

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	シリコンスロット導波路を用いた温度無依存波長フィルタに関する研究
Title(English)	Study of Athermal Wavelength Filters Based on Silicon Slot Waveguides
著者(和文)	渥美裕樹
Author(English)	Yuki Atsumi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9361号, 授与年月日:2013年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:西山 伸彦,荒井 滋久,水本 哲弥,宮本 恭幸,植之原 裕行, 山田 浩治
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9361号, Conferred date:2013/12/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

Study of Athermal Wavelength Filters Based on Silicon Slot Waveguides

(シリコンスロット導波路を用いた温度無依存波長フィルタに関する研究)

(論文要約)

2013 年 11 月 20 日

指導教員: 西山 伸彦 准教授
荒井 滋久 教授

提出者: 東京工業大学大学院
理工学研究科 電気電子工学専攻
荒井・西山研究室
博士課程(後期)

渥美 裕樹

Chapter 1 Introduction

長距離通信を中心に発展してきた光伝送技術は近年、fiber-to-the-home(FTTH)や大規模サーバ内光配線など、より短距離な伝送路への導入が進められている。そして現在、これらの光通信技術を LSI チップ間、チップ内といった更なる短距離配線へ応用する光インターコネクション技術が盛んに研究されている。

LSI チップの高速化・高集積化はムーアの法則に従い CMOS 素子の微細化・低電圧化によって達成されてきた。しかし、将来的には更なる微細化に伴う素子間電気配線での RC 遅延や発熱、高抵抗化といった問題が顕在化する。特に、LSI 内部の比較的長距離配線を担うグローバル配線層における配線遅延や消費電力が、LSI 全体の性能を律速する要因になる。この問題を解決すべく、これまで3次元 LSI 集積やカーボンナノ構造電気配線など様々な技術が研究されてきた。

これらと並び、近年有望視されているのがシリコンフォトニクスを利用した光配線化技術である。光配線は波長分割多重(WDM)方式の採用により高密度信号伝送を可能とし、LSI と同じシリコンを主材料とすることで、成熟している CMOS 技術の一部利用できる^[1-20]。さらに、SiO₂ クラッドとの高屈折率差による極微配線サイズもオンチップへの高密度集積化を可能とする。しかし、オンチップ WDM システムを実現するに当たっては、局所的に百度を超えると言われている LSI ロジック層からの熱拡散、それに起因するチップ内温度分布の不均一性が課題となっている^[21, 22]。シリコンは正方向に大きな屈折率温度係数を有する事から、従来のシリコン細線導波路を用いた分波器においては、温度変化に伴う隣接間チャネルクロークが起きてしまう。したがって、オンチップ WDM システムの実現に向けては温度動作安定化技術が必要不可欠となる。これまで、マイクロヒータ集積による温度チューニング技術^[23]や、カスケードリング共振器による広帯域フラットトップ化技術^[24]、構造温度無依存化技術^[25, 26]などが報告されている。温度無依存化技術はシリコン導波路とは逆の負の屈折率温度係数を有するクラッド材料を組み合わせ、互いの温度依存性を打ち消し合う事で実現される。この技術はチューニング消費電力を要せず、またフラットトップ化のように帯域制限を有さない点から理想的な技術となっている。しかし、シリコン中への光閉じ込めが大きい従来の細線導波路では完全な無依存化は容易でなかった。

2004 年、シリコンフォトニクス特有の高屈折率差の特長を生かし、クラッド材料に強光閉じ込めを可能と

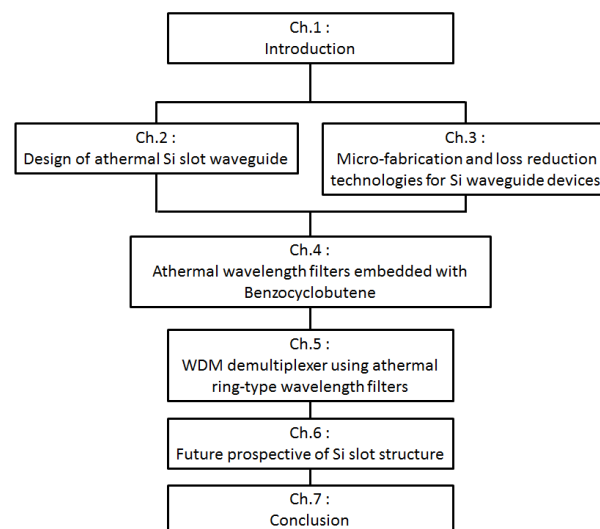


図1 本論文の構成

するスロット導波路構造^[27]が提案された。本構造はシリコンを導波路コアとしながらクラッドの光学特性を伝搬特性に付与することができ、シリコンフォトニクスにおける温度無依存化技術を後押し、本研究テーマとして、スロット導波路構造と負の屈折率温度係数を有するポリマー材料であるベンゾシクロブテン(BCB)を組み合わせた温度無依存波長フィルタの研究を開始した。

