

シリコンフォトニック波長可変レーザを用いた 医療イメージング用光源の開発

Investigation of Silicon Photonic Wavelength Tunable Laser Diode for Medical Imaging Application

2151009



研究代表者

東北大学

准教授

北

智 洋

[研究の目的]

現在の医療検査装置において低侵襲でありながら高感度、高解像度を有するイメージング装置は、必要不可欠なものとなっている。とりわけ光干渉断層法（Optical Coherent Tomography：OCT）は、数 μm オーダーの高い空間分解能によって生体内部の特性を検査できることから、眼底検査や食道癌検査などの分野で実用化が進んでいる。干渉法によって断層イメージングを行うためには、広い波長帯域を持つ光源、狭いスペクトル線幅を持つレーザ光源など検査目的に見合った光源が求められる。これまでにOCT光源としてMEMS技術、KTN結晶の電気光学効果等を利用した波長可変レーザ光源などが開発されているが、高価・大型でOCTの広い普及の妨げとなっている。本研究においては、シリコンフォトニクスを用いる事で、高い空間分解能を有するOCT用光源を安価かつ超小型に実現する事を目的とする。

[研究の内容、成果]

本研究課題の具体的な目標は、OCT分野において実用化が進んでいる広波長帯域光源をシリコンフォトニクスを用いる事で非常に小型・低消費電力で実現することである。

OCTにおける空間分解能は、光源の波長帯域に反比例することから、波長可変帯域ができ

るだけ広い波長可変レーザが望ましい。また、現行のOCT光源は、数10 cm程度の大型の筐体と大きな消費電力を必要とするが、シリコンフォトニクスを利用する事で、バタフライパッケージに搭載可能な超小型・低消費電力波長可変レーザを実現する。本研究によって開発するOCT光源によって従来では、大型で高価であったOCT検査装置の大幅な省スペース化、低コスト化が可能になる。

これまでに申請者が開発してきたシリコンフォトニクス波長可変レーザの構造模式図を図1に示す。本レーザは、シリコンフォトニクスを用いて作製した波長可変フィルタチップと化合物半導体材料からなる光増幅（SOA）チップとを端面結合させた構造を持つ。

波長可変フィルタは、幅400 nm 高さ220 nm程度の微細なシリコンのコアを持つシリコン細線光導波路によって形成された二つのリング共振器で構成されている。

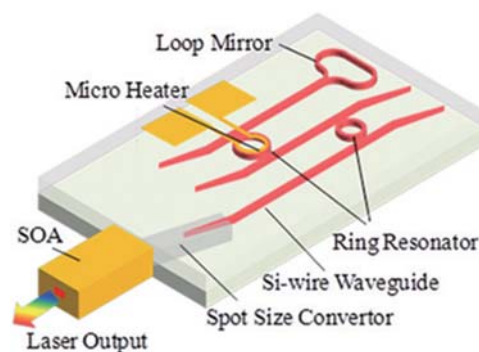


図1 シリコンフォトニクス波長可変レーザ

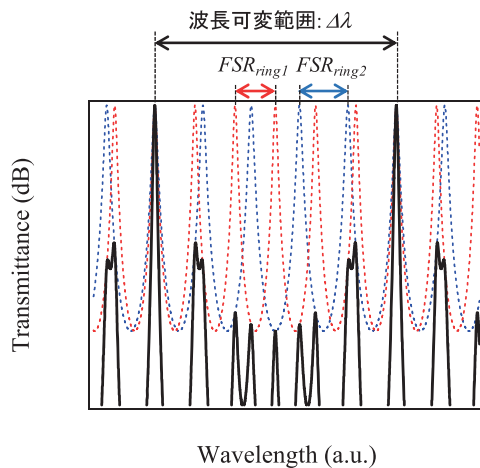


図2 シリコンフォトニクス波長可変フィルタの透過スペクトル

シリコンフォトニクスを用いて作製した二重リング共振器の透過スペクトルの模式図を図2に示す。リング共振器は、波長に対して周期的に透過率が変化するが、二つのリング共振器の周囲長をわずかにずらす事で広い波長範囲において単一の共振波長のみが透過するバーニア効果を利用する事で、単一波長の選択が可能になる。リング共振器上に設置したマイクロヒータを通电加熱する事で、シリコンの熱光学効果によって屈折率が変化しリング共振器の共振波長も変化し、透過波長を制御する事が可能である。

