

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360145

研究課題名(和文) Si 細線 / 石英系混成光導波路集積回路の研究

研究課題名(英文) Research on hybrid Si/Silica waveguide integrated circuits

研究代表者

山田 博仁 (YAMADA, Hirohito)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60443991

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000 円、(間接経費) 4,500,000 円

研究成果の概要(和文)：シリコンや石英といった地球に豊富に存在する材料を用いて、光デバイスや光集積回路を実現する研究であり、特に、Siをコアとする極微細なSi細線光導波路と、一般的に広く用いられている石英系光導波路とを組み合わせた光集積回路を提案し、その可能性を理論および実験の両面から実証した。また、光回路に外部から光入出力を行うためのグレーティングカップラについて研究し、小型で低損失な光結合が可能な構造を導出した。さらに、レーザーダイオードなどを光回路上にチップ実装する方法についても検討し、実際にその方法を用いて波長可変レーザーを実現した。

研究成果の概要(英文)：We studied optical devices or optical integrated circuits with silicon and silica materials. We proposed hybrid silicon/silica integrated optical circuits, and demonstrated the excellent performance by both theoretical analysis and experiments. We also studied grating couplers that input/output optical signal to/from the circuits, and derived the design for compact and high coupling efficiency. We further studied the method of flip-chip mounting of laser diodes on the circuits, and demonstrated a tunable wavelength laser with the method.

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：光デバイス 光回路

1. 研究開始当初の背景

リチウム(Li)、ネオジム(Nd)、ガリウム(Ga)、インジウム(In)等のレアアースは、身の回りの電子機器や自動車などの生産に不可欠な物質であるが、埋蔵量および生産国が限られているため、それらレアアースの輸入が制限され、それらの生産に支障を来す事態となっていた。従来からの光デバイスや光集積回路は、Ga や In などのレアアースを含むため、それらを形成するための GaAs や InP などの半導体基板は高価でかつ、将来に渡って安定的に供給される保障はない。従って、レアアースを含まない材料系による光デバイス開発が急務となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、Si や O, N, C といった地球上に豊富に存在する元素のみによって構成される光デバイスや大規模光集積回路の実現を目指した。具体的には、Si や石英(SiO<sub>2</sub>)をベースとする光導波路デバイス集積回路であるが、既存の Si 光導波路デバイスや石英系光導波路デバイスには様々な欠点があった。しかし、それらの光導波路を組み合わせることにより、互いの欠点をカバーできるようになる。本研究ではその実現のための様々な技術を確認することを目的として研究を行った。また実際に素子や光回路を試作し、その有効性を実証することを目的として研究した。

3. 研究の方法

(1) Si 細線光導波路と石英系光導波路との低損失接合構造および交差構造の設計

Si 細線光導波路と石英系光導波路との混成光集積回路を実現するためには、両導波路を接合するための構造が必要となる。また様々な光回路を実現するためには、光導波路の交差構造も不可欠である。

Si 細線光導波路と石英系光導波路とでは、導波路を伝搬する光のモード径が著しく異なるため、単にそのまま接合しただけでは大きな光結合損失が生じる。そこで、両導波路間でモード径を変換するモード変換器が必要となる。本課題では、Si 細線光導波路と石英系光導波路とを、なるべくコンパクトかつ低損失で接合するためのモード変換器の構造について検討し、設計を行った。

また、導波路の交差においては、交差に伴う損失や、信号のクロストークが生じるが、本課題では、モード径が大きく異なる Si 細線光導波路と石英系光導波路とを交差させることによってそれらを回避し、低損失でかつクロストークが少ない交差を実現するための構造について検討し、設計を行った。

(2) Si 細線光導波路と石英系光導波路との接合構造や交差構造の試作と測定評価

Si 細線光導波路と石英系光導波路との接合構造や交差構造の評価用構造を作製し、測定を行うことによって特性を評価した。石英

系光導波路としては、SiO<sub>x</sub> をコアとする High- $\Delta$  の光導波路を採用した。

(3) 化合物光半導体素子などの搭載方法の検討

Si は間接遷移半導体であるためレーザダイオード(LD)などの発光素子の実現は困難である。そこで InP などの化合物半導体から成る LD チップを光回路上にフリップチップ実装する方法について検討を行った。さらにその方法を実際の光回路に適用した。

