

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：31303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K04294

研究課題名（和文）超小型・低消費電力のfin構造内蔵Si/LiNbO₃超高速光変調器の研究開発研究課題名（英文）Research and development on compact, low-power, fin Si/LiNbO₃ high-speed optical modulator

研究代表者

富田 勲 (Tomita, Isao)

東北工業大学・工学部・教授

研究者番号：40611637

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,000,000円

研究成果の概要（和文）：技術確立された半導体微細加工でSiスロット導波路を形成し、不純物ドーピングで電極化後、LiNbO₃またはBaTiO₃を接合したSiスロット導波路型光変調器の出力特性を研究した。光閉じ込め効率、スロット電界強度分布、電界光変調効率などの静的特性を解析評価し、電極化構造で差異はあるものの、特性は良好であった。ドーピングされたスロット電極の高電界で従来と同性能を保持しつつ、変調器小型化が可能となった。高周波変調時の出力限界は、電気光学係数のより大きいBaTiO₃を導入して改善した。スロットギャップ高電界による絶縁破壊はギャップ内面の絶縁膜厚制御で防止して動的特性を保持した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

10 Gbpsを超える電気信号印加に対して波長チャープを生じない優れた出力特性のLiNbO₃変調器は、信頼性が高く、広く普及している。しかし、変調器小型化では、LiNbO₃の加工が容易でなく、半導体微細加工と比較すると、エッチングレート、精度、軽原子拡散やコストの課題があった。そこで、SOI基板上のSiをスロット導波路に加工後、不純物ドーピングで電極化、無加工のLiNbO₃またはBaTiO₃を接合した小型スロット導波路型変調器を研究し、良好な静的・動的特性を得たことは、当該変調器の光通信システムへの導入で、システム・コンパクト化と省電力化に貢献すると考える。

研究成果の概要（英文）：A hybrid optical modulator using a Si slot waveguide was studied, which can be produced from well-established semiconductor manufacture. LiNbO₃ or BaTiO₃ was bonded to patterned Si structures, including a doped Si slot waveguide, which also works as electrodes. Static modulator performance, including optical confinement rate, electric-field distribution, and EO modulation rate, was analyzed. Despite performance differences depending on electrode structures, the performance surpassed the one with LiNbO₃ without slot waveguides. A high electric field at the doped slot electrodes reduced the modulator size while keeping the static performance. Output limitations at high frequency modulation were overcome with the help of a stronger EO material BaTiO₃. Appropriate control of the insulating-film thickness at the inner surface of the slot gap prevented high field-induced dielectric breakdown while maintaining dynamic modulation performance.

研究分野：光工学

キーワード：強誘電体 半導体 スロット導波路 電気光学効果 光変調器

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 光情報通信ネットワークでは、大容量の動画配信やリアルタイムの双方向通信などの需要で情報通信量が急増しており、光信号の多重化に加え、光信号の高ビットレート化に対応している。特に、光ファイバーの1波長当たりの信号ビットレートが数 10 Gbps を超える領域では、半導体レーザー素子の直接変調では素子内キャリアが高速応答せず、波長チャープングで信号波形が歪む。そこで、半導体レーザー素子からの連続光(CW光)を電気光学効果型の外部変調器に通し、高速電気変調で光信号化する方式を本研究は採用した。

(2) 高性能な 40~100 Gbps の光変調器は、電気光学効果を用いる強誘電体 LiNbO_3 光変調器が占有しているが、コスト低減は容易でなく、微細加工も容易でない。一方、40 Gbps 以下では半導体の電界吸収型光変調器が優勢である。

(3) しかし、半導体電界吸収型変調器は、PIN 構造への逆バイアス変調で光吸収端位置を変化させ、光を明滅させるため、光吸収時のキャリア生成で波長チャープングを生じる。

(4) 強誘電体 LiNbO_3 光変調器は、40~100 Gbps でチャープング・フリー動作が可能であるが、小型・量産化が困難であり、十分な光変調を得るための変調器長は 5 cm と大型であった。電界印加用電極は光走行に追従する進行波型であり、インピーダンス整合した終端抵抗器も必要であり、省電力化は容易ではなかった。本研究では、40 Gbps 以上の強誘電体/半導体融合型の小型変調器を提案し、特性研究を行った。

