

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：32704

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06698

研究課題名（和文）金属アシスト型スロット導波路に基づく集積バイオセンサに関する研究

研究課題名（英文）A study on integrated biosensors based on metal-assisted slot waveguides

研究代表者

石坂 雄平（Ishizaka, Yuhei）

関東学院大学・理工学部・講師

研究者番号：60758598

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：高感度センシングが可能な金属アシスト型スロット導波路に基づく集積バイオセンサおよびガス検出器に関する研究を実施した。具体的には、従来のスロット導波路に比べて2倍以上のセンサ感度を有する屈折率センサの構築が可能であることを明らかにした。また、特定の構造パラメータにおいてセンサ感度が著しく低下することを見出し、その原因はTEモードとTMモードの結合であることを突き止めた。本研究の成果より、プラズモニック導波路におけるTEモードの利用が有用であることを示すことに成功した。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the performance of integrated biosensors and gas detectors based on metal-assisted slot waveguides with high sensitivity. Numerical results show that the sensitivity of the metal-assisted slot waveguide is more than two times as large as the sensitivity of the conventional slot waveguide. In addition to this, we clarify that the mode coupling that deteriorates the sensitivity occurs between the TE mode and the TM mode at specific structures. Our research findings suggest that the use of the TE mode in certain plasmonic waveguides would be useful for some applications.

研究分野：光デバイス工学

キーワード：集積光デバイス バイオセンサ 光導波路 表面プラズモンポラリトン 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体として広く使われるシリコンに対し微細な光導波路を作り込み、様々な機能のデバイスの一つの小型チップに集積するシリコンフォトニクスが光通信应用のみならず、ガスおよびバイオ・化学センサ応用においても高い注目を集めている。特に、Lipson 教授のグループが提案したスロット導波路は、高屈折率媒質となるシリコンに挟まれた低屈折率層に光を強く閉じ込められるため、分析対象物と光の相互作用が強くなるという利点がある。ところで最近、光を微小領域に閉じ込めることが可能な表面プラズモンポラリトンを用いた導波路、いわゆるプラズモニック導波路に関する研究が国内外で活発化している。特に、Zhang 教授のグループより 2008 年に *nature photonics* にて公表されたハイブリッドプラズモニック導波路は、金属による損失と光の閉じ込めのバランスがよく様々な後続研究がなされている。研究開始当初、そのような特性を有するハイブリッドプラズモニック導波路を用いた屈折率センサが提案されていたものの、高性能化に向け低損失かつ高感度な集積バイオセンサ構成法の確立が求められていた。

2. 研究の目的

高感度な集積バイオセンサ (ガス検出器) を構築することを目的とし、プラズモニック導波路における TE モードの長所を活かすことが可能な、金属アシスト型スロット導波路構造を設計する。また、2次元ベクトル有限要素法を用いて、金属アシスト型スロット導波路のセンサ感度の定量的評価を行うとともに、従来型スロット導波路と比較し、どの程度センサ感度が向上するのかを明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

金属アシスト型スロット導波路は高屈折率差導波路であり、かつ表面プラズモンポラリトンが発生しているため、TE/TM モードのハイブリッド性が非常に高い。すなわち、非主要電界成分が無視できない状況となる。そのため、本研究では、光閉じ込め係数やセンサ感度の評価に 2次元ベクトル有限要素法を用いている。また、金属アシスト型スロット導波路に基づくリング共振器の解析では、共振器問題のための 3次元ベクトル有限要素法を用いている。

4. 研究成果

図 1 に、金属アシスト型スロット導波路の構造図を示す。ここで、金属層がない場合は従来型のスロット導波路となる。プラズモニック導波路における大半の研究は TM モードを対象として行われてきているが、本研究では TE モードを利用する。コアはアモルファスシリコン、上部クラッドは水溶液 (またはアセチレンガス) を想定し、屈折率を 3.455、

1.333 (1.000593) とした。また、金属には銀を想定し、屈折率を $0.1453 - j11.3587$ とし、シリカの屈折率は 1.455 とした。構造パラメータは、シリコンの高さ h を $0.22 \mu\text{m}$ 、スロット幅 w_s を $0.1 \mu\text{m}$ とし、シリカ層の厚さを t 、シリコンの幅を w_h と定義した。こうした構造に対して、2次元ベクトル有限要素法を用いて光閉じ込め係数およびセンサ感度の評価を行った。

図 2 に、上部クラッドを水溶液とした場合のセンサ感度の t 依存性を示す。なお、センサ感度は、光閉じ込め係数から実効屈折率を除し、共振波長を乗じたものとして与えられる。図より、 t が小さくなるほど、センサ感度は大きくなるのがわかる。表 1 に、上部クラッドを水溶液とした場合の従来型スロット導波路の光閉じ込め係数およびセンサ感度を示す。金属アシスト型スロット導波路を用いると、 $t = 0.15 \mu\text{m}$ のときで 1.2~1.4 倍、さらに $t = 0.05 \mu\text{m}$ のときで 1.8~2.2 倍のセンサ感度の改善が可能であることを明らかにした。

