

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04634
研究課題名（和文）光波長・空間多重伝送向け表面ファイバ実装型光カプラの革新的製造技術に関する研究
研究課題名（英文）Development of Fabrication Technology of Surface Fiber Mounted Optical Couplers for Wavelength Division Multiplex and Space Division Multiplex
研究代表者
吉田 知也（Yoshida, Tomoya）
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・主任研究員
研究者番号：80462844
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、モードサイズ $10\mu\text{m}$ のエレファントカプラを実現することを目的としエレファントカプラ作製のコア技術であるIIB技術の革新を目指した。これまでのIIBでは先端テーパ部を直線に保ったまま立体湾曲部を形成することが難しく、モードサイズ $10\mu\text{m}$ のエレファントカプラを実現することが出来なかったのだが、本研究では新たな観点として、イオン注入角度と湾曲効果の関係を明らかにし、その効果を利用することで、IIB技術の加工自由度が格段に上がり、所望のエレファントカプラを形成することに使えることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は、エレファントカプラを一般的な光ファイバに対応可能とする革新的な基盤技術となる。それにより、波長分割多重や空間分割多重への応用の障壁が格段に下がり、ひいては、光通信のデータ伝送レートを飛躍的に向上させるための基盤技術になることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we aimed at the innovation of IIB technology, which is the core technology of elephant coupler fabrication, with the aim of realizing an elephant coupler with a mode size of $10\mu\text{m}$. In the conventional IIB, it was difficult to form a three-dimensional curved portion while keeping the tip tapered portion straight, and it was not possible to realize an elephant coupler with a mode size of $10\mu\text{m}$. We clarified the relationship between the irradiation angle of ion-beam-implantation and the bending effect, and by using that effect, we found that the degree of freedom in processing of the IIB technology was greatly increased, and that it could be used to form the desired elephant coupler.

研究分野：シリコンフォトニクス

キーワード：シリコンフォトニクス 光集積回路 イオン注入 MEMS

1. 研究開始当初の背景

シリコンフォトニクスは、通信波長帯の光に対して高屈折率材料となるシリコンを、シリコン半導体製造技術を活用して加工する、小型・高密度・高性能なシリコン光集積回路(Si-PIC)を製造するための技術プラットフォームである。Si-PICは指先に乗る程の小さなチップで光・電気信号変換を実現できるため、データセンタ内でのデータ伝送レート向上の要求に伴い、ラック間の光相互接続を皮切りに、ラック内のボード間、ボード内の各種演算チップ・メモリ間の光相互接続へと、Si-PICと光ファイバをモジュール化した光トランシーバとして利用シーンを拡大することが期待されている。さらに将来的には、光の波長を利用した波長分割多重(WDM)や、マルチコア光ファイバ(MCF)を利用した空間分割多重(SDM)により、データ伝送レートを飛躍的に向上させることも期待されている。

しかし、Si-PICには光ファイバの実装コストが非常に大きいという課題がある。光ファイバ実装はLSI用電気実装とは大きく事情が異なり、Si-PICの光入出力部と光ファイバの光モードを数100nmオーダーでXYZ軸に加え回転軸も位置合わせすることが要求される。しかも、汎用的な光ファイバのモードサイズが約10μmであるのに対し、Si-PIC内の光モードサイズは数100nmと数10倍の開きがある。無論、光ファイバ実装の困難性は当初より分かっており、シリフォトの本格的な研究がスタートして約20年の間、膨大な研究資源が光ファイバ取り付け部となる光カプラの開発に費やされた。しかし、未だ満足のいく光カプラは実現されていない。

光カプラは、光学特性に優れたエッジカプラか回折格子を利用して表面から光を出し入れできるグレーティングカプラ(GC)の2種類が主流である。エッジカプラはその名の通り基本的にダイシングされたSi-PICチップのエッジに搭載される。先が細くなるテーパの光導波路で光モードサイズを徐々に拡大する仕掛けをつくり、光ファイバとのモードサイズを整合させて低損失・光波長帯域の光結合を実現する。エッジカプラは広波長帯域の光カプラなのでWDM応用への将来性もある。しかし、エッジ断面への光ファイバアクセスは表面アクセスに比べて、実装システム構築が困難でコストが高い点が課題となっている。一方、GCは光の回折を利用して表面光結合を実現できるため、LSI実装の延長での実装システムを構築できる可能性を持つ。そのためMCFを利用したSDMへの将来性も高い。しかし、光の回折は波長依存性が非常に強いので波長帯域拡大が困難なので、光学特性には妥協が必要になる。