(4) 光入出力インターフェース構造の検討

光回路と光ファイバーなど外部光回路との間で光信号の受け渡しを行うためには、光入出力インターフェースが必要となるが、本研究ではグレーティングカップラによる入出力インターフェースに関して検討を行った。

4. 研究成果

(1) Si 細線光導波路と石英系光導波路との低損失接合構造および交差構造の設計

Si 細線光導波路と石英系光導波路との低損失接合を実現するためのモード変換器に関しては、図1に示すような Si コア先端をテーパ状に細くしていくことにより、断熱的にモード変換を行う構造に関して、電磁界解析によって光結合損失を見積もった。その結果、断熱的モード変換を実現するためには少なくとも 200  $\mu\text{m}$  以上の長さが必要であり、その場合、結合損失は 0.1dB 以下と十分に小さくできることが分かった。(図2)

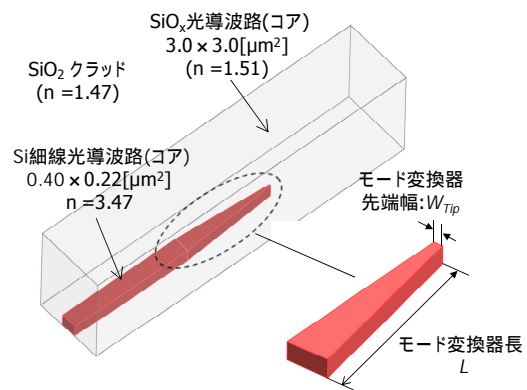


図1 テーパーコア型モード変換器構造

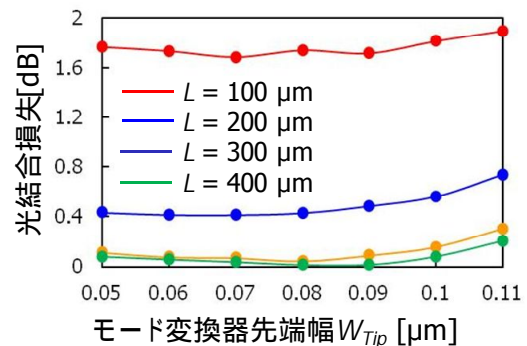


図2 電磁界解析による光結合損失の計算

Si 細線光導波路と石英系光導波路とはモード径が大きく異なるために、単純に交差させただけの構造でも、石英系光導波路側の損失が約 1 dB と若干大きいものの、比較的良好な交差が得られることが電磁界解析によって明らかとなった。さらに、交差部分の Si コア断面を図 3 に示すように細くすることにより、石英系光導波路側の損失を 0.55dB まで小さくできることも分かった。この時クロストークは -50dB 以下に収まっている。

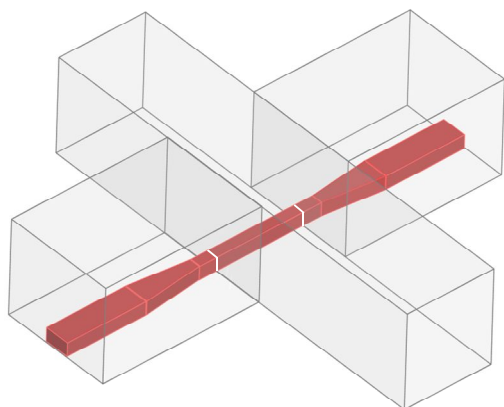
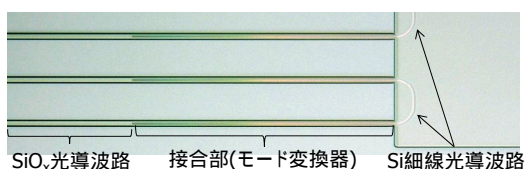


