

シリコン基板上集積光源における光反射制御の研究

代表研究者

碓塚 孝明

早稲田大学 大学院情報生産システム研究科 准教授

1 はじめに

光ファイバ通信や光インタコネクションの大容量化に伴い、光集積回路が注目され、シリコンフォトニクスをはじめとする光回路の大規模化が飛躍的に進んでいる。光回路の大規模集積に向けては、光源である半導体レーザの安定動作が必要であり、レーザへの戻り光の影響を抑制し、光回路内の反射耐性を向上させることが必須である。近年シリコンフォトニクスにおける光源一体集積が活発であるが、光源集積の為にシリコン基板上に III-V 族化合物半導体を集積する必要があり、シリコンフォトニクス回路と半導体レーザの異種材料の結合領域における損失や反射低減に加え、半導体レーザへの反射光の低減、および半導体レーザの光反射耐性の向上が重要課題である。半導体レーザへの戻り光抑制として有効であるのは光アイソレータの導入である。これまでに、シリコンフォトニクスにおける光アイソレータとしては、YIG（イットリウム・鉄・ガーネット）等の磁気光学材料薄膜とシリコン導波路のハイブリッド集積において、光相反位相効果とマッハ・ツェンダ干渉計の組み合わせにより、20 dB 以上のアイソレーション比が報告されている[1]。また、磁気光学材料を用いない光アイソレータの手法として、位相変調構造[2]や非線形効果を用いた結合リング共振器構造[3]の他、金属や誘電体の周期構造を用いた光単方向伝搬[4]、また、変調による単方向光増幅機能が理論提案されている[5]。しかしこれらの光アイソレータ機能の実証はいずれも単体素子によるものであり、半導体レーザとの一体集積には課題がある。一方で、シリコン基板上半導体レーザの高反射耐性化に関しては、シリコン導波路による低損失化と高 Q 値化[6]、量子ドット活性層による線幅増大係数抑制による反射耐性向上が報告されている。また近年、共振器損の制御による構造的な線幅増大係数の低減による反射耐性向上が報告されており[7]、シリコン基板上での実装が期待される。前述のシリコン基板上の III-V 族半導体材料の一体集積に関しては、シリコン基板上の光トランシーバが実用化されており、発光・受光デバイスに進展が得られる一方で、半導体レーザと光アイソレータの一体集積は実用レベルには至っていないのが現状である。したがって、シリコン基板上の III-V 族集積構造の反射制御が、集積光回路の新たなプラットフォームの実現に向けた展望を拓くために重要である。

本研究では、大規模光集積に適用可能な光反射制御技術の実現をめざし、シリコン基板上に集積した III-V 族半導体光集積回路における光反射の抑制を検討した。シリコン基板上の高密度 III-V 族デバイス集積の実現にあたっては、前述のように、(1) 光源の光出力導波路への光アイソレータ機能の付与と光散乱の抑制、(2) 高戻り光耐性を有する半導体レーザが課題である。これらの課題解決のため、シリコン基板上における光アイソレータと半導体レーザの一体集積に向けて、数値シミュレーションを通して光反射耐性の高い集積光源の構成を提案することを目標とした。