1.3 μm 帯において 80 nm の波長範囲で任意の波長のみを透過する波長フィルタの設計を行った。バーニア効果によって選択できる波長範囲 $\Delta\lambda$ は、二つのリング共振器の共振周波数間隔 (FSR_{ring1} 及び FSR_{ring2}) を用いて以下のように表わせる。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2 (FSR_{ring1} \cdot FSR_{ring2})}{c (FSR_{ring1} - FSR_{ring2})}$$

ここで FSR_{ring1} は、シリコン細線光導波路を用いたリング共振器によって作製しやすい約 800 GHz とした。これより FSR_{ring2} は 740 GHz と設計した。選択された波長の透過率と隣の共振モードの透過率差の差（モード利得差）が大きいほど波長選択性の良い波長フィルタとなる。

ここでモード利得差は、シリコン光導波路とリング共振器の光学的な結合の強さ（結合効率）を小さくするほど大きくとれ、波長選択性の高いフィルタを構成することが可能になる。しかしながら小さすぎる結合効率は、選択波長の透過率も減少させるので、選択波長は高い透過率を維持しつつ大きなモード利得差を実現できる 0.2 程度の結合効率のリング共振器を設計した。

このようにして設計、試作した波長可変フィルタの顕微鏡写真を図3に示す。本フィルタは、モード径の小さなシリコン細線光導波路とモード径が大きな半導体光増幅器とを効率的に結合するために、端面部分にスポットサイズコンバータを形成してある。また、リング共振器上には、融点の高いタンタルを用いたマイクロヒータを設置している。

波長フィルタと結合させる半導体光増幅器は、光通信における O バンドにおいて大きなゲインを持つソーラボ社製ゲインチップを用いた。波長フィルタと半導体光増幅器を結合させ、

光増幅器に注入する電流を変化させた時の出力光強度を図4に示す。閾値電流 50 mA 程度の明瞭なレーザ発振が確認できる。次にマイクロヒータに通电加熱を行い発振波長を変化させた時の波長スペクトルを図5に示す。様々な発振波長でのスペクトルを重ねており、最大 79.8 nm の範囲で波長を変化させる事ができた。図6にマイクロヒータ投入電力と発振波長の関係を示す。ヒータ加熱によってほぼ線型に波長が

