

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 4月25日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560343

研究課題名（和文）ガーネットフォトニクスを用いた光非相反素子集積型半導体レーザの開発

研究課題名（英文）Development of laser diode integrated with optical nonreciprocal devices by garnet photonics

研究代表者

横井 秀樹（YOKOI HIDEKI）

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：90251636

研究成果の概要（和文）：半導体レーザの発振安定化のため、光アイソレータなどの光非相反素子は必要不可欠である。半導体レーザと光非相反素子の集積化のため、ガーネット基板上に半導体導波層を有する光非相反素子を構成し、感光性接着剤を用いた貼り合わせにより半導体レーザと集積化する方法について検討した。

研究成果の概要（英文）：In optical communication systems, optical nonreciprocal devices are indispensable in protecting laser diodes from unwanted reflected lights. Integrating technique between laser diodes and optical nonreciprocal devices with a semiconductor guiding layer has been investigated by using photosensitive adhesive bonding.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：光物性・光非相反素子・半導体レーザ

1. 研究開始当初の背景

光通信システムでは、光源に用いられる半導体レーザの発振安定化のため、光アイソレータ等の光非相反素子は必要不可欠である。近赤外領域では、光非相反素子を構成するとき、この波長域で透明かつ磁気光学効果の大きな磁性ガーネットが用いられる。磁性ガーネットと半導体は結晶構造や格子定数が異なるため、これらの組み合わせでのエピタキシャル成長が望めず、半導体素子と光非相反素子の集積化は光集積回路実現の大きな足かせとなっている。

2. 研究の目的

近年、磁気光学導波路の層構造を検討することにより、磁気光学効果の一つである非相反移相効果が増強されることを筆者らのグループが発見し、実際に所望の層構造の磁気光学導波路の製作が検討され始めている。特に、Siを導波層とする磁気光学導波路は、他の導波路形光素子との集積化の可能性もあり、大いに注目されている。

本研究では、ガーネット基板上に半導体導波層を有する光非相反素子を構成した後に半導体レーザを集積化させるガーネットフォトニクスにより、光非相反素子集積型半導体レーザを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示す光非相反素子集積型半導体レーザの開発を目的として、まずは磁性ガーネット上にSiを成膜し、成膜されたSiを導波層とする磁気光学導波路により、導波路型光アイソレータを製作する(図1における点線で囲まれた部分の素子)。この磁気光学導波路が実現できれば、様々な表面処理や熱処理を必要とするウェハボンディング法を利用することなく、大きな非相反移相効果を有する導波路により光アイソレータが構成できるので、再現性よく超小型の光非相反素子を製作することが可能となる。得られた光非相反素子に対して、感光性接着剤を用いて半導体レーザを集積化することで、光非相反素子集積型半導体レーザが実現される。

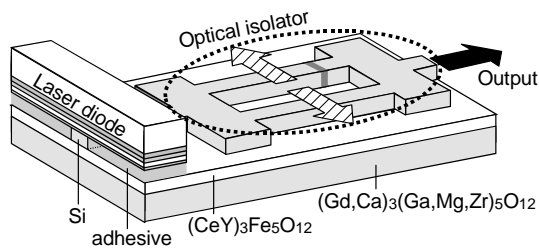


図1 ガーネットフォトニクスで実現される光非相反素子集積型半導体レーザ

4. 研究成果

(1) ガーネット基板上へのSiの成膜

図2に示す非相反移相効果を利用した干渉計光アイソレータを実現するために、ガーネット基板上へのSiの成膜について調べた。 $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG) 基板上に、rfスパッタリング法によりSi層を成膜した。成膜時のArガス圧は 4×10^{-2} Torrとした。スパッタリングレートは約10.7 nm/minである。原子間力顕微鏡 (AFM) により表面粗さを観察したところ、0.2 μm 厚のSi層の平均表面粗さは約1.4 nmであった。表面粗さは、(Ca,Mg,Zr)-doped $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GCGMZG) 基板上に成長された(CeY) $_3$ Fe $_5$ O $_{12}$ (Ce:YIG) 上に成膜したSi層においても同等の値を示した。

Si層の屈折率を分光エリプソメトリにより測定した。図3に、測定されたSiの屈折率を示す。波長1.55 μm における屈折率は約3.77であることが分かった。また、磁性ガーネットとして用いるCe:YIGのファラデー回転係数は、波長1.55 μm において約-4500 deg/cmである。Ce:YIGおよびGCGMZGの屈折率は、波長1.55 μm で、それぞれ2.22、1.94である。Siの屈折率がCe:YIGやGCGMZGより大きいので、導波路を伝搬する光波はSi層に強く閉じ込められる。

