す。誘電体多層膜基板の上に光バッファ層を介してグレーティングと導波路コアから構成される。グレーティング構造としては、GMR 素子を微小開口とするため、我々の研究グループが考案した、1 対の分布ブラッグ反射器 (DBR) で構成される光導波路共振器内にグレーティングカップラ (GC) を集積した、共振器集積 GMRF (Cavity-Resonator-Integrated GMR Filter : CRIGF) 構造とした。この構造により、ピーク透過率 70%、波長選択幅 (半値全幅) 0.1nm が得られる

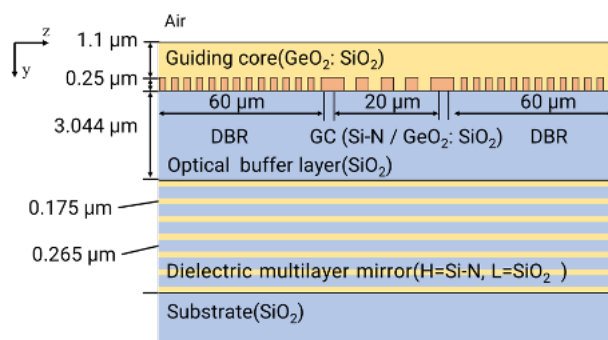


図 1 誘電体多層膜を用いた透過型 GMR 素子の設計例

ことを、FDTD シミュレーションにより確認した。この構造は、誘電体多層膜と GMR で構成される一種のファブリペロ共振器を構成している。従って、CRIGF 動作波長とファブリペロ干涉の強めあう波長とを一致させる必要があり、光バッファ層の膜厚依存性が大きいことが課題であることを明らかにした。

次に、透明基板上に 2 次元周期構造を有する GMR 素子を検討した。図 2 に共鳴波長 1575nm において動作する透過型 GMR 素子の設計例を示す。この構造では 2 つの直交した導波光に対して動作する 2 つの GMR を利用する。一方の導波光 (x 軸方向に伝搬する TM モード) に対しては、非常に強い空間光-導波光結合が生じるため広帯域反射特性を示し、もう一方の導波光 (y 軸方向に伝搬する TE モード) に対しては、弱い空間光-導波光結合により狭帯域反射特性を示すように導波路構造を設計した。さらにこの 2 つの共鳴状態を同時に発生 (同一波長で共鳴) させるようにそれぞれのグレーティング周期を設計することで、共鳴時には互いに打ち消しあうような干渉を起こさせる。その結果として広帯域な反射スペクトルの中に狭帯域な透過スペクトルが得られる。一般的に、狭帯域スペクトルで高効率を得るためには長い相互作用長が必要となる。そこで本素子では、y 軸方向に 2 重周期構造を用いることで、2 次回折による導波光面内の反射 (DBR) 効果を強め、必要な相互作用長の短尺化 (開口の微小化) を実現した。まず、この 2 重周期を有する 2 次元周期構造が平面内に無限にある場合、ピーク透過率約 100%、波長選択幅 (半値全幅) 0.4nm が得られることを RCWA シミュレーションにより確認した。また、開口を 85 μm 角、入射ビーム径を 45 μm に制限した場合でもピーク透過率は 96% が得られることを FDTD シミュレーションにより確認した。本素子は、導波方向が直交した 2 つの導波光の干渉を利用し、さらに狭帯域を実現するために一方に 2 重周期構造を採用した、全く新しい構成の透過型 GMR 素子の提案であり、本分野の発展に大いに貢献すると考えられる。

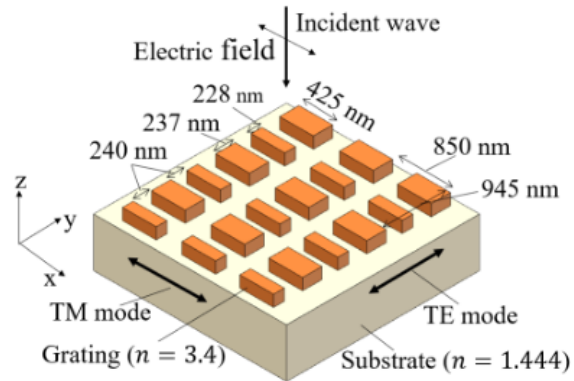


図 2 2 重周期構造を一方に持つ 2 次元周期構造を用いた透過型 GMR 素子の設計例

(2) デバイス作製と特性評価

本研究で設計した図 1 の透過型 GMR 素子については、グレーティングの埋込構造であること、導波路コア上面の平坦化が必要であること、光バッファ層の膜厚依存性が大きいなど、作製上の課題がいくつかある。さらに、動作波長に応じて光バッファ層の膜厚を制御する必要があり、波長が異なるフィルタを同一基板上へのアレイ集積化を行うことが困難であること、等の要因を考慮し、本研究ではこの透過型 GMR 素子の作製を行わなかった。