2. 研究の目的

(1) 小型化のための微細加工を考えた場合、強誘電体 LiNbO_3 でなくとも電気光学効果を持つ半導体 GaAs、InP が使用可能である。しかし、電気光学係数は 1/10 程度と小さく、Si プロセスとの整合性も高くない。そこで、SOI 基板上の Si 微細加工でスロット導波路を形成し、その上に無加工の LiNbO_3 を接合するタイプの光変調器を研究した。

(2) Si スロット導波路(屈折率 3.45)の厚みを低減すると、スロット導波路から LiNbO_3 (屈折率 2.21)へ光が浸透する。この浸透光に対して LiNbO_3 の電気光学効果でチャープング・フリー変調を行う。

(3) 半導体微細加工で Si スロット導波路間のギャップをナノ・サイズにできるので、従来の LiNbO_3 変調器に比べて千倍以上の大きな電界を生成でき、光変調器を短尺化できる。結果として、進行波電極と終端器は不要となり、省電化される。

(4) 本研究は、微細加工が困難であるが電気光学効果の大きい強誘電体 LiNbO_3 と微細加工が容易な半導体 Si の長所を融合した小型変調器の性能研究を行った。

3. 研究の方法

(1) 提案した Si/ LiNbO_3 融合変調器のスロット導波路はギャップを有し、ドーピングで電極機能を果たす。ギャップ近傍の高電界がキャリア・フリーの LiNbO_3 へ印加され、光変調を行う。

(2) COMSOL&Lumerical による解析評価で静的特性は良好であったが、動的特性は光導波部分のドーピング量を低減する変調ドーピングで低光損失、低抵抗、低印加電圧を保持し、高周波変調を目指したものの、特性は十分ではなかった。光損失の大きい fin 構造も低光損失の平坦化構造へ置き換えたが、高周波変調時に出力限界があった。そのため、電気光学係数が大きい他材料 BaTiO_3 の使用を検討した。さらに、スロット・ギャップ間の高電界による絶縁破壊も懸念されたため、防止策としてギャップ内面に絶縁膜を設置し、膜厚制御による動作保証を検討した。

4. 研究成果

(1) 当初は Si/LiNbO₃ 変調器の特性研究を行い、電極化構造で差異はあったものの、良好な静的特性を得た(文献①～④)。動的特性に関しては、上記の理由から Si/BaTiO₃ 変調器を検討した。

(2) BaTiO₃ 薄膜を石英基板上に成長させ、この基板を Si 基板に接合することが最近可能となり、このタイプの Si/BaTiO₃ 変調器を研究した。

(3) Si/BaTiO₃ 変調器の既存研究としては、プラズモニック型で変調速度 50 Gbps、電圧素子長積 0.45 Vcm、光損失～10 dB/cm、マッハツェンダー型で変調速度 25 Gbps、電圧素子長積 0.2 Vcm、光損失 5.8 dB/cm などがある。Si/BaTiO₃ 変調器でも既存構造では低電圧素子長積、高速変調、低光損失の同時達成は困難であった。

(4) 今回解析評価した Si/BaTiO₃ 変調器では Si/LiNbO₃ 変調器と同構造を採用している。Si スロット導波路はナノ・ギャップを有し、スロット導波路から BaTiO₃ への浸透光に強い変調を行う。スロット導波路は変調ドーピングで光集中する部分は低光損失となっている。当初構造案の fin 構造は、例えば fin 周期 280 nm、fin 占有率 35%で光損失が 16.3 dB/cm もあったため、平滑化構造へ改良し、光損失～1 dB/cm を達成した。この構造でスロット・ギャップ間隔 70 nm 付近で電圧素子長積 0.16 Vcm (図 1)、変調速度 53.6 GHz (図 2)を得た。さらに、スロット・ギャップ高電界による絶縁破壊はギャップ内面の絶縁膜厚制御で防止し、動的特性を保持した。

