

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：32714

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04628

研究課題名（和文）極微小領域局在光を有する水平スロット導波路を用いた超高感度センサの研究

研究課題名（英文）A study on ultra-sensitive sensor using horizontal slot waveguides with localized light in very small area

研究代表者

中津原 克己（NAKATSUHARA, Katsumi）

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号：70339894

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：薄膜積層技術と選択的エッチング技術を駆使し、従来の垂直スロット導波路では実現が困難であった極めて微小な領域に光を局在させる水平スロット導波路の形成技術を開発した。平坦で滑らかな境界面を有し、厚さ20nm以下の中空水平スロット導波路を実現し、分布ブラッグ反射器で挟んだ構造を製作し、その共振波長特性からスロットモードとして特徴的な特性を得ることに成功している。また、センサ感度の向上に寄与するマルチスロット構造を検討し、理論特性の解析を行い、試作した3層スロット導波路において導波光を確認した。さらに五酸化ニオブとシリコンを用いたハイブリッド水平スロット導波路を考案し、試作素子より基本特性を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、従来の垂直スロット導波路では実現できていない微小な中空スロット導波路の形成に成功したことは学術的意義が大きい。また、スロット部分を多数積層したマルチスロット構造を検討し、理論特性の解析を行い、試作した3層スロット導波路において導波光を確認した。マルチスロット構造は高感度なセンサを実現する上で有効であり、センシングデバイスの特性向上への貢献が期待できる。さらに、シリコンと五酸化ニオブを組み合わせたハイブリッド水平スロット導波路を考案し、試作素子を用いて導波光の確認に成功した。この成果はシリコンフォトニクスでの応用可能であり、光集積回路の新機能の創出への貢献が期待出来る。

研究成果の概要（英文）：We designed and fabricated DBR resonator of the horizontal slot waveguide using Nb2O5. Furthermore, hollow slots were formed in the cavity, and wavelength characteristics were measured. The fabricated devices have resonance characteristics due to the hollow slots. In addition, we analyzed the normalized intensity distribution and effective refractive index of horizontal multiple layered slot waveguides. We fabricated a Nb2O5 horizontal three-layer SiO2 slot waveguide and obtained the propagation light that passed through the fabricated waveguide. We also proposed and analyzed hybrid slot waveguides using Si and Nb2O5. The strong light-confinement in the hybrid horizontal slot waveguides was theoretically obtained.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：スロット導波路 センサ 局在光 微細加工技術 薄膜積層技術 光導波路 シリコンフォトニクス

1. 研究開始当初の背景

光学的センサは火花や熱の発生の問題がなく、適応範囲が広い。さらに、導波路形光センサは小型で信頼性が高く、センシングシステムのコンパクト化などが期待される。一般に導波路形光センサでは光パワーの大部分がコア内にあり、対象物質の検出にはクラッドへ染み出したエバネッセント光を利用している。スロット導波路は高屈折率媒質によって挟まれた**低屈折率領域のスロットに光を局在**させる特異な特性[2]を有しており、図1のようにシリコンなどの高屈折率媒質に挟まれたスロット部分に光が局在する(図2)。この特性は境界面に垂直な電束密度の連続性に起因しており、光パワー密度はスロット幅が狭いほど、高い光パワー密度が得られ、液体など**スロット内に充填した物質と局在光の強い相互作用**が期待できる。幅の狭い垂直な溝を導波路内に形成するには高度な微細加工技術が要求される。幅が広いスロットではスロット領域外へ光パワーの分布が広がり、スロット内の光パワー密度が低下する。図3に示した正規化光パワー密度分布解析例のように100nm幅のスロットではスロット部分に光が局在するものの、スロットのない典型的なSi細線導波路の光パワー密度と同程度である。高い光パワー密度を得るにはスロット幅をさらに狭くする必要があり、非常に高度な微細加工技術が必要となる。

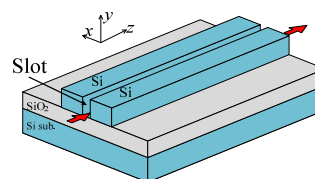


図1 垂直スロットSi導波路(鳥瞰図)

