

令和元年6月12日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04359

研究課題名（和文）立体湾曲シリコン導波路を用いた革新的空間光学の開拓

研究課題名（英文）Novel space optics using vertically curved silicon waveguides

研究代表者

榊原 陽一（Sakakibara, Youichi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・総括研究主幹

研究者番号：40357091

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：立体湾曲シリコン導波路カップラをシリコンフォトニクスの空間光学への応用に適する光入出力部とするために、出射する光ビームの空間的広がり方を制御できる技術を確認することを目的とし、理論解析によりビーム進行方向およびビーム形状を変換する新型のデバイス構造を創案し、この構造を実現するためのイオン注入等の加工プロセスの開発に取り組んだ結果、放射損失が小さく波長帯域も広い特性を有し目標とする空間的広がり方を示すデバイスの試作に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

十分解明されていなかった立体湾曲シリコン導波路カップラの光伝搬の仕組みを物理的に解明し、光ビームの空間的広がり方を制御できる新しいデバイス構造を理論的および実験的に創出することができた。この成果はビームステアリングなどのシリコンフォトニクスの新しい空間光学的应用に直結するのみならず、光ファイバーとの光入出力にも応用可能であり、光センサーや光通信など今後の発展が期待されている基幹科学技術分野の基盤的技術としての活用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：For vertically curved silicon waveguide couplers to be applied to space optics using silicon photonics, we pursued a technology to control the propagation profile of the light beam in the free space emitted from the couplers. With numerical analysis we invented a new device structure that enables vertical turning of the beam propagation direction and transformation of the beam propagation profile. We experimentally developed manufacturing methods using ion implantation and so on to realize such a device structure, and succeeded in fabricating a device with the target beam propagation profile with small radiation loss and wavelength dependence.

研究分野：光機能デバイス、光機能材料、ナノテクノロジー

キーワード：シリコンフォトニクス 導波路 イオン注入 空間光学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自由空間を伝搬する光を操る空間光学は、光工学における中核技術として幅広い分野で用いられてきた。それに加えて、この四半世紀の間に光ファイバーや導波路を用いた導波光学が著しい発展を遂げ、空間光学と並ぶ重要な地位を確立してきた。さらに近年、シリコン材料を導波路材料に用いたシリコンフォトニクスの研究が国内外で活発化している。シリコンは近赤外波長域で透明であり、屈折率が 3.5 程度と非常に大きいため、石英ガラスをクラッド材料とすれば極めて大きな屈折率差が得られ、従来に比べてはるかに小さな断面積で急峻な曲げ半径を持つ超小型の導波路デバイスが実現可能である。また、量産性に優れた CMOS 加工技術が転用でき、データセンターや LSI チップ上での光インターコネクションへの非常に大きなニーズがある。

従来シリコンフォトニクスの研究は光ファイバーと接続する光インターコネクションへの応用指向がほとんどであり、空間光学との接点は少なかった。しかし最近米国を中心にフェーズアレー (J.Sun 他、Nature 493(2013)195, MIT) や Orbital Angular Momentum (OAM)(T.Su 他、Opt.Exp.20(2012)9396, UC Davis) などシリコンフォトニクスの空間光学への研究展開が活発化している。これらの研究では、シリコン導波路が存在する基板面から擬似的に垂直な面外方向に回折格子カプラを用いて光を取り出している。フェーズアレーにおいては碁盤目状に配置された回折格子カプラから出射される光の各々の位相関係を調節することにより、出射干渉光の空間イメージ制御を実現した。OAM においては円環状に配置した回折格子カプラから出射される光の各々の位相関係を螺旋階段的に調節することにより、出射光の OAM 形成を実現した。

このようにシリコンフォトニクスの空間光学への展開では回折格子カプラを用いるのが主流であるが、回折格子カプラは波長依存性や出入射角度依存性が大きいなどの大きな課題もあった。本研究実施者は、本研究開始の数年前より図 1 に示した概念に基づき、シリコン細線導波路を面外上方に湾曲させて垂直方向からの光の入出力を実現しようという試みに着手し、垂直方向からのイオン注入によりシリコン導波路をわずか数 μm の曲率半径で加工できることを初めて実証した (T.Yoshida, Y.Sakakibara 他、Opt.Exp. 23(2015) 29449.)。試作した立体湾曲カプラでは完全に垂直な光入出力、広帯域でフラットな波長依存性、小さな偏波依存性、小さな入射角度依存性などが確認され、回折格子カプラの弱点とされる点がすべて克服された画期的なものであった。