次に、本研究で設計した図 2 の透過型 GMR 素子は、単結晶 Si で導波路およびグレーティングを構成している。本素子を実現するためには、Si を精密かつ深く垂直に加工する必要があるが、コロナ禍による勤務先での延べ 9 ヶ月近い出勤制限も影響し、本研究期間中に素子作製が可能なレベルでのプロセス開発には至らなかった。しかし、研究・実験は継続して実施しており、実験データが得られ次第、学会発表や論文発表を行うことで成果を公表する予定である。実際に試作し、その特性を明らかにする事で、本素子の有用性を示すことができると共に、同様な構成での GMR 素子についての新たな知見が得られることが期待できる。

一方で、これまで我々の研究グループにおいて検討してきた、図 1 の構成に類似している、誘電体多層膜基板上に GMR 構造を積層集積する垂直入射の反射型素子においても、実際に試作した素子において、理論設計と近い特性は得られていなかった。さらに、透過型素子と同様に斜入射型素子も実用上は求められている。そこで、斜入射に対して狭帯域再帰反射特性を示す GMR 素子を初めて考案・設計し、誘電体多層膜基板を用いて作製した。図 3 に素子の断面構造を示す。誘電体多層膜の作製には、膜厚や屈折率の精密制御が必要であるため外注した。この誘電体多層膜基板の上に後工程として GMR 構造を作製するため、誘電体多層膜の熱履歴耐性や温湿度等の耐環境性、電子ビーム描画によるパターンニングに対する影響について検証を行った。誘電体多層膜を構成する材料としては、低屈折率側は SiO₂ とし、高屈折率側は Si₃N₄, TiO₂, Ta₂O₅, Nb₂O₅ を検討した。その結果、誘電体多層膜の成膜方法や材質によっては、後工程プロセスの熱履歴による膜剥がれが起こる、2 次電子の影響により電子ビーム描画による精密なパターンニングが困難になりやすい等、その後の成膜やパターンニングの工程

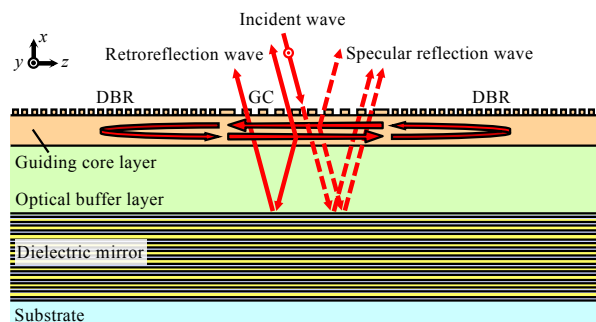


図 3 斜入射狭帯域再帰反射 CRIGF の断面構造と光波伝搬の様子

に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。試作した動作波長 1540nm 用の斜入射狭帯域再帰反射 CRIGF パターンの中央付近の SEM 写真を図 4 に示す。図 3 の y 方向にも光波を閉じ込めるため、グレーティングの凸構造を利用してチャンネル構造を形成した。作製した素子は、入射角 9.3° に対しピーク再帰反射率 86.8%、波長選択幅 2.1nm の測定結果が得られた。これは 2 次元モデルを用いた FDTD シミュレーションによる理論予測値の、入射角 8.8° 、ピーク再帰反射率 91.2%、波長選択幅 1.9nm とよく一致していた。誘電体多層膜を用いた CRIGF 素子において、理論予測をほぼ再現する特性が実際に得られた最初の実験結果であり、GMR 素子作製における種々の実験的な知見が得られただけでなく、我々の提案した解析モデルの正当性・有用性が証明できたと考えられる。

