

シリコン細線光導波路機能素子の偏波無依存化

太縄 陽介 岡山 秀彰
佐々木 浩紀

クラウドサービスの進展に伴い、通信ネットワークを伝送される情報量は指数関数的に増大している。光ファイバ伝送は、電気有線伝送と比較して低損失(1kmあたり5%の減衰)、広帯域(数THzの信号帯域)という特長がある。そのため、光通信ネットワークは、高速かつ大容量の情報伝送に適しており、クラウドサービスを支えるインフラストラクチャーとして重要性がますます増加している。

光ファイバ伝送では、電気信号を光に変え、受信した光信号を電気信号に変換する光トランシーバが用いられている。あらゆる装置を高速な光通信ネットワークに接続するためには、光トランシーバの一層の小型化と、消費電力の大幅な低減が必要であり、それらを実現する技術として、近年シリコンフォトニクス技術が注目されている¹⁾。

シリコンフォトニクスでは屈折率の高いシリコンを光導波路材料として使用することで、強い光閉じ込め効果が得られるため、光配線を数 μm の曲率半径で曲げることが可能となる。このため、従来の石英系導波路を用いた光集積回路に比べ、光回路の面積を1/100以下に小型化できる。

われわれは、光機能回路を数百 μm 四方に小型化できるシリコン細線導波路モノリシック光集積回路の開発を進めている。光通信ネットワークで使用されるシングルモード光ファイバは、回転対称な円形断面をしているため、シリコン細線導波路に結合される光の偏波状態はさ

まざまである。そのため、シリコン細線導波路で構成する光機能回路も、偏波状態にかかわらずに設計特性を実現する、偏波無依存化が必須となる。本稿では、光トランシーバの実現に必要な各種光機能回路素子の偏波無依存化設計手法と、試作評価結果について報告する。

シリコン細線光導波路

図1(a)に、シリコン細線導波路の断面構造を示す。SOI(Silicon on Insulator)基板上的パターンをプラズマエッチングすることで、導波路コア部分を形成する。次に導波路の保護層として、クラッド層の SiO_2 (石英)を化学気相成長法で堆積させた。光トランシーバとしてFTTH(Fiber To The Home)を想定し、そこで使用される1310nmおよび1490nm波長帯域で単一モードとなる導波路構造を計算し、一辺が300nmの正方断面形状を採用した。この導波路は、基板に平行な電界成分を持つTE偏波と、基板に垂直方向な電界成分を持つTM偏波が伝搬可能であるが、断面形状が正方形なため、偏波依存性はない。図1(b)に、実際に作製したシリコン細線導波路の断面形状のTEM(透過電子顕微鏡)観察写真を示す。設計値に対する作製誤差は1~2%程度であることが確認できた。

