

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15055

研究課題名（和文）集光レンズ装荷シリコンフォトンクスによる光ピンセットシステムの開発

研究課題名（英文）Development of optical tweezers system based on silicon photonics

研究代表者

渥美 裕樹 (Atsumi, Yuki)

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：30738068

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）：CMOS技術との高いプロセス親和性を有するシリコンフォトンクスは、低コストかつ大量に光集積チップを生産することができる。本研究では、数百ナノメートル四方オーダ内に強く光を閉じ込めることができるシリコン光導波路をチップ表面に物理湾曲させた垂直湾曲光結合デバイスを用い、溶媒内に混入させたターゲット（数ミクロン径粒子）の捕捉・操作を図った。高屈折率クラッド材料である窒化シリコンを用いることで、溶媒内に集光点もしくはコリメート光を発生できることを数値解析で明らかにするとともに、光集積チップの作製、および封止技術、観測技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

シリコンフォトンクスは光通信業界ですでに商用化が進んでいるが、将来様々な分野での利用が期待されている。本研究で取り組んだ光ピンセットデバイスに関しては、バイオセンシングや材料科学分析といった分野を中心に非常に強力なツールとなりうる。本開発目標デバイスは、画期的な光結合器デバイスとして実績を有するシリコン垂直湾曲導波路構造をベースとしており、そのレンズ機能を担うクラッド材料を選択することで多種多様なビーム制御が可能であることを明らかにした。これは、光ピンセットとしての多種多様な機能性の創出につながるものである。

研究成果の概要（英文）：Silicon photonics has an advantage of large-scale productivity with low cost because of its high compatibility with CMOS technology. In this research, we worked on development of optical tweezers for the target particles of several microns in diameter using a vertically curved silicon waveguide optical coupler which can strongly confine the light within a few hundred nanometers squares. Silicon nitride cladding which shows relatively high refractive index realized optical beam focusing and/or collimation into the solvent through the numerical analysis. Moreover, fabrication process of the Si photonics chip was developed as well as sealing and observation techniques.

研究分野：シリコンフォトンクス

キーワード：シリコンフォトンクス 光ピンセット 表面光結合器

1. 研究開始当初の背景

医療・食品・環境・エネルギーといった様々な分野をまたがるバイオテクノロジーにおいて、光科学で物質状態を制御するバイオフォトニクスは、高精度な生体分子検出・識別を実現する上で必要不可欠な技術である。その中で、レーザ光を極限まで集光することでナノ～マイクロメートル程度の誘電体粒子を三次元捕捉することができる光ピンセットは、集光状態の制御により単位粒子を力学的に操作(移動・回転)することが可能であり、生物学や材料科学の分野を中心に非常に重要なツールとなっている。しかし、一般的な光ピンセット評価システム【図 1(a)】は、捕捉位置検出や集光位置制御といった機能を実現するに当たり複雑な空間光学系を要求する上、複数のターゲットを同時に操ることができないという技術的課題を有しており、既存の集光原理に基づいての高性能、高機能、小型、低コスト化は極めて困難な状況にある。

