

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24760281

研究課題名(和文)片持ち梁形状光導波路を用いた光変調素子の研究

研究課題名(英文) Investigation of optical modulators using optical waveguides with cantilever beam structure

研究代表者

雨宮 嘉照 (Yoshiteru, Amemiya)

広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学研究所・特任助教

研究者番号：20448260

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：シリコン窒化膜とシリコン酸化膜を多層構造にし、光導波路中央部縦方向にスロット形状をした梁構造を付加させた素子を作製した。この導波路をリング共振器型形状にしてバイオセンサーとして評価し、腫瘍マーカーの診断に必要な水準と同程度の溶液濃度の検出が可能であることを確認した。シリコンスロット導波路に梁構造を付加させたリング共振器光変調素子を提案し、0.5V以下の低電圧動作が実現できることをシミュレーションにより見積もった。所望の構造の変調素子の作製工程を構築し、作製した素子にて光変調動作を確認した。シミュレーションと比較して高電圧動作なので、今後は高電圧の要因を探求し更なる動作性能の向上を目指す。

研究成果の概要(英文)：Optical waveguides with a beam structure was fabricated. The beam structure is the slot structure arranged in vertical direction at the center of the waveguide where silicon nitride and silicon oxide layers are multi-layered. Ring resonator type device was formed using these waveguides and the performance for bio-sensor was evaluated. It was confirmed that detection sensitivity of the solution concentration is comparable to the level necessary for the diagnosis of tumor markers. The ring resonator optical modulator using silicon slot waveguides with a beam structure was proposed. The low operation voltage of less than 0.5 V was estimated by simulation. The fabrication process for the device with the desired structure was established and optical modulation was confirmed using the fabricated device. The operation voltage was high compared with the simulation. The origin of high voltage will be searched and the further improvement of operation performance will be aimed in the future.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光変調素子 マイクロ・ナノデバイス

1. 研究開始当初の背景

近年、梁構造のデバイスは原子間力顕微鏡 (AFM) で用いられるようなミリメートルサイズから、Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) に組み込まれるようなマイクロサイズまで多岐にわたり、諸々 (表面形状・膜厚・加速度等) のセンサーに用いられている。一方、情報通信の大容量・高速化に伴い、光通信技術 (受発光素子、変調素子、ファイバー、光導波路等の技術) が進歩してきており、半導体集積回路内の長距離金属配線 (低速・高消費) への代用も考えられている。しかし、実用化への障壁の一つとして集積回路内で用いるには、動作電圧や消費電力が大きいという点が上げられる。そこで、梁構造を付加させた光導波路素子で、所望の動作性能が実現できる構造を考案し、光変調素子動作やセンサー応用としてセンシング動作の検証を試みる。

2. 研究の目的

光導波路に片持ち梁構造を付与させた、光変調素子やセンサー素子を実現することが目的である。そのために、良好な性能が可能となる素子構造の選定や作製工程の確立を行い、光変調動作やセンシング動作 (特にバイオ物質の検出) の検証を行う。さらに、梁構造を付加した素子の物理・生物学的な変化に対する光学特性・感度を明らかにし、各々の事象に対するセンサーへの応用も検証していく。

3. 研究の方法

(1) 梁構造導波路の作製技術構築

変調素子およびセンサー素子への応用を念頭に置き、導波路の材質および膜堆積方法を選定し堆積条件 (膜の組成比) の探索を行う。パターンの描画・エッチング条件を改善して、側壁粗さ及び導波損失を低減させ所望の構造の素子作製工程を構築する。素子の作製および改善は研究代表者所属の所有クリーンルーム内の真空装置にて行う。また、光学シミュレータを用いて、素子構造の最適化や動作性能の見積もりを行う。

(2) 作製素子の応用実証・特性解明

電圧駆動変調素子及びセンサー (特にバイオセンサー) への応用実証を行う。光学測定の入力光にはチューナブル半導体レーザーや発光ダイオード、出力光の検出には InGaAs ディテクタ、光スペクトルアナライザや分光器を用いて行う。バイオ物質の検出には、シリコン材料であるポリジメチルシロキサン (PDMS) を用いた流路を素子上面に作製しバイオ物質を流路内に導入して、光出力の変化を測定することにより行う。さらに、物理学的な外因 (温度) の変化による光学特性を、ペルチェ素子によって温度制御した素子ホルダを用いて測定する。