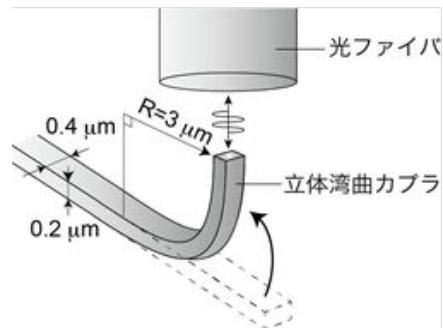


図 1 立体湾曲カプラの概念図

2. 研究の目的

本研究は、本研究実施者らが開発した上記の立体湾曲シリコン導波路カプラ (形状が象の鼻に似ていることからエレファントカプラとよぶ) を用いて、シリコン導波路の存在する基板面から垂直な面外方向の空間に光を取り出して利用する新しいタイプの空間光学の開拓を目指した。シリコンフォトニクスの高集積性という特長を生かせる有望な応用として光ビームのステアリングエンジンを想定し、その実現に必要な基盤技術の確立を目指した。

従来光ビームのステアリング方法としては回転ミラーを利用する方法が主流であるが、機械的駆動機構が必要なため小型化や高速駆動が困難である。シリコンフォトニクスを用いれば機械的可動部の一切ない全固体チップ型ステアリングエンジンの実現が期待できる。図 2 に想定するステアリングエンジンの概念図を示す。研究開始当初はフェーズアレー方式によるステアリングエンジンを目指していたが、本研究を開始する過程で、光出射するエレファントカプラを逐次スイッチで切り替えて出射光をレンズでコリメート化すれば、簡明な駆動方式で優れたステアリング素子を実現できることに気づき、研究方針に変更を加えた。この新方式ではエレファントカプラから出射する光ビームの空間的広がり方をコリメートレンズの開口と整合させることが重要であり、ビームウェスト幅が 5 マイクロメートル程度の擬ガウシアンビームを垂直出射するエレファントカプラの実現を目標に設定し、そのための理論的設計指針と作製技術の開発を目的とした。

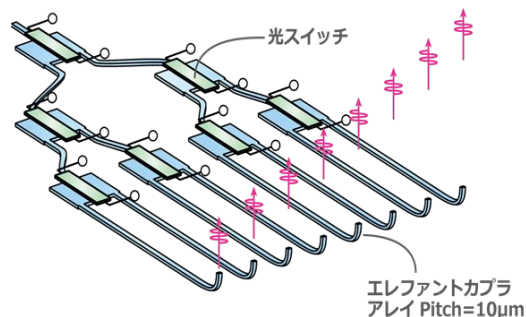


図 2 ビームステアリングエンジンの概念図

3. 研究の方法

(1)シリコン導波路中では光は $440\text{nm} \times 220\text{nm}$ 程度の微小な断面内に強く閉じ込められており、導波路から自由空間に光がそのまま出射すると極めて大きな開口数(NA)で光が広がってしまう。本研究の目標とするエレファントカブラ端でビームウェスト幅が5マイクロメートル程度の擬ガウシアンビームの形成を実現するためには、従来にない新しい発想に基づくビーム形状変換機構の開発が必要であった。そこで本研究では数値解析による理論的設計指針の導出を行った。光導波路の解析でよく用いられるビーム伝搬法(BPM)近似解析は屈折率差の大きいシリコン導波路には不適当なため、膨大な計算量が必要となるが計算結果の信頼性の高い3次元FDTD法による数値解析を採用した。計算機環境の整備や1日程度以内で計算が終了する基本メッシュサイズの選定等の準備の後、本計算を進めた。

(2)数値解析から導出された目標構造を実際に作製し機能検証するための加工プロセス技術の開発を行った。幅数十nm程度の微細な先端幅のシリコン導波路を加工するための電子ビーム露光技術、ドライエッチング技術、イオン注入技術、酸化膜成膜技術などを開発した。デバイス評価装置を自作し、試作されたデバイスの測定評価を行った。

