

ワイドバンド波長多重シリコンフォトニクス素子の創生

大阪府立大学 大学院工学研究科 高橋 和

Development of Silicon Photonic Chip for Wideband WDM Telecommunication

Yasushi Takahashi

Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

シリコン光素子は極短距離光通信の普及に有効である。本研究の目的は、異なる光通信波長帯で動作するシリコン光素子を、同一の素子デザインを用いて、単一チップ上に集積することである。そのためには、1チップ内でシリコン基板の厚みを、光素子の動作波長に合わせて制御する必要がある。我々は、インクジェット装置と光干渉膜厚計を用いて、位置精度が $100\mu\text{m}$ 、厚み精度がサブナノメートルの薄膜化プロセスを開発した。これにより、例えば、1つのシリコンチップに、主要な光通信バンドである1310/1480/1550 nm帯で動作する光素子を集積可能となる。デモンストレーションとして、1310 nm帯と1550 nm帯で動作するフォトニック結晶シリコンラマンレーザを、1チップ集積した。

Silicon photonic devices are available for the industrial applications of ultra-short distance optical communication. The purpose of this research is to fabricate silicon photonic devices operating in different optical communication wavelength bands on a single chip using the same device design. To this end, it is necessary to control the thickness of the silicon substrate in accordance with the operation wavelengths. We have developed the chemical process with a position accuracy of $100\mu\text{m}$ and a thinning accuracy of sub-nanometer by using an inkjet printer and a film thickness monitor. Thereby, it is possible to integrate the photonic devices operating in the 1310/1480/1550 nm bands on one silicon chip. We demonstrate the photonic crystal, silicon Raman lasers operating in the 1310/1550 nm bands fabricated on one chip.

1. まえがき

巨大データセンタにおける大規模情報処理は、スマート社会の実現を根幹から支える技術である。しかし、ポータブル通信機器の普及に伴い増加しつづける情報流通量を、従来の電子回路技術だけで担っていくことは、エネルギー的に困難となってきている。なかでも、銅線ケーブルを用いた情報伝送が物理限界に到達しつつあり、シリコンフォトニクス素子を集積した高密度光リンクの商業利用が始まっている。今後、この情報伝送量をさらに増大するには、通信に用いる波長域の拡大が重要であり、全ての通信波長帯 $1.25\mu\text{m}$ ~ $1.65\mu\text{m}$ を利用していくことが望まれる。

Silicon on insulator (SOI) 基板は、シリコンフォトニクスのプラットフォームとなっている。これは、シリコン電子回路の発達した製造技術が転用できること、大きな屈折率差による強い光閉じ込めが可能なこと、さらに全ての光通信波長帯でシリコンが透明という特

長のためである。実際に、筆者らは、100 万以上の Q 値を有するフォトニック結晶ナノ共振器を $1.27 \mu\text{m} \sim 1.60 \mu\text{m}$ の広い波長範囲で開発してきた¹⁾。しかし、SOI 基板上に作製される光素子の動作波長は、トップシリコン層の厚みに依存するため、同一基板上に作製されたシリコンフォトニクス素子は、基本的に狭い波長範囲でしか動作しない^{2)~4)}。

光素子の性能を変えずに、動作波長だけを変えるには、図 1 に示すように、素子サイズをスケール則に従って制御するのが最善である(楽器の周波数が楽器の大きさに反比例するのと同様である)。3次元方向すべてにわたり、ナノメートル単位で構造制御できれば、1つの素子デザインで、あらゆる波長帯の光素子を作製可能となる(屈折率の波長分散は小さいので無視できるものとする)。現在のシリコン製造技術では、水平方向の制御は容易であり、筆者らは、フォトリソグラフィを用いて高 Q 値ナノ共振器の大量作製を実証している⁵⁾。しかし、垂直方向、つまり SOI 基板のトップシリコン層の厚みの制御が困難である。図 1 のような光素子を実現するには、ナノメートルの厚み精度と位置選択性を有する薄膜化技術が必要となる。

