

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：82626

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2014～2015

課題番号：26889073

研究課題名(和文) オンチップ三次元光集積回路に向けたa-Si:H多層光伝送デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of c-Si/a-Si:H hybrid multi-layer optical transmitter toward 3D optical integrated circuits

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・電子光技術研究部門・研究員

研究者番号：30738068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：シリコンフォトニクスを用いた次世代オンチップ光配線において、CMOS後工程で形成可能な水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)をベースとする多層光配線技術が有望視されている。本研究では、多層偏波多重システム及び偏波ダイバーシティシステムに向けた層間偏波ビームスプリッタの開発、及び層間光スイッチへの応用検討を行った。異なる断面寸法を有するシンプルな多層シリコン細線方向性結合器において、広帯域、低挿入損失、低クロストークの層間偏波ビームスプリッタを提案設計した。さらに、構造誤差に対する特性評価を行い、本デバイスは十分実現可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Silicon photonics has the potential to provide high-density signal transmission for interconnection in a datacenter. Recently, multilayered three-dimensional Si photonics integrated circuits (Si-PICs) have been researched to enhance circuit integration capacity and for partial waveguide bridges to reduce the loss of the numerous waveguide crossings. In this research, I proposed a compact Si interlayer polarization beam splitter (PBS) and a Si interlayer optical switch that are based on a crystalline Si (c-Si) and hydrogenated amorphous Si (a-Si:H) vertical asymmetrical directional coupler. The device with a 260-nm × 220-nm and a 340-nm × 200-nm waveguides operates in a broadband, with small insertion loss and crosstalk. The device is also robust in terms of alignment error between the vertical waveguides. Totally, the proposed device seems to be feasible.

研究分野：光半導体デバイス

キーワード：シリコンフォトニクス 偏波ビームスプリッタ 多層光配線

### 1. 研究開始当初の背景

近年、大規模計算シミュレータやビッグデータの多目的利用に伴い、より高速信号処理かつ低消費電力なスーパーコンピュータが要求されている。このような要求の下、ムーアの法則に則るべく LSI 微細化に伴い、構成要素である CMOS 単体の動作速度・消費電力は年々向上している。しかし、コア間を接続する比較的長距離なグローバル電気配線における相対信号遅延、発熱消費電力が LSI 性能全体のボトルネックとなっている。その打開策として、三次元 LSI 集積技術、新材料電気配線技術と並び、結晶シリコン(c-Si)をベースとした光配線技術(シリコンフォトンクス)が世界中で盛んに研究されている。[1]

近年、シリコンフォトンクスの次なる展開として、多層光配線による三次元光集積技術の導入が検討されている。本技術は制限された実装面積での高密度な信号伝送密度を可能とし、さらに回路内の導波路交差部分に適用し立体交差構造にすることで回路の低損失化が期待されている。配線材料としては、LSI バックエンドプロセスとの親和性から、300 台での低温成膜が可能な水素化アモルファスシリコン(a-Si:H)が有力な導波路材料の一つとなっている。本材料を用いたデバイスとして、これまで低損失光導波路、層間光伝送デバイスなど、回路を構成する基本デバイスを中心に報告されている。

そのような動向の中で、さらなる開発が望まれている機能デバイスの一つに、層間偏波ビームスプリッタ(PBS)が挙げられる。PBS は偏波多重システムや偏波ダイバーシティシステムを構成する上で必要不可欠なデバイスである。前者はシリコン光導波路の大きい屈折率異方性を利用し、1本の配線に複数の偏波信号を同時に伝送することができるシステムであり PBS は目的地での各偏波信号の取り出しに使用される。また後者は、主に光受信機に用いられ、ランダム偏光入力信号に対して光回路内での偏波依存性を消失するシステムであり、本デバイスはランダム偏波を一度偏波分離して片側偏波をもう一方に整合する際に使用される。

これまで数多くの平面回路用 PBS が報告されている一方で、a-Si:H をベースとした三次元光回路用の層間 PBS は実現されていない。層間 PBS は同時に層間光伝送を兼ねることから、従来の平面 PBS と層間光伝送の2段構成よりも小さく実現できる。このような背景の下、本研究にて層間 PBS の開発を行うという着想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、次世代 LSI チップ上三次元光集積回路の実現に向けて必要不可欠である多層間光信号伝送機能に関し、a-Si:H を上層導波路に用いた層間光信号処理デバイスの実現を目指した。数ある偏波ビームスプリッタの動作機構の中で、構造形成が容易、小型、