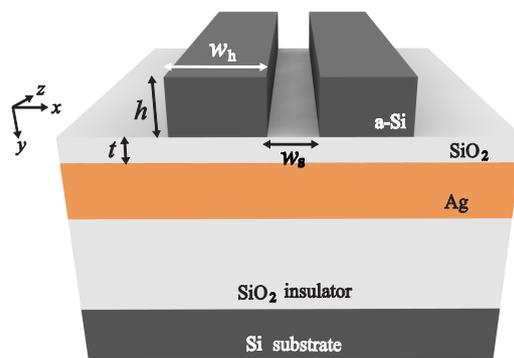


図 1 金属アシスト型スロット導波路の構造

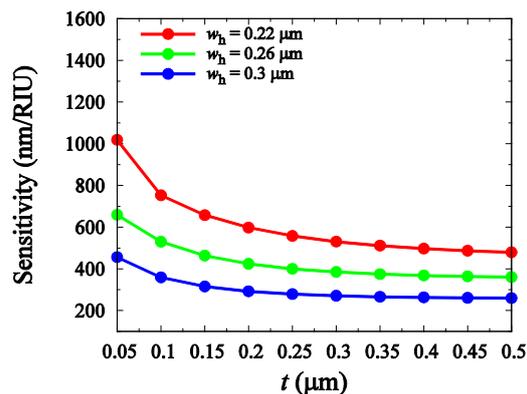


図 2 センサ感度の t 依存性 (水溶液の場合)

表 1 従来型のセンサ感度

w_h (μm)	Γ	Sensitivity (nm/RIU)
0.22	0.48	455
0.26	0.41	353
0.3	0.32	258

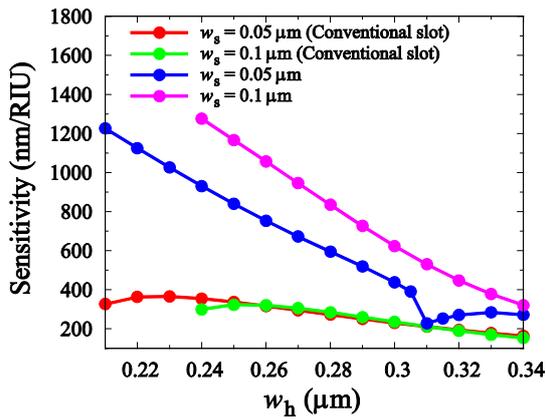


図3 センサ感度の w_h 依存性 (ガスの場合)

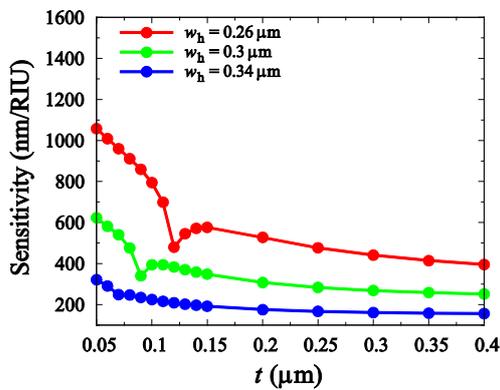


図4 センサ感度の t 依存性 (ガスの場合)

次に、上部クラッドをアセチレンガスとした場合のセンサ感度の評価を行った。図3に、金属アシスト型スロット導波路および従来型におけるセンサ感度の w_h 依存性を示す ($t = 0.05$)。図より、金属アシスト型スロット導波路のセンサ感度は 1000 nm/RIU を超えていることがわかる。これは従来構造の2倍程度大きい値である。図4に、金属アシスト型スロット導波路におけるセンサ感度の t 依存性を示す。図より、シリカ層の厚さ t を小さくするほど、センサ感度は大きくなることがわかる。また、ある特定の t においてセンサ感度が著しく低下していることがわかる。具体的には、 $w_h = 0.26 \mu\text{m}$ のときで $t = 0.12 \mu\text{m}$ 付近、 $w_h = 0.3 \mu\text{m}$ のときで $t = 0.09 \mu\text{m}$ 付近で大きくセンサ感度が低下している。本研究では、この原因が TE モードと TM モードの結合によるものであることを突き止めた。これは当初予想していなかった知見である。なお、実用的には、このようなセンサ感度が著しく低下する構造は避けるべきであると考えられる。図5に、金属アシスト型スロット導波路および従来型スロット導波路の光パワー分布を示す。図より、シリコンコア領域にある光パワーはほぼ等しいことがわかる。また、金属アシスト型スロット導波路では、下部クラッドの光パワーが小さい分、解析対象物が存在してい

