

## 招待論文

## Si 細線導波路

馬場 俊彦<sup>†a)</sup>坂井 篤<sup>†</sup>深澤 達彦<sup>†</sup>大野 文彰<sup>†</sup>

## Si Photonic Wire Waveguides

Toshihiko BABA<sup>†a)</sup>, Atsushi SAKAI<sup>†</sup>, Tatsuhiko FUKAZAWA<sup>†</sup>, and Fumiaki OHNO<sup>†</sup>

あらまし Si 細線導波路は  $0.5\ \mu\text{m}$  角以下の微小断面をもつ Si をコアとし、波長  $1.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$  を伝搬帯とする単純なチャンネル導波路である。この導波路では、コアとクラッドの巨大な比屈折率差のおかげで、半径数  $\mu\text{m}$  の微小曲げにおいても十分な低損失が得られる。更に時間領域有限差分法を用いた精密な設計により、損失  $0.3\ \text{dB}$  以下の微小な分岐と交差も可能になる。これらをうまく組み合わせると、小型の H トリー型光信号分配回路、マッハツェンダ干渉計、アレー導波路回折格子などが実現される。この導波路には、従来の様々なシリカ素子を劇的に微小化する可能性があり、高密度、高機能な光集積回路の母体として発展することが期待される。

キーワード Si 細線, 光導波路, シリコンフォトニクス, SOI, 光集積回路

## 1. ま え が き

現在、実用化されているシリカ系光導波路は、放射損を低く抑えるために曲げ半径を  $\text{mm}\sim\text{cm}$  オーダと大きくする必要があり、結果として光素子や光回路が  $1\sim 100\text{cm}^2$  といった大きな面積を占有するという問題がある。 $\mu\text{m}$  オーダの曲げ半径を許容する微小な導波路があれば、 $1\text{mm}^2$  以下の面積にまで光回路を微小化でき、より密度や自由度の高い光配線が可能になる。このような微小曲げの実現には、強い光閉込めが必要になる。コアとクラッドの間に極めて高い比屈折率差  $\Delta$  (コアとクラッドの屈折率をそれぞれ  $n_1$  と  $n_2$  としたとき、 $(n_1^2 - n_2^2)/2n_1^2$  で定義される) をもつ HIC (High Index Contrast の略) 導波路は、このような要求を満たす有望な候補である。シリカ系導波路の  $\Delta$  はたかだか数%であるが、HIC は 10% を超える  $\Delta$  を有する。このような高  $\Delta$  は、2 を超える屈折率をもつ誘電体や半導体をコアとし、屈折率が 1.0 の空気や 1.5 程度の低屈折率誘電体をクラッドとすることで得られる。横方向や縦方向に対して部分的に高  $\Delta$  を用いた導波路もあるが、その場合は低  $\Delta$  方向への光漏れが導波路や素

子の設計を制約する。究極的に強い光閉込めを得るには、すべての方向に対する高  $\Delta$  が望まれる。

HIC が具体的な素子に用いられたのは、1992 年 McCall らによるマイクロディスクレーザ [1] が最初である。ここでは空気に囲まれた半導体円形ディスク (一種の曲げ導波路) に光が強く閉じ込められ、直径数  $\mu\text{m}$  の微小素子でのレーザ発振が実現された。1995 年に Zhang らはディスクをリング導波路に変えてレーザ発振を実現し、サブ  $\mu\text{m}$  角の微小コア断面をもつ導波路を Photonic Wire と呼んだ [2] (和訳する際は、通常、細線導波路と呼ばれる)。また 1997 年 Foresi らは、LSI 用に開発されていた Silicon-On-Insulator (SOI) 基板に、いわゆる Si 細線導波路を製作した [3]。Si をコアとする導波路はこれ以前にも数多く報告されていた。しかしこれらはいずれも Si 膜をわずかにエッチングすることで形成される大型のリップ導波路であり、HIC のような強い光閉込めを実現するものではなかった。したがって HIC の Si 細線と呼べるものは、Foresi らの研究が最初である。その後、1998 年 Little らが同様の Si 細線でリング共振器フィルタを実証した [4]。ただし曲げを含むこの導波路の基礎特性については、2001 年 Sakai らの報告 [5] など、比較的最近になって調査された。そして直線や曲げの損失低減 [6]~[9]、曲げにおける偏波クロストークの評価 [10]、低損失な分岐 [11],[12] と交差 [13]、スポットサイズ変換器を用いた

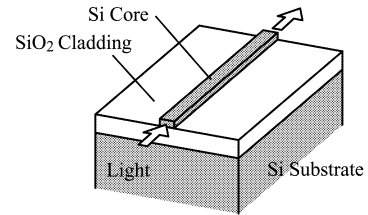
<sup>†</sup> 横浜国立大学大学院工学研究院, 横浜市  
Graduate School of Engineering, Yokohama National University, Yokohama-shi, 240-8501 Japan  
a) E-mail: baba@ynu.ac.jp

光ファイバとの高効率結合 [14],[15], H トリー型光信号分配回路 [16],[17], マッハツェンダ干渉計 [18], ラティスフィルタ [19], アレー導波路回折格子 (AWG) [20] などが次々に報告されるようになった. またファイバとの高効率結合が可能になったことで, 非線形性の評価やラマン増幅の検討も始まっている.

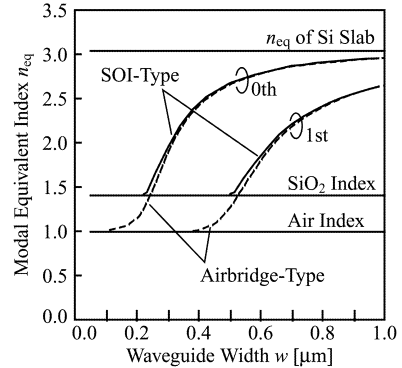
いうまでもなく Si は波長  $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$  の光通信波長帯で透明であり, 材料的に極めて安定かつ豊富である. 特に SOI 基板上的 Si はウェーハスケールの単結晶薄膜であるため, 厚さと屈折率が均一である. したがって将来に向けては, Si-LSI の CMOS 技術を活用した製作, LSI との融合による高機能化, あるいは光インタコネクションを利用した LSI 自体の高性能化など, 様々な期待が生まれている. 本論文では, この導波路の基礎特性から簡単な応用までを総合的に報告する. まず 2. では, 直線導波路の分散特性の計算, 製作, 評価を述べる. 本論文では, 全体を通して三次元時間領域有限差分 (3D-FDTD) 法を用いた計算結果を示す. 3. ~ 5. では, 基本的な導波路コンポーネントである曲げ, 分岐, 交差について述べる. 6. では微小分岐の応用である H トリー型光信号分配回路とマッハツェンダ干渉計について述べる. 7. では導波路型素子の代表例として, 極めて小型の AWG を示す.

