

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：32714

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630166

研究課題名(和文)コンタクトエピタキシャル法を用いたシリコンフォトニクス用光アイソレータの研究

研究課題名(英文)A study of Silicon optical isolators using contact epitaxial technique

研究代表者

中津原 克己(Nakatsuhara, Katsumi)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号：70339894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：集積化に適した光アイソレータの実現に向け、シリコン導波路上に磁気光学ガーネットであるセリウム置換イットリウム鉄ガーネット(Ce:YIG)を形成するための基礎研究を行った。シリコン上に非晶質状態のCe:YIG薄膜を積層後、種結晶をコンタクトさせて結晶化を図るコンタクトエピタキシャル法の条件探索を行い、非処理のCe:YIG装荷シリコン導波路に対して伝搬損失が低減されることを明らかにした。さらにコンタクトエピタキシャル法を施したシリコン上のCe:YIG膜のX線回折評価において強いピーク強度が得られ、結晶性の向上が示され、ファラデー回転係数の測定においても磁気光学効果の発現が確認された。

研究成果の概要(英文)：Isolators employing cladding layers of magneto-optic garnet films on silicon waveguides are very attractive for realizing optical integrated circuits. We investigate a waveguide optical isolator using a Mach-Zehnder interferometer (MZI) with an upper cladding layer of a magneto-optic garnet film crystalized by using the contact epitaxial method which consists of contacting a seed crystal and heating the film process. As an elemental study, the evaluation method of propagation loss in a silicon waveguide loaded with an upper cladding layer of cerium substitution yttrium iron Garnett (Ce:YIG) film in an asymmetric MZI waveguide was proposed. After the contact epitaxial process, the reduction of the propagation loss in in silicon rib waveguides having the Ce:YIG upper cladding layer was obtained. High crystallinity and developing magneto-optical effect were also demonstrated with Ce:YIG films formed on the silicon layer by using the contact epitaxial technology.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光アイソレータ 磁気光学効果 異種材料 光導波路 シリコンフォトニクス

1. 研究開始当初の背景

光デバイスに予期せぬ方向から光が入射すると、所望のデバイス動作を実現することが出来なくなるため、反射戻り光や不要光などの伝搬を防止する光アイソレータが必要となる。光伝搬方向によって伝搬特性が異なる非相反性が必要な光アイソレータには、特殊な材料である磁気光学材料が不可欠である。半導体レーザを構成する化合物半導体との整合性に優れている光アイソレータとして、FeやCoなどの強磁性体と化合物半導体光増幅器(SOA)を組み合わせた非相反損失型アイソレータがあり、動作実証の報告がなされている。

Silicon on Insulator (SOI)ウェーハの上部シリコン層を活用して光デバイスを形成する技術はシリコンフォトニクスと呼ばれ、小型で高機能な光集積回路の実現を目指し、活発に研究されている。しかし、非相反性を有する磁気光学ガーネットはシリコンと非常に性質が異なり、一般的なエピタキシャル成長ではシリコン上に磁気光学ガーネット単結晶を形成することは困難である。MITの研究グループからシリコン導波路上に磁気光学ガーネットを多結晶状態で形成し、それをマイクロリング共振器に組み込んだ光アイソレータの動作実証の報告がされているが、得られる磁気光学効果が小さく、このままでは実用には適さず、課題がある。

申請者らはそれぞれ、シリコン導波路を用いた光スイッチの動作実証、非晶質媒質であるSiO₂基板上へのコンタクトエピタキシャル法による磁気光学ガーネット薄膜の形成、直接接合技術を用いた導波路型光アイソレータの動作実証を行ってきた。これらの研究成果をもとにコンタクトエピタキシャル法を用いたシリコンフォトニクス向けの導波路型光アイソレータの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、光アイソレータに必要な磁気光学ガーネット結晶をシリコン導波路上にコンタクトエピタキシャル法によって形成する技術の確立を目的とした。コンタクトエピタキシャル法は非晶質状態の薄膜をシリコン導波路上に積層後、上部から種結晶をコンタクトさせて結晶化を図る方法である。図1に示すように、本研究では通信波長帯で大きな磁気光学効果を有する磁気光学ガーネットのCe_xY_{3-x}FeO₅(Ce:YIG)を、一旦、非晶質状態でシリコン導波路上に積層し、種結晶ガーネットをコンタクトさせ、適切な熱処理を行うことで結晶化させる技術の確立を目指した。シリコンフォトニクス用に開発したコンタク