(3)シリコン導波路を加工するための方法として、液浸ArFフォトリソグラフィを用いる技術の開発に取り組んだ。ビームステアリングエンジンを実現するためには多数のエレファントカブラを一括製造する必要があり、高精細のフォトリソグラフィが必須のためである。導波路加工済みの直径300mmの大型ウェハを20mm四方の小片に切り出し、以後エレファントカブラに加工するプロセスの開発を進めた。

4. 研究成果

(1)3次元FDTD法による数値解析手法により、エレファントカブラ中での光の伝搬挙動を丁寧に解析した結果、湾曲部は面内導波路と同じ幅にすることにより放射損失をなくし、その上部のシリコン導波路を、長さ数マイクロメートルのうちに幅が数十nmまで漸減するような逆テーパ構造とし、その周囲に厚さ2~3マイクロメートル程度の酸化膜をCVDで等方成膜して頂部に微小レンズ構造を形成すると、逆テーパ構造から放射した光が頂部レンズで集光され、ビームウェスト幅が5マイクロメートル程度の擬ガウシアンビームを形成可能であることが光ファイバーとの結合シミュレーションから明らかになった。図3にその概要を示す。湾曲部による光進行方向の屈曲と、非湾曲のテーパ部・レンズ部によるビーム形状変換を役割分担させるという発想によるものである。(発表論文、学会発表)

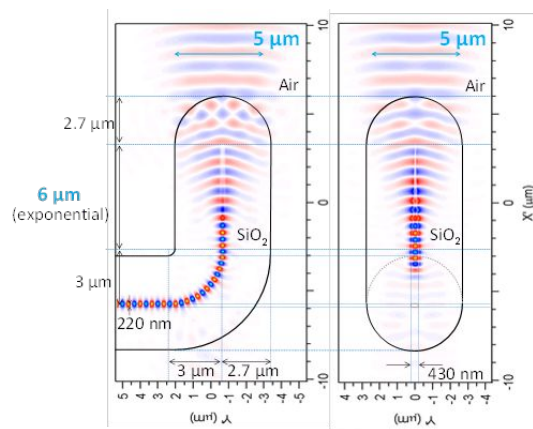


図3 数値解析による設計構造

(2)図3に示した指針構造に近い構造が、実際のイオン注入湾曲加工プロセスでどの程度実現可能かどうか、試作実験に取り組んだ。加工プロセス的には、湾曲部の先に非湾曲部を存在させることは極めて挑戦的であり、さらに酸化膜をCVDでレンズ形状に等方製膜できるかどうかは不明なため、指針構造にどの程度まで近いものが作製可能かどうかを検証することは極めて重要であった。図4に試作構造の断面SEM写真を示す。期待したように芯となるシリコン導波路の周囲に酸化膜が等方的に製膜され、先端部がレンズ状の形状になることが確認された。また、出射光のビーム拡がりビームウェスト幅5マイクロメートルのガウシアンビームとよく一致することが確かめられた。(発表論文、学会発表)さらにイオン注入条件の改良により、光ファイバーとの結合効率を改善することができた。(発表論文、学会発表)

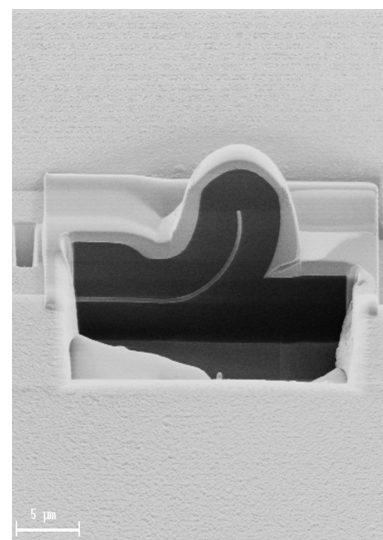


図4 試作構造の断面観察結果

(3)液浸ArFフォトリソグラフィを用いてシリコン導波路を加工したところ、幅が数十nmま

で漸減する逆テーパ構造を再現性良く一括製作可能なことが確認された。さらにシリコン導波路を立体湾曲するイオン注入と酸化膜をデポするCVDのプロセス条件を調整することにより、湾曲部での放射損失が大幅に抑制され、ほとんど偏光依存性のない素子を作製できた。光ファイバーとの結合損失も低く、ビームステアリングへの応用にも非常に適するものである。(学会発表)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Y. Atsumi, T. Yoshida, E. Omoda, and Y. Sakakibara, "Design of compact surface optical coupler based on vertically curved silicon waveguide for high-numerical-aperture single-mode fiber," J. Jpn. Appl. Phys., 査読有, Vol.56, No. 9, pp.090307-1-4, Aug. 2017. DOI: 10.7567/JJAP.56.090307

