

CMOS 互換フォトニック結晶共振器の開発による省エネ光制御に関する研究 (152103015)

Low-power devices based on CMOS compatible photonic crystal cavity

研究代表者

田邊孝純 慶應義塾大学

Takasumi Tanabe Keio University

研究期間 平成 27 年度～平成 29 年度

概要

信号処理に係る消費電力の増大傾向を解決するために、チップ間あるいはチップ内の情報伝送を光化する試みが進んでいる。そのためには、効率的な光変調や光検出が必要であるが、シリコンチップ上でそれを行うのは簡単ではない。これまでのシリコンフォトニクス素子で小型な変調器や受光器が作成されてきたが、フォトニック結晶技術を用いればさらなる省エネや小型化が期待できる。しかし従来のフォトニック結晶は、完全には CMOS 互換ではなかった。我々は CMOS 互換性を高めるべく、フォトリソグラフィを用いた作製手法と、ガラスクラッド構造であっても 10^5 を大きく超える光閉じ込め係数(Q 値)が得られることを示した。この素子構造を基本として全光スイッチ動作を実証した。次に、同様の構造を用いて電気光変調器を作製し、 $\pm 0.5V$ の電圧を電極間に印可することで効率的な光変調が実現できることを示した。さらに、最小受光感度 $2\mu W$ を有する光レシーバ動作も全シリコンで実現した。これによって、全光、電気光と光電気変換を CMOS 互換フォトニック結晶共振器で実現ができることを示した。

1. まえがき

フォトニック結晶を用いるとシリコン(Si)フォトニクスにはない様々な機能が実現できる。フォトニック結晶素子を Si フォトニクスと融合できれば、これまでの Si フォトニクス技術よりもさらに小型化や省エネ化を進めることができるのみならず、実現が難しかった新たな機能素子の実現が期待できる。

すなわち本研究は、フォトニック結晶共振器技術を CMOS 互換性の高い Si フォトニクスに真に融合することを目的としている。より具体的には、CMOS 互換構造(すなわち SiO_2 クラッド付き)の高 Q 値 2 次元フォトニック結晶微小光共振器を CMOS 互換プロセス(すなわちフォトリソグラフィ)で作製しその高性能化と多機能化を目指すものであった。

2. 研究開発内容及び成果

2. 1. フォトリソグラフィで作製した共振器による高 Q 値の実現

作製は、フォトリソグラフィを用いて、構造は SiO_2 クラッド構造を有することで、上下面が保護した。これまで、2 次元 Si スラブで作製したフォトニック結晶共振器では CMOS 互換性が謳われてきたが、実際には、電子ビーム描画で作製され、エアブリッジと呼ばれる構造を有するために、他の CMOS 素子や Si フォトニクス素子との互換性が取れなかった。それに対してフォトリソグラフィを用いて、 SiO_2 クラッド構造を有する構造からなる、CMOS 互換フォトニック結晶共振器を作製できれば、広く用いられつつある Si フォトニクスファウンダリをも利用することができるようになった。

設計を工夫することで、Si フォトニクスファウンダリで作製した場合でも高性能(すなわち高 Q 値)なフォトニック結晶共振器が得られた。図 1(a)に、作製した素子の電子顕微鏡写真を示す。像を取得するためにクラッドを剥いているが、実際の素子は SiO_2 クラッドで保護されている。共振器部分の空気穴の位置をわずかにずらした幅変換型共振器のデザインを採用している。画像からわかるように、フォトリソグラフィで作製した場合でも所望のパタンが得られた。

本素子の光学透過スペクトルを図 2 に示す。素子は SiO_2 クラッドで保護されているため安定した光学特性が得られる。Q 値 2.2×10^5 が達成されフォトリソグラフィで作製したフォトニック結晶共振器として当時世界最高値であった。

また、ファブリケーションの揺らぎを利用した共振器モードも確認し、きわめて高い Q 値の 2.5×10^5 が得られた。

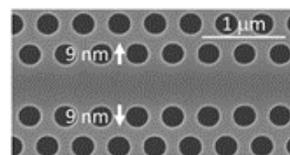


図 1 CMOS 互換 Si フォトニック結晶共振器

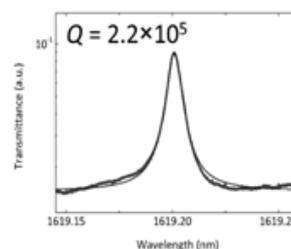


図 2 共振器素子の透過スペクトル

2. 2. pin 電気光学変調器及び全 Si レシーバ

次に CMOS 互換 pin 集積フォトニック結晶共振器を用いて、電気光(EO)変調実験を行った。その結果を図 3 に示す。0.5GHz 信号で変調し、電圧振幅は $\pm 0.5V$ である。さらに振幅 $\pm 0.25V$ でも明瞭な変調動作が確認され、低電圧駆動が実証できた。本素子は、 SiO_2 クラッドされており、従来素子構造での報告例と比較し、速度 2 倍、電圧振幅比で 1/2 の特性改善が達成された。

通常通信波長帯の光検出は InGaAsP や Ge 材料を使ってなされるが、これらの材料と Si をハイブリッド集積することは簡単ではない。もし全 Si 光レシーバが実現できれば、コスト面で大きなアドバンテージが得られる。そこで我々はフォトニック結晶共振器を用いて、光を強く閉じ込

めて、小さな光入力でも効率的に二光子吸収キャリアを生成することで光検出を実現した。

図4に示す感度特性が得られ、そこから計算される量子効率率は0.89%と決して高くはないが、本素子のポイントは、暗電流が36pAと他のレーザと比較して低いので、検出可能な最低パワー2μWが達成された。