トエピタキシャル法を用いて導波路型光アイソレータの製作および動作実証を行い、シリコンフォトニクスの長を活かした高密度かつ高機能な光集積回路の実現に寄与する技術的革新に挑戦した。コンタクトエピタキシャル法を用いた磁気光学ガーネット薄膜の形成は、ガーネット基板上に結晶成長した単結晶Ce:YIGに近い大きな磁気光学効果が期待される。また、種結晶との局所的なコンタクトと熱処理により選択的に形成することが可能なため、他のシリコンデバイスとの集積化に自由度が得られ、シリコンフォトニクスへの適合性が高く、学術的、工学的波及効果が大きいと考える。

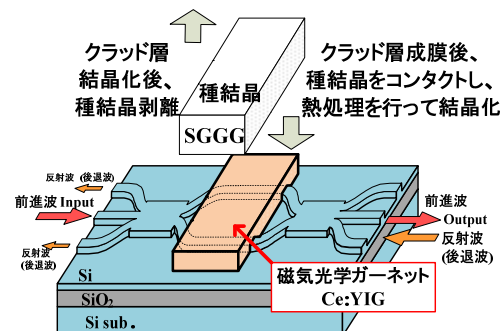


図1 コンタクトエピタキシャル法を用いた導波路型光アイソレータ

3. 研究の方法

本研究ではこれまで積み上げてきたシリコン導波路デバイスの形成技術、コンタクトエピタキシャル法による磁気光学ガーネット形成の基礎技術、直接接合を用いた導波路型光アイソレータ製作技術を融合し、シリコンフォトニクスに適したコンタクトエピタキシャル技術の開発を行い、導波路型光アイソレータを製作し、その動作実証を目指した。本研究では研究目的を達成するため、次の研究課題に分けて計画を進めた。

- ・光アイソレータ実現のための磁気光学ガーネット材料の結晶化技術の基礎検討
- ・磁気光学ガーネット材料のシリコン導波路上への選択的形成技術の開発
- ・集積化のためのコンタクトエピタキシャル法の条件探索とCe:YIG薄膜の特性評価

なお、各課題の研究成果を随時プロセス条件に反映させ、柔軟に対応しながら、研究を遂行した。

4. 研究成果

(1) 光アイソレータ実現のための磁気光学ガーネット材料の結晶化技術の基礎検討

イットリウム(Y)の一部をセリウム(Ce)に

置換したセリウム置換イットリウム鉄ガーネット YIG($Ce_xY_{(3-x)}Fe_5O_{12}$; Ce:YIG)は、比較的大きなファラデー効果を示す材料である。Ce と Y の置換量を増加させることにより、さらに大きなファラデー効果を得ることが期待できるが、これまでに確立されたコンタクトエピタキシャル法では Ce の置換量 $x=1$ の条件が用いられていた。本研究課題では Ce の置換量 $x=1.5$ の条件に挑戦した。第 1 段階目の基礎的検討事項として Ce の置換量 $x=1.5$ のターゲットを用いてスパッタリングにより溶融石英基板上へ形成した Ce:YIG 薄膜に対して、結晶化プロセスにおける重要なパラメータである熱処理条件の検討を行った。高い結晶性を有する Ce:YIG 薄膜の形成条件の最適化には、さらに詳細な検討が必要であるが、Ce の置換量 $x=1.5$ の条件においてもコンタクトエピタキシャル法による結晶化の兆候が得られた。