## 2. 直線導波路の特性

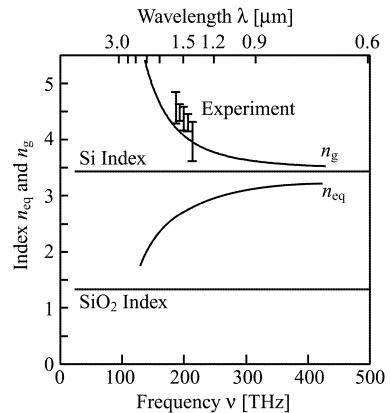
図 1(a) に FDTD 計算モデルを示す. SOI 基板最上層の方形断面をもつ Si をコアとし, その上と横には空気を仮定した. またコア直下に  $\text{SiO}_2$  を仮定する SOI 型, 空気を仮定するエアブリッジ型の 2 種類を考えた. 更にこの層の下には Si 基板を仮定した. Si,  $\text{SiO}_2$ , 空気の屈折率はそれぞれ  $3.45 \sim 3.50$ ,  $1.44 \sim 1.45$ ,  $1.0$  である. コア層の厚さは  $0.32 \mu\text{m}$ , コア直下の層の厚さは  $1.0 \mu\text{m}$  である. また断らない限り波長  $\lambda$  を  $1.55 \mu\text{m}$  とし, 主電界ベクトルが面内にある TE 偏波 (厳密には TE 的な偏波であるが, ここでは簡単のために TE 偏波と呼ぶ. TM 偏波も同様) を仮定した. 空間を分割する立方体セルは 1 辺が  $40 \text{ nm}$ , 微小時間ステップは  $0.06 \text{ fs}$  である. 導波路幅  $w$  に対するモード等価屈折率  $n_{eq}$  の変化, 及び  $n_{eq}$  と群屈折率  $n_g (\equiv n_{eq} + \omega \partial n_{eq} / \partial \omega)$  の分散特性を図 1(b),(c) にそれぞれ示す. SOI 型ではコア幅  $w$  が  $0.5 \mu\text{m}$  以下, エアブリッジ型では  $0.38 \mu\text{m}$  以下で単一モードとなる. 一般に  $n_{eq}$  は周波数に依存するが, この導波路の  $n_{eq}$  は Si の屈折率から  $\text{SiO}_2$  の屈折率までという広範囲の値をとり得るため, 依存性



(a)



(b)



(c)

図 1 直線導波路の FDTD 計算 (a) SOI 型の計算モデル (b) SOI 型とエアブリッジ型のコア幅  $w$  に対するモード等価屈折率  $n_{eq}$  (c)  $w=0.5 \mu\text{m}$  の SOI 型の基本モードの等価屈折率  $n_{eq}$  と群屈折率  $n_g$  の分散特性

Fig. 1 FDTD analysis of straight waveguide. (a) Calculation model of SOI-type waveguide. (b) Modal equivalent index  $n_{eq}$  of SOI-type and airbridge-type waveguides calculated as a function of core width  $w$ . (c) Dispersion characteristics of equivalent index  $n_{eq}$  and group index  $n_g$  of fundamental mode in SOI-type waveguide with  $w=0.5 \mu\text{m}$ .

の絶対値が大きい．つまり  $n_{eq}$  の周波数微分で与えられる構造分散が極めて大きくなり，上式で与えられる  $n_g$  が異常に大きくなる．具体的には，コア材料である Si の屈折率よりも大きい 4.5 ~ 5.0 という値に達する．これは素子サイズの縮小に有効である．

この論文中に述べるすべての実験では，市販のユニボンドタイプ SOI 基板（SOI TECH 社製）を用いた．ここで Si と SiO<sub>2</sub> 層の厚さは，計算で仮定した厚さと同じである．製作では，まず電子ビームリソグラフィを用いてゼオン社製ポジレジスト ZEP520 に導波路パターンを形成した．このレジストパターンをマスクとして直接 Si をエッチングすることもできるが，本研究では微細な個所の精度を高めるため，リフトオフを用いてパターンを Ni または Cr マスクに転写した．最後に CF<sub>4</sub>/Xe ガスを導入した誘導結合プラズマエッチングを用いて Si 層と一部の SiO<sub>2</sub> 層をエッチングした．Si コアの側壁角度は 85 ~ 90° である．このように形成された Si 細線は，そのまま SOI 型導波路として評価した．一方，後述する交差の実験では，SiO<sub>2</sub> を HF により除去したエアブリッジ型も製作，評価した．また導波路入射端はへき開により形成した．出射端は同様のへき開か，あらかじめ導波路パターンを途中で止めることで形成した．

測定では，可変波長レーザー光源からの直線偏波の光を TE か TM に合わせ，5 倍と 50 倍の二つの対物レンズにより直径約 1  $\mu\text{m}$  まで集光し，入射端から直接導波路に結合させた．出射光については，導波路上方もしくは側方からビジコンカメラで観察した．更にプリズムを用いて光路を切り換えることで光を多モードファイバに結合させ，光パワーメータで出力強度を測定した．この導波路のコア断面は空気中の光の回折限界より小さいため，出射光は  $2\pi$  を超える大きな放射立体角をもつ．そのためたとえ出射端面に何らかの散乱要因がなくても，上方で検出される光出力も十分に大きい．製作した素子の走査型電子顕微鏡写真と側方から観測した出射光の近視野像を図 2 に示す．空気中の回折限界よりもモードが小さいため，レンズ系を用いた正確な近視野像の評価は不可能であるが，それでもコアによく閉じ込められた伝搬光であることが確認される．伝搬損の評価には，様々な長さの導波路からの出射強度を比較する方法と，入出射端の間でのファブリペロー共振のフィネスから算出する方法を併用した．直接測定という意味では前者の方が望ましいが，各導波路の出射強度はへき開端面や導波路の状況に影響さ

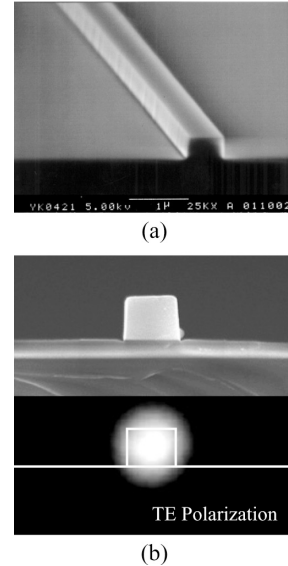


図 2 製作した  $w \sim 0.47 \mu\text{m}$  の SOI 型直線導波路 (a) 走査型電子顕微鏡 (SEM) 写真 (b) 出射光の近視野像  
Fig. 2 Fabricated SOI-type straight waveguide with  $w \sim 0.47 \mu\text{m}$ . (a) Scanning electron micrograph of the waveguide. (b) Near field pattern at cleaved output end.

