

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 4 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23560036

研究課題名(和文)アモルファス・シリコンを用いた大面積・立体構造シリコンフォトニクス

研究課題名(英文)Large-area stacked silicon photonics based on amorphous Si

研究代表者

勝山 俊夫 (KATSUYAMA, TOSHIO)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90467134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：シリコンをベースとする光回路として、新規な大面積立体構造の実現を目的に、アモルファス・シリコン(a-Si)を基本とした光素子の検討を行った。その結果、(1)20 μm 角の大面積エア・ブリッジ型スラブ構造を、a-Si膜を用いて実現することができた。(2)a-Siからなる細線導波路の上にSiO₂層を介し、a-Siからなるグレーティング層を形成して、2層構造の立体光回路を実現した。(3)-FeSi₂発光層の上に、SiO₂層を介して、a-Siからなる細線導波路を形成し、方向性結合器型の立体構造発光デバイスを実現した。この結果、a-Si膜を基本として、多様な立体光回路が実現できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have studied optical devices based on amorphous Si (a-Si) in order to realize new large-area stacked structures composing silicon-based optical circuits. We have thus realized (1) an air-bridge-type a-Si slab structure with a large area (20 μm square), (2) a two-layered stacked optical circuit composed of an a-Si wire waveguide with an a-Si grating layer mediated by a SiO₂ layer, and (3) a directional-coupler-type stacked light-emitting device composed of an a-Si wire waveguide with a -FeSi₂ light-emitting layer mediated by a SiO₂ layer. As a result, it is shown that various stacked optical circuits can be realized by using a-Si material.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：シリコンフォトニクス アモルファス・シリコン Si細線導波路 フォトニック結晶 ベータ鉄シリサイド

1. 研究開始当初の背景

近年、シリコンフォトニクスと呼ばれる技術分野が大きな注目を集め、新しい機能をもつ光素子の実現が期待されている。しかしながら、今までのシリコンフォトニクスにおいては、基板として結晶シリコン(c-Si)からなるSOI(Silicon on Insulator)基板を用いているため、作製する光回路や光部品の形状が制限される結果になっている。たとえば、光回路においては、Si膜が単層のプレーナ型は容易に実現できるが、多層化や立体化、さらには大面積化は極めて難しいのが現状である。

このような中で、我々は、アモルファス・シリコン(a-Si)をベースとしたフォトニック結晶やシリコンフォトニクス光回路の作製検討を開始した。a-Siは、スパッタリング等で容易に作製することができ、さらにSiO₂層を形成すれば、いわゆるSOI(Silicon on Insulator)構造を実現することができる。従来、これらのa-Siを用いたSOIではエア・ブリッジ型スラブ構造を作製することが難しいという問題があった。これは、Si層の下のSiO₂層を除いた構造である中空タイプのエア・ブリッジ型では、a-Siに存在する歪と強度不足のために、高品質な構造が形成できないという欠点による。

今回、a-Si層を注意深く作製し、またアニールによって歪を極力低減することによって、比較的広い面積に、a-Siからなるエア・ブリッジ型Si細線導波路とa-Siからなるエア・ブリッジ型2次元円孔三角格子スラブ構造フォトニック結晶を作製することに初めて成功した。この場合のa-Si層は、厚さ0.2 μmで、その下に1 μmの空気層が存在する。

本研究では、この技術を駆使して、大面積で立体構造のa-Siからなるシリコンフォトニクス光回路の作製技術を開発し、汎用性と生産性が高く、新規な特性が期待できる次世代シリコンフォトニクス立体光回路を実現することを目的とする。

2. 研究の目的

大面積化と多層積層化が可能な、シリコンをベースとする光回路(シリコンフォトニクス)の新規な作製方法を検討する。従来よく用いられてきた結晶シリコン(c-Si)からなるSOI(Silicon on Insulator)基板に代わり、アモルファス・シリコン(a-Si)膜を基本として、エア・ブリッジ型の新規な大面積立体構造のシリコンフォトニクス光回路を実現し、新たな機能の創出を試みる。このために、a-Si膜の歪の低減と光伝搬損失の低減を実現するための膜作製の最適化と、大面積化と立体積層化が可能な膜の平坦化を検討する。