筆者の研究グループは、サブナノメートル精度で基板を化学エッチングにより薄膜化する技術を開発してきた。本研究では、この技術にインクジェット装置を導入して、位置精度を高めることと、3段以上の厚みを有するシリコン基板の作製を目指した。また、エッチング保護膜とエッチングプロセスの最適化により、平坦なエッチング表面を得ることも重視した。本手法の有用性を示すために、1310 nm 帯と 1550 nm 帯で動作するフォトニック結晶シリコンラマンレーザの 1 チップ集積にもトライした。

2. 実験方法

2.1 シリコン基板の薄膜化

筆者が研究対象とするシリコンフォトニック結晶は、その構造を形成する空気孔の大きさが 1 nm 変化するだけで、動作波長が数 nm 変化する。光通信に使用される光素子では、動作波長をナノメートル精度で制御する必要があるため、SOI 基板の厚みをサブナノメートル精度で制御できるのが理想である。このような技術は、これまで存在しなかったが、筆者らは、図 2 に示すように、トップシリコン層を化学エッチングしながら、その膜厚を光干渉計測でリアルタイム測定することで達成した⁶⁾。

図 2 (a) に示すように、薄膜化しない部分を保護マスクで覆い、化学エッチングされている領域の膜厚を溶液中で計測する。図 2 (b) に示すように、反射スペクトルの干渉周期は、基板が空气中 / 液中にあってもほとんど変わらない。そのため膜厚測定精度は同じである。膜厚測定装置は大塚電子製の FE-300 を用いた。エッチングには $\text{H}_2\text{O} : \text{KOH} (4.0 \text{ mol/l}) : \text{H}_2\text{O}_2 (10.1 \text{ mol/l}) = 50 \text{ ml} : 15 \text{ ml} : 0.3 \text{ ml}$ の室温混合溶液、保護膜にはエポキシ樹脂を用

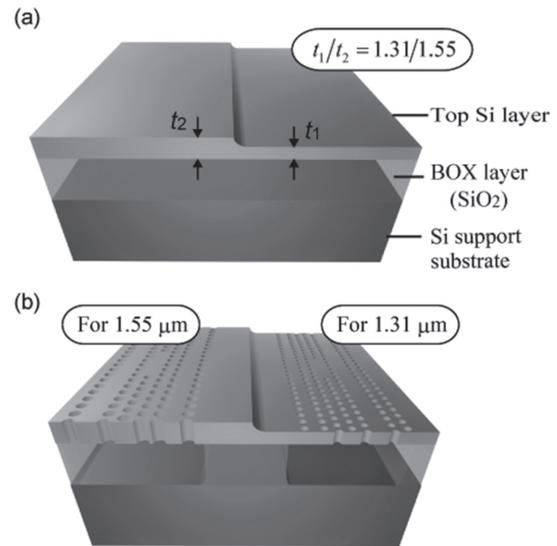


Fig.1 a) Three-dimensional view of the dual thickness SOI substrate. b) 3D view of the chip that integrates the 1.31 and 1.55 μm photonic crystal cavities.