近年、申請者らは光ファイバ実装が容易な表面結合型でありながら、エッジカプラのように光学特性に優れた光カプラの実現を目指し、立体湾曲型光カプラ(像が鼻を曲げている様子にたとえ、エレファントカプラと呼ぶ)という独自の光カプラを開発している。図1に示すようにイオン注入曲げ加工技術(Ion Implantation Bending: IIB)を利用して作製する立体的に湾曲されたシリコン光導波路に沿って光がウェハ垂直方向に曲がるため、高効率化と低波長依存性を可能にする表面結合型光カプラを実現できる。当初、光モードサイズが2μmと小さかったが、現在は5μmまで拡大することに成功し、低結合損失、かつGCと比べ4倍広い光結合波長域を達成した。この結果は、WDMへの応用に対しても十分に広い波長域であり、表面型であるためSDMへの将来の展開も可能になる。

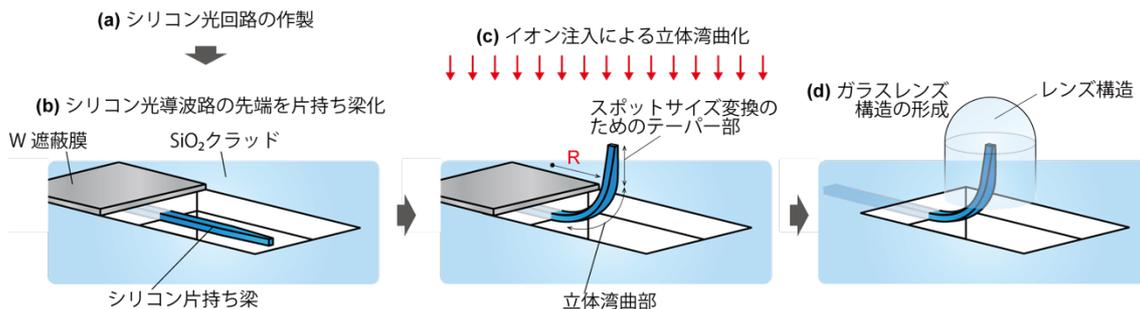


図1：エレファントカプラの作製プロセス概要

本研究では、エレファントカプラの光モードサイズを汎用的な光ファイバの光モードサイズである10μmに拡大するためのプロセス技術開発を実施した。モードサイズ10μmのエレファントカプラを実現するためには、これまでの5μm用エレファントカプラを形成してきたIIBプロセスでは不可能であったため、IIBプロセスの革新が本研究のテーマであった。

2. 研究の目的

本研究では、モードサイズ10μmのエレファントカプラを実現することを目的とし、エレファントカプラ作製の中核技術であるIIBを革新する。3D-FDTDシミュレーションによると、モードサイズ10μmを実現するためには図2のように立体湾曲部の曲率半径が10μm程度、先端の直線テーパ部の長さが15μm程度の形状を実現する必要がある事がわかってい

る。

IIB では、とりわけ先端テーパ部を直線に保ったまま立体湾曲部を形成することが難しい。エレファントカブラの作製プロセスは、Si-PIC の作製後に、シリコン光導波路の周囲のクラッド層 (SiO₂) を等方的にエッチングしてカンチレバー構造にし、カンチレバー構造へのイオン注入によって応力を生じさせ、シリコン光導波路を立体的に湾曲加工する。その後、クラッド層 (SiO₂) を堆積させて完成となる。IIB プロセスの真髄は、カンチレバー構造に対するイオン注入の加速エネルギーと注入量で加工形状を制御できる点にある。

この IIB プロセスにおいて、量産プロセスには不向きな FIB (集束イオンビーム) 装置を用いれば、曲げたい箇所にだけイオンビームを照射できるので加工の自由度が高い。しかし、Si-PIC ウェハプロセスとの融合を前提にすると、半導体製造で利用されるイオン注入装置の利用は必須で、その場合、ウェハ全面にイオン注入をすることになるため、例えば図3に示すように直線に保ちたい先端テーパ部もカーブしてしまう。

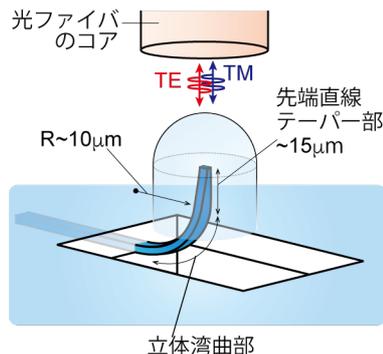


図2：エレファントカブラの寸法

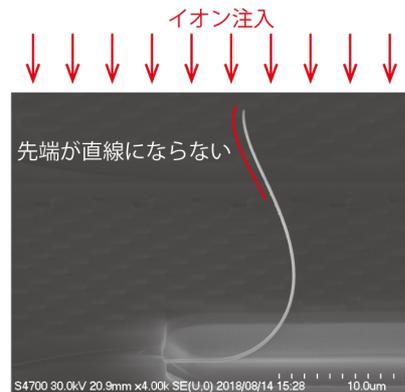


図3：立体湾曲化シリコン光導波路のSEM像

本研究では、長さ 15 μm 程度の先端直線テーパ部を形成するための方策として、(1) イオン注入角度と湾曲効果の関係、(2) カバー層の導入、(3) 部分的薄膜化という3つのアプローチを取り入れる独創的な手法を実験的に検証し、モードサイズ 10 μm のエレファントカブラ実現に挑んだ。

