

シリコン立体湾曲型光結合器（エレファントカプラ）の 偏波無依存化構造に関する研究

産業技術総合研究所 吉田知也

Fabrication Technique of Polarization-Insensitive Structure of Vertically-Curved Si Optical Coupler (Elephant Coupler)

Tomoya Yoshida, AIST

シリコンフォトリクス集積回路の表面結合型光結合器である立体湾曲型光カプラ(エレファントカプラ)の偏波無依存化を実現するために、ドライエッチングによるトレンチ形成とウェットエッチングを組合せた片持ち梁作製プロセスを開発した。

For input/output coupling of silicon photonics integrated circuits, we realized the cantilever fabrication process that combines trench formation by dry etching and wet etching to form a polarization insensitive structure of the three-dimensional curved optical coupler (elephant coupler).

1. はじめに

近年、シリコンを光導波路として利用するシリコンフォトリクス技術の研究開発が活発化している。シリコン半導体の微細加工技術を利用することにより、石英を用いた従来型の石英光導波路では実現が困難な非常に小型・高集積の光導波路デバイスを実現できるためである。シリコンフォトリクス技術によって変調器・受光器・光分岐合流器・光スイッチ・波長分離合流器などの素子を同一チップ上に集積化してシリコン光集積回路を作製することが可能になり、既にシリコン半導体ファウンドリーを活用して量産するところまで技術が成熟し光通信用デバイスとして実用化が始まった。加えて、最近ではシリコンフォトリクス技術の光通信以外への応用、特に各種センサーへの応用の期待も大きく、LiDAR・バイオセンサー・環境センサーなどへの応用が報告されている。

しかし、シリコンフォトリクス技術の本格的な普及のためには、微細集積化されたシリコン光集積回路から光をいかに出射させるか(または入射させるか)という光信号の入出力^{1,2)}の面でまだブレークスルーが必要だと言われている。その原因は、光配線は電気配線のように単純に接触すれば繋がるというものではなく、お互いの光のモードを精密に合わせないと結合損失が大きくなり、途端に信号が伝搬しなくなるという性質のためである。しかもシリコンフォトリクス技術では、典型的には厚さ $3\mu\text{m}$ の SiO_2 上の厚さ 200nm のシリコンを幅 400nm の細線状に加工したシリコン導波路コアを、厚さ $1\mu\text{m}$ の SiO_2 クラッドで覆った構造(光ファイバに例えると、シリコン層がコアで上下の SiO_2 層がクラッドに相当する)によって、チップの表面のサブミクロン領域に光を閉じ込めて光回路を形成するため、LSIの様にチップ表面からアプローチして信号を取り出すということが簡単ではないという弱点を持っている。このシリコンフォトリクス技術の光入出力の弱点を克服

するためには、光ビームのスポットサイズ変換および基板表面からの入出力という2つの技術の組み合わせが有効であり、これまでは回折格子型光結合器(グレーティングカップラ)の開発が精力的に行われてきた。しかし、回折現象に原理的に起因する強い波長依存性・角度依存性・偏光依存性という課題があり、広い波長域を使う波長多重化や偏光を使う偏波多重化など光特有の物理的自由度を活かすためには制限がある。

グレーティングカップラに代わる新たな表面型光結合器として、近年我々はイオン注入による薄膜湾曲技術(Ion Implantation Bending: IIB)³⁾を用いてシリコン光導波路の先端部を表面方向に立体湾曲した表面結合器“エレファントカップラ(図1)”と称する画期的なデバイスの開発に成功した⁴⁻⁶⁾。エレファントカップラは立体的に湾曲された導波路を光波が伝搬するという非常に素直な原理で光の向きを変えることが出来るため、低損失かつ低波長依存でチップ表面から光を入出力できる。またその先端にはシリコン導波路コアを先細にしたテーパ形状とCVD成膜によって形成したレンズを設けた効果的なスポットサイズ変換機能^{7,8)}を有する。