図2に、試作したシリコン細線導波路の波長1490nmにおける伝搬損失の偏波依存性を示す。

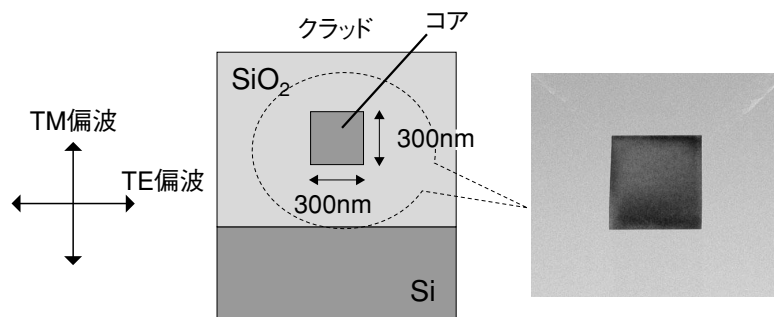


図1 (a)シリコン細線導波路断面構造と (b)試作した導波路断面TEM写真

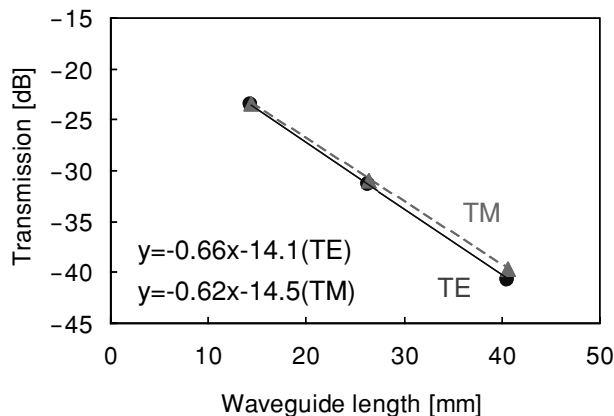


図2 導波路伝搬損失の偏波依存性 ($\lambda=1490$ nm)

伝搬損失の評価は、3種類の長さの異なる導波路サンプルを用意し、伝搬損失と導波路長の関係をプロットして、その傾き値を算出することで、単位長さあたりの伝搬損失を求めた。伝搬損失は、TE偏波に対して -0.66dB/mm 、TM偏波に対して -0.62dB/mm であり、試作したシリコン細線導波路の偏波変動損失が小さいことが確認できた。シリコン細線導波路では、曲げによる損失や媒体による吸収が無い限り、光は減衰することなく伝搬が可能である。しかし実際には、導波路パターンの描画プロセスやエッチングプロセスなど、導波路の作製工程において生じる側壁のラフネスにより、伝搬光と放射モードとのカップリングが生じ、これが伝搬損失の主たる要因となる。現在、細線導波路の作製プロセスの改善を行っており、 -0.3dB/mm 程度までの伝搬損失の改善にめどが立っている。典型的な光トランシーバの導波路長として、2mm以下程度を想定しているため、実用上十分な伝搬損失が得られていることがわかる。

FTTHトランシーバ用光回路

図3に、現状のGE-PON(Gigabit Ethernet Passive Optical Network)²⁾ FTTHの各家庭における光端末で使用されているトランシーバ用に開発中の光回路を示す。光回路は、光源である半導体レーザー(LD)と受光器であるフォトディテクタ(PD)に、波長合分波フィルタとシリコン細線光導波路を組み合わせた構成である。フィルタは、上り信号の1310nmと下り信号の1490nmとを合分波するフィルタと、TV用信号の1550nmを分離するブロックフィルタからなる。

シリコン細線導波路は、シリコンで作製するコア(屈折率3.5)と石英のクラッド(屈折率1.45)との大きな屈折率差により、強い光閉じ込め効果が得られるため、図3に示すフィルタを数百 μm 四方の極めて小面積で実現可能であり、光回路を従来の石英系導波路に比べて1/100以下に小型化が可能である。その一方で、伝搬される光の

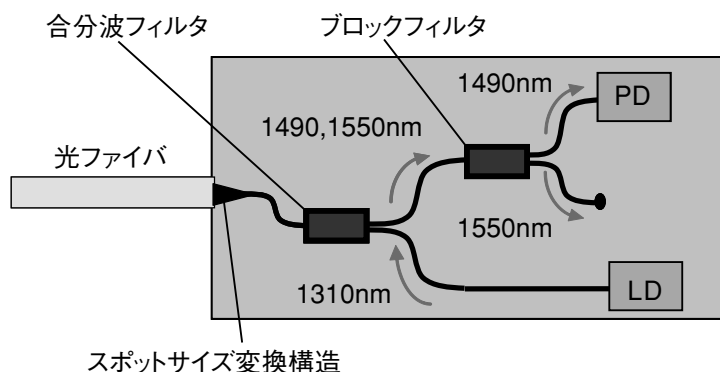


図3 FTTH(GE-PON)トランシーバ用光回路

モード径は、シングルモード光ファイバでは10 μ m程度なのに対してシリコン細線導波路では数百nm程度と大きく異なるため、そのままでは結合効率が著しく低くなってしまふ。

