

Oral presentation | 3 Optics and Photonics : 3.14 Silicon photonics and integrated photonics

📅 Tue. Sep 17, 2024 9:00 AM - 11:30 AM JST | Tue. Sep 17, 2024 12:00 AM - 2:30 AM UTC 🏨 C32 (Hotel Nikko 3F)

[17a-C32-1~9] 3.14 Silicon photonics and integrated photonics

Shota Kita(NTT), Mitsuru Takenaka(Univ. of Tokyo)

9:00 AM - 9:15 AM JST | 12:00 AM - 12:15 AM UTC

[17a-C32-1]

Real-time Ranging and Velocimetry Operation in Si Photonics SLG FMCW LiDAR

○Takemasa Tamanuki¹, Mikiya Kamata¹, Toshihiko Baba¹ (1.Yokohama National Univ.)

9:15 AM - 9:30 AM JST | 12:15 AM - 12:30 AM UTC

[17a-C32-2]

Theoretical Design of Collimating Optics with Low Position and Angle Dependence

○Mikiya Kamata¹, Toshihiko Baba¹ (1.Yokohama Nat'l Univ.)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[17a-C32-3]

Fabrication of Nb₂O₅ waveguide for visible-light phased arrays

○Yuto Shimbo¹, Shun Yajima¹, Yoshiki Hayama², Katsumi Nakatsuhara², Yuya Shoji¹ (1.Tokyo Tech., 2.KAIT)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[17a-C32-4]

Wavelength selective switch with high-power input using SiN

○Yoshiki Komatsu¹, Takemasa Tamanuki¹, Mikiya Kamata¹, Shota Nawa¹, Toshihiko Baba¹ (1.Yokohama Nat'l Univ.)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[17a-C32-5]

Theoretical Consideration on Athermal SLG Beam Scanners (II)

○Yuki Ozawa¹, Toshihiko Baba¹ (1.Yokohama Nat'l Univ.)

🎯 Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[17a-C32-6]

Beam Splitters for Visible-Light Quantum Optical Circuits with Alumina Waveguides

○Takuto Yamaguchi¹, Naoki Fushimi¹, Masaharu Hida¹, Tetsuya Miyatake¹, Shoichi Miyahara¹, Toshiyuki Miyazawa¹, Kenichi Kawaguchi¹, Ryoichi Ishihara², Shintaro Sato¹ (1.Fujitsu Ltd., 2.TU Delft)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[17a-C32-7]

High Q-factor Er:Gd₂O₃ Microring Resonators based on Bound States in the Continuum

○Xuejun Xu¹, Tomohiro Inaba¹, Takuma Aihara², Atsushi Ishizawa³, Takehiko Tawara³, Haruki Sanada¹ (1.NTT Basic Research Lab., 2.NTT Device Tech. Lab., 3.Nihon Univ.)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[17a-C32-8]

Crystallization of Polycrystalline YIG/Ce:YIG bilayer structure

OShun Yajima¹, Yuya Shoji¹ (1.Titech)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[17a-C32-9]

Investigation of sacrificial layer materials for magneto-optical material integration by μ -transfer printingOKosuke Nakanishi¹, Rai Kou², Yoshikatsu Sutou², Toshiya Murai², Koji Yamada², Yuya Shoji¹
(1.Tokyo Tech., 2.AIST)

Si フォトニクス SLG FMCW LiDAR のリアルタイム測距・速度測定

Real-time Ranging and Velocimetry Operation in Si Photonics SLG FMCW LiDAR

横国大院工, °玉貫岳正, 鎌田幹也, 馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ. °Takemasa Tamanuki, Mikiya Kamata and Toshihiko Baba

E-mail: tamanuki-takemasa-jd@ynu.ac.jp

自動運転や空のモビリティへの適用を目的とした, 小型, 軽量, 低消費電力な Si フォトニクス非メカ式 FMCW LiDAR が開発されている^{1,2)}. 我々は, フォトニック結晶導波路スローライト回折格子(SLG)による非メカ式光ビームスキャナを実証し^{3,4)}, さらに FMCW 用コヒーレント検波器までを搭載した LiDAR の動作も報告してきた⁵⁾. 今回は, FMCW ドップラーシフト検出による測距と速度検出^{2,6)}を同時にリアルタイムに実現するシステムの構築とその動作について報告する.

LiDAR チップには DFB レーザ($\lambda = 1538$ nm)を直接変調した線形三角波の FMCW 光⁷⁾($P_{in} = 7.2$ dBm)を入力し, 周波数掃引時間 T_c は Up, Down チャープとも $100 \mu s$, 帯域幅 B は 10 GHz とした. FPGA による DAC 制御回路を用い, LiDAR チップの p-i-p ドープ熱光学ヒータ制御 SLG からの出射ビームの水平方向走査, ならびに SLG アレイの切り替えによる垂直方向走査を $2T_c$ と同期して高速制御した. SLG から出射し, 物体で反射された光は同じ SLG で受光し, 内部に集積した Ge-PD でコヒーレント検波した. TIA で信号増幅した後, 別の FPGA と ADC で構築した高速周波数検知回路⁸⁾にて FFT 処理を行って, Up, Down チャープ時のビート周波数 f_{up}, f_{down} を解像点毎に検出し, 距離 $R = cT_c(f_{up} + f_{down})/4B$ と速度 $v = \lambda(f_{up} - f_{down})/4$ をそれぞれ同時に算出した. ADC クロック速度 (FFT サンプリング周波数) f_{smp} を 25 MHz, FFT サンプリング数 N_m を 2048 に設定し, FFT 計算時間 T_{cap} を $81.92 \mu s$ ($RBW = 12.2$ kHz)として T_c 以内に収めた. Fig. 1 に示すように, 再帰性反射シートを貼付した直径 32 cm の円筒体を回転盤 (33.3 rpm) 上に設置し, 測距ターゲットとした. ビーム掃引範囲は $X = 6.2^\circ$, $Y = 7.5^\circ$ である. 画像の解像点数を 1280 ($X64$, $Y20$) ピクセル, フレームレートを 3.91 fps とし取得した距離と速度の点群画像 (測距を点の位置で表示, 速度をカラーで表示, 実際は動画) を Fig. 2 に示す. 測距ターゲットの形状と円筒表面速度がリアルタイムに表示された. 今後, LiDAR チップのいっそうの損失低減や出射ビームの狭幅化によりランバート散乱体のリアルタイム検知動作も見込める.