研究当初の課題としては、温度無依存導波路用途としての構造設計や波長シフト温度係数の構造誤差依存性などの解析がまだされておらず、検討が必要であった。また、スロット導波路としての基本的な伝搬特性(伝搬損失、曲げ損失など)に関しての明確な評価も明らかにされておらず、解明が必要であった。

以上の背景を踏まえ、図 1 に本論文の章構成を示す。Chapter 2 では BCB 埋め込みスロット導波路での温度無依存導波路の断面構造設計および、波長シフト温度係数の構造誤差耐性伝搬特性に関して数値解析を行った。また、Chapter 3 において、シリコンフォトニクスデバイス開発として必要不可欠な微細加工技術の検討を行い、電子線露光(EBL)プロセスにおける近接効果補正技術、および低損失化に向けた ICP-RIE による Si 転写技術、マルチモード導波路の評価を行った。Chapter 4 では設計された温度無依存導波路を位相干渉領域に適用した温度無依存波長フィルタの設計および作製をおこなった。また、ポリマー材料における懸念事項である吸湿耐性に関して、フッ化樹脂保護層による吸湿保護技術の検討を行った。Chapter 5 では、本章までに

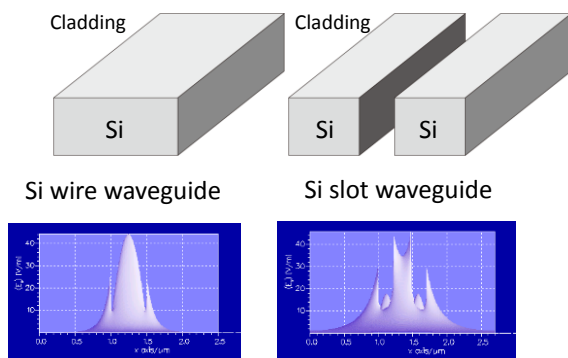


図 2 従来 Si 細線導波路および Si スロット導波路

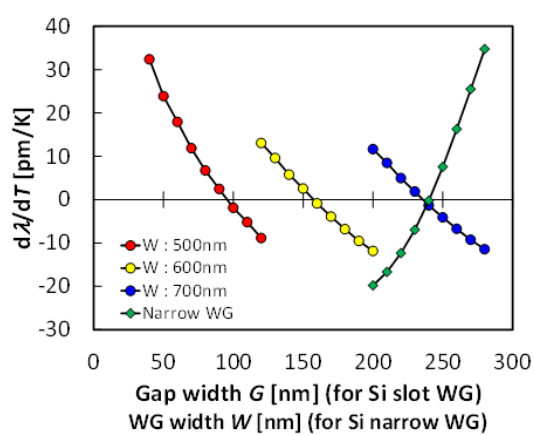


図 3 波長シフト温度係数ギャップ幅依存性

実現された温度無依存リング共振器のアレイ化による WDM-demultiplexer(DEMUX)実現に向けてデバイス設計をおこなった。また DEMUX 実現に向けて必要技術である DUV を用いた波長トリミング技術の検討をおこない、800GHz チャンネル間隔 4 チャンネル WDM フィルタの作製を行った。Chapter 6 ではスロット導波路の応用として、EO ポリマーをクラッド層として用いた変調器、またバイオセンシング、III-V/Si ハイブリッドレーザへの検討をおこなった。

Chapter 2 Design of athermal Si slot waveguide

本章では、BCB 埋め込み温度無依存 Si スロット導波路の設計を行い、数値計算によりその伝搬特性の評価を行った。スロット導波路は図 2 に示すように、nm オーダの間隔で並行する2本の Si 細線導波路から成る。TE-like モードにおいては、従来の Si 細線導波路が Si コアに強い光閉じ込めを行うのに対し、スロット導波路はギャップ領域であるクラッド材料に強く光を閉じ込めることが可能である。そしてスロット導波路幅 W とギャップ幅 G をパラメータとすることで、Si と BCB の光閉じ込め係数を調整し、温度