低損失の理由から、非対称方向性結合器タイプを採用した。層間 PBS では成膜プロセス条件により a-Si:H の膜厚制御が可能である点から、直線 Si 細線導波路同士の方法性結合器で偏波分離を実現できる(図 1)。断面寸法の異なる 2 種類の Si 細線導波路を垂直方向に配置し、両導波路の TM-like モード実効屈折率を一致させ、TE-like モードを大きく離すことにより、方向性結合動作による TM 偏波のクロスポート透過、位相不整合による TE 偏波のバーポート透過が得られる。

上記基本構造を用い、具体的に下記 2 点のデバイス開発に取り組む。

- (1) a-Si:H 多層ハイブリッド導波路間における偏波スプリッタの開発
- (2) a-Si:H 多層ハイブリッド導波路間における液晶装荷型光スイッチの開発

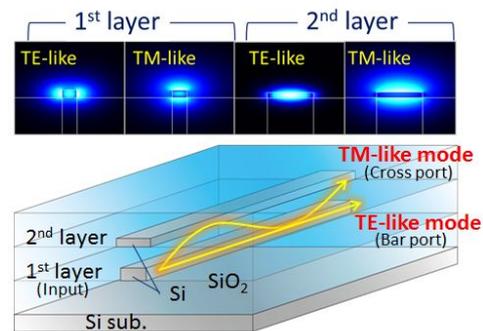


図 1. 非対称方向性結合器型の層間 PBS

### 3. 研究の方法

上述した(1)、(2)のデバイス開発に向け、それぞれ下記の方法ですすめる。

- (1) 層間 PBS を構成する上下層の Si 細線導波路の断面寸法の設計を行う。

この際、シリコンフォトンクスの特徴であるナノメートルサイズへの強い光閉じ込めにより、加工プロセスにおける構造誤差が光学特性にシビアに効いてくるため、構造誤差に対するトレランスが高い構造を目標とする。素子設計には電磁界解析シミュレータを使用し、両導波路において TE-like モードに関しては実効屈折率差を大きくし、TM-like モードに関しては一致する構造を採用する。動作波長帯として C バンド(1530-1565nm)を想定し広帯域に動作する構造を明らかにする。さらに回路に導入するにあたり、入出力部を含めたデバイス全体の構造設計を行い、構造誤差による偏波分離特性への影響評価を行う。

- (2) 開発された層間 PBS に対し、上層 a-Si:H 導波路側に液晶を装荷した経路スイッチング素子への応用検討を行う。液晶分子は大きな屈折率異方性を有しており、シリコンフォトンクスデバイスのクラッド層に導入し分

子の配列方向を変化させることで、導波路からのエバネッセント光を通じて光の位相を制御することが可能となる。まずは c-Si 単層導波路において液晶、配向膜、及び電極を集積し、電圧 on/off 時での位相シフト動作の確認を行い、多層光スイッチへの技術転用を探る。