なお, 本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (A) (22H00299), ならびに立石科学技術振興財団研究助成 S の援助を得て行われている.

参考文献 1) C. V. Poulton, et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 7700108 (2019). 2) C. Rogers, et al., *Nature*, **590**, 256 (2001). 3) H. Ito et al., *Optica*, **7**, 47 (2020). 4) T. Tamanuki, et al., *J. Lightwave Technol.*, **39**, 904 (2021). 5) 馬場ら, 信学論文誌, J103-C, 434 (2020). 6) S. Suyama et al., *Opt. Express*, **29**, 30727 (2021). 7) 小松ら, 2024 春応物, 22a-11E-7. 8) 玉貫ら, 2022 春応物, 25a-E303-3.

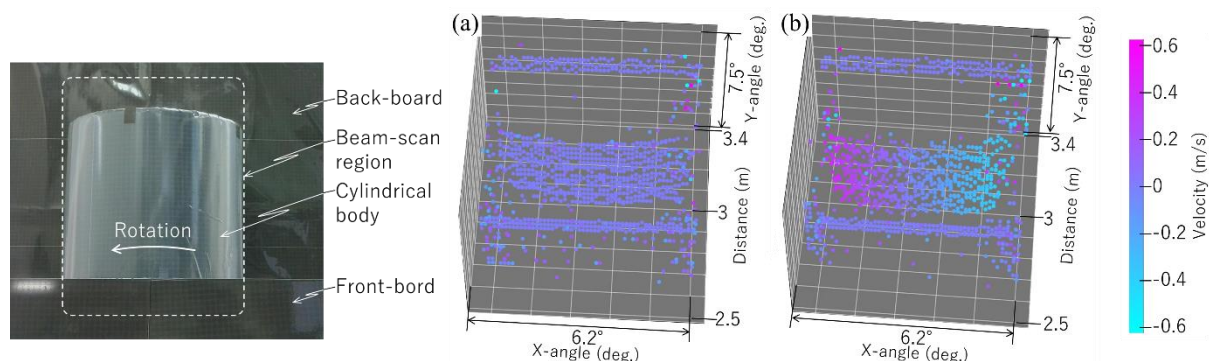


Fig. 1 LiDAR target. Fig. 2 Point-cloud images for ranging and velocity. Rotation-stopped (a) and rotating (b).

位置と角度への依存性が小さいコリメート光学系の理論設計

Theoretical Design of Collimating Optics with Low Position and Angle Dependence

横国大院工 ○鎌田幹也, 馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ., °M. Kamata and T. Baba

E-mail: baba-toshihiko-zm@ynu.ac.jp

Si フォトニクス FMCW LiDAR が開発され, 注目されている. 我々はスローライト回折格子 (SLG) ビームスキャナ搭載 FMCW LiDAR を実証してきた¹⁾. SLG から出射される ϕ 方向に扇状に広がった光は, 特別な設計のプリズムレンズ²⁾によりビーム状にコリメートする. このビームは, θ 方向には波長掃引や熱光学効果, ϕ 方向にはアレイ状に配置した SLG の切り替えとレンズに対するオフセットを利用して 2 次元走査する³⁾. このレンズに関して, 最近の高 NA 薄型や 2 枚組構成を設計してきたが⁴⁾, 長尺 (> 1 mm) な SLG から出射される開口長が大きな光に対するコリメート性能は不十分であった. 今回は, 光の出射位置 y と角度 θ に対して低依存なコリメートレンズの理論設計を行った.

コリメート後の ϕ 方向ビーム拡がり $\delta\phi$ が, $y = 0-4$ mm, $\theta = 10-30^\circ$ の範囲で低依存となるように, 点光源の位置を y 方向にオフセットさせながら, レンズ上下面角度や曲率半径を理論設計により最適化した. 図 1(a)には, 単レンズを仮定したときの y と θ に対する $\delta\phi$ の計算結果を示す. θ に対しては, $\delta\phi$ の変化を 0.2° 以下に抑制できている. しかし, 単レンズでは最適化できるパラメータが少ないため, y に対する $\delta\phi$ の増大は抑制できず, 最大 0.6° まで拡がる. 一方, 2 枚組レンズを採用すると調整可能なパラメータが増えるため, 図 1(b)に示すように, θ に対する $\delta\phi$ の変化を約 0.25° と単レンズと同程度に抑えながら, y に対して小さい $\delta\phi$ を維持することができる. これらは, 理論解析をベースにした手動によるパラメータ探索を行った結果であるが, 今後の最適化により, y と θ に対して $\delta\phi \ll 0.1^\circ$ となる条件が期待される.

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(A) (22H00299), ならびに立石科学技術振興財団研究助成 S の援助を得て行われている.