4. 研究成果

(1) シリコン窒化膜多重スロット導波路を用いた、バイオセンサー応用のための光学素子の研究に関する成果

シリコン窒化膜 (Si_3N_4) とシリコン酸化膜 (SiO_2) を多層構造にし、その後フッ酸処理の時間を調整することにより、図 1 に示すように導波路中央部の酸化膜が残存し、シリコン窒化膜の一部が梁構造になった導波路が形成できる。縦方向にシリコン窒化膜の一部に溝が出来たスロット構造ともみなせ、スロットの数はシリコン窒化膜に挟まれたシリコン酸化膜の層数だけ存在することになる。実際に、低圧化学気相成長法にてシリコン窒化膜とシリコン酸化膜を交互に堆積させ、フッ酸エッチングを行うことにより、シリコン窒化膜だけを残存させることができ、所望の構造の素子作製工程を確立することができた。作製した素子の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像を図 2 に示す。横方向にスロット構造を作製することも出来るが、その場合にはスロット構造を作製するためのレジストパターンの描画に依存するため、30nm 程度の間隔のスロットを作製するには最適な描画条件の探索が必要となる。しかし、縦方向の場合は堆積時間でスロット幅を調整することができ、より簡便に 30nm 程度の間隔のスロット作製ができ、実際に図 2 の SEM 像から 15-30nm 程度のスロット幅の作製が可能であることが確認できた。

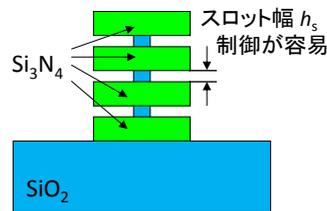


図 1 シリコン窒化膜多重スロット導波路の断面構造

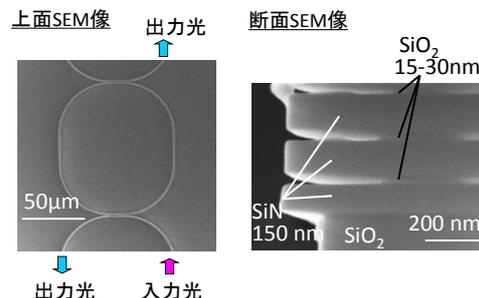


図 2 作製素子の走査型電子顕微鏡 (SEM) 像

この導波路構造をバイオセンサーに応用するために、平面構造をリング型にしたリング共振器構造を用いた (図 2 上面 SEM 像)。流路を素子上に作製してバイオ物質を流路中に流すことにより、導波路表面にバイオ物質が吸着し、屈折率の変化および共振波長の変化が起こる。共振波長の変化量を測定することによりセンシング素子として働くので、その

要因である検出物質の有無による屈折率変化を光学シミュレータと計算により見積もった。スロット層の数をパラメータとして、屈折率変化のスロット幅依存性を図3に示す。導波路表面に吸着する検出物質と検出のために必要なバイオ物質の膜厚の合計を15nmとしてシミュレーションを行ったために、30nm以上のスロット幅についての結果となっている。スロット幅が狭くスロット層数が大きいほど、屈折率変化が大きく、通常のスロット無し導波路より高感度のバイオ物質の検出が期待される結果が得られた。

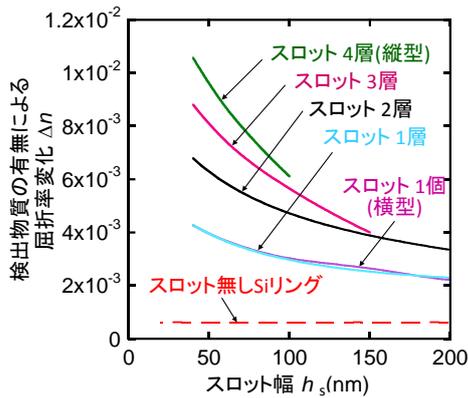


図3 検出物質の有無による屈折率変化のスロット幅依存性

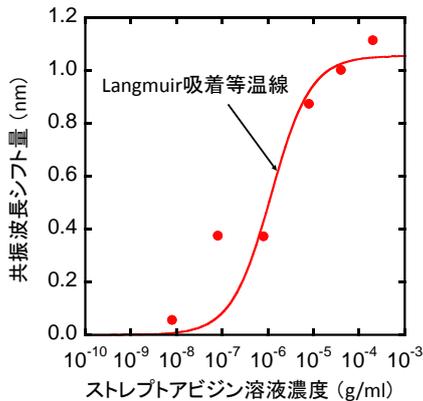


図4 共振波長シフト量のストレプトアビジン濃度依存性

スロット層数を3層、スロット幅を15-30nmとした素子にて、結合力が強くバイオ物質検出の確認にてよく使用されるビオチンとストレプトアビジンの溶液を用いてバイオセンサーの評価を行った。シリコンに配向性良く結合するシリコン結合たんぱく質(Siタグ)をビオチンさせた溶液を、素子上面に流して導波路表面に吸着させ、その後ストレプトアビジン濃度を振った溶液を流して共振波長シフト量を測定した(図4)。濃度 5×10^{-9} g/ml程度までの検出が可能で、腫瘍マーカーによるがん診断に必要な濃度は数 10^{-9} - 10^{-8} g/mlなので、ある種の腫瘍に対しては有効な手段になりうる可能性がある。多くの腫瘍マーカーに適用するには、もう1桁以上の検出感度向上が望まれる。その他のセン