#### 4. 研究成果

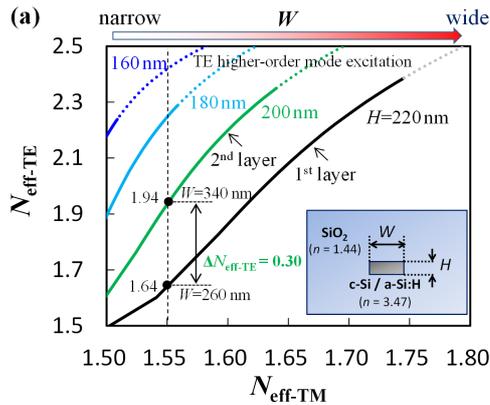


図 2. Si 細線導波路での実効屈折率の関係

(1) まず層間 PBS の機能部である非対称方向性結合器の設計を行った。図 2 に Si 細線導波路における、TE-like, TM-like モードの実効屈折率を示す。解析には有限差分法(FDM)を用いた。研究目的で述べたように、偏波分離動作を実現すべく、TM-like モードの実効屈折率は一致させ、TE-like モードの実効屈折率は引き離す。1 層目 c-Si 導波路の高さは従来の平面光回路を踏襲すべく 220 nm とした。2 層目 a-Si:H の高さは成膜プロセスにより制御可能であることから 200 nm とした。数値解析により、デバイスの広帯域動作、高い導波路寸法誤差耐性を有するためには実効屈折率は小さい方が良いという結果が得られた。そこで TM-like モードの実効屈折率を 1.55 とし、その時の各導波路の寸法として、それぞれ c-Si (高さ 220 nm × 幅 260 nm)、a-Si:H (高さ 220 nm × 幅 340 nm) を得た。この時、TE-like モードの実効屈折率差は 0.3 と十分大きい値である。従来 Si 細線導波路の立体交差での混信を防ぐため (-20 dB 以下) 多層導波路の層間距離は 650 nm とし、波長 1550 nm における非対称方向性結合器の結合長は 7  $\mu\text{m}$  である。

次に本デバイスを従来の膜厚 220nm 光回路に接続するため、非対称方向性結合器に対し 2 層目 a-Si:H に曲げ導波路、導波路膜厚コンバータ、1 層目 c-Si に導波路幅コンバータを導入した。その結果、曲げ導波路半径を 5  $\mu\text{m}$  にすることで、信号成分である TE-like モードの放射損失を 0.1dB 未満に抑制すると同時にクロストーク成分である TM-like モードの放射損失を 3.6 dB まで高められる結果が得られた。この効果は偏波クロストークを改善

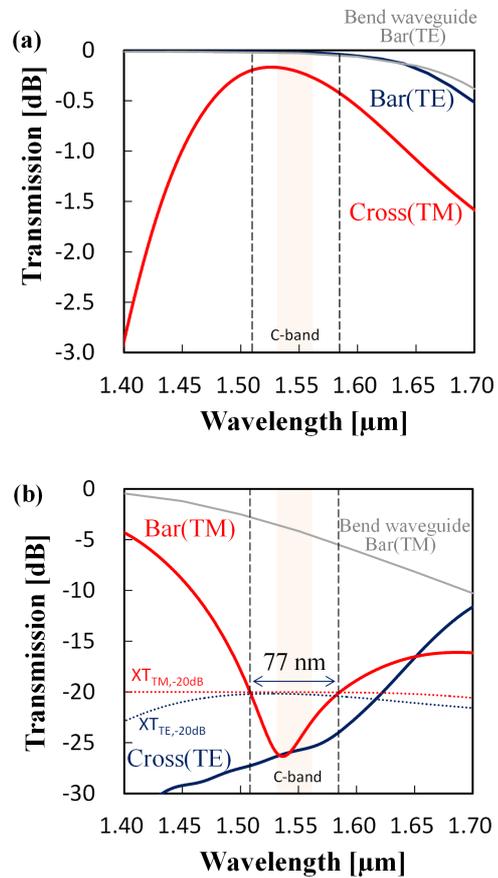


図 3. 設計した層間 PBS の波長特性：(a) 信号成分、(b)クロストーク成分

する方向に働く。また、各種コンバータはテーパ長を 10  $\mu\text{m}$  以上にするすることで、挿入損失 0.01 dB 未満、クロストークを -20dB 以下に抑えられた。これらすべてのパーツを含んだ層間 PBS は 20 × 30  $\mu\text{m}^2$  のデバイス寸法で作製可能であり、非常に小型である。

有限差分時間領域(FDTD)法を用い、本デバイスの波長特性解析を行った。図 3(a)は主要偏波による信号成分のスペクトルを示す。各偏波の挿入損失は C バンド帯において 0.03 dB(TE-like モード)、0.3 dB(TM-like モード)であった。TE-like モードの挿入損失は導波路間光結合、及び曲げ導波路における放射損失に起因し、TM-like モードの損失は、両導波路における実効屈折率の不一致に起因すると推定される。図 3(b)は偏波クロストークを示しており、波長帯域 77 nm 以上で偏波クロストークを -20 dB 未満に抑えられる結果が得られ、十分に C バンドをカバーする。

シリコンフォトニクスデバイスの重要な検討事項として、構造耐性が挙げられる。作製プロセスを通じて生じるナノメートル単位での作製誤差はデバイス性能に大きな影響を与える。そこで、多層導波路の各寸法誤差、及び、層間のアライメント誤差による特性への影響を評価した。その結果、導波路幅に対しては  $\pm 5$  nm、導波路膜厚については  $\pm$