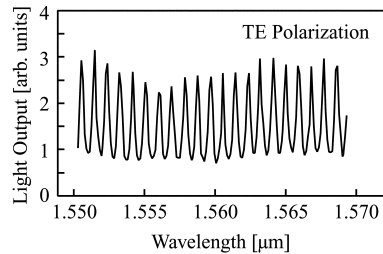


図 3  $w \sim 0.7 \mu\text{m}$  の SOI 型直線導波路に対して測定された透過スペクトルの一例 (振動は入出射端の間のファブリペロー共振を表す)  
Fig. 3 Example of measured transmission spectrum for SOI-type straight waveguide with  $w \sim 0.7 \mu\text{m}$ . Observed oscillation shows Fabry-Perot resonance between input and output ends.

れやすい．一方，後者はより簡便で，導波路ごとの評価を可能にする．図 3 は観測されたファブリペロー共振の例である．導波路端面の反射率は TE 偏波に対して 42% と計算され，この値と図 3 の共振から算出される損失値は 11 dB/mm となった．これは前者の方法による評価値とおおよそ対応している．損失の原因は側壁の凹凸による散乱と考えられ，典型的な凹凸振幅である 10 ~ 20 nm と高  $\Delta$  を考慮すると，おおよそ妥当な値で

ある．凹凸を 3 nm 以下にまで低減できれば，損失は 1 dB/mm 以下になる．一方，図 3 の共振スペクトルのピーク間隔から見積もられる群屈折率  $n_g$  を図 1(c) にプロットした．実験結果はおよそ計算値に一致し，材料屈折率よりも大きな値が実際に確認された．

### 3. 曲げ損と偏波クロストーク

微小な曲げでは，放射損に加えて，左右の非対称性に起因した偏波間クロストークが発生する．曲げ半径  $r$ （導波路中心までの半径で定義）に対する損失と偏波クロストークの計算結果をそれぞれ図 4 の実線で表す． $r$  を大きくすると，損失とクロストークは急激に小さくなる． $r > 2.5 \mu\text{m}$  では TE, TM 両偏波に対して損失 0.1 dB 以下，導波路側壁角度が基板面に対して  $90^\circ$  のときのクロストークが  $-30$  dB 以下と十分に小さくなる．

実験でこれらを評価する際には，測定に用いた光検出系の偏波依存性に注意する必要がある．たとえ入射光が TE または TM であっても，曲げを通過した後の出射光には入射光に対する直交偏波が混入し，光検出系の偏波依存性によって出射光強度が変化する．これにより，曲げ損失の評価値も影響を受ける．ここではまず入射端での光の結合効率の偏波依存性はないものと仮定し，一方，伝搬損，曲げ損，及び出射光の検出効率には偏波依存性があるものと考えた．そして両偏波に対する直線導波路と曲げ導波路の出射光，及び自由空間伝搬光の強度を比較することで，曲げ損失とクロストークを実験的に導いた．その結果が図 4 の実験プロットである．TE 偏波の曲げ損失は計算値によく一致し， $r > 1.8 \mu\text{m}$  ではほとんど無視し得るほど小さくなった．一方，TM 偏波の損失は，計算に対応して全般的に TE 偏波の損失より大きくなった．同程度の曲率半径では約 1 dB の損失が発生してしまう．十分な低損失を得るためには半径  $5 \mu\text{m}$  以上が必要である．計算と実験で定量的な一致が得られないのは，後述する導波路側壁の傾斜の影響と考えられる．曲げでの TE の透過率に対する TM の透過率の比を  $b$  とおくと，上の曲げ損失をおよそ反映させた  $b=0.75$  に対して，クロストークは約  $-20$  dB と評価された．この値は当初予想された  $-30$  dB 以下という計算値よりも大きい，導波路側壁の傾斜を考慮すると説明できる．側壁が基板面に対して  $83^\circ$  まで傾くと，クロストークの計算値は約  $-20$  dB まで増える．実際に製作した導波路にも同程度の傾斜が見られるため，理論と実験は

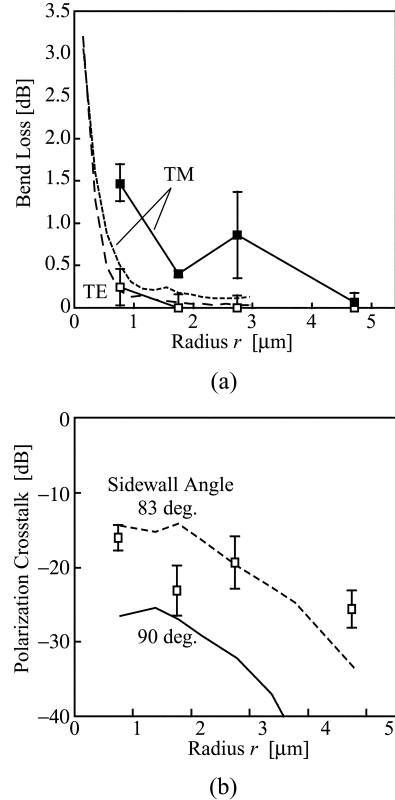


図 4  $w \sim 0.5 \mu\text{m}$  の SOI 型導波路の曲げ特性の計算と実験結果 (a) 曲げ半径  $r$  に対する損失．プロットと実線は実験結果，波線と点線は計算結果を表す．(b)  $r$  に対する偏波間クロストーク．プロットは実験結果，実線と波線は計算結果を表す．

Fig. 4 Calculated and measured bend characteristics of SOI-type waveguide with  $w \sim 0.5 \mu\text{m}$ . (a) Bend loss versus bend radius  $r$ . Plots and solid line denote experimental results and dashed and dotted lines calculated results. (b) Polarization crosstalk versus bend radius  $r$ . Plots denote experimental results and solid and dashed lines calculated results.