2 シリコン基板上集積光アイソレータ

シリコン基板上に半導体レーザと一体集積可能な光アイソレータ構造を検討した。光集積回路のプラットフォームとしては、SiO₂/Si 基板上に形成した InP 薄膜テンプレートを用いた[8]。本構造は、低屈折率層である SiO₂ 上に薄膜 InP 層を形成することにより、コア層への高い光閉じ込めを可能とし、低消費電力駆動の半導体レーザおよび光半導体増幅器を形成できる。加えて、メンブレン構造の表面に高い結合係数を有するブラッグ回折格子、およびフォトニック結晶構造等を適用することができるため、周期的な屈折率および利得構造の形成にも利点が高い[9]。さらに、メンブレン表面への誘電膜や金属のポストプロセスによって、様々な機能を付与できる特徴を有する。これらの特徴を活かして、光アイソレータおよび半導体レーザの集積構造として、磁気光学材料による光相反損失を用いたアクティブ型集積光アイソレータ構造を検討した。断面構造を図 1 に示す。図 1 (a) は半導体レーザの断面図である。SiO₂/Si 基板上に InP の薄膜構造を形成し、量子井戸(MQW: Multiple Quantum Wells)活性層を埋め込んだ構造である[8]。活性層の両側には p 領域と n 領域を形成し、横方向の pin 電流注入構造を有する。活性層上部の InP のエッチング、もしくは誘電体薄膜を用いて表面回折格子を形成し、単一モードレーザを実現できる。図 1 (b) は光アイソレータ構造

の例である。ここで、レーザはTEモード発振であるため、光アイソレータにおいてもTEモード動作が必要となる。導波路の側面に強磁性体材料を形成し、基板に垂直方向に磁界を与えることで、TEモードの前進波と後進波の伝搬損失が異なる光相反損失型の光導波路が実現され、光アイソレータ機能を実現できる。この原理を用いた光相反損失型の光アイソレータはInP基板上で実現されており[10]-[13]、レーザと光アイソレータ一体集積[12]の他、TEモードにおいて、前進波と後進波間のアイソレーション比36.6 dB/mmが報告されている[13]。本研究においては、レーザとの整合性を確保するために、レーザ領域と同様の埋め込み活性層導波路構造を用いることとした。また、メンブレン埋込み導波路の一方の側面に薄膜強磁性体層を形成し、基板に対して垂直方向に磁界を印加することにより、TEモードに対する非相反光伝搬機能の付与を検討した。強誘電体層に起因する光損失は、レーザ領域同様に、横方向への電流注入により補償することができる。前述のように活性層領域における光閉じ込めが高いため、低電流駆動での光損失補償が期待される。