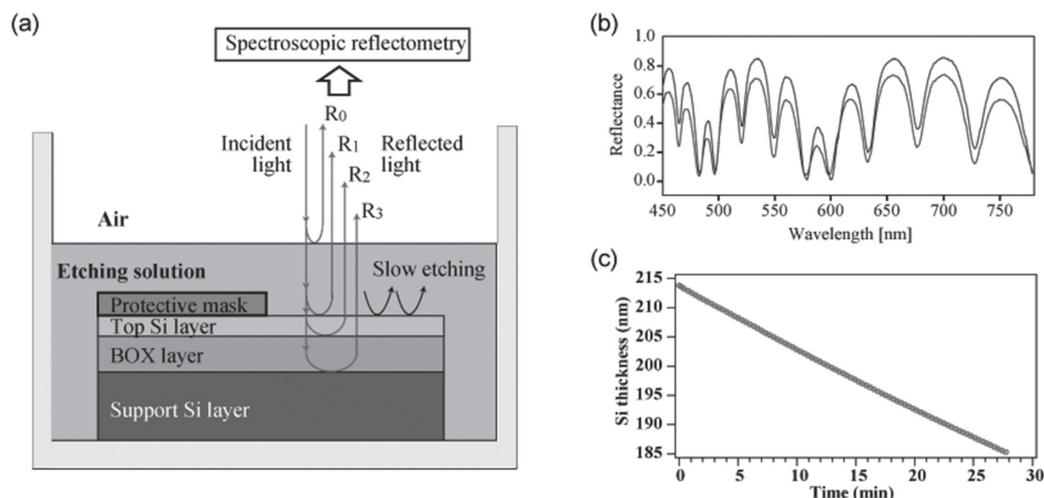


Fig.2 a) Schematic for the chemical etching of the substrate with aid of spectroscopic reflectometry. b) Spectra of the reflected light for the SOI in air and submerged in the etching solution. c) Temporal change of the thickness of the top Si layer.

いた。KOHは異方性エッチング溶液として知られるが、エッチングを阻害する H_2O_2 をわずかに混ぜることで、そのエッチング能力を低減できる。図2(c)に示すように、1分間に1ナノメートルという超低速度でエッチングが進む。そのためサブナノメートル精度で膜厚を制御できる。エッチング後の表面をAFMで調べた結果、表面凸凹は0.3 nm程度に抑えることができた。

2.2 インクジェットの導入

図3に示すように、インクジェット装置(紀州技研 NANO WM5000)を用いて、SOI基板上に保護マスクであるエポキシ樹脂を塗布した。上記の化学エッチングは、シリコンの表面状態に敏感である。インクジェット塗布を用いることで、エッチングする表面を清浄に保つことができるので、エッチングの再現性が高まる。エポキシの粘度(シクロペンタノンを用いて調整)と基板温度を最適化することで、マスク塗布の位置精度を50マイクロメートル以下に高めることができた。シリコン光素子には低光損失特性が求められるので、シリコン中への不純物の混入、結晶欠陥の形成は最も避けるべきである。本手法では、エッチング溶液、保護膜とも安価な市販品を用いているが、結晶シリコン中に混入する不純物が少なく、また結晶欠陥も形成されにくいという長所がある。そのため、100万以上の Q 値を持つナノ共振器を作製できる⁶⁾。

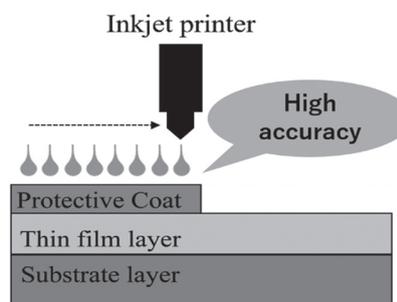


Fig.3 Picture for coating the protective mask using an inkjet printer.

3. 実験結果と考察

3.1 多段基板の作製

図4に、2つの厚みを有するSOI基板のプロセスチャートを示す。まず、市販のSOI基板に保護膜をインクジェットで塗布する。希フッ酸により表面酸化物を除去したのち、化

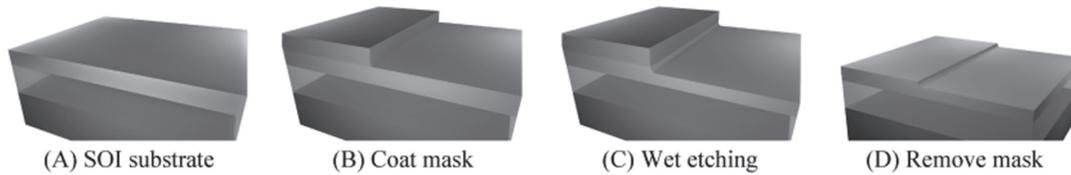


Fig. 4 Process steps for fabrication of the dual thickness SOI substrate.