(2)磁気光学ガーネット材料のシリコン導波路上への選択的形成技術の開発

フォトリソグラフィ技術と保護層とする SiO_2 上部クラッド層のエッチング技術を駆使し、シリコン導波路上に Ce:YIG 領域を選択的形成する技術を確立した。さらに基礎的な要素技術として、非対称マッハツェンダー干渉計シリコン導波路の片側のアーム導波路に Ce:YIG 薄膜を形成し、コンタクトエピタキシャル法の前後の波長特性を解析することでシリコン導波路上の Ce:YIG 薄膜の特性を評価する方法を開発した。

図 2 に評価用の MZI 導波路の解析モデルを示す。Ce:YIG 領域の長さは $150\mu m$ として製作した評価用非対称 MZI 導波路素子の写真を図 3 に、得られた熱処理前後の波長特性を図 4 に示す。シリコン上に非晶質の Ce:YIG 薄膜を装荷した状態では消光比が $7.4dB$ であるのに対し、コンタクトエピタキシャル法を施した状態では消光比が $18.7dB$ まで増加した。理論特性とのフィッティングによる解析結果から、成膜後に熱処理をしていないアモルファス状態の Ce:YIG 装荷シリコン導波路の伝搬損失に対して、コンタクトエピタキシャル法の熱処理を施した Ce:YIG 装荷シリコン導波路では伝搬損失が低減されることを明らかにした。表 1 に伝搬損失の見積比較結果を示す。

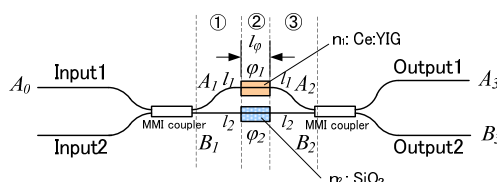


図2 非対称MZI導波路の解析モデル

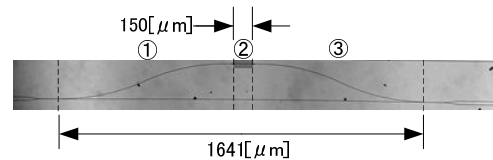


図3 製作した伝搬損失評価用非対称MZI導波路素子

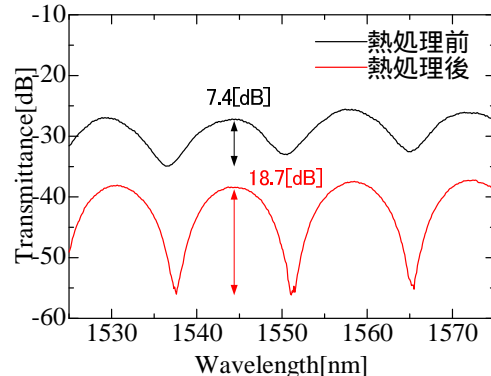


図4 熱処理前後の波長特性例

表1 熱処理前後の伝搬損失見積もり

クラッド	SiO_2	Ce:YIG
熱処理前	0.5[dB/mm]	2.1[dB/mm]
熱処理後	1.4[dB/mm]	1.75[dB/mm]

また、従来、研究代表者が光スイッチ等のデバイスに用いていたシリコン導波路の製作プロセスでは、 450 以上の熱処理プロセスを経ることで、シリコン導波路自体の伝搬損失が増加するという課題が明らかになった。この課題の要因について、詳細な実験と検討を繰り返し、 650 程度まで伝搬損失の増大を抑制した導波路製作技術ならびに熱処理制御技術の開発を行った。

(3)集積化のためのコンタクトエピタキシャル法の条件探索と Ce:YIG 薄膜の特性評価

コンタクトエピタキシャル法の熱処理温度およびコンタクト圧力等の条件探索を行い、シリコン上の Ce:YIG 薄膜の特性評価を行った。観察用試料として SiO_2 基板上に成膜した Ce:YIG 薄膜を用いてコンタクトエピタキシャルプロセスを施した。スパッタ装置による成膜後の非晶質状態の Ce:YIG 薄膜の写真を図 5(a)に、コンタクトエピタキシャルプロセス後の Ce:YIG 薄膜の写真を図 5(b)に示す。成膜した Ce:YIG の膜厚は $440nm$ であった。図 5(a)の非晶質状態の Ce:YIG 薄膜は濃い茶褐色の不透明な状態であった。一方、図 5(b)に示すように温度 800 、圧力 $1N$ の条件でコンタクトエピタキシャルプロセスを行った試料では Ce:YIG 薄膜は透明性が上がり、ガーネット基板に直接結晶成長した Ce:YIG 薄膜に見られるような緑色がかかった状態となった。