そのため、光ファイバとの結合部分には、シリコン細線導波路のモード径を、光ファイバのそれにあわせて拡大するスポットサイズ変換構造が必要になる。

これらのスポットサイズ変換構造、合分波フィルタ、ブロックフィルタといった光機能素子は、いずれも伝搬する光の偏波に関係なく動作することが必要なため、各機能素子の偏波無依存化が、シリコン細線光導波路による光トランシーバの実現には必須となる。

スポットサイズ変換構造の偏波無依存化

スポットサイズ変換構造には、シリコン細線導波路の横方向幅をテーパ状に加工し、導波路の先端幅寸法を100nm程度まで小さくすることで、光の閉じ込めが弱くなりモード径を拡大可能な、逆テーパ型を採用した。実験で使用する先球ファイバとの結合で偏波無依存を達成するため、数値シミュレーションを行い、最適な設計細線導波路先端幅として、100~120nmを得た。

図4に、このスポットサイズ変換構造を有するシリコン細線導波路と、先球ファイバとの結合効率の関係を示す。細線導波路の先端幅を100nmから200nmまで変化させた構造で試作をし、設計と一致する120nmの先端幅で、TE、TM両偏波に対して結合効率-3dBが得られ、偏波無依存の結合特性を確認した。現在、更なる結合効率の向上のために、スポットサイズ変換構造の最適化を検討中である。

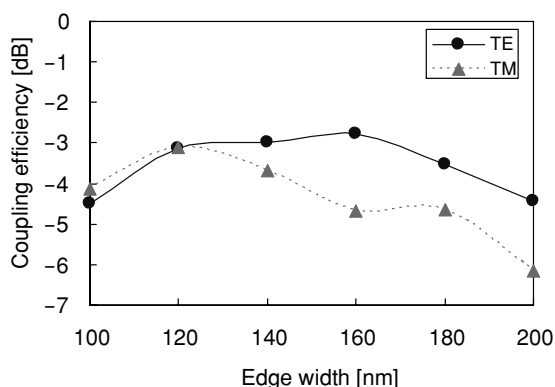


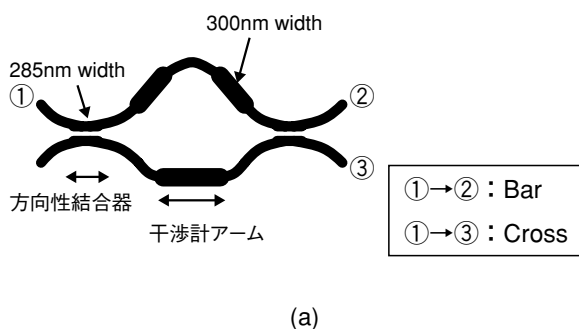
図4 スポットサイズ変換構造と先球ファイバの結合効率評価結果

合分波フィルタの偏波無依存化

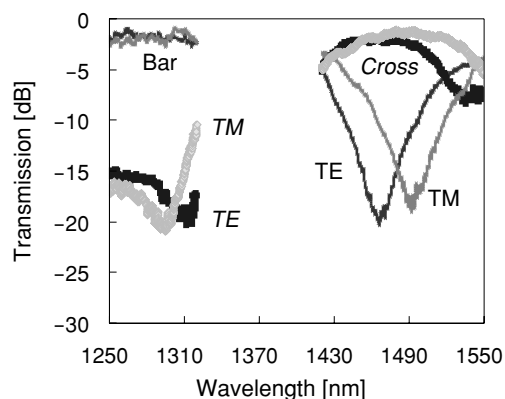
図5(a)に示す方向性結合器と干渉計アームとからなる、マッハツェンダ干渉器で構成した合分波フィルタを開発した。