学エッチングにより薄膜化を行う。エッチング後に保護膜はピラニア洗浄で除去した。KOH エッチング溶液に対して十分な耐性があり、かつエッチング後に綺麗に除去できるマスクとしてエポキシ樹脂が優れていることが分かった。図 5 は、この手法を繰り返すことで作製した 4 段階の厚み 213/191/170/150 nm を持つ SOI 基板の写真である。

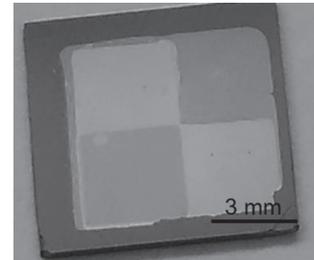


Fig. 5 Camera image of a quad thickness SOI.

図 6 に 3 種類の厚みを有する SOI 基板の作製結果を示す。図 6(a) は、挿入図の矢印に沿って厚みを測定した結果である。挿入写真の色の変化(光干渉により生じる)に合わせて 213/200/180 nm と厚みが変わっていることが分かる。この厚み変化は、現在の光通信の主要な波長帯である 1.55/1.48/1.31 μm の比率と一致している。図 6(b) で、基板全体にわたり急峻な段差が直線状に得られていること、エッチング表面の平坦性が維持されていることが分かる。

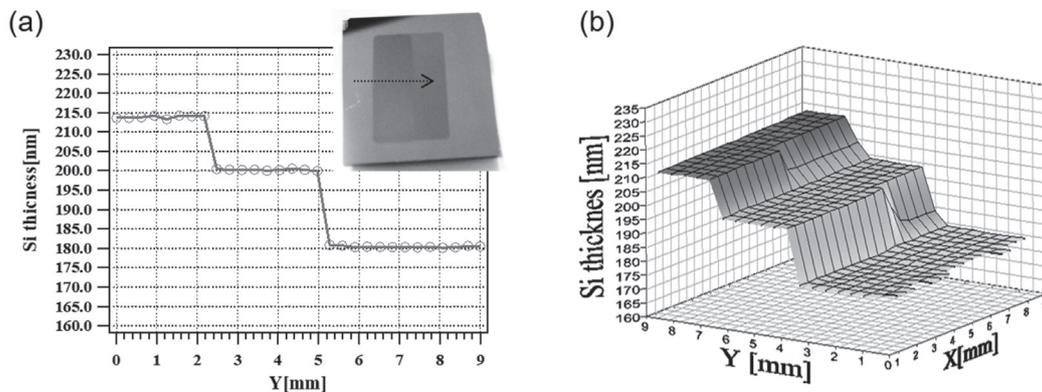


Fig. 6 (a) Line profile for top Si layer of the three thickness SOI substrate. Insertion is a shot of the fabricated substrate. (b) Two-dimensional map of the substrate.

3.2 微小ギャップの作製

本手法でどの程度の微小ギャップが形成可能か調べた。図 7(a) に示すように、インクジェットの塗布条件を変えてみたが、保護膜のライン幅は 200 μm 程度が最小であった。条件によっては、界面が直線状にならないケースも見られた。基板の前処理、表面状態などでも大きく変化した。一方で、化学エッチングは、図 7(b) に示すように、100 μm 以下の微小ギャップでも急峻かつ均一に行うことができた。一部、平坦でないところは、ギャップ内に溜まったゴミを測定してしまったためである。