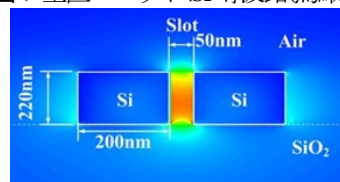


図2 垂直スロット導波路断面の光パワー密度分布

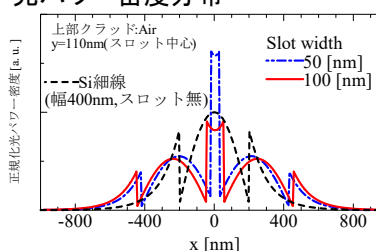
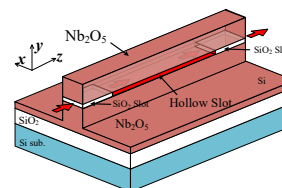


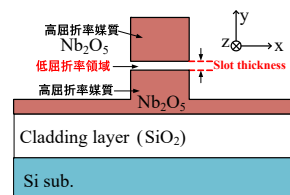
図3 垂直スロット導波路(Si)の正規化光パワー密度分布(x方向)

2. 研究の目的

ナノメータオーダーの厚さ制御が容易な薄膜積層技術とその薄膜材料の選択的エッチング技術を組み合わせたプロセス技術を開発し、従来の垂直スロット導波路のスロット幅では実現できない微小な厚さを有する水平スロット導波路を形成することを目的とする。本研究で基本要素とする水平スロット導波路の概要図を図4に示す。さらに水平スロット導波路を用いた導波路形光センサの動作実証を目指した。また、センサ感度向上のためのデバイス構造を検討した。



(a) 鳥瞰図



(b) 断面構造

図4 水平スロット導波路の概要図

3. 研究の方法

本研究ではセンサデバイスの重要な構成要素である水平スロット導波路について詳細な理論解析を行い、スロット内での光局在を得るために、薄膜積層技術および選択エッチング技術に加え、ドライエッチング条件の確立を図った。さらに、素子の試作と特性評価を繰り返しながら、新規構造の考案を行い、3年計画の中で研究目的の達成に向けて課題を設定し、段階的に研究を遂行した。

- (1) 水平スロット導波路の形成のための要素技術の確立
- (2) 水平スロット導波路の形成のための要素技術の確立
- (3) 水平スロット導波路を用いた DBR 共振器形光センサデバイス
- (4) Nb₂O₅-Si ハイブリッド水平スロット導波路
- (5) 多層スロット導波路の検討

4. 研究成果

- (1) 水平スロット導波路の形成のための要素技術の確立

水平スロット導波路を用いたセンサデバイス実現に向けた第一段階として、高屈折率媒質であるNb₂O₅とその間に挟まれたSiO₂薄膜の積層構造の検討を行った。図5にスロット部分をSiO₂とした水平スロット導波路の概要図を示す。導波路断面内の正規化光パワー密度分布の解析を行い、スロット層厚やスロット位置、導波路幅等の構造パラメータ依存性を明らかにした。図6にSiO₂スロット導波路の光強度分布の計算結果例を示す。SiO₂スロットは

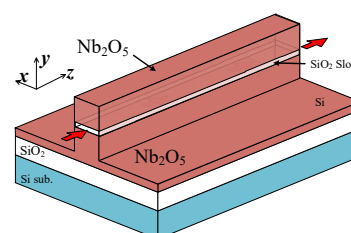


図5 水平スロット導波路の鳥瞰図

センシング部分となる中空スロット構造を保持する構造であるとともに、SiO₂スロット内に光を局在させることで、センシングデバイスの検出部に用いる中空スロット導波路と効率よく接続することが可能であることを理論的に明らかにした。

さらに、反応性DCスパッタリング装置によって高速かつ精密に成膜する技術を確認し、Nb₂O₅とSiO₂を一括して加工するドライエッチングに関して、様々な条件を調べ、高RFパワーでの加工条件においてエッチング面の粗さが低減することを見出した。図7の電子顕微鏡写真に示す。SiO₂スロットの試作を行い、厚さ30nm未満のSiO₂スロット導波路の形成に成功した。

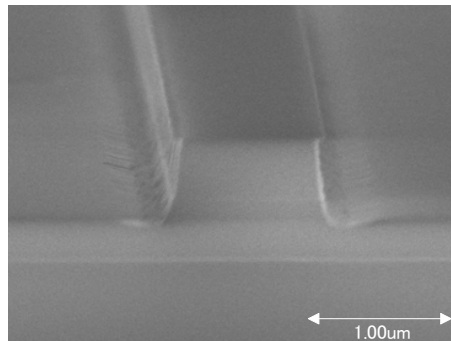
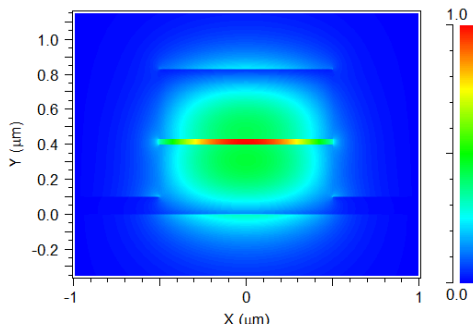