また本素子は、Si 細線とファイバとの結合においても最小結合損失1.4dBの記録値を達成した。

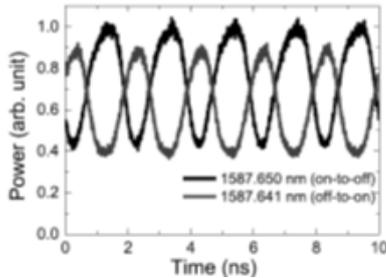


図3 0.5 GHz EO 変調実験

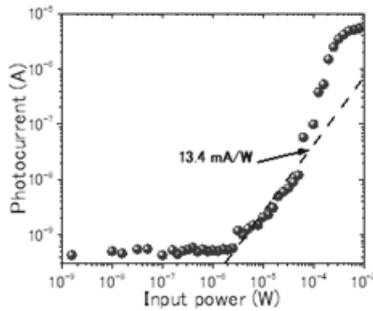


図4 光レーザ動作時の感度曲線

2. 3. DeMUX フィルタ

フォトリソグラフィで作製されたフォトニック結晶において、8、16チャンネル×267、136GHzかつ2.5 Gbpsの波長分波器を実現できることを示した。素子の大きさは1信号あたり60μm²である。この大きさは従来素子の20万分の1程となる。この素子の透過スペクトルが図5である。個々の共振器の直上にはヒータが集積されており、電極への電圧を変化させることで、共振波長をチューニングできる。こうした集積もSiO₂クラッドがなされているので可能となっている。

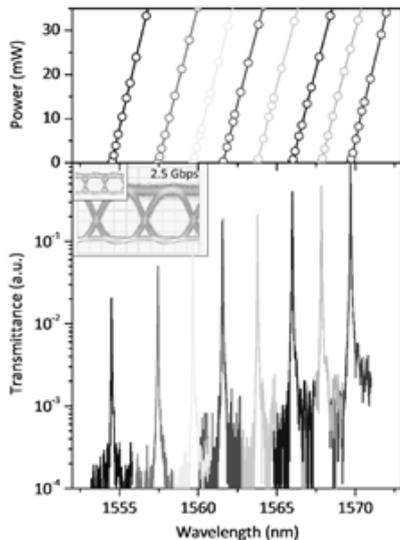


図5 DEMUX フィルタ特性

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

Si フォトニクス素子だけでは実現されてこなかった素子を、フォトニック結晶素子と組み合わせることで実現ができる。従来はSi フォトニクス素子とフォトニック結晶素子は双方ともにCMOS 互換性がうたわれていたものの、作製も構造も異なっていたために集積化が難しかった。今回、世界で初めてSi フォトニクスファウンダリのスキームを用いても、様々なフォトニック結晶素子応用が可能なQ 値10⁵を達成したことで、Si フォトニクスとフォトニック結晶素子技術が融合すると期待される。

CMOS によるフォトニック結晶素子の安定的な作製が可能となったので、DeMUX フィルタをはじめとする、複数共振器素子を組み合わせた高機能光集積回路の研究が進展すると期待できる。この技術は、素子の低コスト化が求められるような、比較的短距離の光伝送用のコンポーネントに用いることが期待される。

4. むすび

SiO₂クラッドで保護された構造のフォトニック結晶共振器をフォトリソグラフィで作製し、当時世界最高値であるQ 値2.2×10⁵を達成した。素子作製のランダム性についても評価を行い、2 nm 程度の作製誤差があることを明らかにするとともに、その程度の作製誤差の影響を積極的に活用し、光のアンダーソン局在を活用するとQ 値2.5×10⁵が得られることを示した。

pin 構造を集積することでEO 変調を実現し、sub-GHz の速度で動作する電気光変調器をデモンストレーションし、±0.5 V での光変調、さらには±0.25 V でも光変調が得られることを確認した。さらに、pin 構造は光レーザ動作も可能とし、暗電流36 pA、最終検出可能な光強度2 μW (-27 dBm) の光レーザを全シリコンで作製した。

CMOS フォトニクスの勃興に向けたキーとなる素子の開発を進めた。

【誌上発表リスト】

- [1]Y. Ooka, T. Tetsumoto, A. Fushimi, W. Yoshiki, and T. Tanabe, "CMOS compatible high-Q photonic crystal nanocavity fabricated with photolithography on silicon photonic platform," Scientific Reports, Vol. 5 11312 (2015年6月)
- [2]Y. Ooka, N. A. B. Daud, T. Tetsumoto, and T. Tanabe, "Compact resonant electro-optic modulator using randomness of a photonic crystal waveguide," Opt. Express, Vol.24 No.10 pp11199-11207(2016).
- [3]Y. Ooka, T. Tetumoto, N. A. B. Daud, and T. Tanabe, "Ultrasml in-plane photonic crystal demultiplexers fabricated with photolithography," Opt. Express, Vol.25 No. 2 pp1521-1528 (2017).

【報道掲載リスト】

- [1]"Photolithographic fabrication of a silica-clad photonic-crystal nanocavity", SPIE Newsroom, 2015年11月17日
- [2]"光ナノ共振器、高性能か フォトニック結晶構造 安価に量産"、日刊工業新聞 朝刊27面、2015年7月14日
- [3]"「光回路の素子量産」慶大、光使う情報処理に道"、日経産業新聞 朝刊8面、2015年7月6日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.phot.elec.keio.ac.jp>