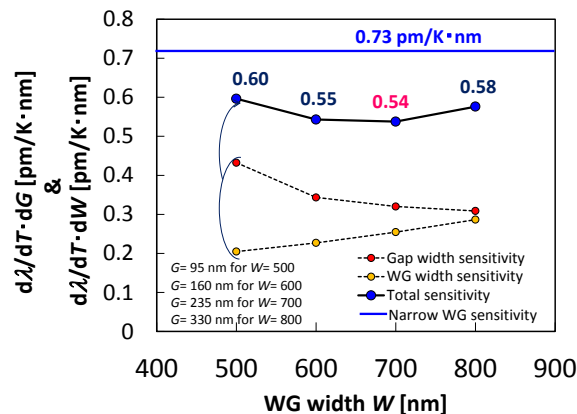


図 4 波長シフト温度係数の導波路構造誤差耐性

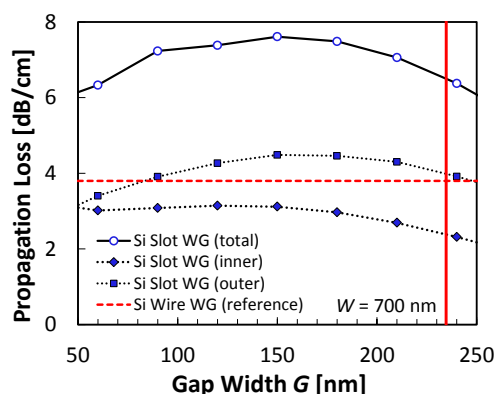


図 5 ラフネス-吸収層置換を用いたスロット導波路の散乱損失ギャップ幅依存性

変化による互いの屈折率変化を打ち消しあうことで、温度無依存化は実現される。図 3 は、各導波路幅における波長シフト温度係数のギャップ幅依存性を示している。計算には有限差分法(FDM 法)を用いた。導波路幅を固定した時、ギャップ幅を広げる事で、BCB への光閉じ込め比率の増大による波長シフト係数の負方向変化が得られた。また、温度無依存となるギャップ幅は導波路幅を広げる事で拡張方向にシフトする結果が得られた。

図 4 は温度無依存導波路構造における、各導波路幅での波長シフト温度係数構造誤差耐性を示している。ギャップ幅依存性に関しては、導波路幅が広がるほど誤差耐性は強くなり、飽和する傾向が得られた。一方、導波路幅依存性に関しては、弱くなる傾向が得られた。基本的に導波路幅、ギャップ幅ズレは同時に起こる事から、構造誤差耐性は両者を総合して評価する必要がある、導波路幅 700 nm(ギャップ幅 235 nm)の時、最も構造耐性の強い温度無依存導波路と計算された。また、青線は大きなエバネッセント光広がり効果を利用した狭細線型

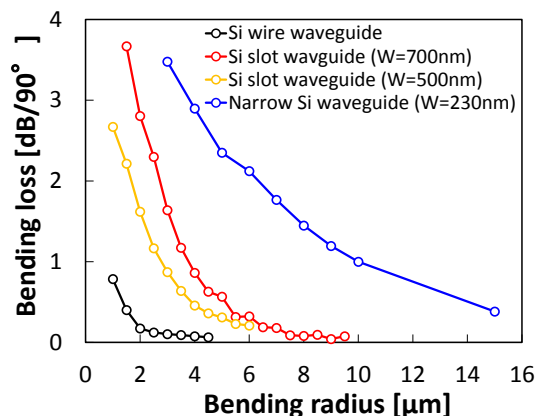


図 6、放射損失の導波路曲げ半径依存性

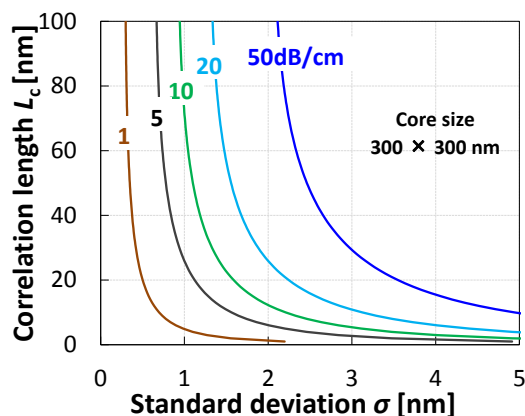


図 7 Si 細線導波路における伝搬損失と側壁ラフネスの関係

温度無依存導波路の構造誤差耐性を示しており、本スロット導波路型温度無依存導波路の方が耐性を有する結果が得られた。

次に、固有モード展開(EME)法を用いて温度無依存スロット導波路の伝搬損失見積もりを行った。今回、伝搬損失の原因となる導波路側壁ラフネスを吸収媒体に置き換え、シリコン細線導波路の測定結果をもとに、散乱損失の見積もりを行った。図 5 に導波路幅 700 nm における計算伝搬損失を示す。結果、温度無依存構造であるギャップ幅 235nm においては、細線導波路と比較して dB 値として約 1.7 倍となり、スロット導波路は細線導波路と比べ、より滑らかな導波路形成技術が必要である結果が得られた。また、図 6 は有限差分時間領域(FDTD)法による 90° 曲げ損失の曲げ半径依存性を示している。温度無依存 Si スロット導波路は許容曲げ半径として 7 μm となり、狭細線型の数十 μm と比較して、急峻な曲げが可能である結果が得られた。

