

異種材料接合による光導波路への光アイソレーター集積

水本 哲 弥

Integration of Optical Isolators on Optical Waveguides with Direct Bonding of Dissimilar Materials

Tetsuya MIZUMOTO

An optical isolator plays an essential role in preventing light wave from propagating in an undesired direction. A magneto-optic material is important for obtaining such a nonreciprocal function. In this article, a surface activated direct bonding technique is described for integrating a magneto-optic garnet on silicon and III-V compound semiconductor waveguides. This technique enables us to integrate the optical isolator on a commonly used waveguide platform. Waveguide isolators based on the nonreciprocal phase shift induced by a first-order magneto-optic effect are addressed. An isolation >20 dB was obtained in the nonreciprocal phase shift isolators constructed with SOI and GaInAsP/InP waveguides.

Key words: optical isolator, optical waveguide, direct bonding, magneto-optic garnet

光アイソレーターは、光を一方向のみに伝達し、反射戻り光など予期せぬ光波の伝搬を防止する。光能動部品などを所期の特性で動作させ、光回路の動作安定化に必要な不可欠な素子である。例えば、半導体レーザーに外部から光が入射すると強度雑音や位相雑音の発生原因となるが、光アイソレーターをレーザー出射端に配置することにより、これを防止することができる。

光アイソレーターを他の光素子と集積するために、さまざまな導波路型光アイソレーターが検討されてきた。バルク型光アイソレーターと同様に偏波面回転を用いて導波路型光アイソレーターを構成しようとする、導波路複屈折を精密に制御してTEモードとTMモード間の位相整合を図る必要がある。導波路形状とともに材料の複屈折性の厳密な制御にもなう困難さを回避するために、偏波面回転とは異なる原理で動作する素子が検討されている。一偏波で動作する干渉導波路型光アイソレーターは、モード間の位相整合が不要で、動作波長帯域が広いことに特徴がある。さらに、直接接合などの方法を用いて磁気光学材料をクラッド層として配置することによって、III-V族化合物半導体やシリコンなど、さまざまな光集積回路用導波路プラットフォームで光アイソレーターを実現することがで

きる。

本稿では、光集積回路への展開を視野に、導波路型光アイソレーターを実現するためのコア技術となる異種材料接合技術と、これを用いた導波路型光アイソレーターの開発状況について述べる。

1. 異種結晶接合

磁気光学ガーネットは光ファイバー通信波長帯で光吸収が小さく、大きな磁気光学効果を有する材料として、光アイソレーターの形成に最も適している。しかし、化合物半導体等の光集積回路用導波路材料とは物性が大きく異なるため、これらの材料上に良好な単結晶を成長することは困難である。

この問題を回避するために、磁気光学ガーネット単結晶を直接接合する方法が開発されている¹⁾。接合するウェハー表面に水酸基を吸着させ、室温で水素結合を介して緩やかに接合させた後、加熱・脱水縮合によって接合を得る方法（親水化接合）と、真空チャンバー内でプラズマ処理などによって表面を活性化して接合する方法（表面活性化接合）が開発されている（図1）。異種結晶の直接接合においては、低い温度で接合を実現するために効果的な表面活

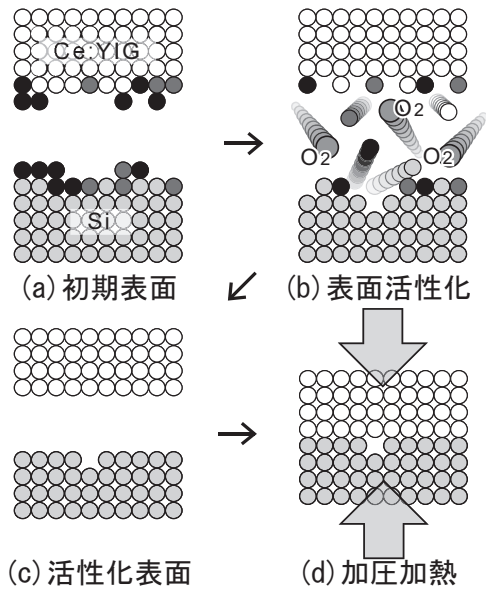


図1 表面活性化接合.