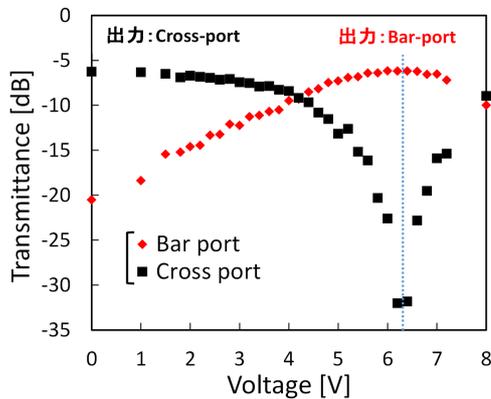


図 4. 平面内液晶装荷シリコン MZI のスイッチ動作

数 nm において C-band での偏波クロストークを -20 dB 以下に抑制できる結果を得た。また、層間の位置アライメントについては  $\pm 100$  nm 以上の誤差耐性を有することが分かった。a-Si:H 導波路の膜厚に関しては、既存技術であるアルカリ溶液を用いたウェットエッチングをもちいることで 1 nm 以下の精度で制御可能であり、本デバイスは十分作製可能である。[2] 設計されたデバイスについて作製プロセス検討を行い、低損失導波路形成に関する基盤技術を確認した。

(2) 液晶を用いた層間光スイッチへの応用に向けては、第一段階として平面シリコン細線導波路デバイスで動作検証を行った。液晶分子の向きによる位相変化を確認するため、マッハツェンダー干渉計を構成し測定を行った。図 4 に作成された光スイッチの印加電圧依存性を示す。非電圧印加時、波長 1550 nm においてクロスポートからの光出力を得た。印加電圧を増加させるに従い、バーポートとクロスポートの強度が反転する様子が観測され、電圧 6.4 V 時に完全にスイッチする結果が得られた。本技術を層間 PBS 構造に導入することで層間スイッチを実現することができ、現在そのような実験を計画中である。

#### < 引用文献 >

- [1] R. Soref et al., IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron., **12**, 1678 (2006).  
 [2] K. Furuya et al., Appl. Phys. Lett., **100**, 251108-1-3 (2012).

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

- (1) Y. Atsumi, R. Takei, M. Okano, T. Amemiya, Y. Sakakibara, M. Mori, "Interlayer Polarization Beam Splitter Based on Asymmetrical Si Wire Directional Coupler," IEEE Photonics Technology

Letters, 査読有り, 28, 2016, in press.  
 DOI: 10.1109/LPT.2016.2558286

[学会発表](計 5 件)

- (1) 渥美裕樹、武井亮平、岡野誠、雨宮智宏、榊原陽一、森雅彦『三次元シリコン光集積回路に向けた層間偏波ビームスプリッタの設計』電子情報通信学会(2015 年総合大会)、2015 年 3 月 10 日、立命館大学(滋賀県草津市)

- (2) 岡野誠、面田恵美子、前神有里子、渥美裕樹、榊原陽一、亀井利浩、森雅彦『合成石英基板上水素化アモルファスシリコン細線導波路』第 26 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 11 日、東海大学(神奈川県平塚市)

- (3) 宮崎哲男、渥美裕樹、岡野誠、武井亮平、三浦登、森雅彦、榊原陽一『液晶を用いたシリコン細線マッハツェンダー光スイッチ』第 26 回応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月 13 日、東海大学(神奈川県平塚市)

- (4) Y. Atsumi, R. Takei, M. Okano, T. Amemiya, Y. Sakakibara, M. Mori, "Design of Feasible Silicon Interlayer Polarization Beam Splitter," IEEE the 12<sup>th</sup> International Conference on Group IV Photonics, August 26, 2015, Pinnacle Vancouver Harborside(Vancouver, Canada)

- (5) M. Okano, E. Omoda, Y. Maegami, Y. Atsumi, Y. Sakakibara, T. Kamei, M. Mori, "Hydrogenated Amorphous Silicon Photonic Devices on Synthetic Quartz Glass Substrate," IEEE the 12<sup>th</sup> International Conference on Group IV Photonics, August 26, 2015, Pinnacle Vancouver Harborside(Vancouver, Canada)

#### 6. 研究組織

(1) 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・電子光技術研究部門・研究員

研究者番号：30738068