この結果、極めて多様性に富む機能をもつ立体構造の光部品や光回路が初めて現実のものとなり、シリコンフォトニクスに対するブレークスルー技術を提供することができる。これらの技術は、光通信デバイスとしての応用だけでなく、近年ますます重要性が

増している環境計測のための極微量の気体や溶液の計測、さらには生体の極微量光計測への応用等、極めて汎用性の高い共通基盤技術としての発展が期待できるものである

3. 研究の方法

高品質なa-Siからなるエア・ブリッジ型スラブ構造を実現するために、まずa-Siの歪を極限まで低減する検討を行う。このため、a-Si形成のためのスパッタ条件とアニール条件の検討を詳細に行う。これらの検討によって、エア・ブリッジ型でも平坦で、強靱なa-Si膜を形成し、まず大面積のエア・ブリッジ型スラブ構造を実現する。

次に、容易に積層化ができるというa-SiとSiO₂の特長を最大限活かして、様々なパターンを形成したa-Siと、均質なSiO₂層を次々と積層し、最後にSiO₂のみをエッチングで除く方法で、積層方向に多重化した立体構造のシリコンフォトニクス光回路を実現する。最後に、これらの構造を用いて、新規な光機能の創出を試みる。

4. 研究成果

本研究の結果、(1)20 μm角の大面積エア・ブリッジ型スラブ構造を、a-Si膜を用いて実現することができた。(2)a-Siからなる細線導波路の上にSiO₂層を介し、a-Siからなるグレーティング層を形成して、2層構造の立体光回路を実現した。(3)β-FeSi₂発光層の上に、SiO₂層を介して、a-Siからなる細線導波路を形成し、方向性結合器型の立体構造発光デバイスを実現した。この結果、a-Si膜を基本として、多様な立体光回路が実現できることを明らかにした。

以下に、上記項目ごとに、得られた成果の詳細を示す。

(1) 大面積エア・ブリッジ型スラブ構造の形成

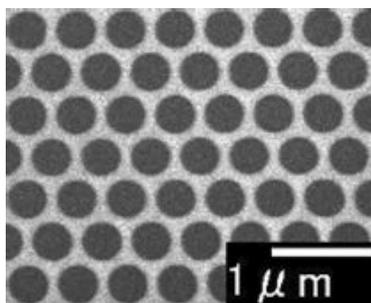
大面積化が可能なa-Siを用いて以下の検討を行った。

スパッタリング法で作製したa-Si膜(厚さ:0.2 μm)のたわみ量が、スパッタ時のウエハ基板温度とアニール温度によってどのように変化するかを詳細に検討した。その結果、スパッタによってストレスが生じることを確認するとともに、スパッタ温度が室温、150、300と変化してもストレス量はほぼ一定であることを明らかにした。また、ストレスはアニールによって低減し、その低減量は、アニール温度を600、1000と変えても変化しないことを明らかにした。

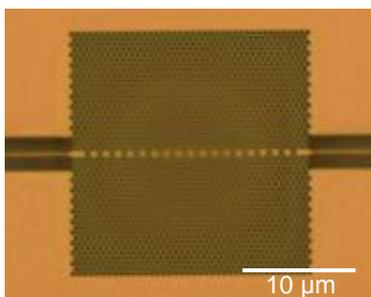
a-SiからなるSi細線導波路を作製し、その光伝搬損失のアニール温度依存性を詳細に検討した。その結果、Si細線導波路の導波路幅と光損失の関係をアニールの前後で比較し、導波路の光モードプロファイルに基づ

く考察から、アニールによって a-Si 自体から生じる光損失が増加し、導波路表面の凹凸による光損失が減少することを定量的に明らかにすることができた。この結果は、a-Si を用いたフォトニック結晶や細線導波路の低損失化の基礎となる知見を与えるものである。