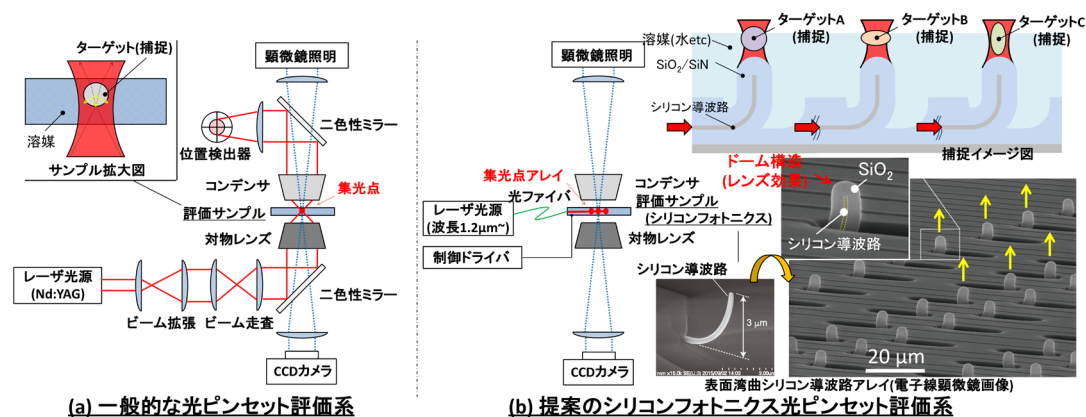


図 1：従来、及び本提案の光ピンセットシステム

2. 研究の目的

本課題では、評価サンプル側に光ピンセット機構を集積すべく、『レンズ構造有する表面湾曲シリコン光結合器』を評価サンプル上に二次元配列集積した新しい動的オンチップ光ピンセットシステム【図 1(b)】を開発する。評価サンプル自体に集光機構を集積しターゲットの捕捉・操作を行うことで一般的な蛍光光学顕微鏡での観察評価が可能となり、評価システムの圧倒的な低コスト化につながる。さらに、集光構造を二次元アレイ化し各々ポートからの出射光束状態を空間・時間制御することで、複数ターゲットの同時捕獲、移動操作、さらには識別が可能となる。本提案デバイスは CMOS プロセス、及び最終工程での MEMS プロセスによりチップ上の光ピンセット機構を同時一括形成できることから、大量生産性、面均一性に優れている。

3. 研究の方法

本課題では、短距離光通信やセンシング用途を中心に積極利用が進んでいるシリコンフォトニクスを開発サンプルの基盤技術とする。シリコンフォトニクスは既存 CMOS 技術とのプロセス親和性、高密度集積性に優れており、小型・高機能・高性能な光電子集積システムを安価に大量生産できる。これはセンシング分野で需要の高い、“使い捨て”サンプルとして扱うのに適する。またシリコンは、近赤外波長(1.2 μm~)において透明な材料であり、この付近の波長帯は検出ターゲットである生体タンパク質を非破壊で透過できることから、バイオセンシング用途に向いている。

第二のポイントとして、独自技術である表面湾曲シリコン光結合器を集光機構として応用する。本技術は、片持ち梁化したシリコン細線導波路に上方からイオン注入することで導波路内に格子欠陥応力を生じさせ、チップ表面方向への湾曲を実現する【図 1(b)】。さらに表面湾曲後に被覆膜を等方成膜することで先端部にドーム状構造が自己形成される。すでにこのレンズ効果を利用し、これまで光ファイバ実装に向けた擬コリメート光の生成に成功している。このレンズ効果は被覆膜材料やドーム半径、シリコン導波路寸法に応じて制御可能であり、光ピンセットを実現するに当たり不可欠な空間集光光束をフレキシブルに生成できることから、多種多様のターゲットを捕獲可能である点で大きな優位性をもつ。本課題では、デバイス設計において、理論計算、及び電磁界解析ソフト(FDTD法・BPM法)を用い、光ピンセットに使う表面湾曲シリコン光結合器の構造設計を行った。光ピンセットでは溶媒内で集光点を作る必要があることから、レンズの屈折率は溶媒よりも大きい必要がある。次に設計構造に応じたプロセス開発を行った。これまでのシリカ材料クラッドでは溶媒内集光できないため、新たなクラッド材料成膜プロセスの開発を行った、また、チップ上への流体材料の封止プロセス、及びターゲットおよび出射光の両者を同時観察できる観測系を立ち上げることで捕捉動作の評価を行った。

4. 研究成果

電磁界解析ソフト(3D-FDTD法, BPM法)を用いてデバイス設計を行った。CMOSプロセス互換性の点からSiO₂、SiONやSiNがレンズ材料の候補となる。その中で、SiN($n \sim 2$)は溶媒の一つとして想定される水($n=1.33$)に対して屈折率が高く、より強いレンズ効果が得られるため高開口数集光を実現する上で有用であることが分かった。垂直湾曲シリコン導波路の先端テーパ長(幅430nm→90nm)を5 μm 、レンズ直径を8 μm にした時、レンズ先端部に3 μm 幅のビームウエストを有する疑ガウシアンビームが生成できることを明らかにした。また、テーパ長を7 μm にした時、溶媒内5 μm の位置での集光がなされる。図2(a)は5 μm 径シリカ球に対して、波長1550nmの3 μm 幅ガウシアンビームを集光させたときの光強度プロファイルを示している。直交偏波(TE偏波)、垂直偏波(TM偏波)ともにシリカ球内部で強く集光している結果が得られた。一方、図2(b)は溶媒内でビーム交差するように光結合器を45度傾斜配列した場合の強度プロファイルを示している。図2(a)で示した単一結合器と比べ、高開口数集光が生成できている。また両者の位相を制御することで、位相干渉により強度分布が最大半波長(775nm)の範囲で掃引できることが分かった。このような位相制御はシリコンフォトニクスチップ上に熱光学効果素子を集積することで実現できる。

