

シリコンフォトニクス 光電融合モジュール技術

志村 大輔
岡山 秀彰

小谷 恭子
八重樫 浩樹

高橋 博之

近年ブロードバンドサービスが普及したことにより、情報の伝送量は増加の一途をたどっている。このため、情報処理システムにおける情報処理能力の大幅な増強が期待されている。情報処理システムにおける信号処理は、装置間、装置内部のボード間、ボード内部のチップ/モジュール間といった区分が可能であるが、現在、装置間や一部ボード間まで、光ファイバや光導波路が普及しつつある。ボード内部の近接チップ間を高速に電気配線で接続するには、電磁干渉ノイズや配線数、配線サイズの問題があり、また年々増加する情報伝送の容量から見ても電気配線では接続できなくなり、光配線技術に対する期待は大きい。

光配線技術の中でも光回路基板として検討されているものとして、ポリマー導波路やシリコンフォトニクスなどが挙げられる。シリコンフォトニクスの場合、シリコン酸化膜やポリマー導波路に比べ屈折率が非常に大きいことから、光の閉じ込めが強く、曲げ損失の影響を受けにくい。また近年のシリコンプロセスの進展によりnmオーダーの加工が可能になったこと、良質なSOI (Silicon on Insulator) 基板が入手可能になったことから、研究が盛んに行われるようになってきている。我々は、シリコンフォトニクスの中でもシリコン細線導波路の研究開発を行っている。本報告では、シリコン細線導波路の設計および基礎特性評価結果を報告し、続いて光回路を構成する上で重要な波長合分波器についてのシミュレーションおよび評価結果を報告する。最後に集積化した例として一心双方向通信モジュール用チップについて報告する。

シリコン細線導波路

シリコン導波路は従来から研究開発が盛んに行われており、主に図1に示す2種の構造がよく用いられている。微細加工の困難さの点から、図1 (a) に挙げられるようなリブ型導波路 (導波路幅3~5 μm) がよく研究されていた。しかし、リブ型導波路の場合、回路自体も大きく、さらに従来開発が行われているポリマーを利用した導波路と比べメリットが少ない。一方、図1 (b) に示すような細線型導波路の場合、リブ型導波路と比べて断面積と

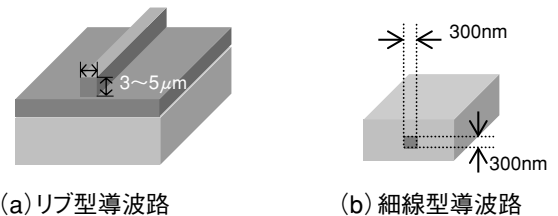


図1 導波路構造

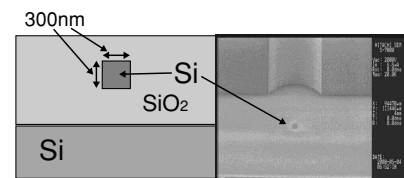


図2 実際に作製したシリコン導波路
左：概略図 右：SEM写真

して1/100程度になるため回路集積および小型化に非常に有効な構造となる。本研究では、小型集積化を目的としているため、細線型導波路を採用した。また基礎特性評価を行う上で、一心双方向通信として代表的なFTTH (Fiber To The Home) で用いられる波長1.31 μm および1.49 μm 帯での波長領域におけるシリコン細線導波路の設計条件を探った。コアサイズは1.31 μm と1.49 μm の波長で同時にシングルモードとなり、偏波無依存化も達成できる厚み300nm \times 幅300nmを採用した。図2に実際に作製したシリコン導波路の断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観測した結果を示す。

導波路基礎特性評価

作製した導波路の直線導波損失測定を行った。評価系は波長可変光源からの出力光を導波路に入射させ、導波路からの出射光をスペクトラムアナライザにより受光する方式とした。導波路と光ファイバの結合方法は、劈開により導波路端面を露出させ、両端に先球ファイバを調芯して軸合わせする方法で行った。今回測定した導波路においては、作製誤差によりPolarization Dependent Loss (PDL) 値最大2.0dBとなっているため、偏波制御を行い受光値が最大となる偏波状態で測定を行っている。

また、導波路単体の伝播損失を評価するため、接続損失を除外できるカットバック法を用いた。測定手順として、導波路長12mmから2mmごとと短くしていき、コア幅260、300、320、400、500、700nmの導波路についてそれぞれ測定を行った。