ストレスとアニールの関係の検討結果を基に、20 μm 角の面積エア・ブリッジ型スラブ構造を、a-Si 膜を用いて実現することができ (図 1) a-Si 膜を用いたエア・ブリッジ型スラブ構造フォトニック結晶の高機能化に途を拓いた。



(a) SEM拡大像



(b) 光学顕微鏡による全体像

図 1 . a-Si からなるエアブリッジ型フォトニック結晶

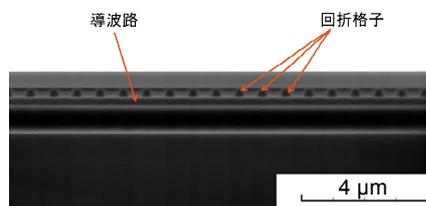
(2) a-Si 細線導波路とグレーティングからなる 2 層構造立体光回路の実現

a-Si からなる細線導波路の上に SiO_2 層を介して、同じく a-Si からなるグレーティング層を形成し、2 層構造の立体光回路を実際に作製した。作製は以下の手順で行った。

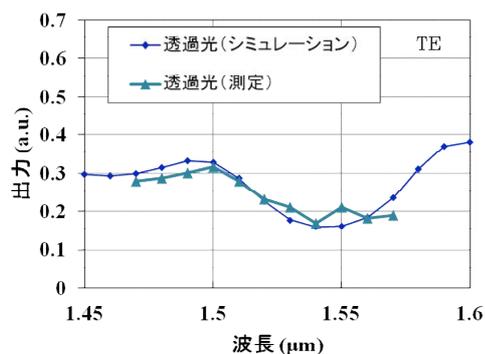
まず、a-Si 薄膜 (0.2 μm) と SiO_2 膜 (1.0 μm) が Si 基板上に積層している三層構造の特殊な SOI 基板を用いた。次に、電子ビームリソグラフィの際の位置合わせの基準となるマーカーを、金を用いたリフトオフにより作製する。金を用いる理由は、電子線照射時の二次電子を観察し位置合わせを行うためである。SOI 基板にレジスト塗布後、電子ビームリソグラフィとドライエッチングにより細線導波路を形成した。次に、細線導波路の上に SOG (Spin on Glass) を塗布し、その上に a-Si 層を作製した SOG を介することで、下の導波路の凹凸の影響を受けずに上の a-Si 膜

が作製できる。この積層膜を用いて、位置合わせ電子線描画を行い、グレーティング形状を作製して、2 層構造の立体光回路を実際に作製することができた (図 2 (a))。

上記 で検討した結果をもとに、光入力のための細線導波路の最適化を行い、実際にレーザ光を入射して、その特性を実験的に評価した。特に、出射光の波長依存性と偏光依存性を詳しく調べ、時間領域差分 (FDTD: Finite-difference time-domain) 法を用いたシミュレーションとの比較により、設計したものが実際にできているかを評価した。これらの検討により、出射光の波長依存性と偏光依存性の測定結果では、シミュレーション結果とほぼ同一の結果が得られた。図 2 (b) は、一例として、光出力強度の波長依存性を TE モードについて示したものである。このことから、設計どおりの細線導波路とグレーティング層からなる 2 層構造の立体光回路を実際に作製することができ、立体光回路という概念を検証することが出来た。



(a) 断面SIM (Scanning Ion Microscope) 像



(b) a-Si 細線導波路からの出力特性

図 2 . a-Si 細線導波路とグレーティングからなる 2 層構造立体光回路

(3) $\beta\text{-FeSi}_2$ 発光層と a-Si からなる細線導波路を有する方向性結合器型立体構造発光デバイスの実現

今回我々が検討した、 $\beta\text{-FeSi}_2$ を用いた方向性結合器型素子の概念図を図 3 (a) に示す。励起光には a-Si で吸収がなく、かつ通信波長にも使用される 1.3 μm の波長の光を想定した。波長 1.3 μm の半導体レーザ光を励起光として、 $\beta\text{-FeSi}_2$ サンプル上に形成した a-Si 導波路から入射し、その後 $\beta\text{-FeSi}_2$ に移った