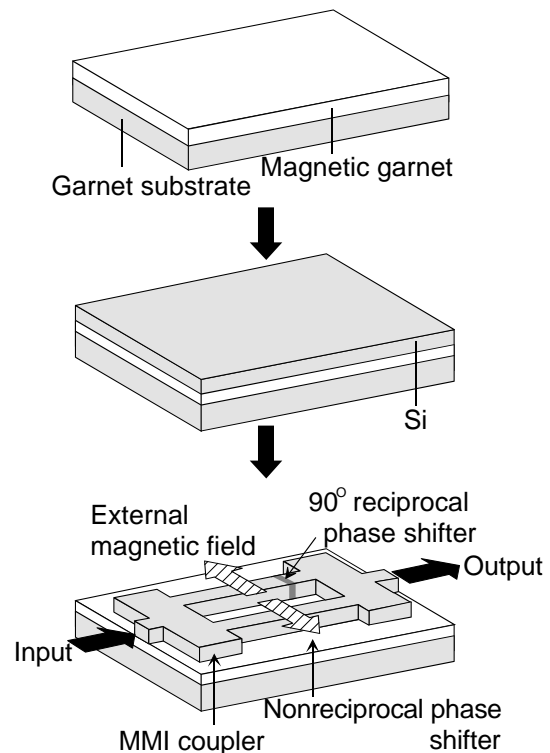


図2 非相反移相効果を利用した干渉計光アイソレータ

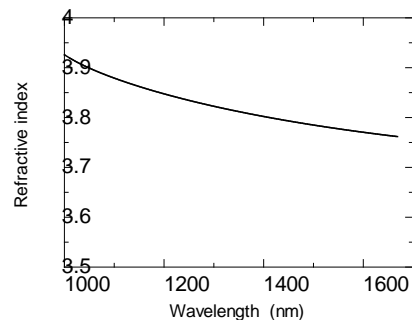


図3 分光エリプソメトリにより測定されたSiの屈折率

(2) 非相反移相効果を利用した光アイソレータの設計

測定により得られた屈折率の値を元に、Si導波層を有する磁気光学導波路における非相反移相効果の大きさを計算した。図4に、波長1.55 μm におけるair/Si/Ce:YIG構造の磁気光学導波路を伝搬するTMモードに生じる非相反移相効果の大きさを示す。Si厚さが190 nmのとき、非相反移相効果の大きさは最大となることが分かる。 $\pi/2$ の非相反移相効果を生じるために必要な伝搬長は約190 μm である。

上記の計算では、磁気光学導波路の構造をair/Si/Ce:YIGと仮定したが、実際の導波路構造はair/Si/Ce:YIG/GCGMZGであり、Ce:YIGの厚さは有限である。そこで、Si層の厚さを

0.2, 0.3, 0.4 μm としたときの、Ce:YIG の厚さによる非相反移相効果の大きさを図 5 に示す。Ce:YIG の厚さが 0.3 μm 以上あれば、非相反移相効果の大きさは収束することが分かる。

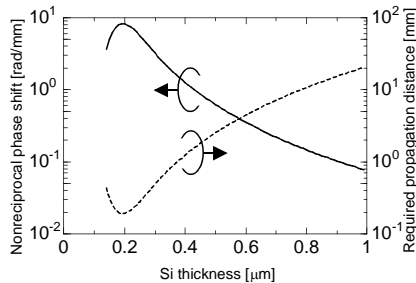


図 4 air/Si/Ce:YIG 導波路における非相反移相効果の大きさ

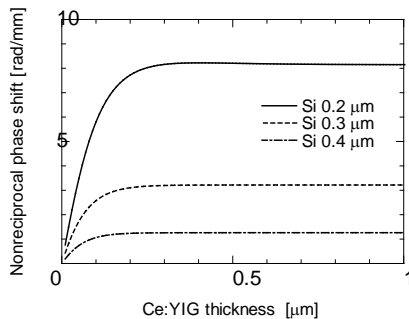


図 5 air/Si/Ce:YIG/GCGMZG 導波路における非相反移相効果の大きさ

光分岐結合器として MMI カプラを用いることにより、光アイソレータの素子長を短くすることができる。図 6 に 1×2 型 MMI カプラの素子構造を示す。1 ポートから光波を入射したときの光分岐特性を図 7 に示す。中央ポートから二つの横ポートに光波が分岐していることが分かる。