以上の様なユニークな表面光結合器であるエレファントカップラは、シリコン光集積回路の新たな応用分野を切り開く上でとても魅力的なデバイスであるが、一つだけまだ未解決の加工プロセス上の課題を抱えていた。その課題は偏波無依存化への対応である。シリコン光導波路は作製公差などの観点から、光導波路に対して水平な偏波(TE偏波)の光を効率よく導波するように扁平なコア(幅 $0.4\mu\text{m}$ 、高さ $0.2\mu\text{m}$)がスタンダードになっているため、エレファントカップラにおいてもTE偏波対応をこれまで優先してきた。しかし、シリコン光集積回路上でTM偏波をTE偏波に変換する偏波回転素子を実現できる技術も出てきており、他方で空間から光を出し入れするセンサ応用への期待が増大している背景から、エレファントカップラにおいても光導波路に水平なTE偏波だけでなく、垂直なTM偏波にも対応してほしいというニーズが出てきている。

本研究ではエレファントカップラをTE・TM両偏波に対応した偏波無依存化構造とするために必要となるプロセス技術開発を確立することを目的とした。

2. エレファントカップラの偏波無依存化構造のプロセス開発

2.1. 開発指針

エレファントカップラをTM偏波にも対応させるためには、立体湾曲部の曲率半径を $3\mu\text{m}$ から $6\mu\text{m}$ に拡大する必要がある。これはシリコンフォトニクス技術が扁平なコア

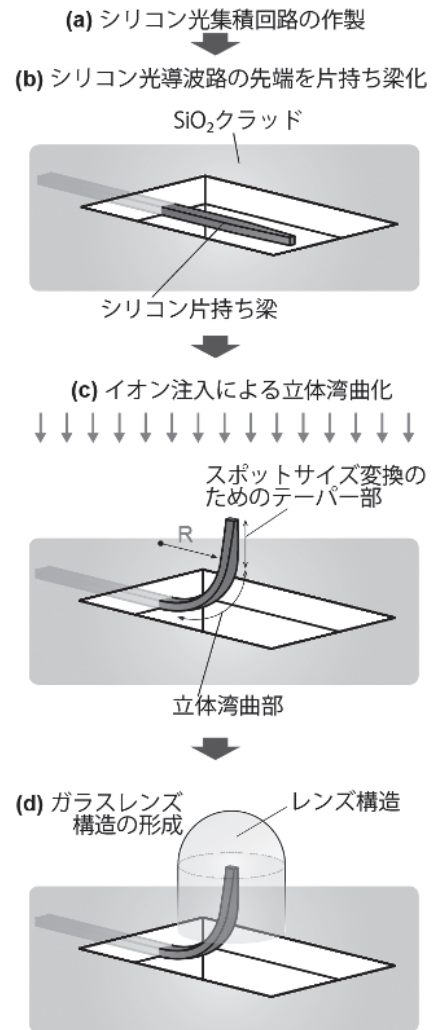


図1: エレファントカップラの作製プロセスの模式図

を標準としており、立体方向にシリコンコアを湾曲加工するエレファントカプラの場合にはTM偏波の光の方が閉じ込めが弱くなるため小さな曲率半径では放射損失が増大する事が原因である。ところが、エレファントカプラの作製面では曲率半径を $6\mu\text{m}$ に拡大することは容易ではないプロセスの変更を伴う。エレファントカプラの形成においては、図1(b)に示すようにシリコン導波路コアを片持ち梁形状に加工した後にイオン注入を行う必要があるのだが、片持ち梁の形成法としてはウェットプロセスによる等方的なエッチングしか実質的に選択肢がなく、サブミクロンの非常に小さな断面であるシリコンコアをミクロンオーダー長さの片持ち梁に形成する本プロセスでは、ウェットプロセスからの乾燥工程において表面張力によって引き起こされるスティクションを回避することが片持ち梁の長尺化によってより困難になるためである。そこで、本研究ではTM偏波に対応すべく長尺の片持ち梁形成をスティクションフリーで実現するために、従来法のウェットプロセスに加えドライエッチングプロセスを併用する新しい片持ち梁作製プロセスを開発した。