単独のシリコン細線導波路とは異なり、方向性結合器部分では、2つの導波路間で光の結合が生じるため、正方形断面形状の導波路のままでは、偏波無依存特性が得られない。数値シミュレーションの結果、方向性結合器の導波路断面幅を、コア高さよりわずかに狭い285nmとすることで、偏波無依存特性が実現できることが判明した。干渉計アーム部の導波路断面は、300nm \times 300nmの正方形断面とし、それ以外の曲線部分ではTEとTM偏波とのカップリングを抑制するために、285nm幅とした。

図5(b)に試作した合分波フィルタの特性を示す。直交するTEとTMの両偏波に対し、波長1310nmおよび1490nm帯域において、15dB以上のクロストークを確保して波長分離機能を確認できた。



(a)



(b)

図5 (a) マッハツェンダ干渉器構造 (b) 合分波フィルタ特性

図5(a)の干渉計アームのような細線導波路部分では、導波路の設計形状と作製された実際の形状との間に誤差が生じやすい。そのため、合分波フィルタの作製誤差耐性を高めるために、干渉計アームの設計改良を試みた。

干渉器型の素子の場合には、導波路自体が偏波無依存性を有していなくても、干渉器全体としての干渉条件を偏波無依存化することが可能である。そこで、干渉計アームを構成する2つの導波路の構造を異なるものとして、互いに違う偏波依存性を持たせ、一方の導波路で生じた位相の偏波差を他方の導波路の位相差で打ち消す設計手法を用いた。この設計により、作製誤差耐性の大きな幅広導波路が利用可能となる。

図6(a)に、偏波無依存設計を行ったマッハツェンダ干渉器の構造を、図6(b)にシミュレーション結果を示す。作製誤差トレランスに優れた幅広導波路構造を有しながらも、所望の波長分波特性が実現できていることがわかる。実験的にもこの効果を確認している。

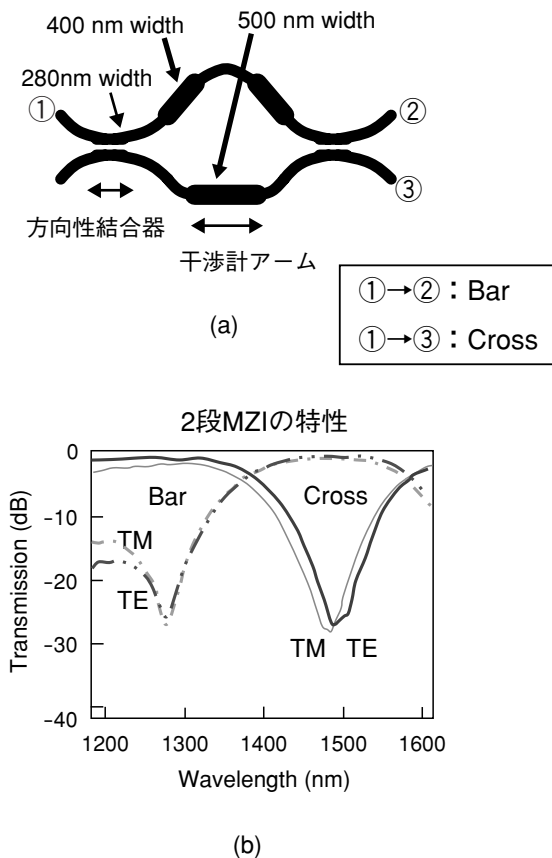


図6 (a) マッハツェンダ干渉器の干渉条件による偏波無依存化設計と (b) シミュレーション結果

ブロックフィルタの偏波無依存化

ブロックフィルタは、特定の狭帯域の波長を阻止するためのフィルタである。狭帯域特性を実現するために、干渉器型ではなく、ブラッグ反射を用いたフィルタ構成とした。

設計ではまず、ブラッグ反射波長を偏波によらず同一とするために、光が細線導波路を伝搬している際に感じる屈折率である等価屈折率を同じにする必要がある。このために、図7(a)に示すブラッググレーティングの導波路断面を正方形とし、その上でピッチとデューティ比の最適設計を行った。