3. 研究の方法

本研究では下記3つの手法を実験的に検討し、実デバイスでの光学特性の評価を行いながらプロセス構築を目指した。

(1) イオン注入角度と湾曲効果の関係：IIB加工では、イオン注入中に徐々にカンチレバー構造が湾曲していく。そのため、ある瞬間、カンチレバー構造が緩く湾曲した状態にある時に、斜めからイオン注入を行うと、先端部への注入角度が極端に浅くなり、実質的に根元部のみにイオン注入する状況がつけられる。このように、IIB加工中に湾曲化していくシリコン光導波路の形状に合わせてウェハ保持角度を調整する手法が、先端テーパ部を直線に保つ効果的な手法になる可能性がある。

(2) カバー層の導入：IIB加工は、イオンの注入深さ=注入イオンの加速エネルギーによってイオン照射量当たりの曲げ量に変化する特徴がある。被加工膜に対して、イオンの注入深さが約50%のときに、最大の曲げ効果が得られる。先端テーパ部を厚くすると、相対的に注入深さが小さくなるので湾曲効果が小さくなる。そのために、先端テーパ部を金属膜などで被覆し厚みを増す手法が、先端テーパ部を直線に保つ可能性がある。

(3) 部分的薄膜化：上記(2)とは逆の発想で、カンチレバー構造の根元部だけを薄く加工すると、根元部に対して深さ50%のイオン注入条件を設定した時に先端部ではイオン注入深さが相対的に浅くなる。

1年目はその中から最も簡便な(1)の実現方法について重点的に取り組み、その結果、(知財に関するのでイオン注入条件の詳細は省略するが)イオン注入角度を上手く選択することで、加工の自由度が格段に上がり、手法(1)だけでも所望の光学特性が得られる構造を実現できることがわかった。2年目にはこの手法の確立を目指しイオン注入の角度・ドーズ・エネルギー等の各種パラメータを立体湾曲加工過程でどの様に組み合わせると所望の形状に成りやすいかを、実用化を念頭になるべく少ない工程数で実現するための実験を進めた。最終年度には光スイッチが搭載されたシリコン光集積回路に新開発のエレファントカブラを融合する試作を実施した。

4. 研究成果

本研究により、IIB技術はイオン注入の「角度」というパラメータ導入により加工自由度が格段に上がり、デポ・リソ・エッチングを要する「カバー層の導入」や「部分的薄膜化」といった入った製造工程を追加しなくとも所望のエレファントカブラを形成することに使えることを見出した。これはエレファントカブラを搭載するシリコン光集積回路への制約が新たに

生じないことを示唆し、本技術が幅広い応用に展開可能であることを示している。

図4に角度を変えながら IIB 加工を実施した立体湾曲シリコン細線導波路の SEM 像の例を示す。照射角度の大小や照射向きを変えることにより、立体化されたシリコンカンチレバー構造の表面や裏面を程よく曲げ加工することが出来ていることがわかる。

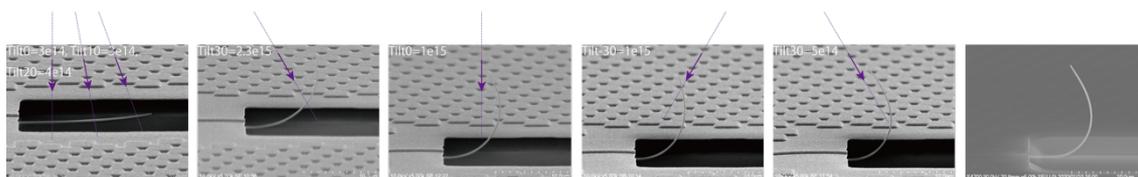


図4：角度を変えながら IIB 加工を施した立体湾曲化シリコン光導波路の例 (SEM 像)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yoshida Tomoya, Atsumi Yuki, Omoda Emiko, Sakakibara Youichi	4. 巻 59
2. 論文標題 Improvement of fabrication accuracy of vertically curved silicon waveguide optical coupler using hard mask shielded ion implantation bending	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 078003 ~ 078003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab9cd8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yoshida Tomoya, Atsumi Yuki, Omoda Emiko, Sakakibara Youichi	4. 巻 32
2. 論文標題 Polarization-Insensitive Vertically Curved Si Surface Optical Coupler Bent by Ion Implantation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Technology Letters	6. 最初と最後の頁 1319 ~ 1322
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LPT.2020.3022354	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------