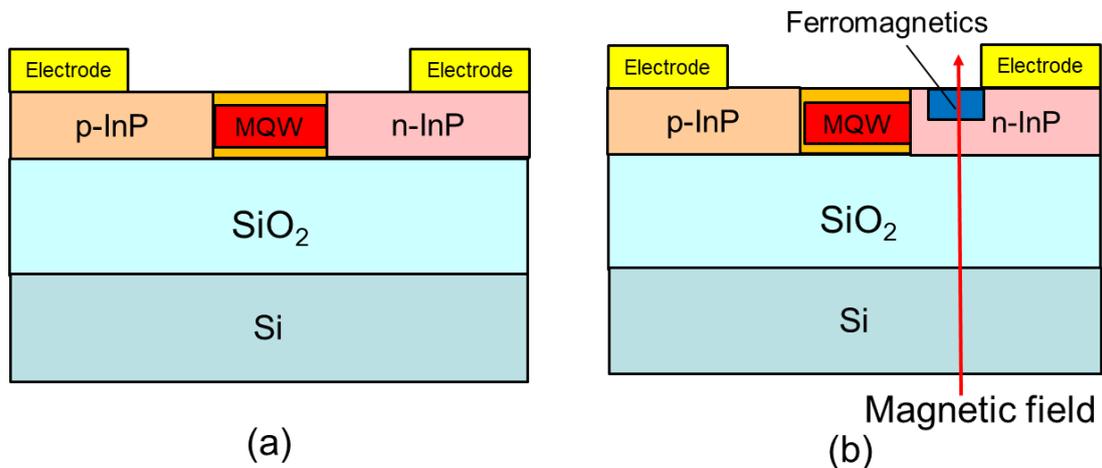


図1 光源集積アイソレータ構造の(a)レーザの断面図と(b)光アイソレータの断面図。

3 光アイソレータ特性

数値シミュレーションによりアイソレータ機能の解析を行った。図2は解析に用いた光アイソレータ導波路の断面図である。量子井戸コア領域への電流注入を容易とし、および素子形成を簡易化するため、メンブレン表面への強磁性体形成を検討した。6層InGaAsP量子井戸活性層を薄膜InP層内に埋め込み、活性層上にInPによるリッジ構造を形成し、リッジ側面に磁性体構造を形成する。図2(a)はリッジ側壁に直接強磁性体を形成した構造であり、図2(b)は光損失抑制抑制のためにInP側壁と強磁性体間に低屈折率層を形成した構造である。本導波路構造の断面解析により光アイソレータ特性を解析した。解析には3階の複素誘電率テンソルによる2次元のフルベクトル有限要素法を用いた。強磁性体の複素誘電率テンソル ϵ_{ij} は以下で与えられる。

$$\epsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & \epsilon_{xz} \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ -\epsilon_{xz} & 0 & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

強磁性体材料には鉄を用い、対角成分の実効屈折率は $3.17+5.27i$ 、非対角の複素誘電率成分 ϵ_{xz} は $3.15+1.8i$ とした[10]。この複素誘電率テンソルを用いて、光アイソレータ導波路構造の複素実効屈折率 n_{eff} を解析し、実効屈折率の複素成分 κ により前進波および後進波の伝搬損失 α を評価した。また、前進波と後進波の損失差によりアイソレーション比を求め、アイソレーション比と損失の比をFigure of merit (FOM)として定義し、光アイソレータ特性の性能を評価した。

$$n_{eff} = n_r + ik \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \kappa \quad (3)$$