図2 Ce:YIG 接合の様子.

性化処理法を見いだすことが重要である.

光ファイバー通信波長帯で大きなファラデー回転係数を有する磁気光学ガーネット Ce 置換 YIG (Ce:YIG, $(YCe)_3Fe_5O_{12}$) と GaInAsP の表面を酸素プラズマで活性化処理し、2枚のウェハーを貼り合わせた後、1 MPa の圧力を加えながら温度 250°C で 1 時間加熱処理し、接合を実現している (図 2)。引張り試験では、0.5 MPa 以上の引張り力で InP 基板の破壊がみられ、2 枚のウェハーは剥離することなく接合が維持されたことから、光デバイスとしては実用上十分な接合強度が得られている。また、SOI (silicon on insulator) ウェハー上の厚さ 300 nm の Si と Ce:YIG の表面を酸素プラズマで活性化処理し、5 MPa で加圧しながら温度 250°C で 8 時間加熱処理して、Si と Ce:YIG の接合も実現している。接合条件の詳細については、文献²⁾などの報告を参照されたい。

異種材料の接合では、高温で接合した後、室温まで温度を下げると、材料の熱膨張係数差によって接合界面に応力が発生する。応力による光導波路の破断は大きな導波路損失につながるため、接合温度の低減とともに応力緩和の工夫が重要である³⁾。

2. 導波路型光アイソレーター

バルク型光デバイスと異なり、導波路中を伝搬する光波の伝搬特性は偏波 (TE, TM モード) によって異なる。そのため、一般的には、ファラデー効果による偏波回転 (TE-TM モード変換) は、楕円偏波の主軸が回転することになる。一見すると偏波が回転しているように見えるが、主軸方向に対して直交する偏波成分が存在するために、光アイソレーターとして十分な消光状態を作ることができな

い。ファラデー効果による TE-TM モード変換を用いて光アイソレーターを構成する場合には、TE モードと TM モードの位相整合を図る必要がある。構造異方性と材料の複屈折性を精密に制御することによって TE, TM モード間の位相整合を図ることはできるが、製作許容精度の点で実現上困難である。また、位相整合条件は波長に依存するため、動作波長範囲が制限される。

偏波間の位相整合を回避するために、半漏導波路型⁴⁾ および非相反放射型⁵⁾ の光アイソレーターが検討されている。いずれも伝搬定数が連続スペクトルとなる放射モードと導波モードの変換を利用することで、位相整合に対する要求を緩和することができるが、半漏型では磁気光学材料と光学異方性材料の集積化が、非相反放射型では非相反移相効果が小さいことがそれぞれ課題である。

これに対して、一方の偏波のみが動作に関与する動作原理を用いれば、偏波間の位相整合の問題を回避することができる。このタイプの光アイソレーターとして、非相反損失型⁶⁾ と非相反移相型⁷⁾ がある。非相反損失型光アイソレーターは、Fe, Co などの強磁性材料がもつ大きな磁気光学効果によって生じる光吸収損失の伝搬方向依存性を利用する。前進波に対する残留光損失は、内蔵する半導体光増幅器の利得で補償する。

一方、磁気光学材料を配置した層厚方向に非対称な導波路において、光の伝搬方向に直交する面内方向の磁化成分によって、TM モード光の伝搬定数が伝搬方向によって異なる非相反移相効果が発現する。マッハ・ツェンダー干渉 (MZI) 導波路に、非相反移相効果と伝搬方向によらず一定の位相差を与える相反移相器を組み入れると (図 3)、前

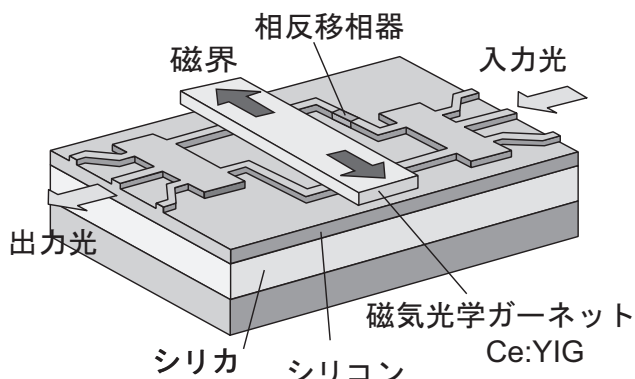


図3 干渉導波路型光アイソレーターの構造⁷⁾.