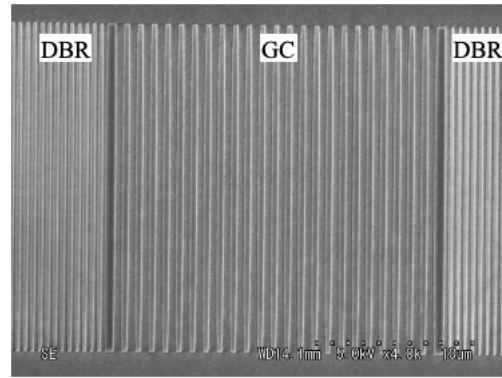


図 4 試作した斜入射狭帯域再帰反射 CRIGF

が証明できたと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Inoue Junichi, Kusuura Toshiaki, Ueda Ryohei, Kintaka Kenji, Ura Shogo	4. 巻 14
2. 論文標題 Narrowband focusing retroreflector with a thin-film structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 082003 ~ 082003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac09bf	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 Ueda Ryohei, Watanabe Akari, Ozawa Keisuke, Kintaka Kenji, Nishio Kenzo, Kusuura Toshiaki, Inoue Junichi, Ura Shogo	4. 巻 -
2. 論文標題 Laser-wavelength stabilization by a focusing cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Technical Digest of 26th Microoptics Conference	6. 最初と最後の頁 96 ~ 97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/MOC52031.2021.9598032	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 Ura Shogo, Tsuji Ryugo, Inoue Junichi, Kintaka Kenji	4. 巻 28
2. 論文標題 Multidimensional angle sensing method using guided-mode resonance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Review	6. 最初と最後の頁 650 ~ 654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10043-021-00688-y	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 Yang Zhiyu, Asai Ryo, Inoue Junichi, Kintaka Kenji, Ura Shogo	4. 巻 -
2. 論文標題 Narrow-bandpass filter using orthogonally propagating guided-mode resonance with doubly periodic grating	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 10th IEEE CPMT Symposium Japan	6. 最初と最後の頁 110 ~ 111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICISJ52620.2021.9648543	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 Inoue Junichi, Ura Shogo, Kintaka Kenji	4. 巻 -
2. 論文標題 Guided-mode Resonance Filter for Micro-optic Spectrometer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)	6. 最初と最後の頁 1812-1817
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ECTC32862.2020.00283	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 Kintaka Kenji, Kusuura Toshiki, Inoue Junichi, Ura Shogo	4. 巻 -
2. 論文標題 Retroreflection by Cavity-Resonator-Integrated Guided-Mode Resonance Mirror	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICTON51198.2020.9203013	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 Kintaka Kenji, Kusuura Toshiki, Inoue Junichi, Ura Shogo	4. 巻 32
2. 論文標題 Thin-Film Narrowband Retroreflector Based on Waveguide Grating Structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 933 ~ 936
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LPT.2020.3005411	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 Ura Shogo, Tsuji Ryugo, Inoue Junichi, Kintaka Kenji	4. 巻 -
2. 論文標題 Two-dimensional waveguide grating for sensing three-dimensional angle fluctuation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tech. Dig. International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020	6. 最初と最後の頁 31-32
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 Ueda Ryohei, Kusuura Toshiki, Inoue Junichi, Kintaka Kenji, Ura Shogo	4. 巻 -
2. 論文標題 Narrowband focusing mirror based on cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Tech. Dig. International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020	6. 最初と最後の頁 103-104
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 Asai Ryo, Inoue Junichi, Ura Shogo, Kintaka Kenji	4. 巻 -
2. 論文標題 Design of cavity-resonator-integrated guided-mode resonance narrowband-pass filter	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. IEEE CPMT Symposium Japan 2019	6. 最初と最後の頁 pp.165 - 166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICJSJ47124.2019.8998733	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 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 楊 知雨, 浅井 亮, 井上純一, 金高健二, 裏升吾
2. 発表標題 二重周期構造を持つ直交伝搬導波モード共鳴バンドパスフィルタの基礎検討
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 Ryohei Ueda, Akari Watanabe, Keisuke Ozawa, Kenji Kintaka, Kenzo Nishio, Toshiki Kusuura, Junichi Inoue, and Shogo Ura
2. 発表標題 Laser-wavelength stabilization by a focusing cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter
3. 学会等名 26th Microoptics Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zhiyu Yang, Ryo Asai, Junichi Inoue, Kenji Kintaka, and Shogo Ura
2. 発表標題 Narrow-bandpass filter using orthogonally propagating guided-mode resonance with doubly periodic grating
3. 学会等名 10th IEEE CPMT Symposium Japan (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 楊 知雨, 石岡誠太, 井上純一, 金高健二, 裏升吾
2. 発表標題 角度低依存の導波モード共鳴バンドパスフィルタの設計
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Inoue Junichi, Ura Shogo, Kintaka Kenji
2. 発表標題 Guided-mode Resonance Filter for Micro-optic Spectrometer
3. 学会等名 The 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kintaka Kenji, Kusuura Toshiki, Inoue Junichi, Ura Shogo
2. 発表標題 Retroreflection by Cavity-Resonator-Integrated Guided-Mode Resonance Mirror
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田凌平、楠浦俊樹、井上純一、金高健二、裏升吾
2. 発表標題 共振器集積導波モード共鳴素子による狭帯域集光再帰反射
3. 学会等名 2020年第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 Ura Shogo, Tsuji Ryugo, Inoue Junichi, Kintaka Kenji
2. 発表標題 Two-dimensional waveguide grating for sensing three-dimensional angle fluctuation
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020 (ISOM '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ueda Ryohei, Kusuura Toshiki, Inoue Junichi, Kintaka Kenji, Ura Shogo
2. 発表標題 Narrowband focusing mirror based on cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020 (ISOM '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上田凌平、渡邊明理、小澤桂介、金高健二、西尾謙三、楠浦俊樹、井上純一、裏升吾
2. 発表標題 集光共振器集積導波モード共鳴フィルタのレーザ波長選択特性
3. 学会等名 第35回エレクトロニクス実装学会春季講演大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryo Asai, Junichi Inoue, Shogo Ura, and Kenji Kintaka
2. 発表標題 Design of cavity-resonator-integrated guided-mode resonance narrowband-pass filter
3. 学会等名 IEEE CPMT Symposium Japan 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅井亮, 井上純一, 裏升吾, 金高健二
2. 発表標題 共振器集積導波モード共鳴狭帯域バンドパスフィルタの設計
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 (Optics & Photonics Japan 2019)
4. 発表年 2019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
研究 分担 者	裏 升吾 (Ura Shogo) (10193955)	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・教授 (14303)	

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
---------	---------