図6 TMモードの2次元光強度分布(E_y 成分) 図7 SiO₂スロット導波路電子顕微鏡写真

(2) 周期構造を有する水平スロット導波路

センシングデバイスを構成する基本要素として、導波路側壁に周期構造を施したパーティカルグレーティング構造の検討を行い、FDTD法による特性解析、構造の設計を行った。電子ビーム描画装置による周期構造のパターン形成条件の確立に取り組み、図8のようにパーティカルグレーティングを有する水平スロット導波路の製作プロセスの検討を行った。図9に試作素子の電子顕微鏡(SEM)写真、図10に測定した波長特性を示す。図10(a)は中空スロット領域形成前の全区間SiO₂スロット導波路の波長特性であり、図10(b)は、パーティカルグレーティング領域内に中空スロット構造を形成した後の波長特性である。波長特性は中空スロット構造の形成前後で変化しており、阻止帯域幅の変化と阻止帯域内に透過帯域が生じている。これは中空部分が形成されることによって、その部分の等価屈折率が変化し、位相差が生じ、中空スロットの導波モードの伝搬したものと考えられる。

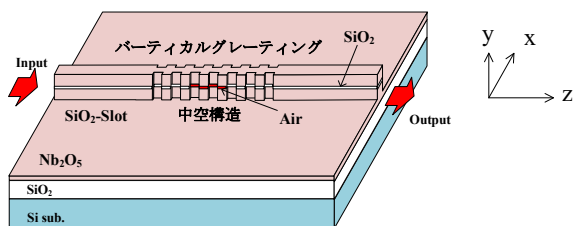


図8 側壁に周期構造を有する水平スロット導波路

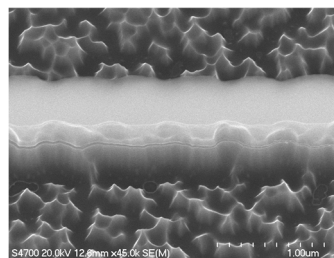
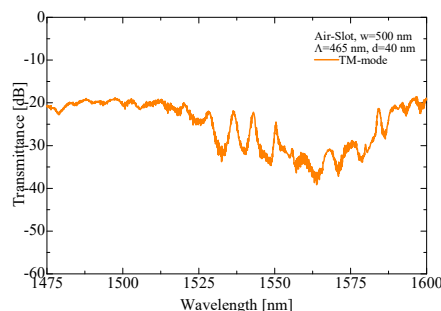
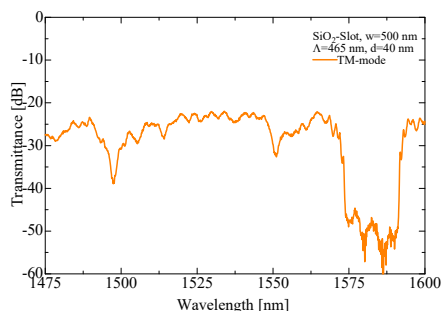


図9 周期構造を有する水平スロット導波路のSEM写真



(a). 中空スロット形成前

(b). 中空スロット形成後

図10 中空スロット形成前後の波長特性

(3) 水平スロット導波路を用いた DBR 共振器形光センサバース

微小な中空スロット内に入った検出対象物質による屈折率変化をとらえるセンシングデバイスとして、図11に示すパーティカルグレーティングを用いたDBR共振器構造を提案し、設計と理論解析を行った。中空スロット部分の領域形成技術と材料特性を考慮した選択的エッチング技術の検討を行い、導波路側壁に周期構造を形成した分布反射器の間に、センシング動作に不可欠な中空水平スロット構造を形成することに成功した。図12に製作した水平スロット導波路を用いたDBR共振器の電子顕微鏡写真、図13に波長特性を示す。得られた波長特性はスロットモードの等価屈折率に合致している。本素子を用いて、中空スロット部分に滴下した液体の屈折率に応じた波長特性の変化を得ることに成功した。