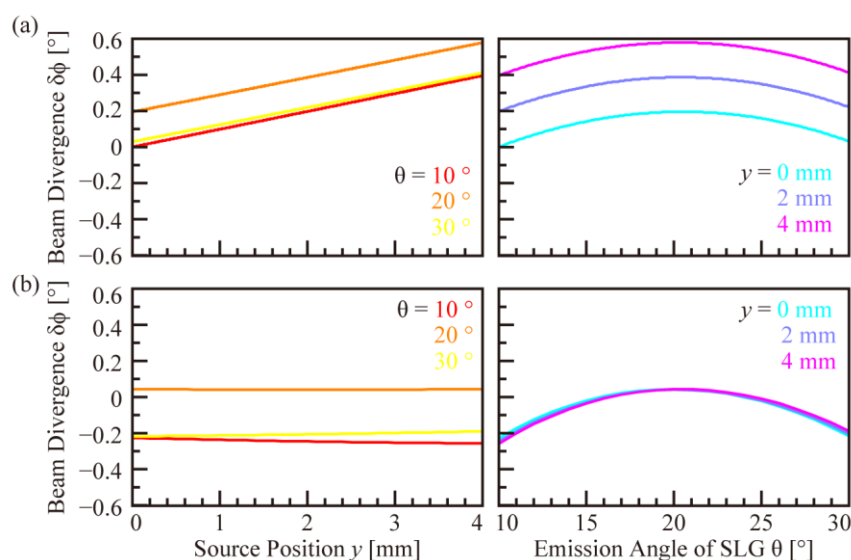


図1 光の出射位置 y と角度 θ に対する ϕ 方向ビーム拡がり $\delta\phi$. (a) 単レンズ, (b) 2 枚組レンズ.

参考文献

- 1) T. Baba, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **28** (5), 8300208 (2022).
- 2) J. Maeda, et al., Opt. Lett., **44**, 5780 (2019).
- 3) H. Ito, et al., Optica, **7**, 47 (2020).
- 4) R. Kubota, et al., CLEO-PR, CWP17A (2022).

可視光フェーズドアレイに向けた Nb₂O₅ 導波路の作製

Fabrication of Nb₂O₅ waveguide for visible-light phased arrays

東工大¹, 神奈川工科大², ^{○(M)}新保 祐人¹, 矢島 駿¹, 端山 喜紀², 中津原 克己², 庄司 雄哉¹

Tokyo Tech.¹, KAIT², ^{○(M)}Y. Shimbo¹, S. Yajima¹, Y. Hayama², K. Nakatsuhara², Y. Shoji¹

E-mail: shimbo.y.ab@m.titech.ac.jp

1. はじめに

デジタル世界と現実世界の融合は、将来の大きな展望とみなされている。拡張現実(AR)は、教育、ショッピング、製造、エンジンなどの e ラーニングに使われる学際的なアプリケーションフレームワークである[1]。光ビームの形成と走査に関する技術として、光フェーズドアレイ(OPA)があるが、LiDAR 応用に向けて半導体光集積回路を用いたものが主流であり、動作波長は近赤外領域になる[2]。AR における応用も見据えた可視光帯で動作する OPA の先行研究では液晶を用いた OPA が報告されている[3]。SiN 導波路と液晶を組み合わせた位相シフターにおいて、液晶の配向が大きな屈折率の変化を引き起こし、光ビームの走査を実現する。しかし、分子の配向に時間がかかるため、動作速度に限界がある。また、LiDAR 等で実績のある半導体材料の多くは可視光帯では吸収が強く利用できない。

本研究では、磁気光学効果による高速な位相シフターを利用した集積型 OPA の実現を目的としている。磁気光学結晶 Ce:YIG と屈折率が近い Nb₂O₅ を光導波路の材料として採用する。今回、Nb₂O₅ を材料とした光導波路の作製プロセス条件を検討した結果について報告する。

2. 光フェーズドアレイの構成

Fig. 1 に本研究で提案する集積型 OPA の概要を示す。OPA は光導波路と位相シフター、グレーティングカップラによって構成される。入力側から入射された可視光は複数回の等分岐を繰り返し、導波路の終端で基板の面直方向に出射される。導波路の途中に形成した位相シフターにより、伝搬する光の位相を制御しグレーティングカップラから出射される光ビームの角度を高速に変調する。磁気光学効果はナノ秒オーダーの高速応答が可能であり[4]、光ビーム走査による網膜投影型の次世代スマートグラスなどへの応用が期待できる。

3. デバイス製作

光フェーズドアレイを作製する前段階とし

て EB プロセスと反応性イオンエッチング(RIE)により SGGG 基板上に Nb₂O₅ の光導波路を作製した。RIE では CF₄ と O₂ の混合ガスによるエッチング条件の探索を行った。作製した光導波路の SEM 画像を Fig. 2 に示す。なお、作製したデバイスの光学測定の結果は当日報告する。

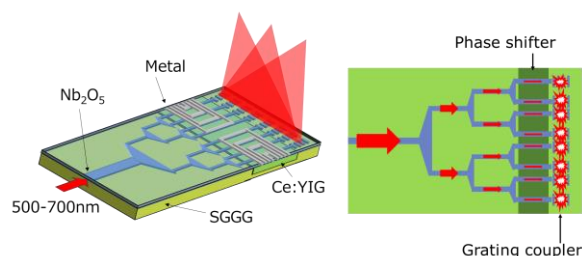


Fig. 1. Example of Optical phased allay

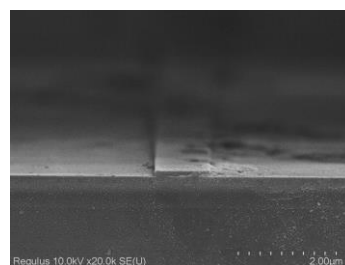


Fig. 2. Nb₂O₅ waveguide on SGGG

謝辞

本成果の一部は、JSPS 科研費(23H04802)の支援によるものであり、実験プロセスの一部は、文部科学省 ARIM (JPMXP1224IT0028) 東工大ナノ構造造形支援において実施された。

参考文献

- [1] S. Dargan *et al.* Computational Methods in Engineering (2023)
- [2] Y. Guo *et al.* Appl. Sci. **11**, 4017 (2021).
- [3] M. Notaros *et al.*, Opt. Express **30**, 13790 (2022).
- [4] S. Yajima *et al.*, Opt. Express **31**, 16243 (2023).