この段階では、分離したい波長の反射回折率が偏波によって異なる。そのため、効率の低い方の偏波が十分に回折されることを目標として、ある程度強い回折が起こるように、グレーティングの凹凸の深さあるいはグレーティング部分の全長を十分にとる設計を行った。上部クラッドに高屈折率材料を用いる方法などで回折効率の調整も可能である。

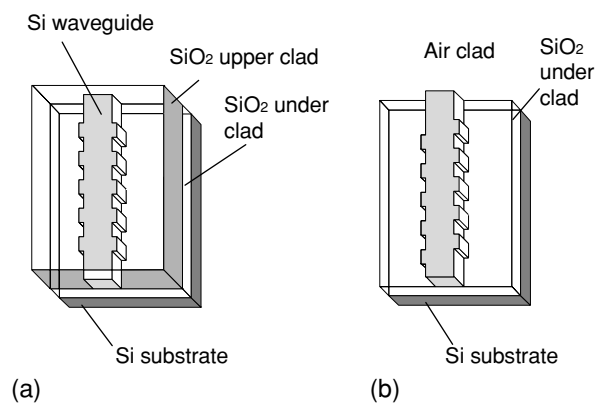


図7 ブロックフィルタの (a) グレーティング構造と、(b) 偏波変換グレーティング

図8(次ページ)に、試作したブロックフィルタの評価結果を示す。グレーティング構造の作製誤差のために、波長特性は設計値よりも短波長側にシフトをしているが、TE、TM偏波ともに1280nm付近の波長が反射され、偏波無依存な波長阻止特性を確認できた。

既に述べた以外の設計方法として、ひとつの偏波から他の偏波に変換する機能を有するグレーティングを使用する構造の検討も進めている。偏波を入れ替える機能によって、偏波間の差をより容易に低減することが可能となる。また、偏波無依存な波長選択のほか、偏波を利

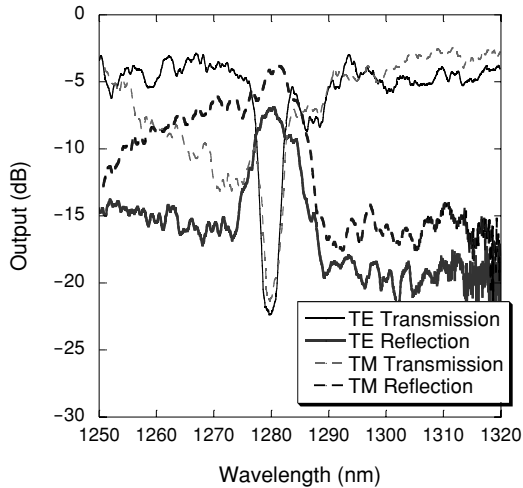


図8 試作したブロックフィルタの特性

用した様々な光信号処理にも応用可能な素子と考えられる。シリコン細線導波路では、コアとクラッドの屈折率差が大きいため、比較的大きな伝搬方向の電場成分をもち、両偏波で共通するこの電場成分を介して偏波間の変換を行うことができる。導波路構造として、上下非対称のもの、グレーティング構造として左右非対称にすることで、偏波変換用のグレーティングが実現される。例えば図7(b)に示す、上部クラッドを空気とした導波路構造が採用できる。このような単純な構造を採用することで、プロセスに負荷をかけずに作製が可能となる。図9にはシミュレーションによる計算結果を示す。TM(TE)偏波が所定の波長でTE(TM)偏波に変換され、反射されることでブロックフィルタとして動作可能であることが確かめられた。