Y. Atsumi, T. Yoshida, E. Omoda, and Y. Sakakibara, "Broad-band surface optical coupler based on a SiO₂-capped vertically curved silicon waveguide," Opt. Express., 査読有, Vol.26, No. 8, pp.10400-10407, Apr. 2018. DOI: 10.1364/OE.26.010400

Y. Atsumi, T. Yoshida, E. Omoda, and Y. Sakakibara, "Low-loss and broadband optical coupler based on lensed-top vertically curved silicon waveguide," IEEE Photon. Technol. Lett., 査読有, Vol. 31, No. 8, pp. 603-606, Apr. 2019. DOI: 10.1109/LPT.2019.2903233

〔学会発表〕(計10件)

Y. Atsumi, T. Yoshida, E. Omoda, and Y. Sakakibara, "Large mode-field-diameter surface optical coupler based on SiO₂-capsuled vertically curved Si waveguide," The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition (OFC) 2017, Th2A.8, Los Angeles (USA), Mar. 2017.

Y. Atsumi, T. Yoshida, E. Omoda, and Y. Sakakibara, "Fabrication of vertically curved Si surface optical coupler coupling with 5- μ m-mode-field-diameter optical fiber," IEEE International Conference on Group IV Photonics (GFP) 2017, ThB5, Berlin (Germany), Aug. 2017.

Y. Atsumi, T. Yoshida, E. Omoda, and Y. Sakakibara, "Characterization of coupling properties of vertically curved Si surface optical coupler designed for coupling with 5- μ m-MFD SMF," The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition (OFC) 2018, Tu2A.2, San Diego (USA), Mar. 2018.

Y. Sakakibara, Y. Atsumi, and T. Yoshida, "Three dimensional silicon optical waveguide structure bent by ion implantation for surface coupling," The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition (OFC) 2018, M4F.3, San Diego (USA), Mar. 2018.

Y. Atsumi, T. Yoshida, E. Omoda, and Y. Sakakibara, "High-performance surface optical coupler based on SiO₂-capped vertically curved Si waveguide," The 44th European Conference on Optical Communication (ECOC) 2018, We2.9, Roma (Italy), Sep. 2018.

T. Yoshida, Y. Atsumi, E. Omoda, and Y. Sakakibara, "Broadband and polarization insensitive surface optical coupler using vertically curved waveguides fabricated with ArF-immersion lithography," The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition (OFC) 2019, Tu2J.7, San Diego (USA), Mar. 2019.

渥美 裕樹、吉田 知也、面田 恵美子、榊原 陽一、『高 NA シングルモード光ファイバ実装に向けた高効率エレファントカブラの提案』第 64 回応用物理学会春季学術講演会、17a-F204-8, 神奈川、2017.3.

吉田 知也、渥美 裕樹、面田 恵美子、榊原 陽一、『ArF 液浸リソグラフィで作製したエレファントカブラ』、電子情報通信学会 2018 ソサイエティ大会、C-3-44, 金沢、2018.9.

渥美 裕樹、吉田 知也、面田 恵美子、榊原 陽一、『5 μ m スポット径有する広帯域・高効率結合エレファントカブラの実現』電子情報通信学会 2018 総合大会、C-3-24、東京、2018.3

渥美 裕樹、吉田 知也、榊原 陽一、『シングルモードファイバとの結合に向けたエレファントカブラの設計』電子情報通信学会 2019 総合大会、C-3-47、東京、2019.3.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：光結合器

発明者：渥美裕樹、吉田知也、榊原陽一

権利者：国立研究開発法人産業技術総合研究所

種類：特許

番号：特願 2016-243854

出願年：2016 年

国内外の別：国内

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：吉田知也

ローマ字氏名：(YOSHIDA, tomoya)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：電子光技術研究部門

職名：主任研究員

研究者番号(8桁)：80462844

研究分担者氏名：渥美裕樹

ローマ字氏名：(ATSUMI, yuki)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：電子光技術研究部門

職名：研究員

研究者番号(8桁)：30738068

(2)研究協力者

研究協力者氏名：鍛冶良作

ローマ字氏名：(KAJI, ryosaku)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。