図3に波長1.54 μm における各導波路幅の損失測定結果を示す。導波路幅300nmにおける導波損失は0.75dB/mmという比較的良好な値が得られている。

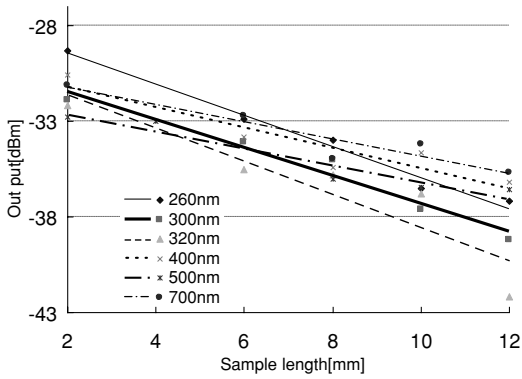


図3 直線導波路 損失測定結果

直線導波路と同様な評価方法で、曲線導波路の損失測定を行った。曲線導波路の評価パターンは半径1、2、5、10、20 μm の90度の円弧14個を直線でつないだものを利用した。図4に試作した曲線導波路半径 $R=2$ および20 μm の曲線部分のSEM画像を示す。

同じ長さの直線導波路と比較した場合の過剰損についての測定結果を図5に示す。これより、半径5 μm 以上では曲線による損失はほとんど見られず、今後のフィルタ作製においてフィルタの小型化が可能であることを示唆する結果となった。

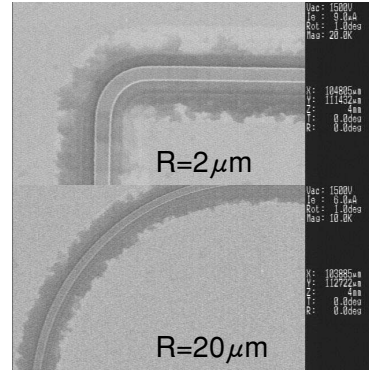


図4 曲線導波路 R=2, 20 μm SEM画像

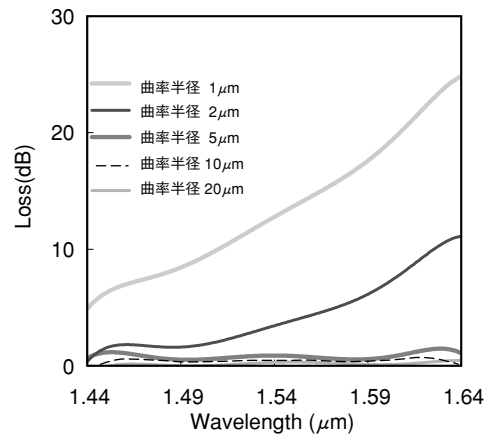
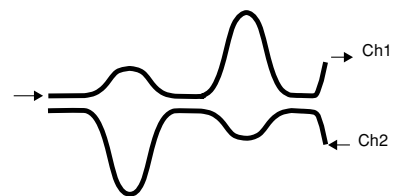


図5 曲線導波路 損失測定結果
R1-20: 半径1-20 μm の曲線導波路

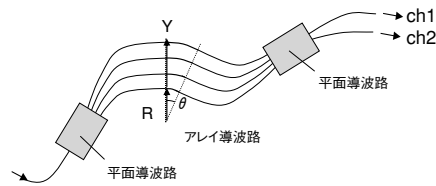
波長合分波器の設計と試作

波長合分波器は、光回路を構成する重要な要素のひとつである。波長合分波器に求められる特性および設計指針としては、

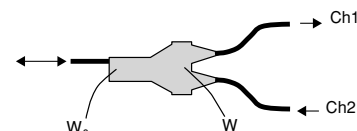
- 偏波無依存動作
 - 合分波時における導波光ロスの低減
 - 回路全体の導波損失を抑えるため、波長合分波器部分のサイズは1mm以下
 - 一般利用できるプロセス加工で可能な形状設計
 - 寸法誤差、温度変化に対して許容範囲が広い
- などが挙げられる。シリコン細線導波路による波長合分波器として、多段マッハツェンダ型、Arrayed Waveguide Grating (AWG) 型、マルチモード干渉 (MMI) 型などが挙げられる。図6に各種波長合分波器の



(a) 多段マッハツェンダ型



(b) AWG型



(c) MMI型

図6 各種波長合分波器 概略図

概略図を示す。

図6 (a) に示した多段マッハツェンダ型波長合分波器の場合、曲がり導波路部分の損失を考慮し、曲がり曲率半径を20 μm としても全長は300 μm 程度であり、非常にコンパクトなデバイスが設計できる。