$$FOM = \frac{\text{Isolation (dB/mm)}}{\text{Loss (dB/mm)}} \quad (4)$$

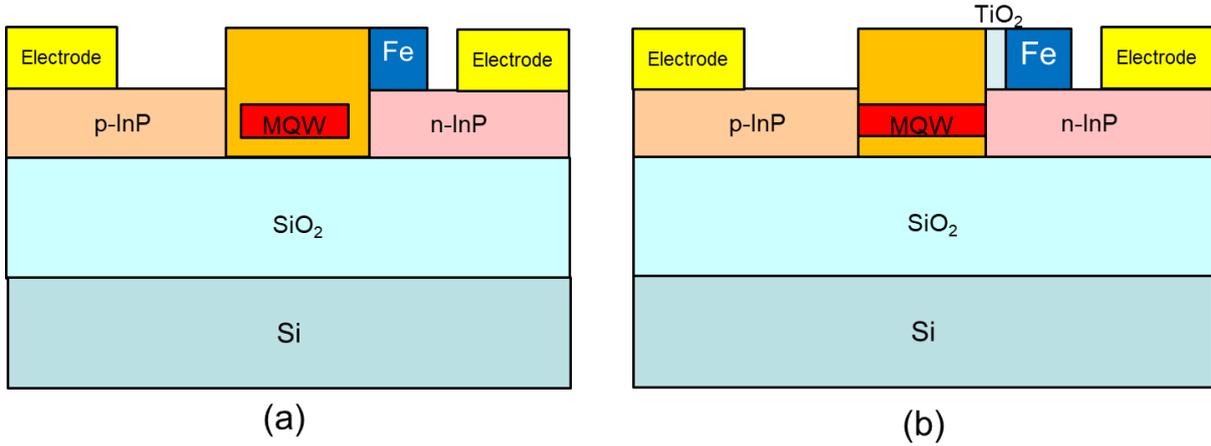


図2 解析に用いた光アイソレータ構造の断面図。(a) InP リッジ側面への強誘電体形成構造と (b) InP リッジ側面への誘電体/強誘電体形成構造。

図3(a)は、図2(a)の InP リッジ側面への強誘電体形成構造における、TE 偏光に対する前進波と後進波の伝搬損失とアイソレーション比を示す。動作波長 λ は $1.55 \mu\text{m}$ である。リッジ高さを変えてその影響を調べた。InP 膜厚は 420 nm 、量子井戸層幅は 700 nm 、量子井戸活性層上の InP リッジ幅は 1100 nm である。リッジ高さの増大に伴い、損失が増大する結果が得られた。これはリッジ高さの増大に伴い InP リッジ内の電界分布が高くなり、強磁性体領域の光分布が増大することによるものである。一方で、アイソレーション比については最大値が存在し、最適なリッジ高さを得られることがわかった。最大値は 33 dB/mm である。光分布が主としてコア領域に分布し、垂直方向の光分布の広がりにより、TE モードに対する光アイソレータ動作の効果が低減するためと考えられる。図3(b)は FOM の値を示す。リッジ高さ 420 nm 付近で、FOM を最大化するリッジ高さが存在することが示された。

また、図4(a)は InP リッジ層の幅を変えた場合の光アイソレーション特性の解析結果である。リッジ高さは 320 nm である。InP リッジ幅の増大に伴い、強磁性体領域への光閉じ込めが減少するため、光損失、アイソレーション比共に減少する。リッジ幅 1000 nm におけるアイソレーション比は 30 dB/mm である。また、図3(b)は FOM のリッジ幅依存性を示す。FOM は InP リッジ幅の増大に伴い緩やかに増大し、最大値は 0.087 であった。本構造においては光損失量が非常に高い点が課題である。一因として、メンブレン構造を採用しているために活性層の層方向に対する光閉じ込めが高い一方で、活性層の横方向に対する光閉じ込めが不十分のため、強磁性体領域の光損失が相対的に高くなっていることが要因と考えられる。