る上部クラッドの光パワーが大きくなっていることがわかる。なお、マイナスの光パワーは逆方向に伝搬していることを表している。このように、下部クラッドに金属を用いることで基板方向への光の染み出しを抑制することができ、その結果、上部クラッドに効果的に光を集めることができる。

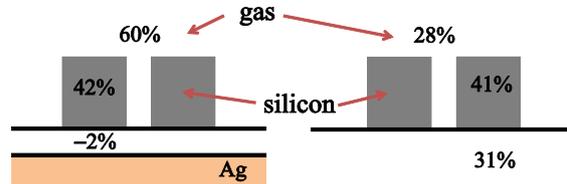


図5 光パワー分布

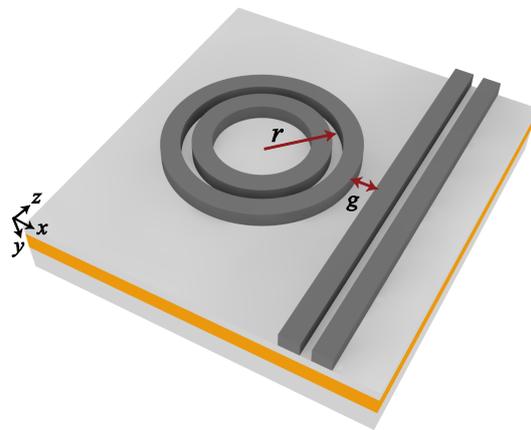


図6 金属アシスト型スロット導波路に基づくリング共振器の構造図

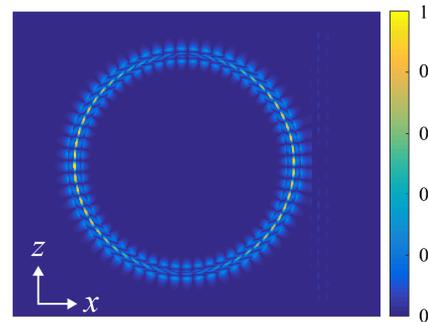


図7 電界分布

本研究では、集積バイオセンサの全体解析として、図6に示すような金属アシスト型スロット導波路に基づくリング共振器の解析を行った。リング共振器の解析には、共振器問題のための3次元ベクトル有限要素法を用いた。具体的には、上部クラッドの屈折率を僅かに変えてセンサ感度の算出および Q 値の評価を行った。3次元解析においては、構造パラメータをそれぞれ $r = 5 \mu\text{m}$ 、 $g = 0.5 \mu\text{m}$ 、 $w_s = 0.1 \mu\text{m}$ 、 $w_h = 0.26 \mu\text{m}$ 、および $h = 0.22 \mu\text{m}$ と設定した。図7に、解析により得られた電界分布を示す。図より、リング導波路内に光

が閉じ込められている様子が確認できる。3次元解析の結果より、 $t = 0.2 \mu\text{m}$ 、 $t = 0.4 \mu\text{m}$ の場合のセンサ感度はそれぞれ 458 nm/RIU 、 394 nm/RIU となった。これらの値は2次元解析により算出されたセンサ感度の値とよい一致を示している。また、 $t = 0.2 \mu\text{m}$ の場合において約 4700 の Q 値が得られた。今後の展望としては、より高い Q 値が得られる共振器構造の開発や集積バイオセンサの実装法の確立が必要になると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① Y. Ishizaka, S. Makino, T. Fujisawa, K. Saitoh, "A metal-assisted silicon slot waveguide for highly sensitive gas detection," IEEE Photonics Journal, vol. 9, no. 1, pp. 6800609-1-6800609-9, 2017. (査読有)
DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2630308

② Y. Ishizaka, M. Nagai, T. Fujisawa, K. Saitoh, "A photonic-plasmonic mode converter using mode-coupling-based polarization rotation for metal-inserted silicon platform" IEICE Electronics Express, vol. 14 no. 2, pp. 20160989-1-20160989-10, 2017. (査読有)
DOI: 10.1587/elex.13.20160989

[学会発表] (計 2 件)

① 石坂雄平, "ダブルスロット型ハイブリッドプラズモニク導波路の光閉じ込め係数評価," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-19, 2016年9月21日, 北海道大学(北海道札幌市).

② 石坂雄平, 藤澤剛, 齊藤晋聖, "金属アシスト型スロット導波路における光閉じ込め係数の評価-高感度屈折率センサの構築に向けて-, " 電子情報通信学会 IPDA 研究会, 2016年3月3日, 東レ総合研修センター(静岡県三島市).

[その他]

ホームページ等

<http://ee.kanto-gakuin.ac.jp/lab05.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石坂 雄平 (Yuhei Ishizaka)

関東学院大学・理工学部・講師

研究者番号: 60758598