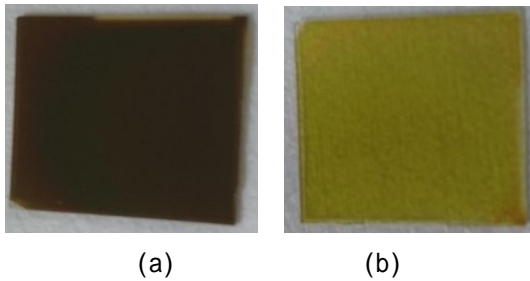


図5 SiO₂基板上に成膜したCe:YIG膜
(a)成膜直後のCe:YIG膜<アモルファス>、
(b)コンタクトエピタキシャルプロセス後のCe:YIG膜

シリコン基板上に成膜したCe:YIG薄膜を用いてコンタクトエピタキシャルプロセスを実施し、X線回折により結晶性を評価した。図6に測定したX線回折の回折角-回折強度特性を示す。シリコン基板上に成膜したまま未処理のCe:YIG薄膜及び種結晶として用いるSGGG片とのコンタクトなしに熱処理したCe:YIG薄膜と比較し、コンタクトエピタキシャル法を施したシリコン上のCe:YIG膜から強いX線回折のピークが得られ、結晶性の向上が示された。

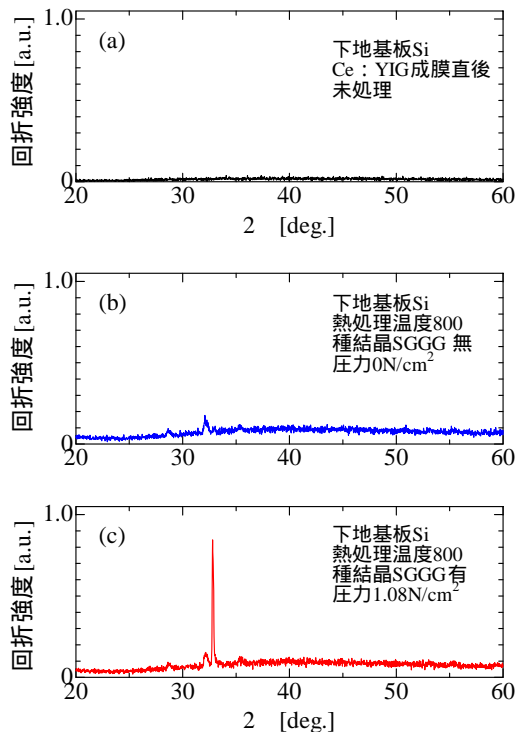


図6 X線回折結果
(a)成膜直後のCe:YIG膜<アモルファス>、(b)熱処理のみのCe:YIG膜、(c)コンタクトエピタキシャルプロセス後のCe:YIG膜

次に波長1550nmの光を用いて磁気光学特性の指標となるファラデー回転の測定を行った。表2に測定結果を示す。コンタクト

エピタキシャル法を施したCe:YIG薄膜では-1960deg./cmのファラデー回転係数が得られた。得られた結果は、ガーネット基板上にエピタキシャル成長した単結晶Ce:YIGのファラデー回転係数-4500deg./cmに対して43%程度ではあるが、これによりシリコン上のCe:YIG薄膜にコンタクトエピタキシャル法を施すことで磁気光学効果を発現することが明らかになった。

表2 Ce:YIG薄膜のファラデー回転係数

下地基板	処理温度 []	種結晶	圧力 [N/cm ²]	回転量 [deg./cm]
Si	未処理	無	-	0 [*]
SiO ₂	800	有	1.08	-1620
Si	800	有	1.08	-1960