およそ一致したと考えることができる．クロストークを  $-30$  dB 以下にまで抑えるためには，側壁角度を正確に  $90^\circ$  に近づけることが重要である．またここまでは曲げ角度を  $90^\circ$  に限定して議論してきたが，クロストークは曲げ角度にも依存することが計算より分かっている．例えば曲げ半径  $1.78 \mu\text{m}$  に対して  $90^\circ$  曲げにおけるクロストークは  $-28$  dB であるが，曲げ角度を  $180^\circ$  とした U 字型曲げでは  $-35$  dB まで小さくなる．一方，二つの  $90^\circ$  曲げを逆向きに直結させた S 字型曲げでは  $-22$  dB まで劣化する．この点を考慮に入れて光配線パターンを作成すれば，全体としてのクロストーク

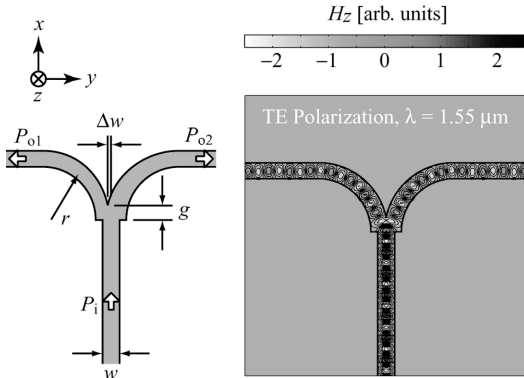


図5  $w=0.44\ \mu\text{m}$  の SOI 型導波路の曲げ結合型分岐の計算モデルと計算された垂直方向磁界 ( $H_z$ ) 分布の計算結果

Fig. 5 Calculation model of bend-waveguide-type branch based on SOI-type waveguide with  $w=0.44\ \mu\text{m}$  and calculated profile of vertical magnetic field ( $H_z$ ) of guided mode.

クを低減することに役立つと考えられる。

#### 4. 曲げ結合型分岐

分岐は様々な光素子に用いられる基本的なコンポーネントである。シリカ系導波路では、十分に緩やかなテーパを用いて1本の入射導波路を2本の出射導波路に分岐させるため、長い素子長が必要となる。また単純なテーパでは、波面の不整合による損失を十分に抑制できない。特に微小導波路である Si 細線では、損失低減のために詳細な構造の最適化が必要である。これまでに斜め反射を用いた小型の分岐が二次元 FDTD 計算された例はあるが、実証例はなかった [21]。

本研究では、候補となる多くの微小分岐構造の過剰損失 (2分岐に伴う 3 dB の出力減衰を差し引いた損失) を計算した。そして最終的に、図5に示す曲げ結合型分岐が低損失となることを見出した。この分岐では、半径  $r$  をもつ二つの曲げ導波路が部分的に接しつつ入射導波路に直結されている。この直結部分では、入射導波路が急に広がる不連続性を意図的に設けている。ここでは入射光が広がるため、波面が自然に二つの導波路へ向かうようになり、滑らかな分岐を生む。広げられた導波路は長さ  $g$  だけ続き、その後、二つの曲げ導波路に分かれる。この  $g$  は損失と分岐比安定性に影響を与える。図6の理論曲線に示すように、損失は  $g=0.6\ \mu\text{m}$  で最小値 0.2 dB をとるが、 $g$  に対する変化はそれほど大きくない。一方、 $g=0.8\ \mu\text{m}$  とすると、入射導波路が分岐の中心軸からずれても等分岐が保た

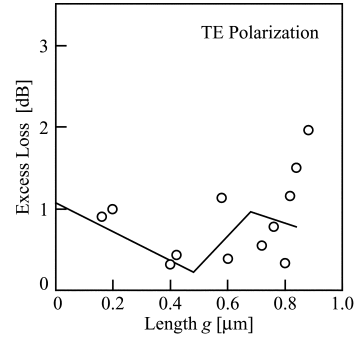


図6 曲げ結合型分岐の長さ  $g$  に対する過剰損失の計算結果と実験プロット  
Fig. 6 Calculated curve and experimental plots of excess loss in bend-waveguide-type branch with length  $g$ .

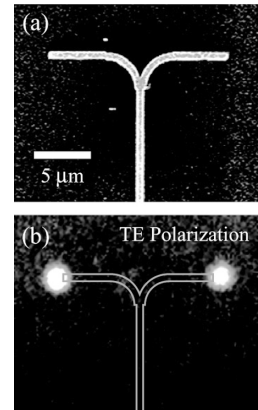


図7  $w \sim 0.47\ \mu\text{m}$  の SOI 型導波路に製作した曲げ結合型分岐 (a) と出射光の近視野像 (b)  
Fig. 7 SEM view of fabricated branch in SOI-type waveguide with  $w \sim 0.47\ \mu\text{m}$  (a) and near field pattern of light output (b).

れるという特異な条件が現れる。

図7は、 $r=2.75\ \mu\text{m}$  の分岐の様子と出射光の近視野像を示している。計算で予測されたように、入射光は目立った散乱もなく分岐を通過し、二つの出射端から取り出されている。様々な  $g$  をもつ試料に対して過剰損を測定した実験プロットを図6に併せて示す。 $g=0.4\ \mu\text{m}$  のとき、最低損失 0.2 dB が得られた。 $g$  に対する変化は計算結果におよそ対応している。

#### 5. モード拡大/縮小型交差

低損失かつ低クロストークな交差は、自由度の高い光配線にとって重要である。また Si 細線は、しばしばエアブリッジ型フォトニック結晶導波路と接続され

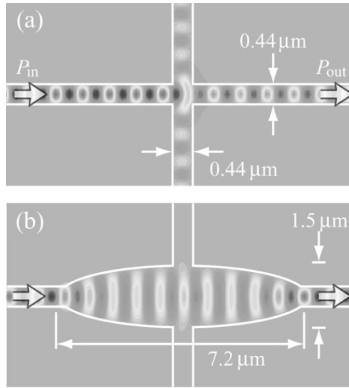
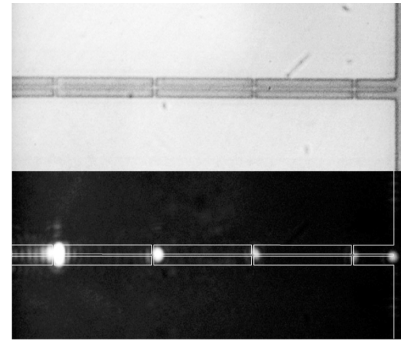


図8  $w=0.44\ \mu\text{m}$ のSOI型導波路の交差におけるTE偏波の $H_z$ フィールドの計算結果 (a) 単純な交差 (b) タイプIの交差

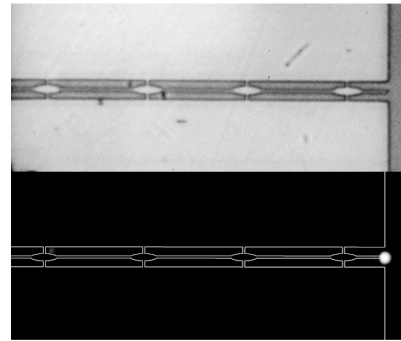
Fig. 8 Calculated  $H_z$  field of TE-polarized mode at intersection of waveguides with  $w=0.44\ \mu\text{m}$ . (a) Simple intersection. (b) Type-I elliptical intersection.