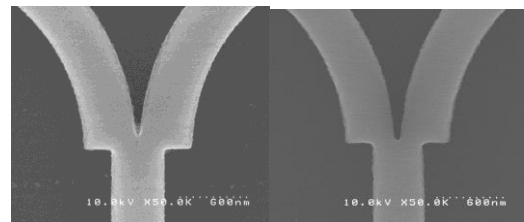


図 8 左:従来均一露光、右:近接効果補正露光

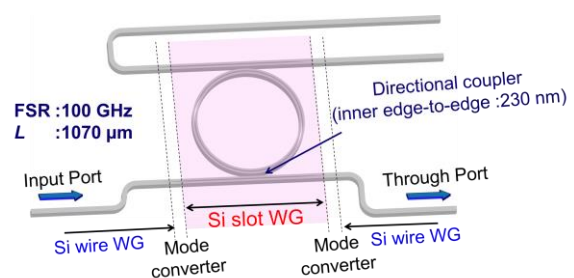


図 9 温度無依存リング共振器の概形図

Chapter 3 Micro-fabrication and loss reduction technologies for Si waveguide devices

本章では、シリコンフォトニクスの加工プロセス検討を行った。前章では温度無依存導波路の構造誤差の評価、伝搬損失の計算を行い、シリコンフォトニクスにおける平滑・微細加工精度の重要性を述べた。図 7 は 300 nm 角の Si 導波路コアを想定した際の側壁ラフネスと伝搬損失の関係を示している。数 nm の側壁ラフネスの増加で伝搬損失は急増することが読み取れる。本章ではまず、微細加工技術の一つ目として、EBL プロセスにおける近接効果補正技術の検討を行った。EBL プロセスにおいては電子銃からの加速電子に対し、レジストや基板の構成原子へ衝突することによる散乱を受けて設計パターンに対してレジストの感光領域は広がりを持つ。この近接効果は、散乱パラメータで評価することが可能であり、主に基板構造・EBL 装置・現像条件に応じた値となる。今回スポット露光を用い、照射量と現像パターン広がりに対し、ガウシアン近似によるフィッティングをかける事で散乱パラメータの見積もりを行った。そして得られた散乱パラメータに応じて、ドーズ量を変調するソフトウェアを用いた近接効果補正(PEC) 露光を行い、微細パターンのマスク形状向上を得た(図 8)。さらに本技術は、光学特性上不要な露光エリアを減らし、プロセス時間の短縮化に向けても有用であり、露光面積を従来の約 1/5 に低減することに成功した。

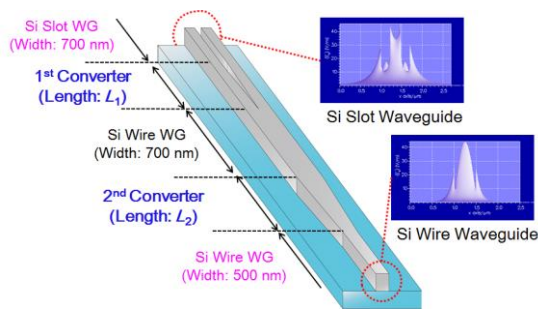


図 10 2 段モードコンバータ

次に ICP-RIE(ガス種:CF₄)による Si 転写技術の検討を行い、ICP 電力、Bias 電力、ガス流量、プロセス圧力、プロセス温度依存性を評価した。側壁垂直性・平滑性を測定し、側壁ラフネス 3σ 値 1.9 nm、500nm 幅シリコン細線導波路での伝搬損失 1.8 dB/cm を得た。また、マルチモード導波路による低損失化検討として、直線領域をマルチモード導波路とし、曲げ導波路領域にマルチモード導波路と Si 細線導波路の 2 種類を用い、両者での高次モード結合および伝搬損失の比較評価を行った。その結果、4 μ m 幅マルチモード導波路で曲げた際は、高次モード結合による 10dB 程度の透過強度ばらつきがみられた。一方、Si 細線導波路による曲げでは高次モード結合が 1dB 以下に抑えられる結果が得られた。また伝搬損失は 500nm 導波路幅での 3.3 dB/cm に対し、1 μ m 以上の導波路幅にすることで 1 dB/cm 以下に低減された。