進波に対しては同相干渉で通過状態，後退波に対しては逆相干渉で阻止状態となる光アイソレーターが実現できる。

また，リング共振器中で非相反移相効果を発生させると，光波伝搬方向によってリング共振器の共振波長が異なる。すなわち，リング共振器と結合するバスラインの伝達特性に伝搬方向依存性が現れ，共振波長付近の狭い波長範囲で光アイソレーターとして機能する。

SOI ウェハ上でのシリコン光導波路あるいは InP 基板上に結晶成長した GaInAsP 導波路で MZI を形成し，その上に Ce:YIG を直接接合して非相反移相効果を発生させて，波長 1550 nm 帯で 20 dB 以上のアイソレーションが得られている^{8,9)}。また，シリコン光導波路でリング共振器を形成し，この上に Ce:YIG を直接接合して，波長 1550 nm 帯で 9 dB のアイソレーション特性が報告されている¹⁰⁾。

磁気光学ガーネットを半導体導波路上に直接接合して形成した導波路型光アイソレーターの現状を紹介した。近年，パルスレーザー堆積法によってシリコン導波路上に磁気光学ガーネット層を形成した導波路型光アイソレーターの動作も報告されている¹¹⁾。堆積したガーネットが多結晶であり，単結晶ガーネットに比べて磁気光学効果が約

20%程度と小さく，光損失も大きいという欠点もあるが，光アイソレーターの集積化という観点で今後の展開が大きいと期待される。

文 献

- 1) T. Mizumoto, Y. Shoji and R. Takei: "Direct wafer bonding and its application to waveguide optical isolators," *Materials*, **5** (2012) 985-1004.
- 2) R. Takei, K. Yoshida and T. Mizumoto: "Effect of wafer pre-cleaning and plasma irradiation to wafer surfaces for plasma-assisted surface activated bonding," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **49** (2010) 086204.
- 3) K. Sakurai, K. Abe and T. Mizumoto: "Relaxation of stress in direct bonding for fabrication of optical isolator with semiconductor guiding layer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **48** (2009) 112401.
- 4) S. Yamamoto, Y. Okamura and T. Makimoto: "Analysis and design of semileaky-type thin-film optical waveguide isolator," *IEEE J. Quantum Electron.*, **12** (1976) 764-777.
- 5) T. Shintaku and T. Uno: "Optical waveguide isolator based on nonreciprocal radiation," *J. Appl. Phys.*, **76** (1994) 8155-8159.
- 6) 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. Lightwave Technol.*, **24** (2006) 38-43.
- 7) F. Auracher and H. H. Witte: "A new design for an integrated optical isolator," *Opt. Commun.*, **13** (1975) 435-438.
- 8) Y. Shoji, T. Mizumoto, H. Yokoi, I-Wei Hsieh and R. M. Osgood, Jr.: "Magneto-optical isolator with silicon waveguides fabricated by direct bonding," *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 071117.
- 9) Y. Sobu, K. Sakurai, Y. Shoji and T. Mizumoto: "GaInAsP Mach-Zehnder interferometric waveguide optical isolator integrated with spot size converter for optical fiber," *IEEE Photonics Conference 2012, ThZ3* (2012).
- 10) M.-C. Tien, T. Mizumoto, P. Pintus, H. Kromer and J. E. Bowers: "Silicon ring isolators with bonded nonreciprocal magneto-optic garnets," *Opt. Exp.*, **19** (2011) 11740.
- 11) L. Bi, J. Hu, P. Jiang, D.-H. Kim, G. F. Dionne, L. C. Kimerling and C. A. Ross: "On-chip optical isolation in monolithically integrated non-reciprocal optical resonators," *Nat. Photonics*, **5** (2011) 758-762.

(2012年8月9日受理)