2.2. 作製方法

図2に本研究で鍵となるTM偏波対応エレファントカプラの実現に必要なシリコン片持ち梁構造の模式図を示す。従来のTE偏波用では立体湾曲部とスポットサイズ変換のためのテーパ部を合わせた長さが $15\mu\text{m}$ であったため片持ち梁直下の SiO_2 層を $1\mu\text{m}$ 除去すればスティクションを回避することが出来たのだが、TM偏波対応のために立体湾曲部の曲率半径 $6\mu\text{m}$ を実現するためには $20\mu\text{m}$ の片持ち梁が必要となり、片持ち梁直下の SiO_2 層は $2\mu\text{m}$ 程度除去しなければならなくなる図2(b)。この構造をウェットエッチングプロセスの時間を延長することのみで実現することも原理的には可能だが、標準的なシリコンフォトリソ技術ではシリコン導波路の下層の SiO_2 (熱酸化膜)は上層の SiO_2 (CVD堆積膜)よりもウェットエッチング速度が1/3未満程度と遅いため、エッチング時間の延長は上層 SiO_2 のアンダカットを増大させ、その結果としてフットプリントが大幅に増加する。フットプリントの増大はエレファントカプラをアレイ配置するセンサ等の応用において大きな制約となる。そのため、本研究ではドライエッチングでシリコン導波路の周囲に予めトレンチを形成することでウェットエッチング時間を同等に抑えて図2(b)の構造を実現した。併せて、曲率半径 $6\mu\text{m}$ のエレファントカプラを形成するためのイオン注入⁹⁾等のプロセス開発を実施し、TE・TM両偏波に対応したエレファントカプラを試作した。

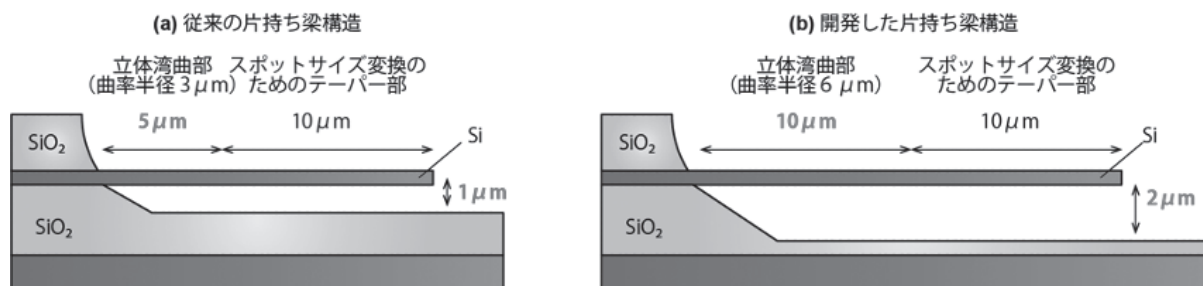


図2：片持ち梁形成プロセスの模式図

2.3. 試作結果

図3に本研究で得られた成果をまとめる。トレンチは図3(a)に示すようにシリコン光導波路の端部をコの字型に囲むようにフォトリソグラフィーとドライエッチングを用いて形成した。エレファントカプラの作製はシリコン光集積回路の作製後に追加的に実施することを想定しているのだが、そうすると多層のパッシベーション層(SiO₂)を形成した後の工程となり、基本的には解像度が数100nmのi線露光装置を活用する段階となる。そのため、幅400nmのシリコン細線導波路の近くまでトレンチをいかに接近させるかが、本手法を実用化段階に進めるために必要になる開発要素となった。今回フォトリソグラフィーのマスクパターンとドライエッチングの条件の様々な組合せを検討した結果、シリコン細線導波路の近傍1μm未満まで接近したトレンチを形成するに至った。現在は本研究の成果を元に更に接近させる手法を開発中である。