設計した4段マッハツェンダ型波長合分波器について、二次元FDTD (Finite Difference Time Domain) 法により計算した波長特性を図7に示す。クロストークは、1.31 μm および1.49 μm 帯域内で25~40dB (同方向伝播) である。双方向通信モジュールにこの波長フィルタを用いるときには、送信光と受信光は互いに逆方向に伝播する。ここでは、同方向伝播時のクロストークの内、反射で戻ってくる分だけが実際のクロストークとして寄与するので、光送受信モジュールに適用した際の実効的なクロストークは40dB以下に抑えられることが期待できる。

しかし、直線および曲線導波路の評価結果より作製誤差による偏波依存性が発生すること、また多段マッハツェンダの場合には、二本の導波路の幅が作製誤差により異なると所望の合分波特性が得られない欠点がある。比較的作製誤差に強いと思われる構造として図6 (b) に示すようなAWG型および、図6 (c) に示すようなMMI型も検討を行っている。AWG型において、素子中央で点対称な構造とした構造を採用した場合、小型化が可能となり、約200 μm 角に収めることができた。MMI型においては、受発光素子を接続する側の二本の導波路間のギャップが相対的に小さくなるように、導波路幅にテーパを設けた。これによりギャップへ漏れ出す光が低減される。現在これらの波長合分波器についても評価を行っている。

図8に動作概略および実際に作製した波長合分波器の観

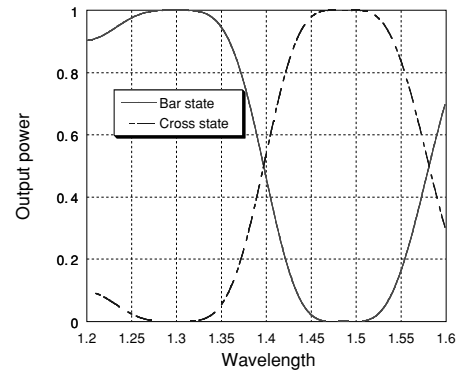


図7 4段マッハツェンダ型波長合分波器
二次元FDTD法シミュレーション結果

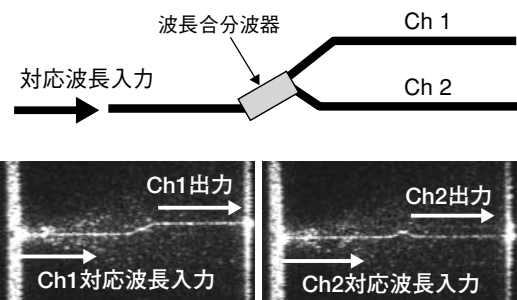


図8 波長合分波器 光導波軌跡観測例

測例を示す。測定は、基板上面側から赤外線カメラを用いて光導波路の導波光軌跡を観測している。入力ポートよりチャンネル1に対応した波長を入力した場合、波長合分波器により出力ポートが選択され、チャンネル1にのみ光が導波していることがわかる。また、逆にチャンネル2に対応した波長を入力した場合も同様の結果が確認できた。

TIPS

【基本用語解説】

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。従来光素子は、ガリウムヒ素、インジウムリン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、生産効率の向上といったメリットが期待できる。

SOI (Silicon on Insulator) 基板

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。

スポットサイズ変換器

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。光入出力における光パワー損失を低減するために設ける。

シリコン細線導波路

シリコン細線導波路は、コアはシリコンを、クラッドは石英を材料とする光導波路。光導波路とは、所望の経路に光を閉じ込めて伝播させるための、光の通り道。従来から用いられる石英光導波路に比べて光の経路を鋭く曲げることができる(最小曲率半径5ミクロンが可能。石英光導波路の約1/1000)ので、小さな面積に光導波路を配置できる。

FTTH (Fiber to the Home)

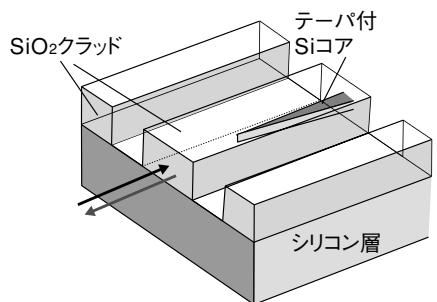
加入者宅まで接続された光ブロードバンド網

波長合分波器

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、異なる経路を通っ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。