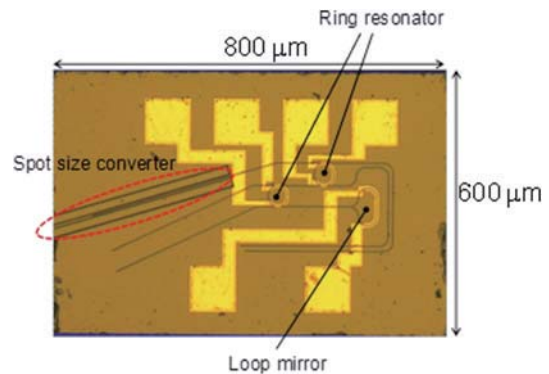


図3 試作した波長可変フィルタチップ

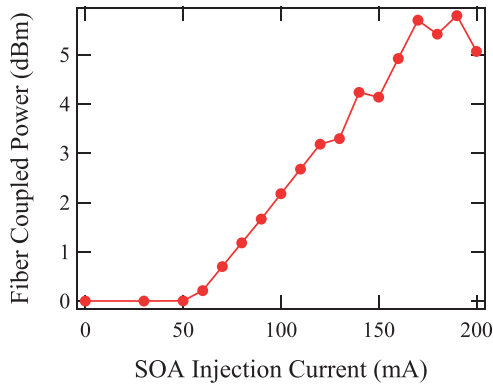


図4 光出力強度の注入電流依存性

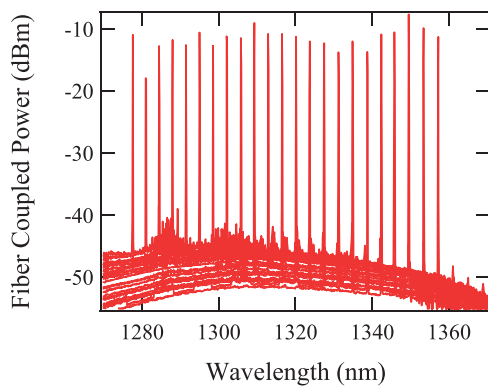


図5 波長可変特性

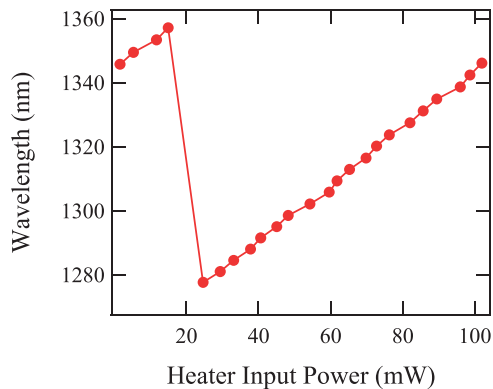


図6 ヒータ電流による発振波長の制御

変化しており、ヒータによる波長変化の効率は 0.86 nm/mW という結果が得られた。本実験で得られた波長可変範囲 79.8 nm は、周波数に換算すると約 14 THz に対応し一般的な光通信に用いられる C 帯の周波数範囲 4.4 THz の約 3 倍であり非常に広い周波数範囲である。

このように波長フィルタの設計値である 80

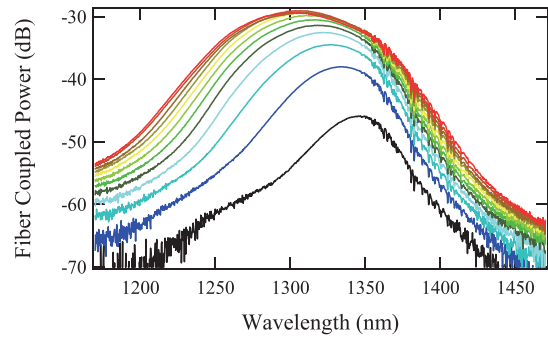


図7 光増幅チップの ASE スペクトル

nm の波長可変範囲をほぼカバーする範囲での波長可変動作の実証に成功した。本レーザに用いた光増幅チップの ASE スペクトルを図7に示す。大電流注入時に ASE スペクトルの波長帯域が増加し、半導体光増幅器のゲイン波長範囲は約 150 nm に及ぶことがわかる。

本実験では、波長可変フィルタの制約により 80 nm 程度の波長可変範囲であったが、より広い波長可変範囲を持つフィルタを設計、試作する事で、さらに広い波長範囲で利用できる波長可変レーザの作製が可能になる。本研究で試作した波長可変レーザのデバイスサイズは、シリコンフォトニクスチップのサイズが $800 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ 、光増幅チップのサイズは、 $2 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ であることから、約 $3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ である。このように非常に小型でありながら広い波長可変範囲を有する波長可変レーザの作製に成功した。

[今後の研究の方向、課題]

本研究によって非常に小型でありながら、 80 nm という広い波長範囲の任意の光を出力できる波長可変レーザの開発が可能になった。また、波長可変フィルタの構造を最適化する事で、 150 nm 程度まで波長可変範囲を拡大できる可能性が示された。以上から波長可変範囲に関しては、これまでに開発されてきた OCT 用波長可変光源に対する本レーザの優位性を確認できた。本レーザを OCT 用光源として実用化する

にあたっての今後の課題は、波長切り替え速度の高速化である。現状の波長切り替え速度は、数百 μ 秒程度であり波長をスキャンする周波数は 1 kHz 程度が限界である。今後はマイクロヒータ構造を改良することで、波長スキャン速度の高速化を図っていく。

[成果の発表, 論文等]

北 智洋, 松本 敦, 山本直克, 川西哲也, 山田博仁,
「シリコンフォトリソ —— 量子ドット波長可変
レーザ」電子情報通信学会 LQE 研究会, 2016 年 1
月 28 日, 神戸市産業振興センター (神戸)