トレンチ形成後にウェットエッチングを行った後の形状を模式図とSEM像で図3(b,c)

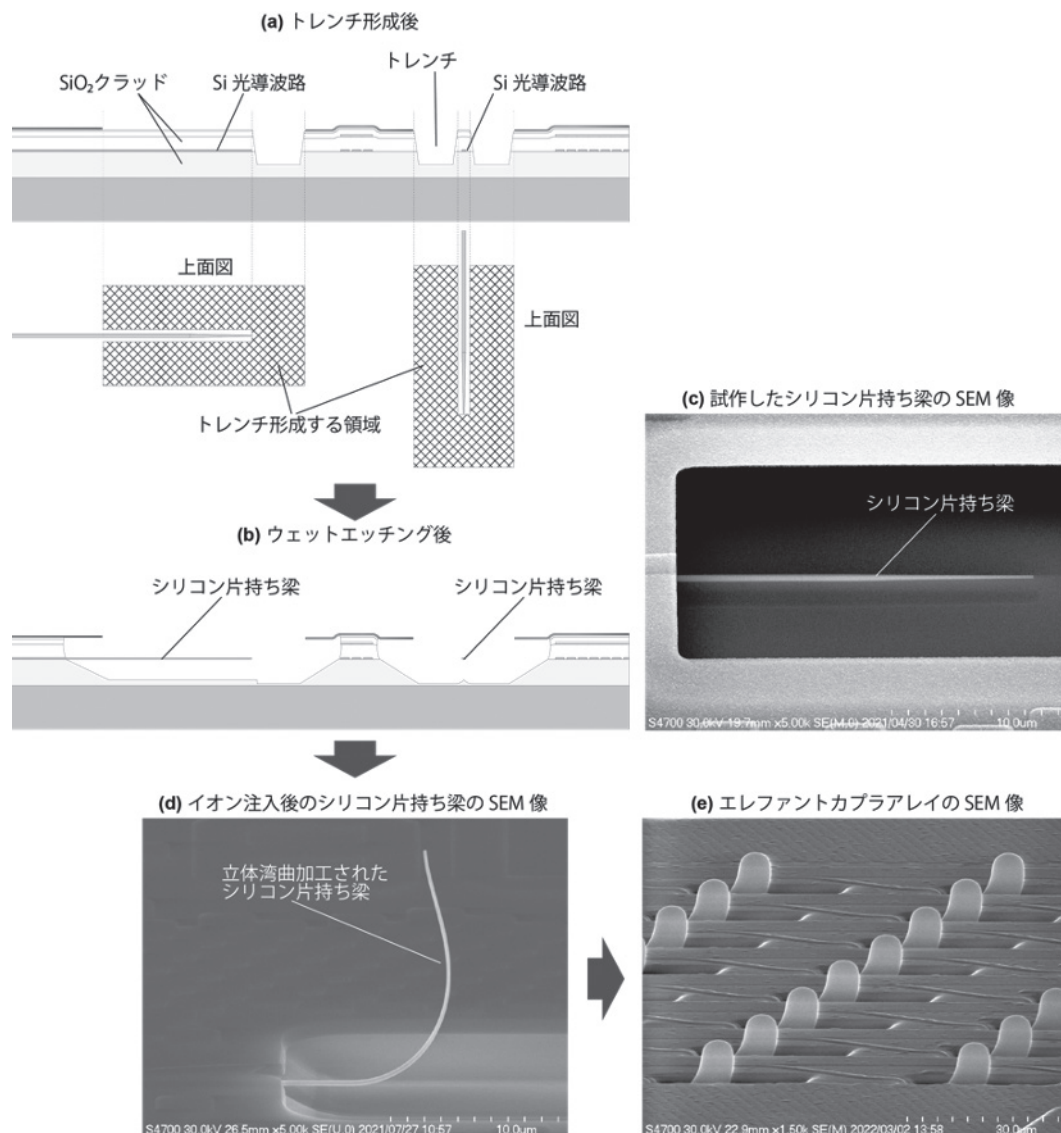


図3：試作結果(a-c)トレンチ形成の模式図と試作したシリコン片持ち梁のSEM像、(d)イオン注入後のシリコン片持ち梁のSEM像、(e)完成したエレファントカプラのSEM像