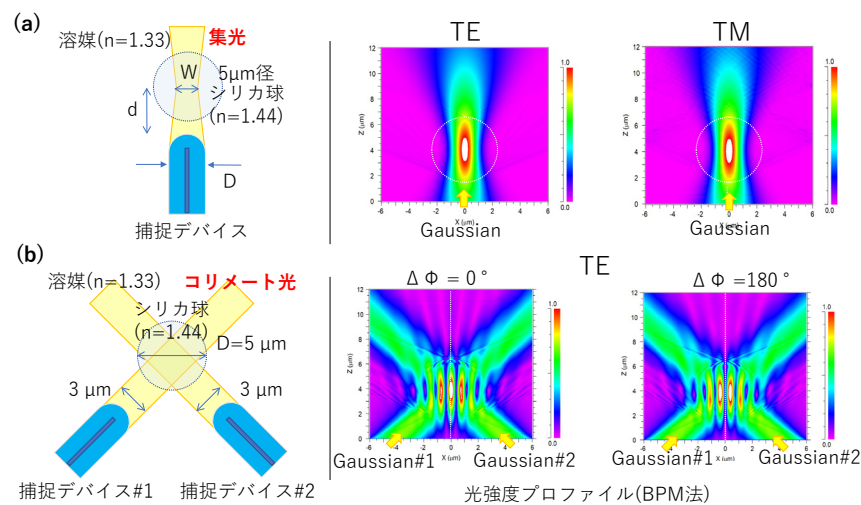


図2 : (a)単一ビーム集光、(b)交差コリメート集光

ベースとなるデバイスチップは、産総研にある300mmウエハ対応スーパークリーンルーム施設(産総研SCR)を用いて作製した。その後、小片チップ化し光ピンセット機構となる光結合デバイスの加工製を行った。そこではまず、光リソグラフィおよびバンプアードフッ酸を用いたウェットエッチングにより、湾曲加工させる部分のシリコン導波路片持ち梁化を行った。次に、イオン注入(Arイオン、110keV)により、片持ち梁化導波路に内部応力を発生させ、チップ表面方向に湾曲させた。最後に、レンズ機構となるSiNクラッドを成膜することで、先端にドーム状構造を有する光ピンセット機構を完成させた(図3)。デバイスの傾斜角度やレンズ径は、イオン注入条件(イオン種、角度、ドーズ量)および、SiN成膜条件(成膜時間)を変えることで制御可能である結果を得た。また、溶媒内に集光点を形成可能な円環配列光ピンセット機構のデモ作製に成功した。デバイスチップは、スペーサー入りUV硬化樹脂を用いてガラスプレートを実装し、その後、毛細管現象を利用して捕獲ターゲットを含む溶液をデバイスチップとガラスプレートの間に封止することで完成させた。

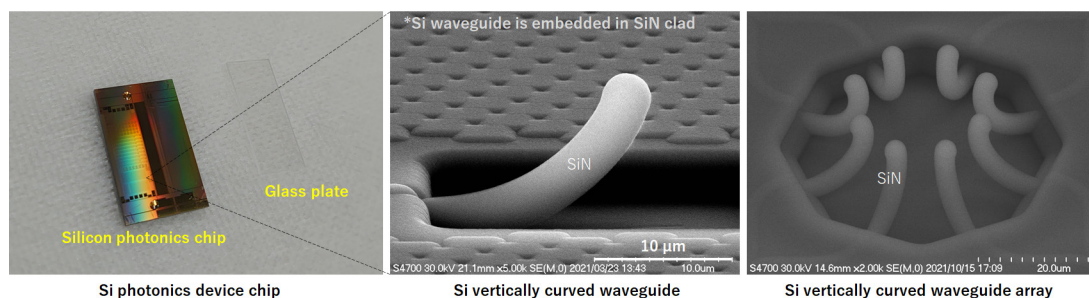


図3 : 開発デバイスチップ(光学顕微鏡像)とSiNレンズ集積光ピンセット機構(SEM像)