一心双方向通信モジュール

シリコン導波路を用いた応用製品として、一心双方向通信モジュールを例に挙げて説明を行う。従来の一心双方向通信モジュール、たとえばOKI開発のmBOSA (Bidirectional Optical Subassembly) モジュール¹⁾の場合、波長分割フィルタ、レンズ2枚、ボールレンズ1個およびLD (Laser Diode), PD (Photo Diode) 等を集積化している。シリコン細線導波路を用いた場合、支持基板に波長分割フィルタ、スポットサイズ変換部等を含んだ導波路を作成することにより、必要最低素子はLD, PDとなる。コストの主な要因となる波長分割フィルタ自体を削減することができるため、作製コストの大幅削減が可能となる。今回作製したモジュールは、波長分割フィルタ部分にシリコン細線導波路で構成する波長合分波器を用い、LD-導波路およびファイバ-導波路間結合には、図9 (a) に示すようなテーパ型スポットサイズ変換をPD-導波路結合には、図9 (b) に示すグレーティング型結合を利用した (図9)。



(a) テーパ型光スポットサイズ変換器

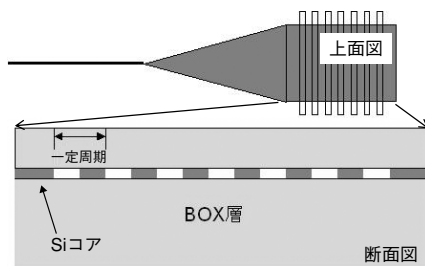
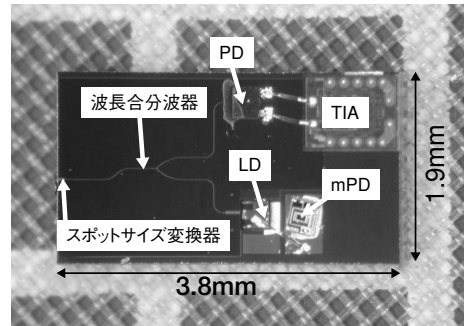


図9 各種光学素子との結合器

実際に集積化した例を図10に示す。1.9mm×3.9mmの基板上にテーパ型スポットサイズ変換器および、グレーティング型結合器、波長合分波器を内包したシリコン導波路を作製した。作製した基板上へ最初にLDおよびPDを表面実装方式により搭載固定、次にモニターPD (mPD) およびトランスインピーダンスアンプ (TIA) の搭載固定を行った。LDおよびPDの平均シエア強度は、MIL規格

図10 一芯双方向通信モジュール作製例
LD・PD・mPD・TIAを搭載したシリコン導波路基板

MIL-STD-883G²⁾ で規定される必要強度の2倍以上と良好な値を示した。今回作製したチップを外部電子回路に集積化およびパッケージ化することにより小型の光モジュールが実現可能となる。

まとめ

我々が開発を行っているシリコン細線導波路の開発状況について報告を行った。各種光学部品設計を行い、実際に作製したサンプルの評価を行った。作製誤差の影響および端面処理の影響により、偏波無依存動作が確認できなかったが、形状実測値からシミュレーションへのフィードバックや、作製誤差に強い合分波器構造を採用することにより改善できると考えている。各種光学部品を組み合わせた一心双方向通信モジュール用チップを作製した場合、1.9mm×3.9mmの大きさでモジュールを実現できることを確認した。今後の展開としては、さらなる集積化を目指し、複数の光学素子に対応した各種素子配置パターンの検討を行い、それに対応する波長合分波器、入出力ポートの検討を行う予定である。◆◆

参考文献

- 1) 小谷恭子 他：Siレンズを用いた低コストFTTH用mBOSAチップ、沖テクニカルレビュー206号, Vol.73 No.3, pp.30-33, 2006年
- 2) MIL規格：MIL-STD-883G pp.354-355

筆者紹介

志村大輔：Daisuke Shimura. 研究開発センタ ネットワークテクノロジーラボラトリ
 小谷恭子：Kyoko Kotani. 研究開発センタ ネットワークテクノロジーラボラトリ
 高橋博之：Hiroyuki Takahashi. 研究開発センタ ネットワークテクノロジーラボラトリ
 岡山秀彰：Hideaki Okayama. 研究開発センタ ネットワークテクノロジーラボラトリ
 八重樫浩樹：Hiroki Yaegashi. 研究開発センタ ネットワークテクノロジーラボラトリ