に示す。ウェットエッチングにはフッ酸溶液を用い、超純水、IPA、ハイドロフルオロエーテルと順に表面張力の小さい有機溶剤に置換した後に乾燥する。当初の狙い通り、長さ $20\ \mu\text{m}$ を超えるシリコン細線導波路の片持ち梁を形成することが確認できた。片持ち梁形成プロセスの最大の難関であるステイクションについては MEMS 分野で長年の研究開発の蓄積があるのだが、一辺マイクロメートルオーダーの断面をもつ MEMS デバイスに比べ、エレファントカプラの場合は $200\ \text{nm} \times 400\ \text{nm}$ の断面でかつ $20\ \mu\text{m}$ 超の長さの片持ち梁を必要としたため非常に挑戦的な課題であった。その様な悪条件の中、ステイクション回避の究極的な手法と言える超臨界乾燥法を用いること無くシリコン片持ち梁を形成可能なプロセス技術を開発できた事の価値は非常に高い。図 3 (d,e) に本開発プロセスを用いて試作したエレファントカプラのイオン注入後の SEM 像と完成後の SEM 像を示す。偏波無依存化に適した構造を形成することが出来ており、アレイ配置にも展開可能であることを実証することが出来た。

3. まとめ

本研究では、TE・TM 両偏波に対応し、かつ低波長依存・高効率な表面型の立体湾曲光結合器(エレファントカプラ)を実現するためのプロセス技術の開発を行った。偏波無依存のエレファントカプラを実現できたことは、光通信応用だけでなく、LiDAR や OTC などのセンサ応用においてもシリコンフォトニクス技術のもつポテンシャルを引き出した新奇デバイスの開発に貢献できると考えている。

4. 謝辞

本研究は、2019 年度公益財団法人日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行ったものである。同助成会に心より感謝致します。

5. 参考文献

- 1) G. Son et al., “High-efficiency broadband light coupling between optical fibers and photonic integrated circuits” *Nanophotonics*, 7.12 (2018)
- 2) R. Marchetti et al., “Coupling strategies for silicon photonics integrated chips [Invited],” *Photon. Res.* 7, 201-239 (2019)
- 3) T. Yoshida, M. Nagao, S. Kanemaru, “Development of thin-film bending technique induced by ion-beam irradiation”, *Applied Physics Express*, vol.2, pp.06651, 2009
- 4) T. Yoshida, E. Omoda, Y. Atsumi, M. Mori, and Y. Sakakibara, “Elephant Coupler: Vertically Curved Si Waveguide with Wide and Flat Wavelength Window Insensitive to Coupling Angle”, *European Conference on Optical Communications 2015, Valencia, Spain, PDP.1.1. Postdeadline paper.*
- 5) T. Yoshida, S. Tajima, R. Takei, M. Mori, N. Miura and Y. Sakakibara, “Vertical silicon waveguide coupler bent by ion implantation”, *Optics Express*, vol. 23, no. 23, pp. 29449-29456, 2015.
- 6) T. Yoshida, E. Omoda, Y. Atsumi, T. Nishi, S. Tajima, N. Miura, M. Mori and Y. Sakakibara, “Vertically Curved Si Waveguide Coupler with Low Loss and Flat Wavelength Window”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no.7, pp.1567, 2016.

- 7) 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," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.56, No. 9, pp.090307-1-4, 2017.
- 8) 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.*, Vol.26, No. 8, pp.10400- 10407, 2018.
- 9) T. Yoshida et al., "Improvement of fabrication accuracy of vertically curved silicon waveguide optical coupler using hard-mask shielded ion implantation bending," *Jpn. J. Appl. Phys.* 59, 078003 (2020).