励起光により発光した $1.5 \mu\text{m}$ の光を、再度 a-Si 導波路から取り出す構造を検討した。ギャップ層、オーバークラッド層には SiO_2 を用いる。次に、FDTD 法を用いたシミュレーションにより、構造の最適化を行った。検討の結果、a-Si 導波路厚が $0.7 \mu\text{m}$ 、a-Si と $\beta\text{-FeSi}_2$ 層との間隔が $0.02 \mu\text{m}$ の時に入力比 70%以上の出力が得られることがわかり、この構造を最適構造とした。

素子作製は、以下の手順で行った。まず、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 層を表面に有する Si 基板の上に、プラズマ CVD 装置を用いて SiO_2 ギャップ層を成膜、次にスパッタ装置を用いて a-Si 導波路層を成膜した。導波路のパターンニングは、レーザーソグラフィと ICP-RIE(Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching)を用いて行った。最後に、プラズマ CVD 装置を用いて SiO_2 クラッド層を成膜した。図 3 (b) に、作製した構造の全体像を示す。

このデバイスを用い、a-Si 導波路に波長 $1.3 \mu\text{m}$ の光を入射すると、波長 $1.5 \mu\text{m}$ の光が、わずかではあるが a-Si 導波路の反対側から出射することが分かり、 $\beta\text{-FeSi}_2$ 層からの発光が、a-Si 導波路を介して得られたことを示すことができた。

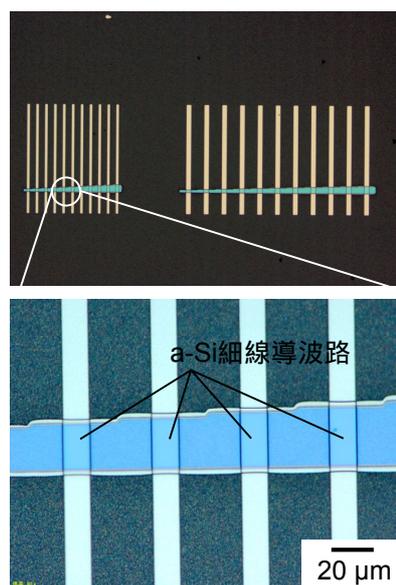
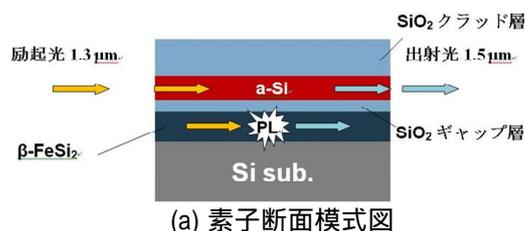


図 3. $\beta\text{-FeSi}_2$ と a-Si 細線導波路を有する方向性結合器型立体構造発光デバイス

以上の (1) (2) および (3) で示した

ように、本課題の研究の結果、a-Si 膜を基本とした構造により、立体光回路を含む多様な光回路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)(すべて査読あり)

H. Tokushige, T. Endo, K. Hiidome, K. Saiki, S. Kitamura, T. Katsuyama, N. Ikeda, Y. Sugimoto, Y. Maeda, "Photonic crystals composed of $\beta\text{-FeSi}_2$ with amorphous Si cladding layers", Japan. J. Appl. Phys., 54, 07JB03 (2015), doi:10.7567/JJAP.54.07JB03

S. Kitamura, M. Senshu, H. Tokushige, T. Katsuyama, N. Ozaki, I. Tanaka and Y. Sugimoto, "Spectral and temporal photoluminescence behavior of colloidal PbS quantum dots", Superlattices and Microstructures, 79, 123-134 (2015)

