

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13983

研究課題名（和文）立体湾曲シリコン細線導波路の光伝搬制御に関する研究

研究課題名（英文）Light propagation control of vetrically curved silicon wire waveguide

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・電子光技術研究部門・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） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：近年、情報通信量の増大により、データセンタ内などの短距離データ通信においても光配線の重要性が増してきた。データセンタ内の高密度光配線を実現するには、サブミクロンサイズの光配線を実現するシリコンフォトニクス技術が不可欠だが、一方で既存の光ファイバ等との接続が課題となっている。本研究では、シリコンフォトニクスと光ファイバ等の光接続の課題を克服するために、シリコンフォトニクス技術を拡張し、シリコン光回路からウェハ表面へ高効率に光入出力を可能にする革新的な技術開発を実施し、広い波長域において高効率の光結合を実現する技術を実証することに成功した。

研究成果の概要（英文）：Recently, the importance of optical interconnection has been increasing even in short distance data link within data centers, due to an increase in the amount of information communication. In order to realize high density optical interconnection in the data centers, silicon photonics technology for realizing submicron size optical interconnection is indispensable, but on the other hand, connection with optical fibers is a problem. In this research, in order to overcome the problems of optical interconnection such as silicon photonics and optical fiber, we have developed innovative technology that expands silicon photonics technology and enables high efficiency input / output of light from silicon optical circuit to wafer surface, and have succeeded in demonstrating a technique for realizing high efficiency optical coupling in a wide wavelength range.

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 光ファイバ 光結合

1. 研究開始当初の背景

近年の高度情報化に伴い、情報通信機器の高機能・高速化、またそれに伴う電力消費量の増加抑制は喫緊の課題である。シリコンフォトニクスは光回路の高集積化を可能とするため情報通信機器の発展を支える技術であり、上記課題を解決すると期待されている。中でも、シリコンフォトニクス技術はシリコン集積回路 (LSI) 上にシリコン光配線を形成して LSI チップ上に光ネットワークを実現することへの期待は大きい。

シリコンフォトニクスでは LSI 製造プロセスを応用して約 200nm 厚のシリコン層を加工して光導波路が形成される。そのため、光は基本的にウェハ表面を伝搬する事となる。ところが、LSI のシリコン光配線実現に向けては、高集積化の観点から光を垂直方向 (縦方向) にも伝搬する事が求められている。ただし光は放射損失とクロストークの問題があるため、直角な取り回しで縦方向に配線することが事実上不可能で、少なくともシリコンフォトニクスの場合においてはミクロンオーダーの曲率を持つ縦方向に湾曲した形状を必須とする。しかし、現実には縦方向に曲率を有する立体構造を LSI 製造ラインで実現可能な技術がこれまで存在しなかったため、現状では回折格子型結合器 (グレーティングカップラ: シリコン光配線に平面的な周期構造を施し、回折現象で光を斜め上方向に伝搬させる) が縦方向への光伝搬を行う役割を担っている。回折現象は波長や偏波に大きく依存する原理であるが、LSI 製造ラインでの実現可能な構造であるため、縦方向の光配線技術の主流となっている。

最近、提案者らの研究グループは立体的に湾曲したシリコン光配線 (立体湾曲シリコン光導波路: 通称、エレファントカップラ (図 1)) を作製する技術を開発しレンズ付光ファイバとの光結合に成功した。湾曲加工には LSI 製造技術の一つであるイオン注入法をアレンジして応用しており LSI 製造ラインとの互換性を有する。本提案は、立体湾曲シリコン光導波路の実用化に向けた、垂直方向伝搬光の制御法の研究である。

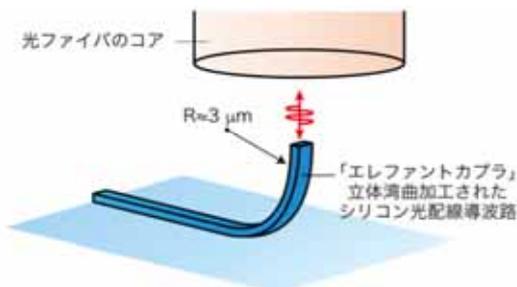


図 1 エレファントカップラの模式図

2. 研究の目的

シリコンフォトニクスでは光波をシリコンウェハに対して垂直方向に伝搬させる機構を

どのように実現するかが、光ファイバの実装やレーザーダイオード (LD) やフォトディテクタ (PD) の集積において課題となっている。最近提案者らが開発した立体湾曲シリコン光導波路は、垂直方向に光伝搬させることを実現しており、実装や集積化の課題を克服する技術として期待される。それを実現するためには、伝搬光のスポットサイズの制御が不可欠である。本研究では、立体湾曲シリコン光導波路の形状や材料が光伝搬現象に与える影響を検証することにより垂直方向へ伝搬する光の制御方法を確立する。テーパ形状、レンズ構造などを付加することにより垂直伝搬光を制御し、光ファイバをはじめとする光素子との光結合の効率化を実証する。