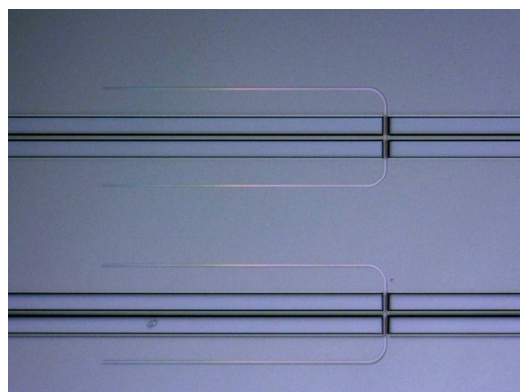
図 3 電磁界解析による光結合損失の計算

(2) Si 細線光導波路と石英系光導波路との接合構造や交差構造の試作と測定評価

Si 細線光導波路と石英系光導波路との接合構造や交差構造を試作し、特性を評価した。試作した光導波路接合および導波路交差の図 4(a)および図 4(b)に写真を示す。



(a) 導波路接合構造



(b) 導波路交差構造

図 4 試作した光導波路接合および交差

試作した構造においてもクロストークは -50dB 以下と小さく、石英系光導波路側の損失は 0.39dB、Si 細線光導波路側の損失は測定限界以下であった。

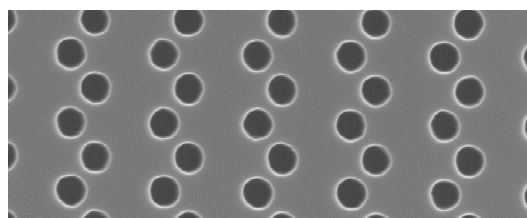
(3) 化合物光半導体素子などの搭載方法の検討

光導波路を形成した SOI 基板上に化合物光半導体素子などをチップ実装する方法を確立し、実際に化合物半導体光増幅器(SOA)を、リング共振器型波長可変フィルターを形成した SOI ウエハ上にチップ実装し、波長可変レーザ動作を実現した。

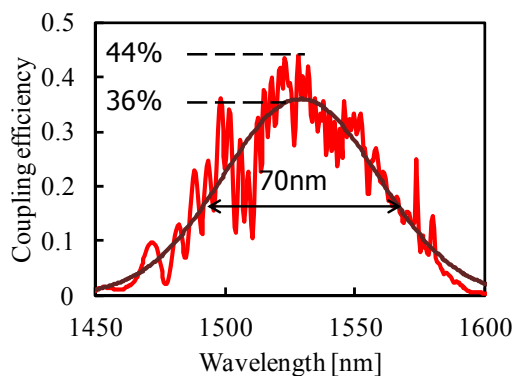
(4) 光入出力インターフェース構造の検討

グレーティングカップラにおいて、高い結合効率と広い動作波長帯域が共に得られる条件について、散乱行列(S-Matrix)を用いる解析手法を確立し、100%数値計算に頼るのではなく、S-Matrix による解析と組み合わせることにより、見通し良く設計できる方法を確立した。また、なるべく簡単な構造で、簡単な製造工程により作製できるグレーティングカップラとして、微小貫通穴によってグレーティングを形成する構造を提案し、試作を行った。

試作したグレーティングの SEM 写真を図 5(a)に示し、測定した光結合効率の波長依存性を図 5(b)に示す。約 40%の結合効率と、70nm の広い動作波長帯域が得られている。



(a) 試作した微小貫通穴グレーティング



(b) 試作したグレーティングカップラの特

図 5 試作した微小貫通穴グレーティング

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

K. Nemoto, T. Kita, and H. Yamada, Narrow-Spectral-Linewidth Wavelength-Tunable Laser Diode with Si Wire Waveguide Ring Resonators, Appl. Phys. Express, Vol.5, 082701, 2012 年, 査読有 DOI: 10.1143/APEX.5.082701.