SiN マイクロリング波長選択スイッチのハイパワー入力調査

Wavelength selective switch with high-power input using SiN

横国大院工, °小松慶喜, 玉貫岳正, 鎌田幹也, 名和翔太, 馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ., ° Y. Komatsu, T. Tamanuki, M. Kamata, S. Nawa, T. Baba

E-mail: komatsu-yoshiki-pv@ynu.jp

我々は Si フォトニクス非メカ式 SLG スキャナ搭載 FMCW LiDAR を開発している^{1,2)}. ここでは 2 次元光ビームスキャンを実現するため, 32~128 本の SLG に入射する光の切り替えをマッハツェンダ干渉型 (MZI) 光スイッチによって行っている. しかし, MZI スwitchは送受往復で最大 14 段の累積損が大きく, これが LiDAR の性能や規模拡大を制限している. これを補償する簡単な方法は, 入力パワーを上げることであるが, Si の二光子吸収がそれを制限する. そこで本研究では, 図 1(a)のように, 二光子吸収がない SiN 導波路に光を結合させ, SiN マイクロリングアレイ波長スイッチと SiN/Si テーパー結合を介して, Si までの損失を入力パワーで補償できるようにした. 図 1(b)の実線は単一の SiN リングでドロップし, Si 導波路に結合させたときの光入出力特性の結果, 点線は線形応答を参考に示している. 測定の結果, 28 dBm で破損しているが, このパワーは Si のみの場合より 5 dB 以上大きい. ただし出力は 5 dBm で顕著に飽和している. 図 1(c)は 8 個の SiN リングアレイとつながるバス導波路とリング 1 のドロップ導波路の出力スペクトルであり, リング 1 の共振波長を熱光学効果により 1553 nm にずらしている. 波長をここに設定することでスイッチ動作は得られたが, バス導波路での累積損が図 1(b)の出力にどう影響しているか, さらに検証する必要がある.

本研究は科研費基盤研究(A) (22H00299), および立石科学技術振興財団の援助を受けている.

参考文献

- 1) T. Baba, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **28**, 8300208 (2022).
- 2) Y. Maeda, et al., VLSI Symposium, JFS5.3 (2024).

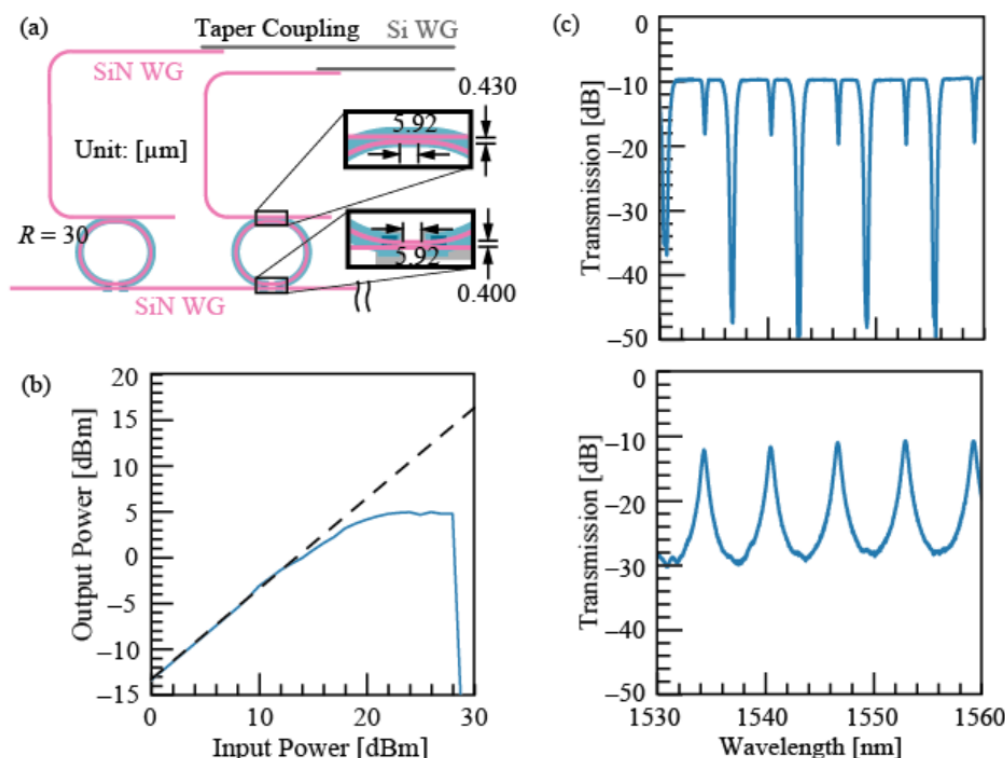


図 1. (a) デバイス構造. (b) 最初のリングでドロップした光の入出力特性. (c) リング 1 の共振波長のみをレーザ波長へシフトさせた際のスルーポート出力(上)とドロップポート出力(下).

SLG ビームスキャナの温度無依存化の理論的検討(II)

Theoretical Consideration on Athermal SLG Beam Scanners (II)

横国大院工 ○小澤優季, 馬場俊彦

Yokohama Nat'l Univ., Y. Ozawa, T. Baba

E-mail: yuki-ozawa-by@ynu.jp

我々は Si フォトニック結晶導波路 (PCW) から成るスローライト回折格子 (SLG) ビームスキャナを搭載した光集積型 FMCW LiDAR を開発してきた [1]. 前回, 光源として用いる半導体レーザの発振波長の温度依存性を SLG の依存性と整合させ, ビーム角度が環境温度の揺らぎに対して無依存になる条件を検討した [2]. 今回は前回の考慮に入っていなかったレーザの SOA 部分, 全体の線膨張, リングの実効位相変化を考慮して, さらに検討した.