3. 研究の方法

(1) テーパー構造を付加しスポットサイズを制御する技術の開発: 通常の平面シリコン細線導波路の終端部分に施されているテーパ形状によるスポットサイズ制御と同様の構造を立体湾曲導波路で実現可能か検討する。先端部分のコアサイズとスポットサイズの拡大効果の関係を明らかにするとともに、一方で懸念されるテーパ付湾曲部分での放射損失についてもシミュレーションを利用しながら検討する。また、検討した結果を元に立体湾曲導波路上へのテーパ構造作製プロセスの開発を行う。実チップの評価は光ファイバとの結合効率測定や、ニアフィールドパターンやファーフィールドパターン測定を用いて行う。

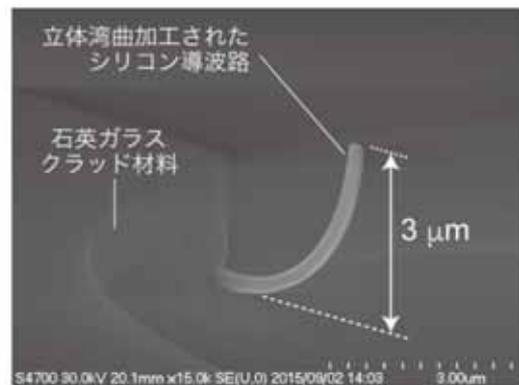


図 2 テーパー付エレファントカップラの電子顕微鏡画像

(2) セカンドコアを付加しスポットサイズを制御する技術の開発: 立体湾曲導波路の場合は、通常の平面シリコン細線導波路に形成するセカンドコアとは異なり、光軸に対して対称な形状のセカンドコアを形成することが CVD 法を用いると実現できると考えられる。まずシミュレーションを活用し、立体湾曲導波路に形成されるセカンドコア材料や堆積厚さと導波モードの関係を明らかにし、モード拡大の効果を検証する。その後、立体湾曲導

波路上へのセカンドコア作製プロセスの開発を行う。実チップの評価は光ファイバとの結合効率測定や、ニアフィールドパターンやファールフィールドパターン測定を用いて行う。なお、セカンドコアの材料としては酸化シリコン系や窒化シリコン系を想定しているが、選定基準として屈折率などの光学パラメータも重要であるが、プロセスの観点から堆積膜の残留応力にも留意する必要がある。

(3) 光結合実証実験系の構築：数 mm 角にダイシングしたテスト導波路チップに対して、表面方向から光ファイバなどの光デバイスに接近させ光結合を実現するための測定系を構築する。

(4) 光結合実証用デバイスの作製：光結合実証用デバイスのプロセスを開発する。テーパ構造と、セカンドコア構造の両方を付加した構造も含めて、スポットサイズ制御に適したデバイスを設計し、実証実験に適したテスト導波路を作製する。

(5) 光結合実証実験：作製したテスト導波路と、構築した測定計を用いて光結合実証実験を行う。テーパの有無、セカンドコアとレンズの有無による光結合効率の違いを計測し、それぞれの要素技術の有効性を確認する。

#### 4. 研究成果

(1) テーパ構造を付加しスポットサイズを制御する技術の開発：通常の平面シリコン細線導波路の終端部分に形成されるテーパ形状よりも短尺化したスポットサイズ変換器をエレファントカプラの先端に形成することにより、光ファイバとの高効率結合を実現可能であることを見出した。この成果は、エレファントカプラを小型化可能であることを示す意味で、画期的な成果である。

(2) セカンドコアを付加しスポットサイズを制御する技術の開発：CVD 法で形成するセカンドコアの材料として酸化シリコンを用い、エレファントカプラから出射する光の発散を抑制できることを見出した。この成果は、エレファントカプラのスポットサイズ制御を CVD 法で簡便に形成するセカンドコアで可能であることを示し、実用化の観点から重要な意味を持つ。