T. Kita, K. Nemoto, and H. Yamada, Long external cavity Si photonic wavelength tunable laser diode, Jpn. J. Appl. Phys.,

Vol.53, 04EG04, 2012 年, 査読有  
DOI:10.7567/JJAP.53.04EG04  
T. Kita, K. Nemoto, and H. Yamada, Silicon photonic wavelength-tunable laser diode with asymmetric mach-zehnder interferometer, J. Sel. Top. Quantum Electron., Vol.20, 8201806, 2012 年, 査読有  
DOI:10.1109/JSTQE.2013.2295712  
山田 博仁, シリコン・シリカ混成光導波路集積回路, レーザー学会誌レーザー研究, 42 巻, 245, 2012 年, 査読有

〔学会発表〕(計 17 件)

山田 博仁, 奈良 匡樹, 北 智洋, シリコンフォトニクスと光カプラ, 電子情報通信学会総合大会, 2014 年 3 月 20 日, 新潟大学

北 智洋, 唐 睿, 根本 景太, 山田 博仁, シリコンフォトニック波長可変レーザー, 電子情報通信学会総合大会, 2014 年 3 月 18 日, 新潟大学

北 智洋, 根本 景太, 山田 博仁, シリコンフォトニクス波長可変レーザーの高出力・安定動作, 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2013 年 10 月 25 日, 門司港

T. Kita, K. Nemoto, and H. Yamada, Highly-stabilized operation of Si photonics wavelength tunable laser diode, SSDM, 2013 年 9 月 27 日, 福岡

T. Kita, K. Nemoto, K. Watanabe, H. Yamazaki, and H. Yamada, CLEO/Pacific Rim 2013, 2013 年 07 月 3 日, 京都国際会館

M. Nara, T. Kita, Y. Tanushi, and H. Yamada, Theoretical analysis method of vertical coupling optical I/O interface with mirrors, SSDM, 2012 年 09 月 25 日, 京都国際会館

M. Nara, T. Kita, Y. Tanushi, and H. Yamada, Theoretical analysis of vertical coupling optical I/O interface with reflectors, 73 回応用物理学会, 2012 年 09 月 13 日, 愛媛大学  
山田 博仁, シリコンフォトニクスによる光集積回路, 応用物理学会 チュートリアル, 2012 年 09 月 11 日, 愛媛大学

K. Nemoto, T. Kita, and H. Yamada, Narrow spectral linewidth wavelength tunable laser with Si photonic-wire waveguide ring resonators, 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Group IV Photonics, Aug. 30, 2012, San Diego, California.

山田 博仁, シリコンフォトニクス, 第 17 回「微小光学特別セミナー」, 2012 年 06 月 26 日, 東大生産研(駒場)

山田 博仁, シリコンフォトニクスの現状と展望, (独)日本学術振興会将来加工技術第 136 委員会, 2012 年 04 月 26 日, 弘済会館(四ッ谷)

根本 景太, 北 智洋, 山田 博仁, Si 細線

光導波路リング共振器フィルタを用いた狭線幅波長可変レーザー, 電子情報通信学会総合大会, 2012 年 3 月 22 日, 岡山大学  
山田 博仁, 北 智洋, 若山 陽之介, 大坂 孝久, シリコン/シリカ複合光導波路集積回路技術, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会, 2012 年 1 月 30 日, 仙台  
T. Osaka, T. Kita, and H. Yamada, Investigation of grating coupler type optical I/O interface at the 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength range, SSDM, Sep. 30, 2011, Nagoya.

Y. Wakayama, T. Kita, and H. Yamada, Optical Crossing by Hybrid Si-Wire/Silica Waveguides, 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Group IV Photonics, Sep. 15, 2011, London(英国).

T. Kita and H. Yamada, Zero Photonic Band-Gap Structure in Si Photonic-Wire Bragg-Grating, 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Group IV Photonics, Sep. 14, 2011, London(英国).

若山 陽之介, 北 智洋, 山田 博仁, Si 細線光導波路とシリカ系光導波路による交差構造の検討, 第 72 回応用物理学会学術講演会, 2011 年 9 月 2 日, 山形大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1 件)

名称: 波長フィルタ及びレーザ  
発明者: 北 智洋、根本 景太、山田 博仁  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2014-02969  
出願年月日: 2014/2/19  
国内外の別: 国内

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕 なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

山田 博仁 (YAMADA, HIROHITO)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60443991

(2)研究分担者

大寺 康夫 (OTERA, YASUO)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 20292295

北 智洋 (KITA, TOMOHIRO)  
東北大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 40466537

田主 裕一郎 (TANUSHI, YUICHIRO)  
東北大学・未来科学技術共同研究センター  
・助教  
研究者番号: 90397985

(3)連携研究者 なし