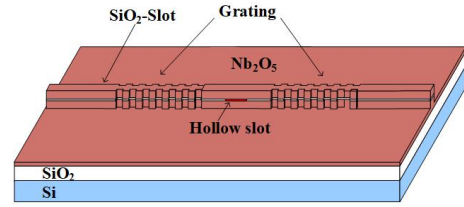
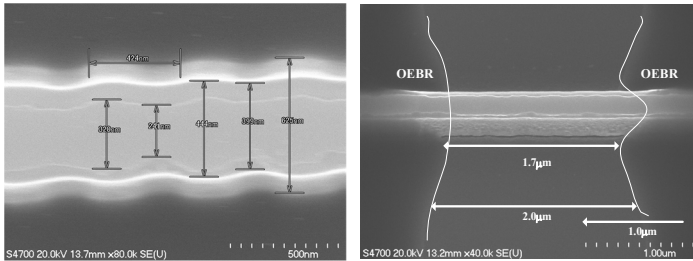


図11 水平スロット導波路を用いた DBR 共振器形光センサバース



(a) 上面図

(b) 鳥瞰図

図12 水平スロット導波路DBR共振器の電子顕微鏡写真

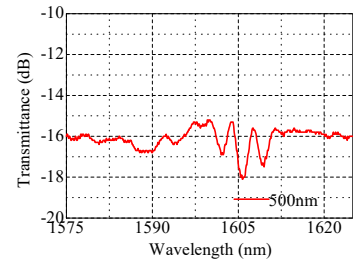


図13 水平スロット導波路を用いた DBR 共振器の波長特性

(4) Nb₂O₅-Si ハイブリッド水平スロット導波路

Nb₂O₅水平スロット導波路の研究過程によって得られた知見をもとに、Nb₂O₅とSiを組み合わせたハイブリッド水平スロット導波路を考案した。図14にNb₂O₅-Siハイブリッド水平スロット導波路の概要図を示す。本構造はシリコンフォトニクスデバイスとの集積化に適し、デバイス設計の自由度を高める構造として期待される。Nb₂O₅-Siハイブリッド水平スロット導波路の導波モードの理論特性解析ならびにパーティカルグレーティングの周期構造の設計

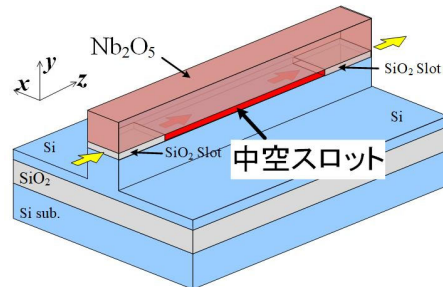


図14 Nb₂O₅-Si ハイブリッド水平スロット導波路

を行った。Nb₂O₅とSiO₂、Siを一括して加工するドライエッチングに取り組んだ。図15にNb₂O₅とSiO₂、Siのドライエッチング後の電子顕微鏡写真を示す。図16にパーティカルグレーティングを形成した試作素子の電子顕微鏡写真を示す。なお、試作素子を用いて導波光の確認に成功し、スロットモードの等価屈折率に合致した波長特性が得られている。この成果はシリコンフォトニクスでの応用可能であり、光集積回路の新機能の創出への貢献が期待出来る。

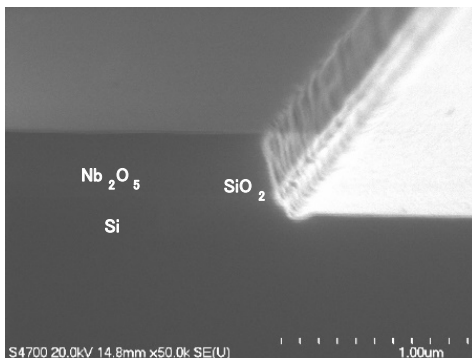


図15 一括ドライエッチング後の電子顕微鏡写真

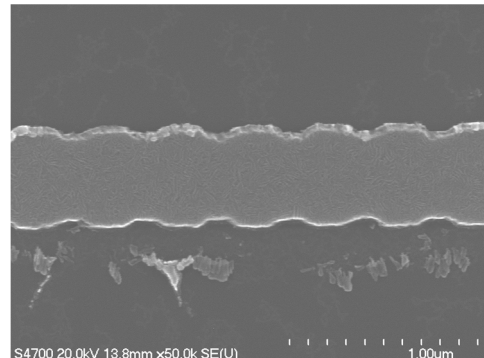


図16 試作素子の電子顕微鏡写真

(5) 多層スロット導波路の検討

高感度なセンサを実現するための導波路構造として、図 17 に示すスロット部分を多数積層したマルチスロット構造の検討を行い、理論特性の解析を行った。図 18 に計算した 3 層水平スロット導波路の光強度分布を示す。また、図 19 に等価屈折率の変化量とスロット総数の依存性の計算例を示す。さらに、マルチスロット導波路の製作条件を検討し、3 層スロット導波路の試作を行った。図 20 に試作した 3 層水平スロット導波路の電子顕微鏡写真を示す。試作した 3 層スロット導波路において導波光を確認した。マルチスロット構造は高感度なセンサを実現する上で有効であり、センシングデバイスの特性向上への貢献が期待できる。