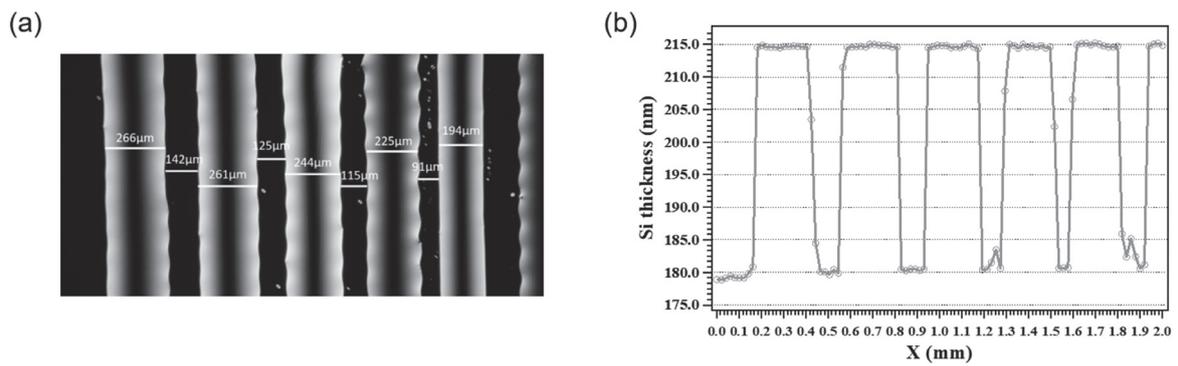


Fig.7 (a) Microscope image of the substrate coated with the epoxy resin. (b) The line profile for the top Si layer.

3.3 1.31 μm帯/1.55 μm帯で動作するシリコンラマンレーザの1チップ集積

最後に、動作波長バンドが異なる2つのシリコンラマンレーザの集積作製を述べる。シリコンラマンレーザは、光励起型のレーザだが、安定して室温連続発振する唯一のシリコンレーザとして知られる。我々は、2013年、高 Q 値ナノ共振器を用いて、閾値 $1\mu\text{W}$ のラマンレーザ開発に成功している²⁾。この光素子はシリコンフォトリソグラフィのなかでも作製難易度の高いデバイスの1つである。

図8に、デュアル波長動作する高 Q 値ナノ共振器の作製プロセスチャートを示す。2つの厚みを持つSOI基板に、電子線描画(EB)レジストをスピコートで塗布する。次に、EBによるフォトニック結晶パターン描画を2つの領域に対して行う。現像してパターンを形成した後、プラズマエッチングによりフォトニック結晶パターンをトップシリコン層に転写する。EBレジストの除去後、弗酸によるエアブリッジ化を行いサンプルが完成する。

ここで注目すべきは、EBとプラズマエッチングは、1回ずつしか行わない点である。段差を持つ基板に対してもEBレジストは均一に塗布できた。また、異なる厚みを持つ基板に対して、オーバーエッチングを抑えたプラズマエッチングが可能だった。これは、厚みが小さい方の空気孔の直径が小さいので、エッチングレートが下がるためである。図8(b), (c)のSEM像より、サイズの異なる2つの空気孔において良好な空気孔パターンが形成されていることが確認できる。

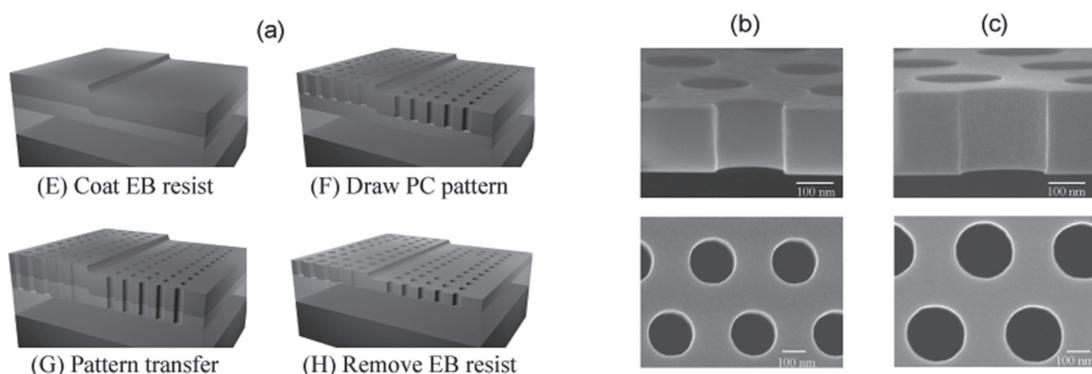


Fig.8 a) Process steps for fabrication of the O- and C-band Si Raman lasers on a dual thickness SOI substrate. b) Cross-sectional SEM image and top view image of the air holes for the O band and c) for the C band.