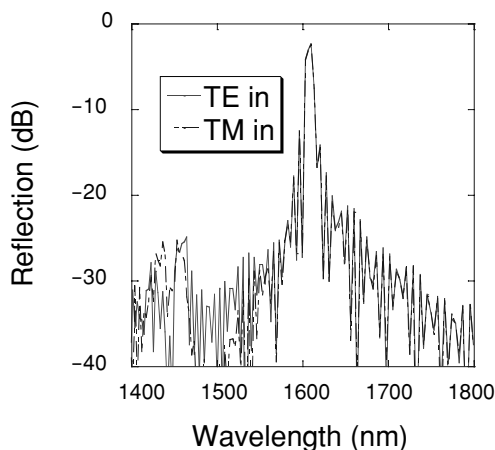


図9 偏波変換グレーティングを用いたブロックフィルタ特性のシミュレーション結果

まとめ

シリコンフォトニクス技術を光通信ネットワークに応用するためには、シリコン細線導波路で構成した光機能デバイスの偏波無依存化が必須の課題である。FTTH用光トランシーバを想定し、必要とされる各種光機能デバイスの偏波無依存化設計を行い、試作デバイスの偏波無依存動作を確認した。

今後、各デバイスの更なる特性向上とともに、光機能デバイスを複合実装することで、光トランシーバ機能の特性向上を進めていく。◆◆

参考文献

- 1) 志村大輔, 他: シリコンフォトニクス光電融合モジュール技術, OKIテクニカルレビュー216号, Vol.77 No.1, pp.4-7, 2010年4月
- 2) IEEE 802.3, 2008.

筆者紹介

太縄陽介: Yosuke Onawa. 研究開発センタ 機器技術研究開発部 光応用機器技術チーム

岡山秀彰: Hideaki Okayama. 研究開発センタ 機器技術研究開発部 光応用機器技術チーム

佐々木浩紀: Hironori Sasaki. 研究開発センタ 機器技術研究開発部 光応用機器技術チーム

シリコンフォトニクス

シリコンを材料とする光素子技術の総称。従来の光素子は、ヒ化ガリウム、リン化インジウムなどの化合物半導体、あるいは石英などの誘電体を材料とすることが一般的であった。シリコンを材料とすることにより、光素子の小型化、光素子とシリコンLSIの集積化、生産性の向上などが期待される。

シリコン細線導波路

光導波路とは、所望の経路に光を閉じ込めて伝搬させるための光の通り道であり、シリコン細線導波路はコアがシリコン、クラッドが石英の材料からなる。光導波路の光を閉じ込める強さはコアとクラッドの比屈折率差に関連する。従来の石英光導波路と比べて、シリコン細線導波路は非常に大きな比屈折率差を有するため、光の経路を鋭く曲げても光が漏れないので、光回路のレイアウト面積を小さくすることができる。

偏波依存性

光は電磁界であり、電磁界の振動方向がお互いに直交するTEとTM成分（偏波）に分離できる。偏波状態により、光が媒体から感じる屈折率が異なるため、伝搬特性に偏波依存性が生じる。

FTTH (Fiber to the Home)

加入者宅まで接続された光ブロードバンド網。

SOI (Silicon on Insulator)

シリコン基板上に、石英とシリコン結晶の薄膜を順次形成した構造を持つ基板。量産製法が確立されており、シリコン細線光導波路を製造するための安価な材料として利用できる。

GE-PON (Gigabit Ethernet-Passive Optical Network)

PONとは、ビームスプリッタなど光電変換を行わないパッシブな素子で構成され、1:Nの双方向通信を可能とするネットワークであり、GE-PONとは、アクセス網としてのPONに、Ethernetのフレームをそのまま送受信させて、1Gbpsの通信速度を実現する技術を指す。

スポットサイズ変換構造

光のビームスポットの大きさを変換する機能を持つ素子構造。光ファイバとシリコン細線導波路のスポットサイズが異なることで生じる結合損失を低減するために使用される。

波長合分波フィルタ

ひとつの経路に重ね合わされた異なる波長の光を波長に応じた経路に分ける機能、および、異なる経路を通過して来た異なる波長の光をひとつの経路に重ね合わせる機能を持つ光学素子。

ブラッグ反射

周期的に同一構造が繰り返す形態を有した素子による光の反射で、特定の光波長で強い反射が生じる。