H. Tokushige, T. Endo, K. Saiki, K. Hiidome, S. Kitamura, T. Katsuyama, M. Tokuda, H. Takagi, M. Morita, Y. Ito, K. Tsutsui, Y. Wada, N. Ikeda and Y. Sugimoto, "Amorphous Si waveguides with high-quality stacked gratings for multi-layer Si optical circuits", Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications, 12, 501-507 (2014)

〔学会発表〕(計 27 件)(国際会議は査読あり)

H. Tokushige, T. Endo, K. Hiidome, K. Saiki, S. Kitamura, T. Katsuyama, N. Ikeda, Y. Sugimoto and Y. Maeda, "Photonic crystals composed of $\beta\text{-FeSi}_2$ with amorphous Si cladding -Comparison with air/ SiO_2 claddings-", The 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence -Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems- (ISPEC2014), Tokyo, Japan, P-3, 2014-11

Kitamura, M. Senshu, H. Tokushige, T. Katsuyama, N. Ozaki, I. Tanaka and Y. Sugimoto, "Spectral and temporal photoluminescence behavior of colloidal PbS quantum dots", The 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence -Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems- (ISPEC2014), Tokyo, Japan, P-2, 2014-11

H. Tokushige, T. Endo, K. Hiidome, K. Saiki, S. Kitamura, T. Katsuyama, N.

Ikeda, Y. Sugimoto, Y. Maeda, "Photonic crystals composed of β -FeSi₂ with amorphous Si cladding layers", International conference and summer school on advanced silicide technology 2014 (ICSS-Silicide 2014), Tokyo, Japan, 20-P27, 2014-7

K. Saiki, Y. Kitamura, H. Tokushige, T. Endo, K. Hiidome, T. Yamaguchi, T. Katsuyama, N. Ikeda, and Y. Sugimoto, "Compact beam splitters based on a simple silicon slit structure", OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology 2014 (OECC/ACOFT 2014), Melbourne, Australia, WE7E5, pp.580-582 (2014)
M. Senshu, S. Kitamura, Y. Wen, K. Imai, T. Katsuyama, Y. Hino, N. Ozaki and Y. Sugimoto, "Time-resolved photoluminescence of InAs QDs fabricated by In-flush technique", The 3rd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence -Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems- (ISPEC2013), Tokyo, Japan, P-2, p. 54 (2013)

徳繁 洋樹, 遠藤 峻, 吹留 啓太, 齋木 健太, 勝山 俊夫, 池田 直樹, 杉本 喜正, "アモルファス Si をクラッドとする β -FeSi₂ フォトニック結晶の作製検討", 2013 年秋季第 74 回応用物理学会学術講演会, 同志社大学, 20a-A8-1, 2013-9

T. Endo, K. Saiki, K. Hiidome, H. Tokushige, T. Katsuyama, M. Tokuda, H. Takagi, M. Morita, Y. Ito, K. Tsutsui, Y. Wada, N. Ikeda, and Y. Sugimoto, "Amorphous Si waveguides with high-quality stacked gratings for multi-layer Si optical circuits", The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim(CLEO-PR 2013), Kyoto, Japan, MM1-7, 2013-7

K. Hiidome, K. Saiki, T. Endo, T. Yamaguchi, Y. Kitamura, T. Katsuyama, M. Tokuda, H. Takagi, M. Morita, Y. Ito, K. Tsutsui, Y. Wada, N. Ikeda, Y. Sugimoto, "Annealing Behavior of Optical Transmission Loss of Amorphous Si Wire Waveguides for Silicon Photonics", IUMRS-International Conference on Electronic Materials (IUMRS-ICEM 2012), Yokohama, Japan, B-9-O25-006, 2012-9

〔その他〕

ホームページ等

<http://kou25hp.eng.u-fukui.ac.jp/el/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

勝山 俊夫 (KATSUYAMA, Toshio)

福井大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90467134

(2) 研究分担者

和田 恭雄 (WADA, Yasuo)
東洋大学・大学院学際・融合科学研究科・教授
研究者番号：50386736

青木 画奈 (AOKI, Kanna)
神戸大学・自然科学系先端融合研究環重点研究部・助教
研究者番号：90332254