図 1 にデバイスの概要を示す. レーザには Si 細線導波路リングから成る外部共振器 [3] を想定し, 一部に負の屈折率温度係数をもつポリマークラッドを仮定した. 共振波長の変化率は

$$\frac{\Delta\lambda/\Delta\lambda}{T} = \frac{2L_{SOA}\left(n_{eff}^{SOA}\alpha + \frac{\partial n_{eff}^{SOA}}{\partial T}\right) + 2L_{Si}\left(n_{eff}^{Si}\alpha + \frac{\partial n_{eff}^{Si}}{\partial T}\right) + 2L_p\left(n_{eff}^p\alpha + \frac{\partial n_{eff}^p}{\partial T}\right) + \zeta_r L_r\left(n_{eff}^r\alpha + \frac{\partial n_{eff}^r}{\partial T}\right)}{2L_{SOA}n_g^{SOA} + 2L_{Si}n_g^{Si} + 2L_p n_g^p + \zeta_r L_r n_g^r} \quad (1)$$

で与えられる. ここで SOA, Si 導波路, ポリマークラッド部, Si リングの実効屈折率をそれぞれ n_{eff}^{SOA} , n_{eff}^{Si} , n_{eff}^p , n_{eff}^r , 群屈折率を n_g^{SOA} , n_g^{Si} , n_g^p , n_g^r , また SOA, Si 導波路, ポリマークラッド部の共振器長をそれぞれ L_{SOA} , L_{Si} , L_p , そして α は Si の線膨張係数とした. また, $\zeta_r L_r$ はリングの実効的な位相変化であり,

$$\zeta_r L_r = \frac{1 - t^4 A_{Ring1}^2}{1 + t^4 A_{Ring1}^2 - 2t^2 A_{Ring1} \cos(\beta L_{Ring1})} L_{Ring1} + \frac{1 - t^4 A_{Ring2}^2}{1 + t^4 A_{Ring2}^2 - 2t^2 A_{Ring2} \cos(\beta L_{Ring2})} L_{Ring2} \quad (2)$$

A_{Ring} は強度減衰, L_{Ring} は周長, t はリングの自己結合係数, β は位相定数である.

Si 厚さを 213 nm とし, 導波路幅 w を変化させたときの規格化周波数変化率の計算結果を図 2 に示す. 図 2(a) はポリマークラッド部がないとき, 図 2(b) は Si 導波路の約 1/4 を BCB ポリマークラッドにしたときの結果である. ポリマークラッド部の共振器長を調整することで, 幅が広い Si 導波路で温度無依存化条件を満たすことがわかった.

本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究(A) (22H00299), ならびに立石科学技術振興財団研究助成 S の援助を得ている.

参考文献 [1] T. Baba et al., *IEEE J. Sel.* **28**, 5 (2022). [2] 小澤ら, 応物春季, 23a-1BJ-9 (2024) [3] T. Kita et al., *IEEE J.* **22**, 6 (2016).

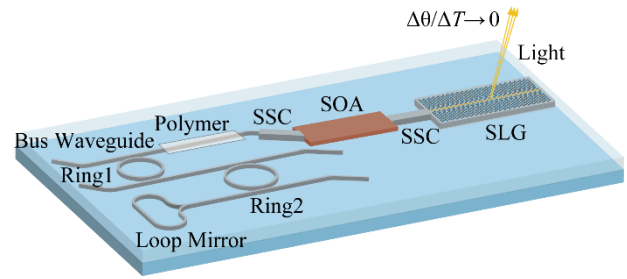


図 1 レーザと SLG ビームスキャナを一体集積する概要.

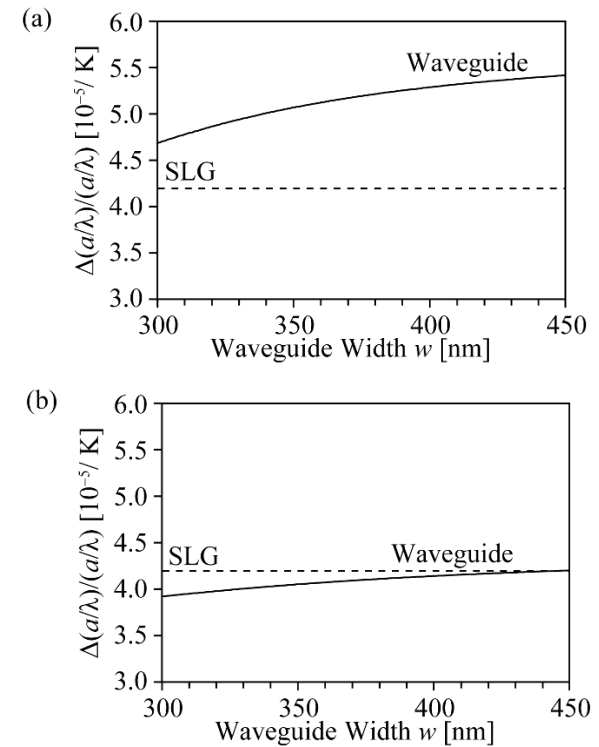


図 2 Si 導波路幅に対するレーザの規格化周波数の変化率. 点線は SLG の同変化率であり, これと一致するとき温度無依存になる. (a) ポリマークラッド部がないとき. (b) BCB ポリマークラッドがあるとき.

アルミナ導波路を用いた可視光量子光学回路向けビームスプリッタ

Beam Splitters for Visible-Light Quantum Optical Circuits with Alumina Waveguides

富士通¹, デルフト工科大² ○山口 拓人¹, 伏見 直樹¹, 肥田 勝春¹, 宮武 哲也¹, 宮原 昭一¹,
宮澤 俊之¹, 河口 研一¹, 石原 良一², 佐藤 信太郎¹

Fujitsu Ltd.¹, TU Delft² ○Takuto Yamaguchi¹, Naoki Fushimi¹, Masaharu Hida¹,
Tetsuya Miyatake¹, Shoichi Miyahara¹, Toshiyuki Miyazawa¹, Kenichi Kawaguchi¹,
Ryoichi Ishihara², Shintaro Sato¹