Chapter 4 Athermal wavelength filters embedded with Benzocyclobutene

本章では、第 2 章で設計した 700nm 幅温度無依存スロット導波路を波長フィルタの位相干渉部分に導入した温度無依存波長フィルタを設計・作製した。図 9 に波長フィルタの一種であるリング共振器の構造モデルを示す。先に述べたように、スロット導波路の伝搬損失は Si 細線導波路と比較して大きいことから、位相干渉の無い領域では従来の Si 細線導波路を導入している。その際、スロット導波路と Si 細線導波路は伝搬モード形状が著しく異なることから、図 10 に示されるような 2 段モードコンバータを導入した。FDM シミュレーションにおいて本コンバータを用いた際のモード変換効率は 99%以上と計算され、直接接続した際の約 70%から改善する結果を得た。また、実際にスロット導波路の伝搬損失を測定し、Si 細線導波路の 3.8 dB/cm に対し、5.3 dB/cm となった。

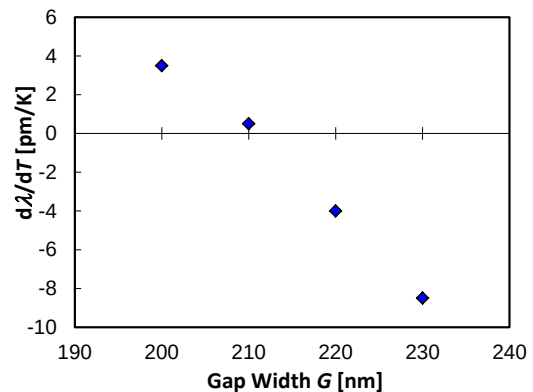


図 11 測定波長シフト温度係数(W=700 nm)

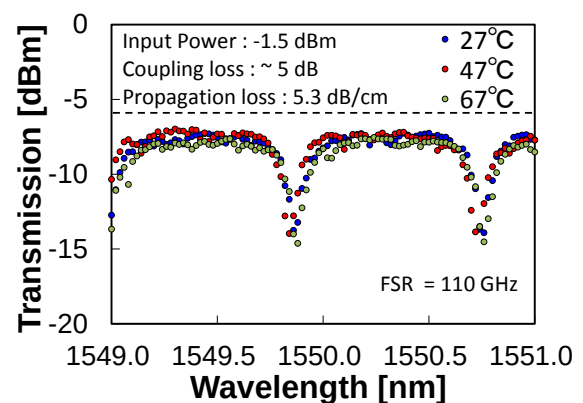


図 12 透過スペクトル@Through ポート

デバイス測定は 1.55 μ m 帯のチューナブルレーザ(もしくは ASE 光源)を用い、先球ファイバを通じてデバイスに入射し、デバイス透過光に対し再び先球ファイバを通じパワーメータ(もしくはスペクトルアナライザ)を用いて検出した。デバイス温度制御にはペルチェ素子を用いた。図 11 に 700nm 導波路幅スロット導波路における波長シフト温度係数ギャップ幅依存性を示す。シミュレーションと同様、ギャップ幅を広げることで波長シフト係数は負方向に変化し、ギャップ幅 210 nm の時に温度無依存動作 0.5 pm/K を達成した。図 12 に温度無依存構造における、各温度の透過スペクトルを示す。各温度に対し共振波長が安定していることが見て取れ、3 mm のガイド Si 細線導波路、及び 2 つのモードコンバータを含むデバイス挿入損失はおおよそ 1 dB となり、低損失温度無依存リング共振器を実現した。また、同じく波長フィルタの一種であるマッハツェンダー干渉計(MZI)に関しても本温度無依存導波路を導入することで波長シフト温度係数-0.9 pm/K を得た。本デバイスにおいては、10 Gbps の信号伝送実験を行い、27~67°C の温度範囲において、アイ開口、ジッター値の維持を