た形で併用される．その際は，プロセス簡略化のためにSi細線もエアブリッジ型であることが望ましく，連続的な交差はその支持としても有用である．Si細線に対する交差としては，共振を利用した構造が二次元FDTD計算され，損失0.2 dBが予測されている[21]．しかし波長 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯での透過帯域は $10\sim 20\ \text{nm}$ と狭い．一方，低 $\Delta$ 導波路に対しては，モード拡大/縮小器をもつ交差が理論計算されている[22]．この交差は，モードを広げることで光の直進性を高め，クロストークを抑制することを原理としているため，共振型よりも広帯域で低損失が期待できる．そこでSi細線に対してこの交差を設計，製作した．

まず単純な交差での光伝搬を計算した結果を図8(a)に示す．同じ幅の導波路が単純に交差するときは，損失1.4 dB，交差導波路の片端に対するクロストークは $-9.2\ \text{dB}$ と見積もられた．一方，検討する交差では，二つのモード拡大器を対向させ，交差導波路をはさみながら接続する．モード拡大器を放物関数状にすると，高次モードを励振させずに基本モードが拡大されることが知られている[23]．ただし本研究では，電子ビーム描画のCADパターン作成を容易にするため，放物関数と類似な形状である楕円関数を利用することにした．そこでまず，1個のモード拡大/縮小器が入出射導波路に沿って交差部分に置かれている状況(タイプI)を計算した．図8(b)に示すように，光は楕円部分で滑らかに拡大，縮小し，交差を通過する． $1.5\ \mu\text{m}\times 7.2\ \mu\text{m}$ の楕円を仮定したとき， $1.51\sim 1.57\ \mu\text{m}$ という広い波



(a)



(b)

図9  $w\sim 0.45\ \mu\text{m}$ のエアブリッジ導波路の伝搬光の近視野像 (a) 単純交差 (b) タイプI交差

Fig. 9 Pictures (upper) and near field pattern of guided light (lower) in airbridge-type waveguide with  $w\sim 0.45\ \mu\text{m}$ . (a) Simple intersection. (b) Type-I elliptical intersection.

長範囲において損失は0.1 dB以下，クロストークは $-30\ \text{dB}$ 以下となった． $1.6\ \mu\text{m}\times 10.4\ \mu\text{m}$ の二つの楕円を入射導波路と交差導波路にそれぞれ配置した4回対称の交差(タイプII)においても，損失は0.4 dB以下に収まる．

実験では，SOI型導波路とエアブリッジ型導波路の交差を製作した．図9はエアブリッジ型に製作された単純交差とタイプI交差の伝搬光の近視野像を示している．単純交差では，強い光散乱と伝搬光の減衰が見られる．一方，タイプI交差では散乱がほとんど見られず，強い出射光が確認される．交差の損失は，同じ長さのSOI型導波路の出射光との比較から評価できる．楕円の長軸 $a$ を様々に変えたときの交差1個当りの損失を図10に示す．実験結果は計算結果によく一致した． $a=7.2\ \mu\text{m}$ のとき，損失とクロストークはそれぞれ0.1 dBと $-25\ \text{dB}$ 以下となった．このクロストークは測定の背景雑音で決まっており，実際はより低い

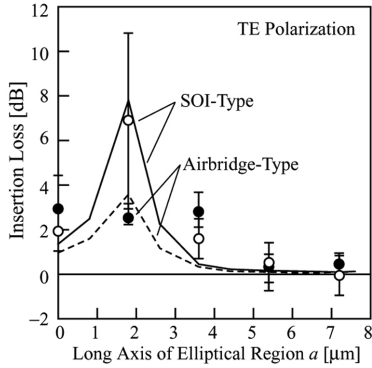


図 10 楕円交差の長軸に対する挿入損の理論曲線と実験プロット

Fig. 10 Theoretical curves and experimental plots of insertion loss at elliptical intersection with long axis.

値と考えられる．タイプIIについても同様に製作，評価したところ，損失は1.2 dBとなった．タイプIIでは交差導波路幅に損失が敏感なことが分かっており，実験値が計算値に比べて大きいのはわずかな幅の広がり原因と思われる．この交差については，楕円の長軸と短軸のバランスなど，より注意深い構造の最適化が必要と思われる．

## 6. 微小分岐の応用

### 6.1 H トリー光信号分配回路

Si-LSIのクロックスキューの問題を解決するため，チップ内光インタコネクションが議論されている．最も簡単な技術として，同じ導波路長でLSI各部にクロック信号を分配するH トリー回路が考えられる．このような回路については， $\text{mm}^2$  オーダの大きさの分岐を含むポリマ導波路を用いた実証例がある [24]．しかし回路をチップ内に導入するには，導波路自体や分岐の大幅な小型化が必要である．この目的にはSi細線が最適であり，4. で述べた曲げ結合型分岐が有効である．そこで図 11(a) に示すように， $35 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$  の占有面積と8個の出射端をもつH トリー回路を試作した．これは全部で7個の分岐を含み，光は入射端の間で3個の分岐を通る．各分岐では，低損失を与える  $r=2.75 \mu\text{m}$  と等分岐を与える  $g=0.8 \mu\text{m}$  を設定した．分岐された導波路は長さ  $5 \mu\text{m}$  の直線導波路によって次の分岐に接続されている．波長  $1.55 \mu\text{m}$  のTM 偏波を入射させたときの出射光の近視野像を図 11(b) に示す．各分岐での散乱は小さく，すべての出射光が確認された．各出射光の透過スペクトルの例を図 12 に示

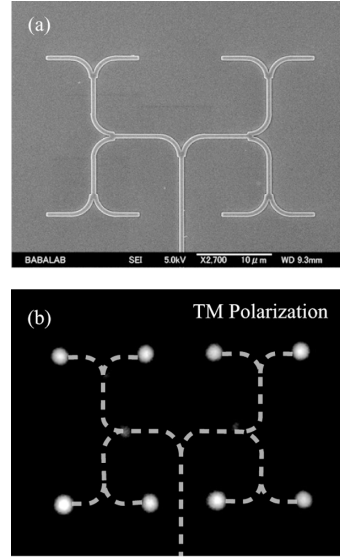


図 11 製作したH トリー光信号分配回路の写真 (a) と波長  $1.55 \mu\text{m}$  の近視野像 (b)

Fig. 11 SEM view of H-tree circuit (a) and NFP of light output at  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$  (b).