MMI カプラの 2 ポートから同振幅で位相差 0 の二波が入射した場合の光結合特性を調べたところ、出力側のポートへ光波が十分に結合されていることが分かった。また、MMI カプラの 2 ポートから同振幅で位相差 π の二波が入射した場合の光結合特性を調べたところ、出力側のポートへの光波の結合はほとんど見られないことが分かった。結合損失は 60 dB 程度であり、非相反移相器と相反移相器が理想的に働く場合、逆方向伝搬の光波はほとんど入力端へ結合しないことが明らかとなった。

MMI カプラを光分岐結合器として採用した場合、非相反移相器を有するマッハツェンダ干渉計を合わせた光アイソレータの全長は約 250 μm となり、超小型の光非相反素子可以实现できる。

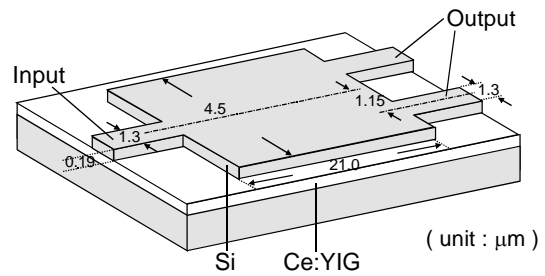


図 6 MMI カプラの素子構造

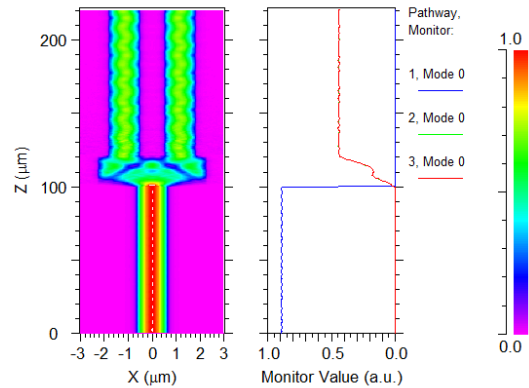


図 7 MMI カプラの光分岐特性

(3) 半導体レーザから磁気光学導波路への光結合効率の解析

感光性接着剤により、図 1 に示すように半導体レーザと光アイソレータを集積化した場合の、半導体レーザから磁気光学導波路への光結合効率について検討した。感光性接着剤の厚さを変化させた場合の光結合効率を計算したところ、接着層の厚さが小さいほど光結合効率が増加することが分かった。今後、半導体レーザ及び磁気光学導波路の構造を最適化することにより、さらなる光結合効率の増加が見込まれる。

(4) 感光性接着剤による貼り合わせ

半導体レーザと光非相反素子の集積化を目指し、感光性接着剤を用いた貼り合わせを試みた。二枚の平滑な基板を用いた貼り合わせを実現する方法を確立した後に、三次元加工が施された基板を用いた貼り合わせを試み、感光性接着剤を用いた貼り合わせが実現できることを明らかにした。

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 3 件)

- [1] H. Yokoi, K. Yamaguchi and Y. Uchiyumi, "Design of optical isolator with sputter-deposited Si layer employing nonreciprocal radiation-mode

conversion”: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50, no. 7, pp. 078001-1-078001-2, July 2011. 査読有り

[2] H. Yokoi, S. Igarashi, Y. Uchiumi and K. Tani, “Garnet photonics toward developing laser diode integrated with optical isolator with Si guiding layer”: Phys. Status Solidi, Vol. 8, no. 3, pp. 1071-1074, March 2011. 査読有り

[3] H. Yokoi, S. Igarashi and Y. Uchiumi, “Interferometric optical isolator with air/Si/magnetic-garnet waveguide operated in unidirectional magnetic field”: Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49, no. 5, pp. 058002-1-058002-2, May 2010. 査読有り

[学会発表] (計4件)

[1] H. Yokoi, N. Ichishima and I. Myouenzono, “Integrating laser diode and optical isolator by photosensitive adhesive bonding”: 14th International Symposium on Semiconductor Wafer Bonding, 2977, Honolulu, United States of America, October 9, 2012.

[2] 高木宏治, 横井秀樹, “ストリップ装荷導波路による非相反放射モード変換型光アイソレータの設計”: 第73回応用物理学会学術連合講演会, 12aPA3-20, 松山, September 12, 2012.

[3] 市島紀彦, 妙圓菌勇, 横井秀樹, 庄司雄哉, 水本哲弥, “Si導波層を有する磁気光学導波路実現のための感光性接着剤を用いたボンディング”: 第73回応用物理学会学術連合講演会, 12aPA3-21, 松山, September 12, 2012.

[4] 妙圓菌勇, 市島紀彦, 横井秀樹, “感光性接着剤による半導体レーザと光非相反素子の集積化”: 第73回応用物理学会学術連合講演会, 12aPA3-22, 松山, September 12, 2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横井 秀樹 (YOKOI HIDEKI)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号: 90251636