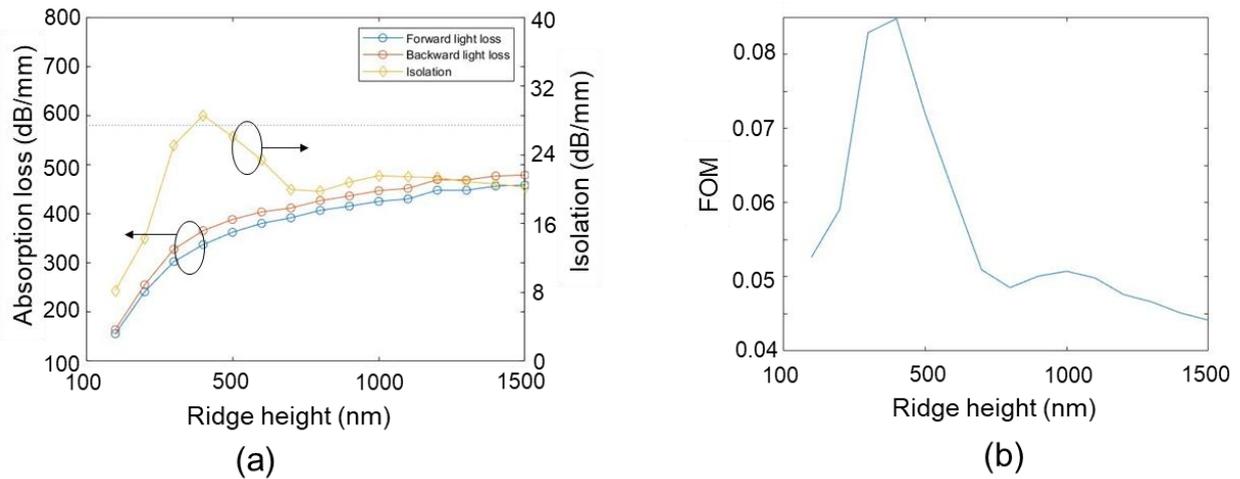


図3 InP リッジ側面への強誘電体形成構造 (図 2(a)) における (a) アイソレーション特性と (b) FOM の InP リッジ高さ依存性。

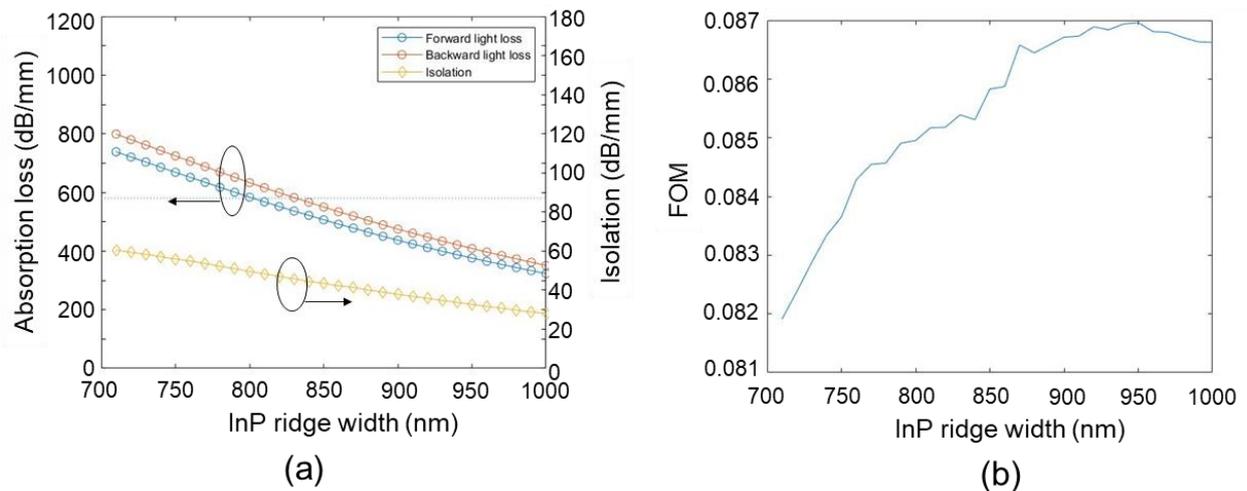


図4 InP リッジ側面への強誘電体形成構造 (図 2(a)) における (a) アイソレーション特性と (b) FOM の InP リッジ幅依存性。

損失低減に向けては、図 2 (b) に示した、リッジ導波路と強磁性体領域間に誘電体膜を形成した構造を検討した。InP 膜厚及び活性層構造は図 2 (a) と同様である。InP のリッジ幅は 700 nm、リッジ高さは 400 nm とした。誘電体膜は TiO_2 とし、膜厚を変えてアイソレーション特性の変化を調べた。図 5 (a) は TE 偏光に対する伝搬損失とアイソレーション比、図 5 (b) は FOM を示す。本構造においては、誘電体膜の低屈折率領域により、InP リッジ領域内の光閉じ込めが強くなり、導波路内の光は主としてコア領域に閉じ込められる。誘電体膜厚の増大に伴い、強磁性体領域への光の閉じ込めが減少し、光損失、およびアイソレーション比共に減少する傾向が得られた。一方で誘電体膜を厚くしていくと、損失の低減に対してアイソレーション比の低減が緩やかであるため、誘電体膜の増大に伴い、FOM は一旦減少するが、少しずつ増大に転じる結果が得られた。膜厚 300 nm における FOM は約 0.05 である。

以上のように、メンブレン構造を用いた非相反損失を用いた TE モードの光アイソレーションの機能を数値シミュレーションにより確認することができた。一方で、現状の構造では FOM の値が最大でも 0.1 程度に留まっている。これはアイソレーション比 10 dB を得る際に伝搬損失が 100 dB となることを示しており、光増幅による損失補償の為には、リッジ構造や誘電体の膜厚構造の制御により、伝搬損失の大幅な低減が必須である。図 2 に示した光アイソレータ構造は、電流注入による光増幅による損失補償機能を有する。量子井戸領域の活性層領域を仮定した場合、活性層領域における光閉じ込めは 1 層あたり 2% 程度の高い値を得るこ