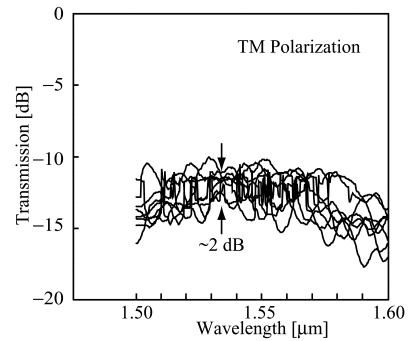


図 12 製作したH トリー回路の各ポートの透過スペクトル  
Fig. 12 Transmission spectra for eight output ports in fabricated H-tree circuit.

す．ここで縦軸の相対光強度は入射端での結合損，導波損，分岐損，及び出射端での反射損を含む．一方，光学系の損失と，光分配に伴う9 dBの減衰は除いてある．図 12に見られる7~8 dBの強度揺らぎは，入射端の間，分岐と端面の間，分岐間でのファブリペロー共振を表している．この揺らぎのほかにも約2 dBの出射端間ばらつきがある．各分岐の不連続点の角の形状が非対称になると分岐比が変化することが分かっており，この点を改善すればばらつきは低減できると思われる．

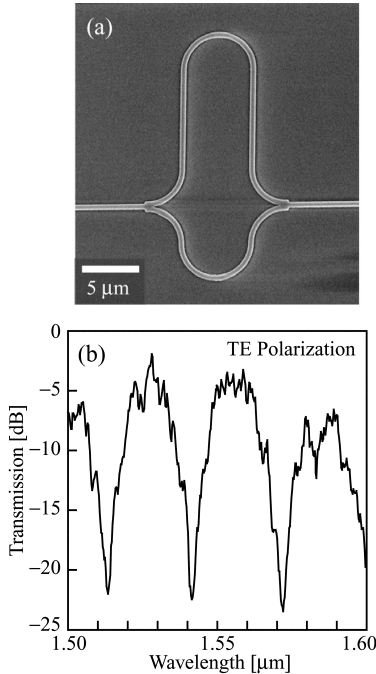


図 13 製作したマッハツェンダ干渉計の写真 (a) と透過スペクトル (b)

Fig. 13 SEM view (a) and transmission spectrum (b) of fabricated Mach-Zehnder interferometer.

## 6.2 マッハツェンダ干渉計

これは光変調器，スイッチ，フィルタなどに多用される最も基本的な干渉素子である．シリカ系導波路では，光の分岐，合流部に方向性結合器からなる 3 dB カプラがしばしば用いられ，素子が構成される．ただし Si 細線では，方向性結合器の 2 本の導波路間の空げきの幅を 10 nm オーダで制御する必要があり，安定した製作が難しい．本研究では，曲げ結合型分岐を分岐，合流部に用いた．各分岐で  $r=3\ \mu\text{m}$ ，二つの導波路長差を  $28.7\ \mu\text{m}$  とした素子を図 13(a) に示す．ここでも明らかな出射光が確認され，分岐，結合部と曲げでの損失の総和は約 1 dB と評価された．図 13(b) の透過スペクトルには明確な干渉特性（ゆっくりとした強度変化）が見られる．スペクトル中のより細かな変化は入射端間のファブリペロー共振である．最大消光比は 20 dB と十分に大きい．これは曲げ結合路型分岐が良好な等分岐，合流を実現していることを意味する．自由スペクトル領域 (FSR) は 16 nm であり，これは群屈折率を 4.6 と仮定したときの理論値とよく一致する．

## 7. アレー導波路回折格子 (AWG)

低損失，低クロストーク，狭チャンネル間隔といった理由から，シリカ系 AWG は波長分割多重システムで幅広く使われている．また複数の AWG を組み合わせることで，アド・ドロップ光合分波，チャンネル選択，多波長変調などの多機能化も実現できる．しかしシリカ導波路の大きな曲げ半径のため，最も小さな AWG でも  $\text{cm}^2$  オーダの面積を占有する [25]．素子を縮小する努力として，InP 系半導体のハイメサ導波路を用いた AWG も報告されている [26]．ここでは上下方向には通常の半導体三層構造が，横方向には半導体/空気の HIC が用いられている．この導波路は数百  $\mu\text{m}$  の小さな曲げ半径を可能にするが，上下方向への漏れ損が更なる微小化を制限するため，素子面積は依然として数  $\text{mm}^2$  である．この面積はシリカ系に比べると極めて小さいが，将来，多数の AWG を組み合わせた多機能化を目指す場合には，十分に小さいとはいえない．加えて，この素子では高さ数  $\mu\text{m}$  のハイメサを形成するのに高度なエッチング技術を要する．特にスラブ導波路とアレー導波路の接続部におけるアレー導波路間の狭い溝を作るには，20 以上の高アスペクト比が必要となる．十分なアスペクト比が得られないと，過剰損が発生してしまう．

Si 細線のフィルタ応用としては，既にリング共振器フィルタ，ラティスフィルタなどがあるが，AWG は報告例がない（ただしここではリブ型の Si 導波路による大型の AWG は含めていない）．Si 細線の微小曲げは AWG の設計自由度を拡大し，占有面積を  $(100\ \mu\text{m})^2$  オーダにまで極端に小さくする可能性をもつ．2. で述べたように細線の高さは約  $0.3\ \mu\text{m}$  なので，ハイメサ型に比べてエッチングが簡単かつ正確である．本研究では，このような微小な AWG を設計，製作し，波長  $1.50\sim 1.57\ \mu\text{m}$  で初めて明確な分波特性を確認した．