Email: y.takuto@fujitsu.com

ダイヤモンド中のカラーセンターにおけるスピン状態を活用した量子コンピュータは、モジュール化することで集積化が可能となるため優れたスケーラビリティを有する [1]。本方式の実現には、量子状態の読み出しや操作を行うための可視光量子光学回路が必要不可欠となる。そのため、前回我々は可視光域での吸収損失が少ないアルミナを用いて赤色光 (波長 637 nm) が良好に伝搬可能な導波路の作製について報告した [2]。本報告では、離れた量子ビット間で量子もつれを生じさせるために必須な光回路部品であるビームスプリッタ (BS) をアルミナ導波路で作製し、その光学評価を行った結果について述べる。

我々は、光閉じ込めを意図的に弱めた2本の光導波路を近接させた際に生じるエバネッセント結合を利用し、伝搬光を分波させる導波路型BSを作製した (Fig. 1(a) 上図)。結合長を $L = 120 \mu\text{m}$ として作製したBSにおいて左上の導波路 (A) を光入力に使用し、右上 (A') および右下 (B') の導波路からの出力強度を測定し光分岐比 $B'/(A' + B')$ を算出した。我々は数値計算との比較を行うため、作製した導波路の断面 SEM 像に EDX 元素マッピング像を重ねたもの (Fig. 1(b) 左図) をもとに、Fig. 1(b) 右図に示す形状に近似を行った。アルミナ層の底面における導波路間ギャップ D が異なるBSにおいて、3次元ビーム伝搬法を用いて光分岐比を解析した結果と、光学評価により得られた光分岐比との比較を Fig. 1(c) に示す。実際に作製したデバイスでも数値計算結果と同じくギャップ D の変化によって光分岐比が制御可能であり、 $D = 300 \text{ nm}$ で作製されたBSにおいて $A' : B' \sim 1 : 1$ の光分岐を達成した (Fig. 1(a) 下図)。今回のBSを低損失な光機能素子と組み合わせることで、量子ビット間の相互作用を可能にする量子光学回路が実現される。

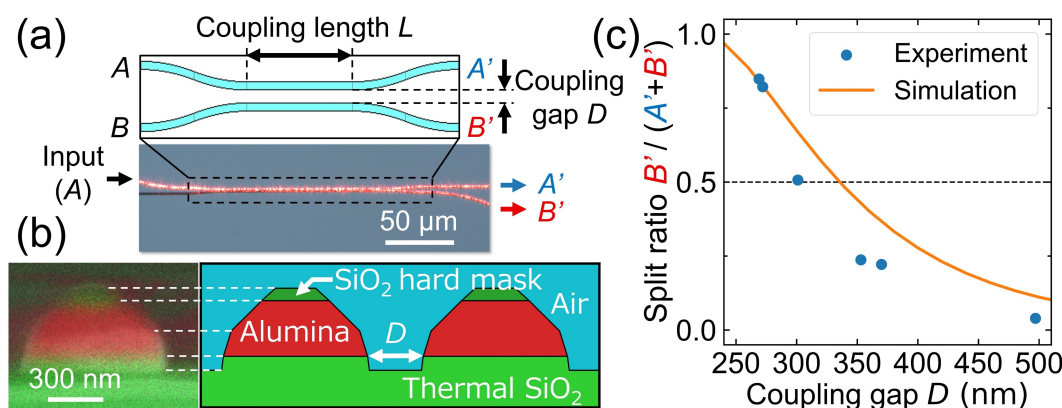


Fig. 1. (a) Schematic of our 2-input/2-output waveguide beam splitter and a photograph of the fabricated beam splitter demonstrating a 1:1 optical split ratio. (b) Left: Cross-sectional SEM image of an alumina waveguide overlapped with EDX mapping of Al (red) and Si (green). The waveguide is well formed although a small amount of SiO₂ hard mask remains on the top. The refractive index at a wavelength of 637 nm is 1.632 for sputtered alumina and 1.443 for plasma-enhanced chemical vapor deposited SiO₂ hard mask. Right: Approximate cross-sectional structure of a fabricated beam splitter for numerical calculations. (c) Plots of measured and numerically calculated optical split ratios for beam splitters with different coupling gaps.

参考文献: [1] R. Ishihara *et al.*, in *67th IEEE IEDM* (2021), p. 14.5.1. [2] 山口 他, in *第 71 回春季応物* (2023), 22p-11F-13.
謝辞: 本研究の一部は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業 (課題番号 JPMXP1224NM0089) の支援を受けた。

Bound States in the Continuum に基づいた高 Q 値 Er:Gd₂O₃ マイクロリング共振器

High Q-factor Er:Gd₂O₃ Microring Resonators based on Bound States in the Continuum

NTT 物性研¹, NTT 先デ研², 日大³

○徐 学俊¹, 稲葉 智宏¹, 相原 卓磨², 石澤 淳³, 俵 毅彦³, 眞田 治樹¹

NTT Basic Research Lab.¹, NTT Device Tech. Lab.², Nihon Univ.³

○Xuejun Xu¹, Tomohiro Inaba¹, Takuma Aihara², Atsushi Ishizawa³, Takehiko Tawara³,
and Haruki Sanada¹

E-mail: xuejun.xu@ntt.com

Er-doped single-crystal rare-earth oxide thin films are promising active media for on-chip integrated optical amplifiers and lasers. Recently, we successfully grew high quality Er-doped Gd₂O₃ thin films on silicon by molecular beam epitaxy [1] and developed a low-loss waveguide platform for optical amplification [2]. To further develop laser devices, high Q-factor optical resonators are desired. In this work, we demonstrated high Q-factor microring resonators based on our previously developed SiN/Er:Gd₂O₃/SOI strip-loaded waveguides [2].

In the case of a straight waveguide, by properly choosing the width, the otherwise inherent lateral leakage radiation can be cancelled out through destructive interference, through the so-called *bound states in the continuum* [3]. We verified by numerical simulation that the similar principle also applies to the bent waveguide of the microring. As shown in Fig. 1, the Q-factors of microrings show a strong width dependence and the mode profiles of waveguides with unoptimized or optimized widths indicate lateral leakage or its cancellation, respectively. We experimentally measured the transmission spectra of microrings with optimized ring widths, and found intrinsic Q-factors typically higher than 80,000, which were limited by the residual Er³⁺ ion absorption and scattering loss induced by fabrication imperfections. By using resonant pumping at a short wavelength around 1480 nm, we also observed significantly enhanced light emission (enhancement factor larger than 70) compared with those from reference waveguides without microrings (Fig. 3). These results indicate that microring resonators are promising device structures for the development of Er-doped lasers on silicon.