とができるため、低注入電流による光増幅を実現できる。同様のメンブレン光増幅器においては、300 μm 長のバルク活性層を用いて、電流量 12 mA におけるチップ利得 10 dB、33 dB/mm の損失補償が報告されている [14][15]。ロスレス動作に向けては同程度の光損失を実現することが必要となる。

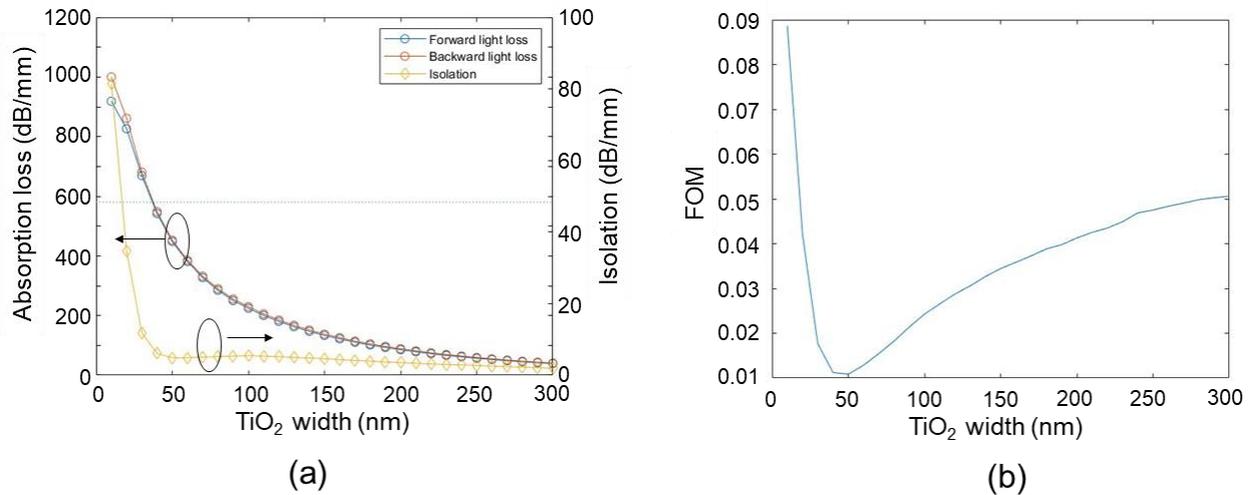


図5 InP リッジ側面への誘電体/強誘電体形成構造 (図 2(b)) における (a) アイソレーション特性と (b) FOM の誘電体膜厚依存性。

4 まとめ

シリコン基板上の光源集積光回路に適用可能な光アイソレータの実現に向けて、非相反損失メンブレン構造を用いた光アイソレータを提案し、数値解析による基礎検討を行った。半導体レーザーの低電流駆動に適した SiO_2/Si 基板上の InP メンブレン構造を採用し、メンブレン構造の表面に強磁性体を形成することで、横方向電流注入による光増幅機能と、TE モードに対する光アイソレーション機能を与えることができる。有限要素法による数値シミュレーションにより、強磁性体構造に鉄を用いた場合において、アイソレーション比 10 dB/mm 以上、FOM 0.09 が得られることが示された。一方で、十分な損失補償の効果をを得るためには FOM 1 以上が必要であることから、光損失の低減が今後の課題である。また、実際の素子作製に向けては、 SiO_2/Si 上 InP 薄膜テンプレート上の強磁性体の形成技術が必要であり、作製を可能とする誘電体材料および磁性体材料の構成の検討も重要である。合わせて、半導体レーザーの反射耐性向上を検討することで、シリコン基板上の光源集積光回路の実現が期待される。