設計，製作した AWG を図 14(a) に示す．この素子は，34 本のコの字型アレー導波路と二つのスラブ導波路で構成され，アレー導波路は直線導波路と  $90^\circ$  曲げからなる．素子面積は  $100\ \mu\text{m}\times 93\ \mu\text{m}$  と小さい．入射導波路とスラブ導波路の接続部には，スラブで基本ガウスビームを放射しつつ光の広がりを適度に抑えるために， $3.5\ \mu\text{m}\times 1.5\ \mu\text{m}$  の半楕円型テーパをおいている．同様にスラブ導波路と他の導波路の間にも，接続損を減らすために  $1.5\ \mu\text{m}\times 0.8\ \mu\text{m}$  の半楕円テーパをおいている．テーパ間のすき間は，最も狭い個所で



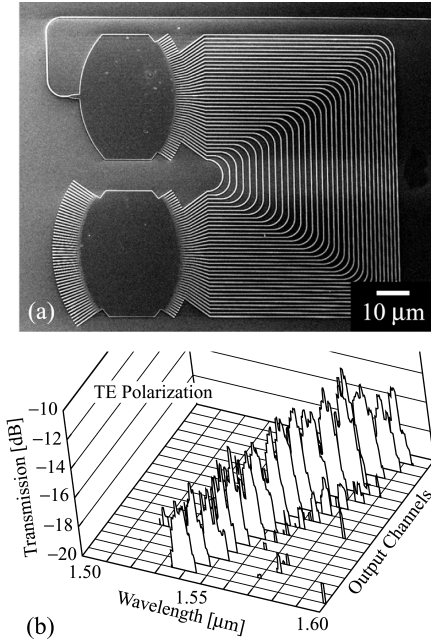


図14 製作したAWGの写真(a)と透過スペクトル(b)  
Fig.14 SEM view (a) and transmission spectrum (b) of fabricated AWG.

10 nm である。TE 偏波を入射させたときの透過スペクトルを図14(b)に示す。ここで縦軸の光強度からは、素子と測定光学系間の結合損を除いている。明確なスペクトルピークが現れ、その波長は17本の出射導波路に対して線形的に変化した。各ピークの中の細かな変化は、素子内部でのファブリペロー共振の影響である。ピーク同士の間隔は3 nm であり、設計値と一致した。しかし半値全幅は約6 nm であり、入射光がテーパによって広げられた分だけ、分波、集光された際のスポットが広がったと思われる。平均的なサイドローブレベルは-5 dB と高い。これについては入射導波路テーパが多少の高次モードを励振してしまうこと、スラブ導波路とアレー導波路を接続するテーパでの光結合による焦点距離のずれが補正されていないこと、アレー導波路のわずかな幅の揺らぎにより波面が乱されることなどが原因と考えられ、今後の改善が必要である。各チャンネルのスペクトルには、測定範囲内で他の主ピークが見られない。したがってFSRは90 nm 以上と広い。これは設計した小さな回折次数10によるものである。

## 8. むすび

本論文では、1.55  $\mu\text{m}$  付近の波長で動作するSi細線導波路の基礎特性、微小コンポーネント、及び機能素子例を示した。この導波路は大きな構造分散をもつため、材料屈折率を超える大きな群屈折率を生む。TE偏波の曲げ損は曲げ半径を1.8  $\mu\text{m}$  以上とすることで十分に抑制されるが、TM偏波については曲げをより大きくする必要がある。分岐と交差には注意深い設計が必要であるが、曲げ結合型分岐では0.3 dB 以下、モード拡大/縮小型交差では0.1 dB 以下の低損失が広帯域で得られる。この微小分岐を応用することで、小型のHトリー光信号分配回路とマツツェンダ干渉計が可能になる。Hトリー回路では最小出力ばらつき約2 dB で8ポートへの分配が、マツツェンダ干渉計では20 dB 以上の大きな消光比が得られている。また微小曲げをアレー導波路に応用したAWGでは、約(100  $\mu\text{m}$ )<sup>2</sup>の占有面積が可能になる。製作された素子では、実質的なチャンネル間隔6 nm、FSRが90 nm 以上の分波特性が観測されている。

このように、Si細線導波路は既存のあらゆるシリカ系素子を縮小する可能性をもつ。シリカ系素子並みの高性能を得るには、各部の更なる損失低減、ファブリペロー共振などの余計な特性の除去、高 $\Delta$ 系に対して製作トレランスを拡大する設計といった項目が特に重要になると思われる。また、この導波路よりも複雑な構造をもつフォトニック結晶導波路等で培われた三次元FDTD計算による詳細な設計と10 nm 以下の寸法を制御するドライエッチングを活用することで、近い将来、かなりの性能向上が期待できるのではないかと考える。

謝辞 本研究は文部科学省ITプログラム並びに21世紀COEプログラム、日本学術振興会科学研究費、科学技術振興機構戦略的基礎研究プロジェクトの支援を得て行われた。

## 文 献

- [1] S. L. McCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. J. Pearton, and R. A. Logan, "Whispering gallery mode microdisk lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol.60, no.3, pp.289-291, Jan. 1992.
- [2] J. P. Zhang, D. Chu, S. Wu, S. Ho, W. Bi, C. Tu, and R. Tiberio, "Photonic-wire laser," *Phys. Rev. Lett.*, vol.75, no.14, pp.2678-2681, Oct. 1995.
- [3] J. Foresi, P. Villeneuve, J. Ferrara, E. Thoen, G. Steinmeyer, S. Fan, J. Joannopoulos, L. Kimerling, H. Smith, and E. Ippen, "Photonic bandgap microcavities in optical