(3) 光結合実証実験系の構築：ウェハ表面方向から光ファイバなどの光デバイス接近さ

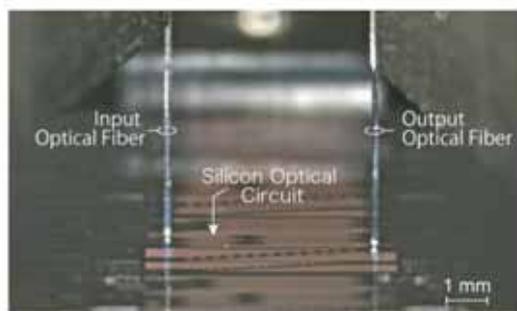


図3 光結合実証実験系の写真

せ光結合を実現するための測定系を構築した。本成果は、今回の研究推進の為に重要であるだけでなく、実用化の観点からは製造工程中に実施されるウェハテスト系のプロトタイプとも位置づけられるもので、非常に重要な成果である。

(4) 光結合実証用デバイスの作製：テーパ構造とセカンドコアを付加したエレファントカプラの作製プロセスを開発した。開発プロセスはテーパやセカンドコアの構造パラメータを十分広く設計できるプロセスとなっており、各アプリケーションに対して最適なスポットサイズ径を形成可能な物となっている。

(5) 光結合実証実験：作製したテスト導波路と、構築した実験系を用いて光結合実証実験を実施した。その結果、実デバイスにおいてテーパ・セカンドコアの両効果を実証することに成功した。本成果は第 41 回欧州光通信国際会議でポストデッドライン論文としてトップ採択され、国際的に大きな注目を集めた。

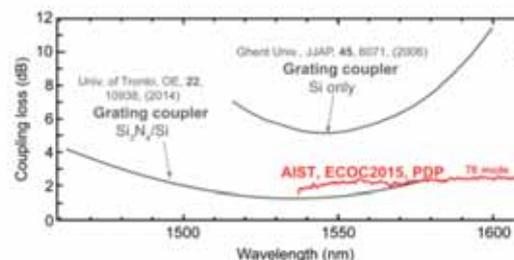


図4 高効率光結合の実証データ

#### 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 2 件)

(1) T. Yoshida, S. Tajima, R. Takei, M. Mori, N. Miura, Y. Sakakibara, Vertical silicon waveguide coupler bent by ion implantation, OPTICS EXPRESS, 査読有り, 23 巻 2015, 29449-29456, 10.1364/OE.23.029449

(2) T. Yoshida, E. Omoda, Y. Atsumi, T. Nishi, S. Tajima, N. Miura, M. Mori, Y. Sakakibara, Vertically Curved Si Waveguide Coupler with Low Loss and Flat Wavelength Window, JURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, 査読有り, 34 巻, 2016, 1567-1571, 10.1109/JLT.2015.2506732

[学会発表] (計 5 件)

(1) T. Yoshida, E. Omoda, Y. Atsumi, M. Mori, Y. Sakakibara, Elephant coupler:

Vertically curved Si waveguide with wide and flat wavelength window insensitive to coupling angle, 41th European Conference on Optical Communication (国際学会), 2015年9月27日~2015年10月1日, Valencia (Spain)

(2) 吉田知也、榊原陽一、シリコンフォトニクスと立体湾曲光導波路、学振158委員会第107回研究会(招待講演)、2015年4月22日、東京

(3) T. Yoshida, R. Takei, S. Tajima, E. Omoda, N. Miura, M. Mori, Y. Sakakibara, Vertically-Curved Waveguide Fabrication Using Ion Implantation Method for Vertical Coupling, VICTRIES 拠点シンポジウム, 2015年11月10日, 東京(国際学会)

(4) 吉田知也、面田恵美子、渥美裕樹、田島涉吾、西孝、武井亮平、三浦登、森雅彦、榊原陽一、立体湾曲型シリコン光導波路による低損失かつ低波長依存ファイバ垂直結合機の開発、電子情報通信学会総合大会(招待講演)、2016年3月16日、福岡市

(5) Y. Atsumi, T. Yoshida, E. Omoda, Y. Sakakibara, Large Mode-Field-Diameter Surface Optical Coupler Based on SiO<sub>2</sub>-Capsuled Vertically Curved Si Waveguide, The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition (国際会議), 2017年3月19日~23日、Los Angeles (米)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

(1) 薄膜部材の湾曲加工方法、吉田知也、榊原陽一、産業技術総合研究所、特許、特願2016-033779、2016年2月25日、国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 知也 (YOSHIDA Tomoya)

産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・主任研究員

研究者番号：80462844