[*]測定限界以下

シリコンフォトニクスへの適用に向けたコンタクトエピタキシャル法の開発過程において得られたこれらの成果から導波路型光アイソレータを集積化した高機能な光集積回路の実現に繋がる知見が得られた。現在、種結晶とのコンタクト前の表面処理やコンタクト圧力等のさらなる条件探索及び素子試作を行い、磁気光学効果の向上及び熱処理温度の低温化に向けた研究を行っている。また、得られた成果および知見をまとめ、論文誌投稿への準備を進めている。

<引用文献>

- H. Shimizu, et al., J. Light. Technol., Vol.24, pp. 38-43, (2006).
- L. Bi, et al., Nature photonics, Vol.5, pp.758-762, (2011).
- K. Nakatsuhara, et al., Opt. Express, Vol. 22, No. 8, pp. 9597-9603, (2014).
- 野毛悟, 宇野武彦, 信学技報, CPM2006-32, pp. 17-22, (2006).
- Y. Shoji, T. Mizumoto, Sci. Technol. Adv. Mater., DOI:10.1088/1468-6996/15/1/014602, (2014).
- T. Shintaku, T. Uno, J. Appl. Phys., 76, 8155-8159, (1994).

5. 主な発表論文等

[学会発表](計6件)

- 岩田将輝, 野毛悟, 中津原克己, "集積型光アイソレータ実現のための薄膜形成条件の検討," 電子情報通信学会 総合大会, 名城大, 愛知, 2017年3月.
- 清藤将人, 武田正行, 中津原克己, 野毛悟, 水本哲弥, "導波路型光アイソレータのためのCe:YIG装荷Si導波路形成技術の基礎検討," 電子情報通信学会 集積光デバイスと応用技術研究会, 三島, 静岡, 2016年3月.

白鳥大毅, 多田拓, 望月夏鈴, 野毛悟, "Si系光集積回路に適用可能なコンタクトエピタキシャル法の検討," 電子情報通信学会 集積光デバイスと応用技術研究

会, 三島, 静岡, 2016年3月.

清藤将人, 武田正行, 中津原克己, 野毛悟, 水本哲弥, "非対称マッハツエンダーを用いたCe:YIG装荷Si導波路の伝搬損失評価," 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会, 青森, 青森, 2015年8月.

清藤将人, 武田正行, 野毛悟, 水本哲弥, 中津原克己, "非対称MZIを用いたCe:YIG on Siの特性評価," 電子情報通信学会 光エレクトロニクス研究会, 熱海, 静岡, 2015年4月.

野毛悟, "コンタクトエピタキシャル法による $Ce_xY_{(3-x)}Fe_5O_{12}$ の膜の方位制御," 電子情報通信学会 電子部品・材料研究会, 山形大, 山形, 2014年9月.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.ele.kanagawa-it.ac.jp/~naka2/>

<http://joho.kait.jp/kyogyoseki.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中津原 克己 (NAKATSUHARA Katsumi)

神奈川工科大学・工学部・教授

研究者番号: 7 0 3 3 9 8 9 4

(2) 研究分担者

水本 哲弥 (MIZUMOTO Tetsuya)

東京工業大学・工学院・教授

研究者番号: 0 0 1 7 4 0 4 5

野毛 悟 (NOGE Satoru)

沼津工業高等専門学校・電気電子工学科・教授

研究者番号: 1 0 2 2 1 4 8 3

(3) 研究協力者

(2015-2016年度)

榊原 健太郎 (SAKAKIBARA Kentaro)

神奈川工科大学・工学研究科・大学院生

(2014-2015年度)

清藤 将人 (SEIDO Masato)

神奈川工科大学・工学研究科・大学院生

金久保 渉 (KANAKUBO Wataru)

神奈川工科大学・工学研究科・大学院生

(2014年度)

端山 喜紀 (HAYAMA Yoshiki)

神奈川工科大学・工学研究科・大学院生