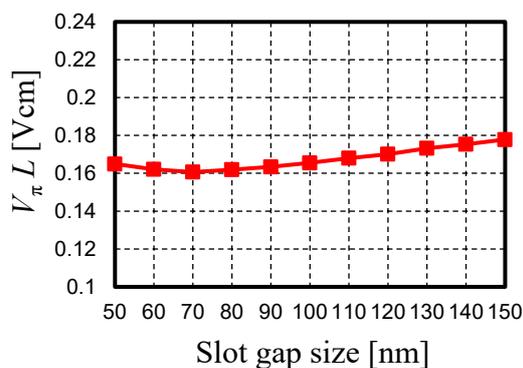


図 1 電圧素子長積とスロット・ギャップ間隔の関係

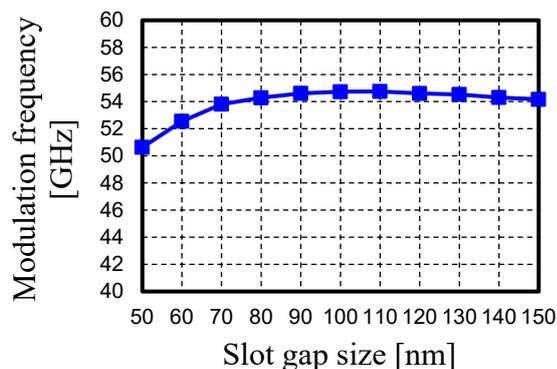


図 2 変調速度とスロット・ギャップ間隔の関係

<引用文献>

- ① T. M. Mercier, M. D. B. Charlton, I. Tomita, The 26th Micro-Optics Conference (MOC2021), Shizuoka, Japan, 26-29 Sep., PO-9, online (2021).
- ② S. Saito, I. Tomita, M. Sotto, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 59, SO0801 (2020).
- ③ S. Saito, M. Sotto, K. Debnath, J. Byers, A. Z. Al-Attili, I. Tomita, *et al.*, The 24th Micro-Optics Conference (MOC2019), Toyama, Japan, 17-20 Nov., C-5 (2019).
- ④ I. Tomita, K. Debnath, K. Ibukuro, *et al.*, The 15th International Conference on Group IV Photonics (GFP2018), Cancun, Mexico, 29-31 Aug., WP8 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shinichi Saito, Isao Tomita, Moise Sotto, Kapil Debnath, James Byers, Abdelrahman Z. Al-Attili, Daniel Burt, Muhammad K. Husain, Hideo Arimoto, Kouta Ibukuro, Martin Charlton, David J. Thomson, Weiwei Zhang, Bigeng Chen, Frederic Y. Gardes, Graham T. Reed and Harvey N. Rutt	4. 巻 59
2. 論文標題 Si photonic waveguides with broken symmetries: applications from modulators to quantum simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 S00801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab85ad	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 T. M. Mercier, Martin D. B. Charlton, and I. Tomita
2. 発表標題 LiNbO3/Si-hybrid slot-waveguide electrooptic modulator designs for 1550 nm
3. 学会等名 The 26th Micro-Optics Conference (MOC2021), Shizuoka, Japan, 26-29 Sep. No. P0-9 (2021) [online] (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Saito, M. Sotto, K. Debnath, J. Byers, A. Z. Al-Attili, I. Tomita, D. Burt, M. K. Husain, K. Ibukuro, D. J. Thomson, W. Zhang, B. Chen., F. Y. Gardes, G. T. Reed, and H. N. Rutt
2. 発表標題 Novel Si photonic waveguides and applications to optical modulators
3. 学会等名 The 24th Micro-Optics Conference (MOC2019), Toyama, Japan, 17-20 Nov., 2019, Paper No. C-5 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 I. Tomita, K. Debnath, K. Ibukuro, M. K. Husain, J. Byers, Z. Zhang, S. Saito
2. 発表標題 LiNbO3/Si-Hybrid Slot-Waveguide Electro-Optic Modulators
3. 学会等名 The 15th International Conference on Group IV Photonics (国際学会)
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----

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		
英国	University of Southampton		