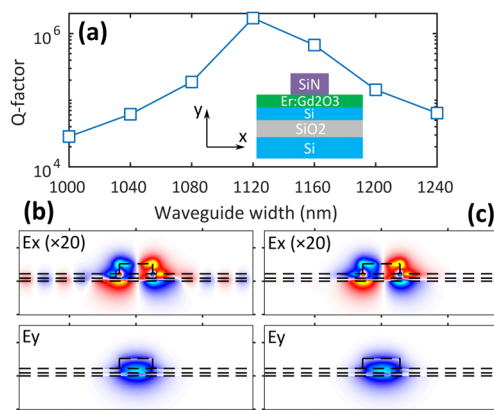


Fig. 1 (a) Simulated Q-factors of resonances around 1553 nm for microring resonators with different waveguide widths. Inset: cross-section of the ring waveguide. Layer thicknesses of Si, Er:Gd₂O₃, and SiN are 90, 157, and 300 nm, respectively. (b) and (c) are resonant mode profiles for waveguide widths of 1000 and 1120 nm, respectively.

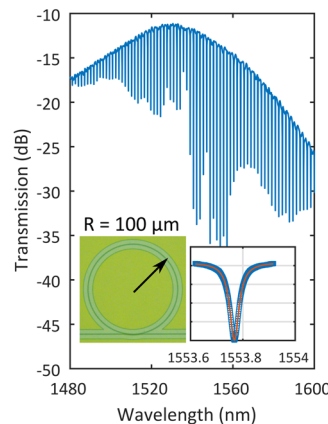


Fig. 2 Typical transmission spectrum of microring resonator. Inset: microscope image of a waveguide-coupled microring; Enlarged view and fitting of a resonance around 1553.8 nm.

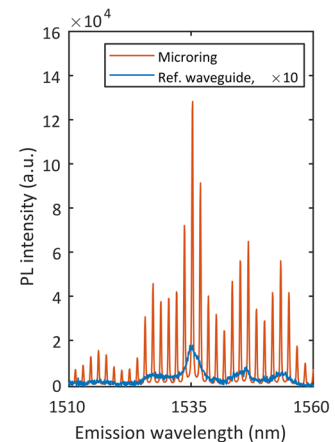


Fig. 3 Photoluminescence spectra from a microring resonator and a reference waveguide.

Acknowledgements: This work was supported by JSPS KAKENHI (Nos. 23H01887, 22H01995, and 20H00357).
References: [1] X. Xu *et al.*, Opt. Express **28**, 14448 (2020); [2] X. Xu *et al.*, Opt. Express **29**, 41132 (2021). [3] C.-L. Zou *et al.*, Laser Photonics Rev. **9**, 114 (2015).

多結晶 YIG/Ce:YIG 二層構造の成膜条件の最適化

Crystallization of Polycrystalline YIG/Ce:YIG bilayer structure

東工大¹ ○(D) 矢島駿¹、庄司雄哉¹

Tokyo Institute of Technology¹, °Shun Yajima¹, Yuya Shoji¹

E-mail: yajima.s.ab@m.titech.ac.jp

はじめに

光集積回路においては、磁気光学材料 Ce:YIG が光アイソレータ[1]や光スイッチ[2]等に用いられている。光導波路との集積方法としては Ce:YIG と格子整合した SGGG 基板上にエピタキシャル成膜したのちに Si 導波路上にチップボンディングを行う手法がある[1]。ただし、チップボンディングでは導波路表面にしか構造を形成できないという制約があるため、実現できる光スイッチの性能に限界がある。本研究では Si 上への磁気光学材料の直接成膜と結晶化プロセスを検討する。

デバイスの作製プロセス

デバイスの作製工程を説明する。Si 導波路を EB 露光と RIE で形成する。S1818G/PMGI SF9 二重レジストをマスクとして Ar/O₂ 混合ガス中で YIG を上、Ce:YIG を下とした二層を連続してスパッタ成膜[3]し、NN-DMAc でのリフトオフによりパターンニングを行う。N₂ 雰囲気下での 800℃の 2 時間のアニールによって、結晶化を行う。

YIG/Ce:YIG 二層構造の成膜時酸素分圧の最適化

1.5cm 基板上に成膜後、2 時間 800℃で N₂ 雰囲気下でアニールした基板のファラデー回転を測定した結果を図 1 に示す。xy 軸はそれぞれ YIG と Ce:YIG 成膜時の Ar/O₂ 混合ガス中の酸素分圧を示している。結果としてファラデー回転は YIG の酸素分圧が高いほど高く、Ce:YIG に関しては酸素分圧 1%において最大値が得られた。

YIG が下に製膜された二層構造と比べて YIG が上にある本構造では磁気光学効果の小さい YIG 中にモード光が到達しないため、損失を抑えて効率的に磁気光学効果を起こすことが期待される。しかし、本研究で得られた Ce:YIG のファラデー回転は単結晶の 1/3 程度であり、結晶性の悪化により伝搬損失も増加していると考えられる。したがって、YIG を先に成膜、結晶化したのちに Ce:YIG を成膜、結晶化する構造の方が結晶性が良く損失が少ないためデバイスとして有効であると考えられる。

謝辞

本成果の一部は、NEDO (JPNP16007)、JSPS 科研費(23H04802)の支援によるものであり、実験プロセスの一部は、文部科学省 ARIM (JPMXP1224IT0028) の支援を受けて、東工大ナノ構造造形支援において実施された。

参考文献

[1]: Y. Shoji, et al., Appl. Phys. Lett., 92, 071117 (2008)

[2]: S. Yajima, et al., Opt. Express, 31, 16243-16250 (2023)