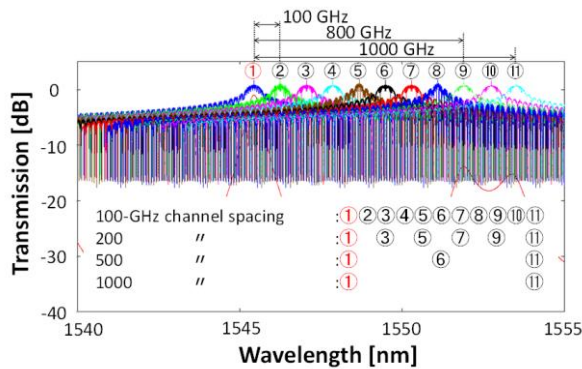


図 13 信号伝送計算モデル

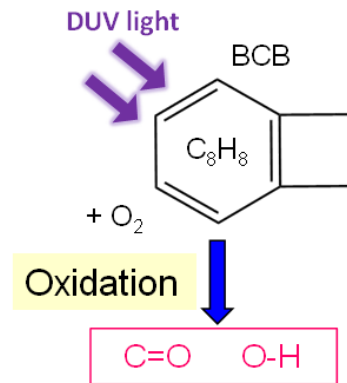


図 15 DUV 照射による BCB 酸化モデル

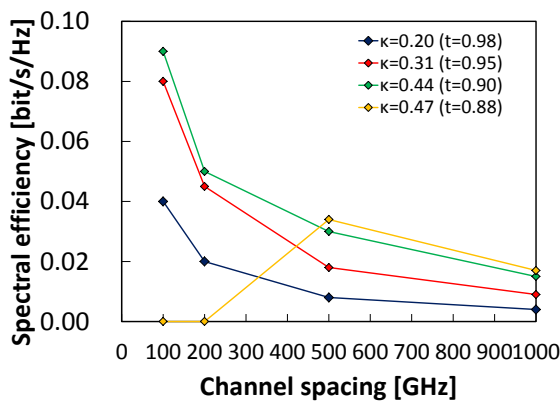


図 14 スペクトル効率 WDM チャンネル間隔依存性

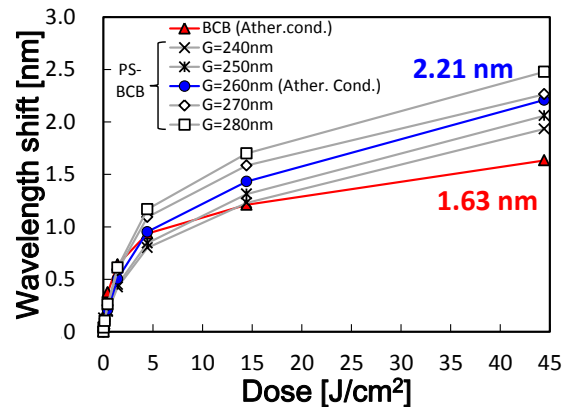


図 16 波長トリミング量 DUV 照射量依存性

確認した。

さらにポリマー材料の課題である、吸湿性の評価を行った。ポリマー材料は吸湿により屈折率変化を引き起こし、共振波長シフトを誘起する。本章では、アモルファスフッ化樹脂である CYTOP(旭硝子製)を保護層として用いる事で、温度 30℃、湿度 80%恒温恒湿下加速試験において波長シフトの低減に成功した。

Chapter 5 WDM demultiplexer using athermal ring-type wavelength filters

本章では、第 4 章で実現した温度無依存リング共振器をアレイ化することによって温度無依存 WDM フィルタを設計・作製した。C バンド帯(1530~1565 nm)において、温度無依存スロット導波路の群屈折率 2.35、最小曲げ半径 7μm を考慮すると、最大 FSR(Free spectral range)はおおよそ 20 nm となり、全帯域カバーするに当たっては FSR 800 GHz、1000GHz を有するリング共振器の組み合わせによる

FSR 拡張が必要となる。WDM フィルタ設計として、図 13 に示されるモデルにおいて WDM 信号の伝送計算を行い、チャンネル間クロストークを考慮したスペクトル効率を評価した。変数パラメータとしては、リング-バス導波路間の結合係数 κ 、チャンネル間隔とした。

図 14 はスペクトル効率のチャンネル間隔依存性を示しており、ビットエラーレート(BER) $< 10^{-12}$ をエラーフリーの基準とした。結合係数 0.44、チャンネル間隔 100 GHz の時、スペクトル効率は 0.09 bit/s/Hz と計算された。効率向上に向けては、カスケードリングによる広帯域フラット化が必要となる。

また、強い光学特性構造依存性を有するシリコンフォトニクスにおいて WDM フィルタを実現するには、共振波長の設計値と測定値の差分を補償する、波長トリミング技術が必要不可欠である。従来はマイクロヒータ集積による温調トリミングが用いられているが、本温度無依存波長フィルタでは動作しない。そこで本章では、クラッド材料である BCB に紫外線を照射