【参考文献】

- [1] Y. Shoji, Y. Shirato, and T. Mizumoto, "Silicon Mach-Zehnder interferometer optical isolator having 8 nm bandwidth for over 20 dB isolation," J. J. of Appl. Phys. vol. 53, 022202, 2014.
- [2] C.R. Doerr, L. Chen, and D. Vermeulen, Optics Express vol. 22, no. 4, pp. 4493-4498, 2014.
- [3] L. Fan, J. Wang, L.T. Varghese, H. Shen, B. Niu, Y. Xuan, A.M. Weiner, and M. Qi, "An All-Silicon Passive Optical Diode," Science vol. 335, no. 6067, pp. 447-450, 2012.
- [4] L. Feng, Y-L. Xu, W.S. Fegadolli, M. Lu, J.E.B. Oliveira, V.R. Almeida, Y-F. Chen, and A. Scherer, "Experimental demonstration of a unidirectional reflectionless parity-time metamaterial at optical frequencies", Nature Materials vol. 12, pp. 108-113, 2013.
- [5] A.Y. Song, Y. Shi, Q. Lin, and S. Fan, "Direction-dependent parity-time phase transition and nonreciprocal amplification with dynamic gain-loss modulation," Phys. Rev. A vol. 99, 013824, 2019.
- [6] Z. Zhang, K. Zou, H. Wang, P. Liao, N. Satyan, G. Rakuljic, A.E. Willner, and A. Yariv, "High-Speed Coherent Optical Communication With Isolator-Free Heterogeneous Si/III-V Lasers," J. of Lightwave Technol. vol. 38, no. 23, pp. 6584-6590, 2020.

- [7] Y. Matsui, R. Schatz, D. Che, F. Khan, M. Kwakernaak, and T. Sudo, "Isolator-free > 67-GHz bandwidth DFB+R laser with suppressed chirp," Optical Fiber Communication Conference 2020 (OFC 2020) Th4A.1, 2020.
- [8] S. Matsuo, T. Fujii, K. Hasebe, K. Takeda, T. Sato, and T. Kakitsuka, "Directly modulated buried heterostructure DFB laser on SiO₂/Si substrate fabricated by regrowth of InP using bonded active layer," Optics Express, vol. 22, no. 10, pp. 12139-12147, 2014.
- [9] K. Takeda, T. Tsurugaya, T. Fujii, A. Shinya, Y. Maeda, T. Tsuchizawa, H. Nishi, M. Notomi, T. Kakitsuka, and S. Matsuo., Optics Express, vol. 29, no. 16, pp. 26082-26092, 2021.
- [10] T. Amemiya, H. Shimizu, P.N. Hai, M. Yokoyama, M. Tanaka, and Y. Nakano, "Waveguide-Based 1.5 μm Optical Isolator Based on Magneto-Optic Effect in Ferromagnetic MnAs," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 46, no. 1R, 205, 2007.
- [11] H. Shimizu and Y. Nakano, "Fabrication and characterization of an InGaAsP/InP active waveguide optical isolator with 14.7 dB/mm TE mode nonreciprocal attenuation," J. of Lightwave Technol. vol. 24, no. 1, pp. 38, 2006.
- [12] H. Shimizu and Y. Nakano, "Monolithic Integration of a Waveguide Optical Isolator with a Distributed Feedback Laser Diode in the 1.5-μm Wavelength Range," Photon. Technol. Lett. vol. 19, no. 24, pp. 1973-1975, 2007.
- [13] R. Oshikiri, Y. Kobayashi, S. Nishiyama, and H. Shimizu, "36.6 dB/mm Extinction Ratio in TE Mode Semiconductor Optical Isolators with Co," 26th Microoptics Conference (MOC), 2021.
- [14] T. Hiraki, T. Aihara, T. Fujii, K. Takeda, T. Kakitsuka, and S. Matsuo "Membrane InGaAsP Mach-Zehnder modulator integrated with optical amplifier on Si platform," J. of Lightwave Technol., vol. 38, no. 11, pp. 3030-3036, 2020.
- [15] T. Hiraki, T. Aihara, K. Takeda, T. Fujii, T. Tsuchizawa, T. Kakitsuka, and S. Matsuo, "Heterogeneously Integrated Low-power-consumption Semiconductor Optical Amplifier on Silicon," CLEO 2019, STh3N.1, 2019.

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月