[3]: X. Sun, et al., ACS Photonics, 2, 7, 856–863, (2015)

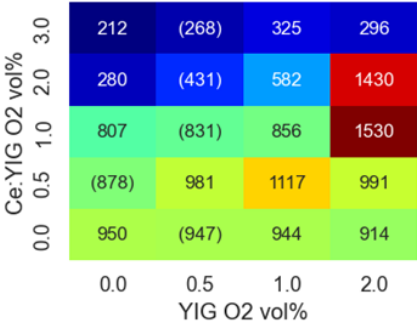


図 1 成膜時 O₂ 分圧とファラデー回転の関係
括弧内の数値は周囲の値を用いて内挿した

薄膜転写技術による磁気光学材料集積用犠牲層材料の検討

Investigation of sacrificial layer materials for magneto-optical material integration by μ -transfer printing

東工大¹, 産総研², [○]中西 航輔¹, 高 磊², 須藤 吉克², 村井 俊哉²,

山田 浩治², 庄司 雄哉¹

Tokyo Tech.¹, AIST², [○]K. Nakanishi¹, R. Kou², Y. Sutoh², T. Murai², K. Yamada², Y. Shoji¹

E-mail: nakanishi.k.ag@m.titech.ac.jp

1. はじめに

次世代の光通信ネットワークの実現に向けて、光デバイスの高密度集積化・量産化・低消費電力化など、様々な研究が行われている。磁気光学材料は光非相反性や不揮発性など他の材料にはない特有の機能を持っており、中でも $\text{CeY}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (Ce:YIG)は波長 1550nm 帯でのファラデー回転が -4500 deg/cm と大きく、光損失が小さいなどの利点を持つことから、その集積化が期待されている[1]。従来の磁気光学デバイスの作製法では、SGGG 基板上に成長した Ce:YIG を Si 導波路上に貼り付けるダイボンディング法が用いられるが、厚い SGGG が回路上に残り、高密度集積が難しいという問題がある。

そこで我々は、薄膜材料を貼り付ける薄膜転写法(μ -transfer printing: μ -TP)に注目し、図 1 に示すプロセスを開発している。 SiO_2/Si 支持基板上に $\text{Ce:YIG}/\text{SGGG}$ を貼り付け薄膜化した後、パターニングと SiO_2 犠牲層除去により中空化したクーポンを形成する。高分子フィルムによってクーポンを持ち上げ、光導波路上に転写する。先行研究では、 μ -TP を用いて Si 導波路上に $\text{Ce:YIG}/\text{SGGG}$ クーポンを集積し、小型な光アイソレータの作製に成功している[2]。しかし、現状のプロセスではクーポンの貼り付けの成功率が低いという課題がある。この要因の一つとして、図 1 に示す薄膜転写法のプロセス概略図のうち、図 1-3 のように希釈フッ酸(DHF)によって SiO_2 犠牲層を除去する際に生じる Ce:YIG 表面の荒れが挙げられる。DHF の暴露時間が長いと Ce:YIG 表面の荒れ具合が大きくなるため、DHF による犠牲層除去時間を短縮する必要がある。

本研究では、 SiO_2 堆積時に用いる PE-CVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) の条件うち TEOS と O_2 の流量を変更し、 SiO_2 犠牲層の粒子密度を小さくすることで、犠牲層除去時間の短縮を検討した。今回、その結果について報告する。

2. 犠牲層除去時間の短縮

PE-CVD 法により Si 上に SiO_2 を堆積した基板

上に、Cr マスクパターンを作製し、DHF ($\text{HF}:\text{H}_2\text{O} = 1:3$)によるエッチングを行った。 SiO_2 成膜条件は TEOS と O_2 の流量のみを変更し、3 と 233 sccm 及び 1 と 233 sccm とした。それぞれの SiO_2 のエッチングレートの結果を図 2 に示す。TEOS と O_2 の流量比を 1:233 とした場合、従来の流量比 3:233 の場合と比較して、エッチングレートは 24 nm/min 程度速くなり、犠牲層除去時間の短縮に成功した。

今後、さらなる犠牲層除去時間の短縮のため、スパッタ法による SiO_2 の成膜も検討する。

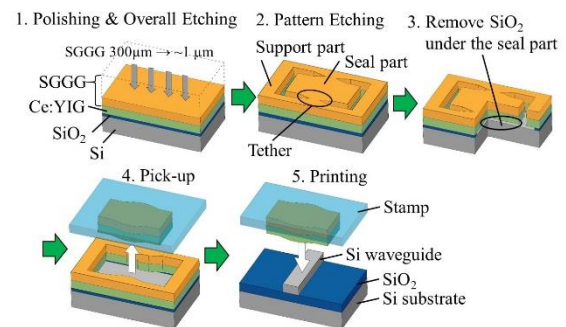


Fig. 1. μ -Transfer printing of thin $\text{Ce:YIG}/\text{SGGG}$ seal on Si waveguide

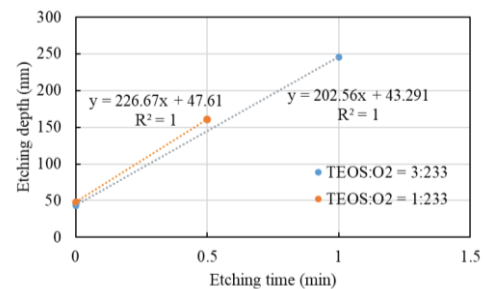


Fig. 2. Etching rate by DHF when SiO_2 is deposited using TEOS flow: O_2 flow = 3:233 and TEOS flow: O_2 flow = 1:233

謝辞

NEDO (JPNP16007)、JSPS 科研費(23H04802)、文科省 ARIM(JPMXP1224IT0029)

参考文献

- [1] T. Shintaku *et al.*, J. Appl. Phys. **76** 8155 (1994).
- [2] D. Minemura *et al.*, Optics Express, **31**(17), 27821-27829 (2023).