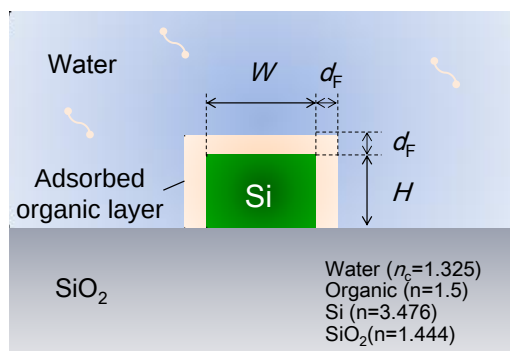


図 17 Si 細線導波路エバネッセント光バイオセンサ

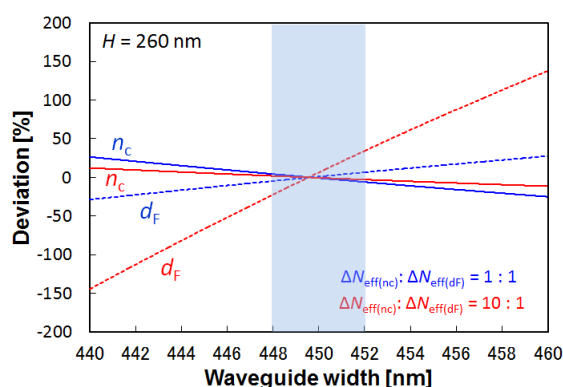


図 18 検出要因の導波路幅誤差依存性

し、大気中の酸素と結合させる波長トリミング技術の検討を行った(図 15)。

その結果、図 16 に示すように、照射に伴う波長シフトが観測され、照射量 44.4 J/cm^2 の時、非感光性 BCB において 1.63 nm 、感光性 BCB において 2.21 nm を得た。この値は、CMOS プロセスである ArF 液浸露光での 300mmSOI ウエハ上導波路幅面内バラツキを考慮した際に、必要波長トリミング量をカバーする結果となっている。また、上記照射範囲においては、照射後も温度無依存性、損失等の光学特性の維持を確認している。

Chapter 6 Future prospective of Si slot structure

本章では、シリコンスロット導波路を用いたデバイス・分野応用に関して検討を行った。その中で、エバネッセント光を利用するバイオセンサは、導波路界面に付着した検出対象による屈折率変化を利用しており盛んに研究がされている。スロット導波路を用いることで、その大きな境界面での電界密度により、高精度検出が可能である。今回、スロット導波路センサ応用に向けた必要技術として、従来の Si 細

線導波路型センサでのセンシング要因の分離法検討を行った。バイオセンシングにおいては検出対象溶媒の屈折率変化と、導波路に付着したターゲット分子の膜厚変化の両方が同時に屈折率変化を引き起こす(図 17)。そこで、TE/TM の両方の伝搬モードでの測定結果から、この両者の要因を分離する計算手法を明らかにした。また、実際にセンサ使用する Si 細線導波路は構造誤差を有する事から、構造誤差に対する要因検出精度を評価する必要がある。実際、想定した導波路幅誤差 $\pm 10\text{nm}$ においては、分離精度は最大 150% の偏差を有しているが、測定時に得られる、両伝搬モードにおける群屈折率を利用する事で、導波路構造の推定が可能となり、測定精度を 30% 程度まで高める事ができる結果を得た(図 18)。