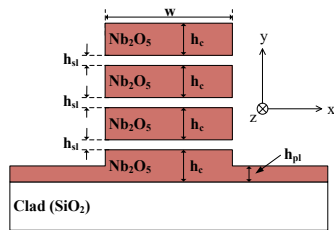


図17 多層水平スロット導波路の断面図

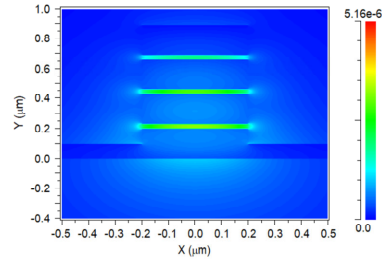


図18 3層水平スロットの2次元光強度分布 (E_y 成分)

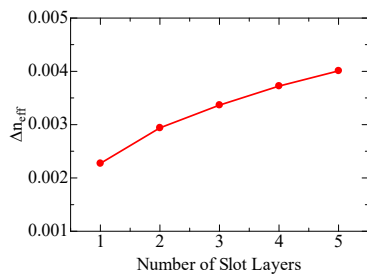


図19 スロット層数と等価屈折率の変化

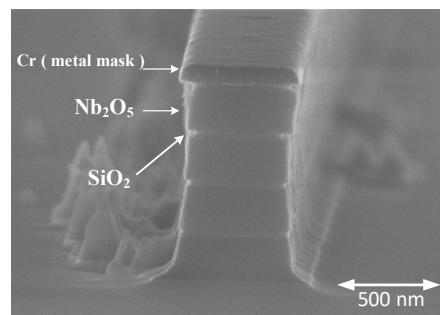


図20 3層水平スロットの電子顕微鏡写真

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 日向匠未, 端山喜紀, 渥美健斗, 中津原克己, 武田正行
2. 発表標題 SiとNb205を用いたSiO2水平スロット導波路の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Hinata, Yoshiki Hayama, Naoki Sawayanagi, Tasuku Touma, Katsumi Nakatsuhara, Masayuki Takeda, Takeshi Nishizawa
2. 発表標題 Nb205 horizontal slot waveguides fabricated by an improved etching process
3. 学会等名 MOC2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 端山 喜紀, 勝俣 直也, 中津原 克己, 武田 正行, 西澤 武志
2. 発表標題 Nb205とSiO2を用いたパーティカルグレーティング構造を有する水平スロット導波路の波長特性
3. 学会等名 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 端山 喜紀, 勝俣 直也, 山中 直貴, 中津原 克己, 武田 正行, 西澤 武志
2. 発表標題 中空スロット構造を有するNb205パーティカルグレーティング導波路の製作
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takumi Hinata, Yoshiki Hayama, Yuki Shimamura, Katsumi Nakatsuhara
2. 発表標題 Fabrication of horizontal three-layer SiO ₂ -slot waveguide sandwiched by Nb ₂ O ₅
3. 学会等名 OECC2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takumi Hinata, Yoshiki Hayama, Naoya Katsumata, Katsumi Nakatsuhara, Masayuki Takeda, Takeshi Nishizawa
2. 発表標題 Nb ₂ O ₅ horizontal slot waveguides with side-wall grating structures
3. 学会等名 IPC2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山 真穂, 鈴木 菜央, 日向 匠未, 端山 喜紀, 中津原 克己
2. 発表標題 SiとNb ₂ O ₅ を用いた水平スロット導波路の断面構造に関する理論的検討
3. 学会等名 PDW2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nao Suzuki, Yoshiki Hayama, Takumi Hinata, Maho Akiyama, Katsumi Nakatsuhara
2. 発表標題 Design and fabrication of DBR resonators for sensing devices using Nb ₂ O ₅ horizontal slot waveguides
3. 学会等名 OECC2023 (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究協力者	丸 浩一 (Maru Koichi)	香川大学・創造工学部・教授	

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