- waveguides,” *Nature*, vol.390, no.13, pp.143–147, Nov. 1997.
- [4] B. E. Little, J. S. Foresi, G. Steinhilber, E. R. Thoen, S. T. Chu, H. A. Haus, E. P. Ippen, L. C. Kimelring, and W. Greene, “Ultra-compact Si-SiO<sub>2</sub> microring resonator optical channel dropping filters,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.10, no.4, pp.549–551, April 1998.
- [5] A. Sakai, G. Hara, and T. Baba, “Propagation characteristics of ultrahigh  $\Delta$  optical waveguide on silicon-on-insulator substrate,” *Jpn. J. Appl. Phys. 2, Lett.*, vol.40, no.4B, pp.L383–L385, April 2001.
- [6] K. K. Lee, D. R. Lim, H-C Luan, A. Agarwal, J. Foresi, and L. C. Kimelring, “Effect of size and roughness on light transmission in a Si/SiO<sub>2</sub> waveguide: Experiments and model,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.77, no.11, pp.1617–1619, Sept. 2000.
- [7] K. K. Lee, D. R. Lim, L. C. Kimelring, J. Shin, and F. Cerrina, “Fabrication of ultralow-loss Si/SiO<sub>2</sub> waveguides by roughness reduction,” *Opt. Lett.*, vol.26, no.23, pp.1888–1890, Dec. 2001.
- [8] Y. A. Vlasov and S. J. McNab, “Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends,” *Opt. Express*, vol.12, no.8, pp.1622–1631, April 2004.
- [9] W. Bogaerts, R. Baets, P. Dumon, V. Wiaux, S. Beckx, D. Taillaert, B. Luyssaert, J. Van Campenhout, P. Bienstman, and D. Van Thourhout, “Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology,” *J. Lightwave Technol.*, vol.23, no.1, pp.401–412, Jan. 2005.
- [10] A. Sakai, T. Fukazawa, and T. Baba, “Estimation of polarization crosstalk at a micro-bend in Si photonic wire waveguide,” *J. Lightwave Technol.*, vol.22, no.2, pp.520–525, Feb. 2004.
- [11] R. U. Ahmad, F. Pizzuto, G. S. Camarda, R. L. Espinola, H. Rao, and R. M. Osgood, “Ultracompact corner-mirrors and T-branches in silicon-on-insulator,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol.14, no.1, pp.65–67, Jan. 2002.
- [12] A. Sakai, T. Fukazawa, and T. Baba, “Low loss ultrasmall branches in a silicon photonic wire waveguide,” *IEICE Trans. Electron.*, vol.E85-C, no.4, pp.1033–1037, April 2002.
- [13] T. Fukazawa, T. Hirano, F. Ohno, and T. Baba, “Low loss intersection of Si photonic wire waveguides,” *Jpn. J. Appl. Phys. 1, Regul. Pap. Short Notes*, vol.43, no.2, pp.646–647, Feb. 2004.
- [14] T. Shoji, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, K. Yamada, and H. Morita, “Low loss mode size converter from 0.3  $\mu\text{m}$  square Si wire waveguides to singlemode fibers,” *Electron. Lett.*, vol.38, pp.1669–1670, 2002.
- [15] V. R. Almeida, R. P. Panepucchi, and M. Lipson, “Nanotaper for compact mode conversion,” *Opt. Lett.*, vol.28, no.15, pp.1302–1304, Aug. 2002.
- [16] T. Fukazawa, A. Sakai, and T. Baba, “H-tree-type optical clock signal distribution circuit using a Si photonic wire waveguide,” *Jpn. J. Appl. Phys. 2, Lett.*, vol.41, no.12B, pp.L1461–L1463, Dec. 2002.
- [17] L. Vivien, S. Lardenois, D. Pascal, S. Laval, E. Cassan, J. L. Cercus, A. Koster, J. M. Fédéli, and M. Heitzman, “Experimental demonstration of a low-loss optical H-tree distribution using silicon-on-insulator microwaveguides,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.85, no.5, pp.701–703, Aug. 2004.
- [18] T. Fukazawa, F. Ohno, and T. Baba, “Si photonic wire components and micro-filters on SOI substrate,” *SPIE Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XII*, no.5349-14, Jan. 2004.
- [19] K. Yamada, T. Shoji, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, J. Takahashi, and S. Itabashi, “Silicon-wire-based ultrasmall lattice filters with wide free spectral range,” *Opt. Lett.*, vol.28, no.18, pp.1663–1664, Sept. 2003.
- [20] T. Fukazawa, F. Ohno, and T. Baba, “Very compact arrayed-waveguide-grating demultiplexer using Si photonic wire waveguides,” *Jpn. J. Appl. Phys. 2, Lett.*, vol.43, no.5B, pp.L673–L675, May 2004.
- [21] C. Manolatou, S. G. Johnson, S. Fan, P. R. Villeneuve, H. A. Haus, and J. D. Joannopoulos, “High-density integrated optics,” *J. Lightwave Technol.*, vol.17, no.9, pp.1682–1692, Sept. 1999.
- [22] 加藤智行, 國分泰雄, “大規模マイクロリングフィルター集積回路のためのクロスグリッド交差の損失低減,” 2002 信学総大, C-3-851, March 2002.
- [23] W. K. Burns, A. F. Milton, and A. B. Lee, “Optical waveguide parabolic coupling horns,” *Appl. Phys. Lett.*, vol.30, no.1, pp.28–30, Jan. 1977.
- [24] L. Wu, B. Bihari, J. Gan, and R. T. Chen, “Fabrication and characterization of a 1-to-48 fanout H-tree structure for clock signal distribution system,” *Proc. Topical Meet. Integrated Photon. Res.*, vol.4, pp.282–284, July 1998.
- [25] M. Ishii, Y. Hibino, Y. Hida, A. Kaneko, M. Itoh, T. Goh, A. Sugita, T. Saida, A. Himeno, and Y. Ohmori, “Low-loss and compact silica-based 16 channel arrayed waveguide grating multiplexer module with higher index difference,” *Proc. European Conf. Opt. Commun.*, vol.3, pp.27–28, Sept. 2000.
- [26] M. Kohtoku, H. Sanjoh, S. Oku, Y. Kadota, Y. Yoshikuni, and Y. Shibata, “InP-based 64-channel arrayed waveguide grating with 50 GHz channel spacing and up to  $-20$  dB crosstalk,” *Electron. Lett.*, vol.33, no.21, pp.1786–1787, Oct. 1997.

(平成 16 年 10 月 5 日受付, 12 月 8 日再受付)



馬場 俊彦（正員）

昭60横国大・工・電気卒．平2同大大学院博士課程了．工博．同年東工大・精研助手．平5横国大講師，平6より同助教授．平17より同教授．現在，フォトニック結晶，微小半導体レーザ，シリコンフォトニクスを研究中．平5学術奨励賞，論文賞．平2丹羽記念賞，平

12丸文研究奨励賞受賞．



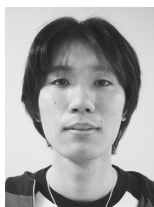
坂井 篤

平9横国大・工・電子情報卒．平14同大大学院博士課程了．工博．在学中はマイクロディスク共振器，近接場光学，シリコン細線導波路を研究．現在は(株)リコーに所属し，フォトニック結晶を研究中．



深澤 達彦

平14横国大・工・電子情報卒．平16同大大学院修士課程了．在学中はシリコン細線導波路による信号分配回路やアレー導波路回折格子を研究．現在は(株)日立製作所に所属．



大野 文彰

平16横国大・工・電子情報卒．現在，同大大学院修士課程在学中．シリコン細線導波路によるアレー導波路回折格子を研究中．