サーへの応用のための測定に関しては、温度の依存性についてはシリコン導波路素子と比較すると1桁感度が悪く、温度センサーとしては低感度だが、バイオセンサーとしては、ノイズが抑制されるという利点になる。バイオセンシング素子にて、生物学的な要因の評価は、物理学的要因や温度変化による屈折率変化が大きく、生物学的な要因のみを選別するには、素子の改善を必要があることが分かった。

シリコン窒化膜多重スロット導波路バイオセンサーにて、腫瘍マーカーの診断に必要な検出感度と同程度を達成することができた。現在広く使用されている方法としては、酵素結合免疫吸着法(ELISA)があるが、装置自体が大きく、検出時間も長いという欠点がある。我々の素子はシリコン基板を用いているために、安価で小型にバイオセンサーが実現できると予測され、病気の予防・早期発見のための自宅での簡易な自己診断バイオセンサーチップ実現の一步となると考えられる。今後は、更なる感度向上のための素子構造や作製工程の改善、生物学的な要因の追求、バイオセンサーチップの実現のためのセンシング部以外の素子との混載などがあげられる。

(2) 光変調素子のための梁構造付加シリコンスロット導波路の研究に関する成果

研究当初は単純に、光導波路の一部を片持ち梁構造にした素子や、テーパー構造を付加させたスポットサイズ変換器と呼ばれる素子の一部を梁構造にした素子を用いて、光変調の評価を行った。しかし、動作電圧や作製の容易さなどを検討し、図5に示すようなスロット導波路に梁構造を付加させたリング共振器型光変調素子の作製に注力して研究を行った。シリコンスロット導波路の下部クラッドのシリコン酸化膜を除去することにより梁構造となっている。光変調素子の動作原理としては、キャリアプラズマ効果による屈折率変化を用いるのが一般的だが、屈折率変化はそれほど大きくなく、数V程度の動作電圧を必要とする。提案素子では、電圧印加による静電力でスロット幅が物理的に変化し、

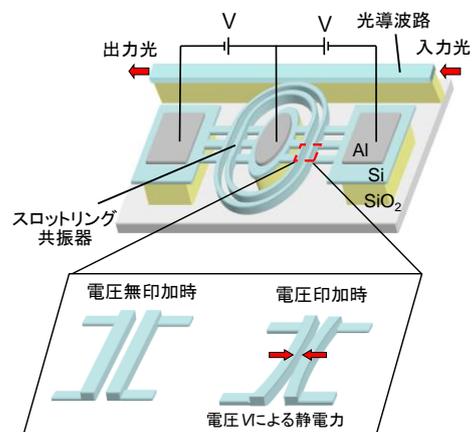


図5 光変調提案素子の模式図

空気とシリコンの屈折率差が大きいので、導波路の屈折率変化も大きくなり、より低電圧動作が期待できる。図6に導波路幅を250nm、スロット幅を50nm、梁の間隔を $10\mu\text{m}$ とした場合の変調動作の消光比のシミュレーション結果を示す。低電圧動作が可能であることの示唆が得られ、0.5Vの低電圧で10dB以上の消光比が見積もられた。

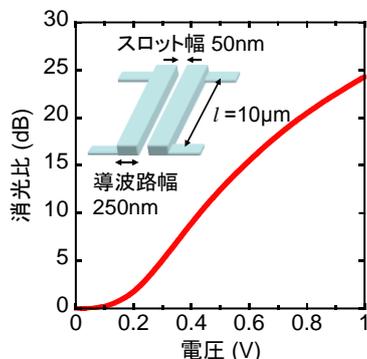


図6 シミュレーションによる消光比の電圧依存性

研究当初は100nm程度のスロット幅の素子しか作製できなかったが、電子線描画によるレジストパターンの描画条件を改善することにより、スロット幅50nmの素子の作製することができた。図7の作製素子のSEM像より、所望の構造の素子が作製できることが確認できる。さらにパターン描画の改善により、導波路側壁の粗さも低減したと考えられ、導波損失の低減および性能指数である Q 値も改善した。図8は、入力波長を固定したときの電圧印加による光出力の変化を示しており、光変調動作を確認することができた。ただし、シミュレーションと比較して、まだ高電圧での動作で、素子作製改善の必要があることが分かった。