さらに開発した光ピンセット観測系を図 4(a)に示す。光路分岐可能な光学鏡筒を導入し、ビジコンカメラと CMOS カメラをそれぞれのポートに設置した。これにより前者による光ファイバ調芯(ターゲット捕捉光)、後者によるターゲット挙動観測を同時に達成できる観測系を創出した。実際に作製したデバイスを用いて光ピンセットデバイスの評価を行った。様々な溶媒とターゲットの組み合わせによる評価を行い、ターゲットの捕捉検討を行った(図 4(b))。コロイド沈殿してしまう組み合わせでは光ピンセット機構先端での捕捉は困難であり、慎重な溶液選定が必要である結論が得られた。本成果は、低コスト大量生産性の点から使い捨てチップとして有用であるシリコンフォトニクス技術をベースとしており、本提案の垂直湾曲導波路技術を用い集光機能や配列状態を制御することでさまざまな捕捉用ビームを生成できることを明らかにした。このように高密度回路集積可能なシリコン導波路を物理的にチップ表面に湾曲させる技術は世界的に見ても例はなく、非常にシンプルな概念で捕捉機構を実現できる。一方で、実際に捕獲操作を行うに当たっては、さらに流路形成などによるターゲットの誘導技術が必要であり、本課題ではその基礎基盤を確立した。

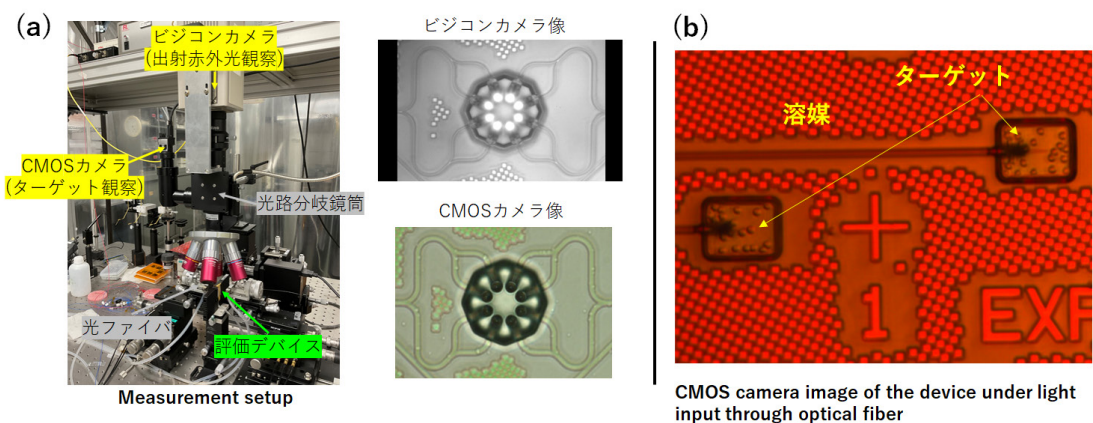


図 4 : 開発した光ピンセット観測系とシリカ球捕捉実験

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 0件）

1. 著者名 Atsumi Yuki, Yoshida Tomoya, Sakakibara Youichi	4. 巻 59
2. 論文標題 Design of aspherical-lensed Si surface optical coupler for coupling with standard single-mode optical fibers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 100905 ~ 100905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abb5bf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 渥美裕樹、吉田知也、面田恵美子、榊原陽一
2. 発表標題 通信用SMFと高効率結合する非球面レンズ付きエレファントカブラの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会2020年総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Atsumi, Tomoya Yoshida, Emiko Omoda, Youichi Sakakibara
2. 発表標題 Vertically-Curved Si Surface Optical Coupler for Coupling with Standard Single-Mode Optical Fibers
3. 学会等名 The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔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
---------	---------