Chapter 7 Conclusion

本論文内容のまとめを行った。

参考文献

- [1] R. Soref and J. Lorenzo, "All-silicon active and passive guided-wave components for $\lambda = 1.3$ and $1.6 \mu\text{m}$," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 22, pp. 873-879, 1986.
- [2] H. Rong, R. Jones, A. Liu, O. Cohen, D. Hak, A. Fang, *et al.*, "A continuous-wave Raman silicon laser," *Nature*, vol. 433, pp. 725-728, 2005.
- [3] T. Baba, "Slow light in photonic crystals," *Nature Photonics*, vol. 2, pp. 465-473, 2008.
- [4] K. Furuya, K. Nakanishi, R. Takei, E. Omoda, M. Suzuki, M. Okano, *et al.*, "Nanometer-scale thickness control of amorphous silicon using isotropic wet-etching and low loss wire waveguide fabrication with the etched material," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, pp. 251108-251108-3, 2012.
- [5] J. S. Orcutt, S. D. Tang, S. Kramer, K. Mehta, H. Li, V. Stojanović, *et al.*, "Low-loss polysilicon waveguides fabricated in an emulated high-volume electronics process," *Opt. Express*, vol. 20, pp. 7243-7254, 2012.
- [6] K. K. Lee, D. R. Lim, H.-C. Luan, A. Agarwal, J. Foresi, and L. C. Kimerling, "Effect of size and roughness on light transmission in a Si/SiO₂ waveguide: Experiments and model," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, p. 1617, 2000.
- [7] W. M. Green, M. J. Rooks, L. Sekaric, and Y. A. Vlasov, "Ultra-compact, low RF power, 10 Gb/s silicon Mach-Zehnder modulator," *Opt. Express*, vol. 15, pp. 17106-17113, 2007.
- [8] D. J. Thomson, F. Y. Gardes, J.-M. Fedeli, S. Zlatanovic, Y. Hu, B. P. P. Kuo, *et al.*, "50-Gb/s silicon optical modulator," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, pp. 234-236, 2012.
- [9] X. Xiao, H. Xu, X. Li, Z. Li, T. Chu, Y. Yu, *et al.*, "High-speed, low-loss silicon Mach-Zehnder modulators with doping optimization," *Opt. Express*, vol. 21, pp. 4116-4125, 2013.
- [10] H. C. Nguyen, S. Hashimoto, M. Shinkawa, and T. Baba, "Sub-100 μm , 40 Gb/s photonic crystal silicon optical modulators," in *Proc. IEEE Group IV Photonics (GFP) Conference*, 2012, pp. 1-3.
- [11] D. Feng, S. Liao, P. Dong, N.-N. Feng, H. Liang, D. Zheng, *et al.*, "High-speed Ge photodetector monolithically integrated with large cross-section silicon-on-insulator waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 95, p. 261105, 2009.
- [12] G. Masini, S. Sahni, G. Capellini, J. Witzens, and C. Gunn, "High-speed near infrared optical receivers based on Ge waveguide photodetectors integrated in a CMOS process," *Adv. Opt. Technol.*, vol. 2008, pp. 1-6, 2008.
- [13] D. Ahn, C.-y. Hong, J. Liu, W. Giziewicz, M. Beals, L. C. Kimerling, *et al.*, "High performance, waveguide integrated Ge photodetectors," *Opt. Express*, vol. 15, pp. 3916-3921, 2007.
- [14] S.-L. Cheng, J. Lu, G. Shambat, H.-Y. Yu, K. Saraswat, J. Vuckovic, *et al.*, "Room temperature $1.6 \mu\text{m}$ electroluminescence from Ge light emitting diode on Si substrate," *Opt. Express*, vol. 17, pp. 10019-10024, 2009.
- [15] Y. Fu, "Light emission and slot waveguide effect in Er-doped SiO₂/Si nanocrystalline multilayer structures," University of Rochester, 2012.
- [16] D. Liang, S. Srinivasan, D. A. Fattal, M. Fiorentino, Z. Huang, D. T. Spencer, *et al.*, "Reflection-assisted unidirectional hybrid silicon microring lasers," in *Proc. IEEE Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)*, 2012, pp. 12-15.
- [17] R. Baets, "Photonics: An ultra-small silicon laser," *Nature*, vol. 498, pp. 447-448, 2013.
- [18] T. Pinguet, P. M. De Dobbelaere, D. Foltz, S. Gloeckner, S. Hovey, Y. Liang, *et al.*, "25 Gb/s silicon photonic transceivers," in *Proc. IEEE Group IV Photonics (GFP) Conference*, 2012, pp. 189-191.
- [19] P. Dong, C. Xie, L. Chen, L. L. Buhl, and Y.-K. Chen, "112-Gb/s monolithic PDM-QPSK modulator in silicon," in *Proc. European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC)*, 2012.
- [20] Y. Urino, T. Horikawa, T. Nakamura, and Y. Arakawa, "High density optical interconnects integrated with lasers, optical modulators and photodetectors on a single silicon chip," in *Proc. Optical Fiber Communication (OFC) Conference*, 2013.
- [21] Z. Hassan, N. Allec, L. Shang, R. P. Dick, V. Venkatraman, and R. Yang, "Multiscale thermal analysis for nanometer-scale integrated circuits," *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 860-873, 2009.
- [22] Z. Li, M. Mohamed, X. Chen, E. Dudley, K. Meng, L. Shang, *et al.*, "Reliability modeling and management of nanophotonic on-chip networks," *Proc. IEEE Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, vol. 20, pp. 98-111, 2012.
- [23] P. Dong, R. Shafiiha, S. Liao, H. Liang, N.-N. Feng, D. Feng, *et al.*, "Wavelength-tunable silicon microring modulator," *Opt. Express*, vol. 18, pp. 10941-10946, 2010.
- [24] F. Xia, M. Rooks, L. Sekaric, and Y. Vlasov, "Ultra-compact high order ring resonator filters using submicron silicon photonic wires for on-chip optical interconnects," *Opt. Express*, vol. 15, pp. 11934-11941, 2007.

- [25] Y. Kokubun, S. Yoneda, and S. Matsuura, "Temperature-independent optical filter at 1.55 μm wavelength using a silica-based athermal waveguide," *Electronics Letters*, vol. 34, pp. 367-369, 1998.
- [26] Y. Kokubun, S. Yoneda, and H. Tanaka, "Temperature-independent narrowband optical filter at 1.3 μm wavelength by an athermal waveguide," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 1998-2000, 1996.
- [27] V. R. Almeida, Q. Xu, C. A. Barrios, and M. Lipson, "Guiding and confining light in void nanostructure," *Opt. Lett.*, vol. 29, pp. 1209-1211, 2004.