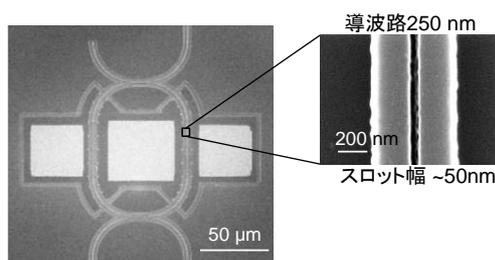


図7 提案素子作製SEM像

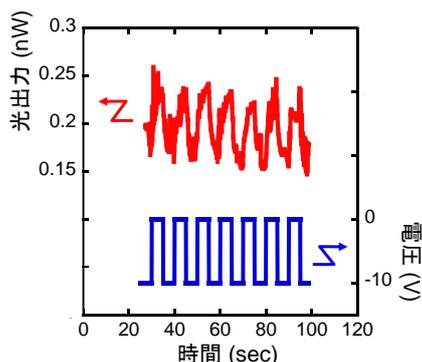


図8 印加電圧による光出力の変調

シリコンスロット導波路リング型光変調素子にて、梁構造を付加させることにより、0.5V以下の低電圧動作がシミュレーションにより示唆され、実際に所望の構造の素子を作製することができ、光変調動作も確認することができた。ただし、現状はシミュレーションと比較すると高電圧動作なので、今後は高電圧動作になる要因を探求し更なる動作性能の向上を目指す。性能向上により大規模集積回路(LSI)チップの動作電圧以下の低電圧変調が可能なる素子の実現できれば、長距離金属配線を光配線で置き換えたオンチップ光配線LSIの実現に近づくと考えられ、現在のLSI内の長距離金属配線による信号遅延の問題が解決でき、LSIの性能向上に寄与すると期待される。

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 1件)

1. Y. Amemiya, K. Noda, T. Sennichi, and S. Yokoyama, Design and characterization of MEMS optical devices using slot-ring resonator for low voltage operation, Jpn. J. Appl. Phys., 55, 2016, pp. 04EC15-1-15. 査読有
DOI:10.7567/JJAP.55.04EC15

[学会発表] (計 10件)

1. Y. Amemiya, MEMS Optical Switches using slot-ring resonator for low voltage operation, Int. conf. on Solid State Devices and Materials 2015, 27-30 Sep 2015, Hokkaido, Japan.
2. 雨宮嘉照, 狭間隔スロットリング共振器型MEMS光学素子の検討, 第62回応用物理学会春季学術講演会, 2015年03月11-14日, 神奈川県平塚市
3. 雨宮嘉照, 梁構造付加スロットリング共振器型光学素子の改善, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年09月17-20日, 北海道札幌市
4. Y. Amemiya, Proposal of MEMS Optical Device Using Slot-Ring Resonator with Low-Voltage Operation, 11th Int. conf. on Group IV Photonics, 27-29 Aug 2014, Paris, France.
5. 雨宮嘉照, 梁構造付加リング共振器型光学素子の検討, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 2014年03月17-20日, 神奈川県相模原市
6. Y. Amemiya, Multi-slot stack-type ring resonator for high sensitivity biosensor and low voltage optical modulator, 10th Int. conf. on Group IV Photonics, 16-20 Sep 2013, Seoul, Korea.
7. 雨宮嘉照, 梁構造付加シリコン光変調素子の検討, 第74回応用物理学会秋季学術講演会

演会, 2013 年 08 月 28-30 日, 京都府京田辺市

8. 雨宮嘉照, スタック型多重スロットバイオセンサの特性, 第 60 回応用物理学会春季学術講演会, 2013 年 03 月 17-20 日, 神奈川県厚木市

9. Y. Amemiya, High Sensitive Biosensors with Slot and Stack-Type Structure using Silicon Nitride Waveguides, Int. conf. on Solid State Devices and Materials 2012, 25-27 Sep 2012, Kyoto, Japan.

10. 雨宮嘉照, スタック型マルチスロットバイオセンサの研究, 第 73 回応用物理学会秋季学術講演会, 2012 年 09 月 11-14 日, 香川県松山市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

雨宮 嘉照 (AMEMIYA, Yoshiteru)

広島大学・ナノデバイス・バイオ融合科学
研究所・特任助教

研究者番号：20448260