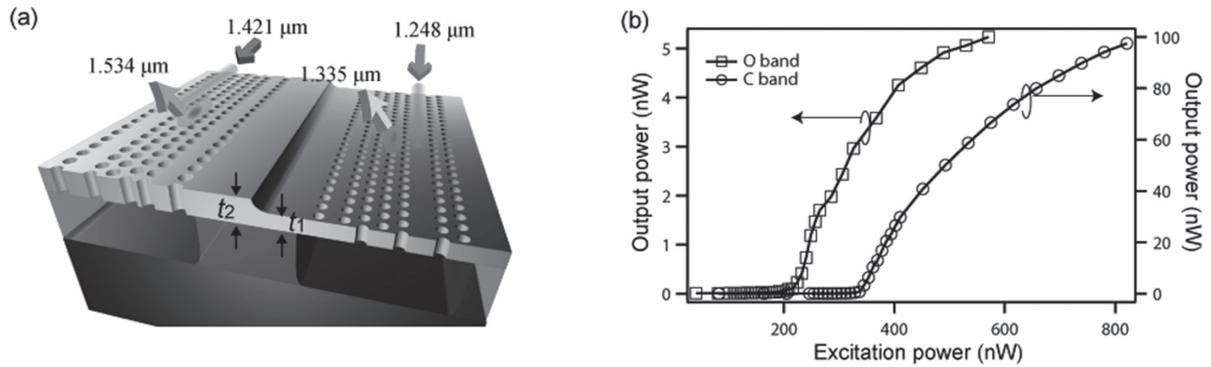


Fig.9 a) 3D view of the nanocavity-based Raman Si laser device operating at the O band and C band. c) Laser output power for both lasers as a function of the excitation power coupled into nanocavity.

図9(a)は、 $1.31\ \mu\text{m}$ 帯/ $1.55\ \mu\text{m}$ 帯で動作するシリコンラマンレーザのチップイメージである。図9(b)は、ラマンレーザの入出力特性を示している。入力、共振器に入射した光強度を示している。どちらの波長帯においても、閾値 $1\ \mu\text{W}$ 以下で、ラマンレーザ発振を確認した。

4. 結論と展望

サブナノメートル精度で基板の厚みを化学エッチングする技術に、インクジェット装置を導入して、膜厚制御の位置精度を高めることに成功した。本技術を用いれば3段以上の厚みを有するシリコン基板の作製が可能となることを確認した。また、エッチング保護膜とエッチングプロセスの最適化により、平坦なエッチング表面を得ることができた。本手法を用いて、 $1.31\ \mu\text{m}$ 帯/ $1.55\ \mu\text{m}$ 帯で動作するフォトニック結晶シリコンラマンレーザを、1度のEB描画とプラズマエッチングのみで、1チップ上に作製できることを実証した。現在、本技術を用いて、 $1.2\ \mu\text{m}$ 以下で動作するシリコンラマンレーザの開発中である^{7),8)}。今後、シリコン高 Q 値ナノ共振器を集積した光モジュールの実用化を目指していく。

5. 謝辞

本研究は、平成29年度日本板硝子材料工学助成会の研究助成を受けて行ったものである。同助成会に心より感謝致します。本研究成果は、筆者の指導学生である桑原充輝が行ったものである。フォトニック結晶サンプルの作製は、京都大学野田進教授との共同研究によるものです。

6. 参考文献

- 1) R. Terawaki, Y. Takahashi, M. Chihara, Y. Inui, and S. Noda, Opt. Express **20** (20), 22743 (2012).
- 2) Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, Nature **498** (7455), 470 (2013).
- 3) Y. Takahashi, T. Asano, D. Yamashita, and S. Noda, Opt. Express **22** (4), 4692 (2014)
- 4) T. Asano, Y. Ochi, Y. Takahashi, K. Kishimoto, and S. Noda, Opt. Express **25** (3), 1769 (2017).

- 5) K. Ashida, M. Okano, M. Ohtsuka, M. Seki, N. Yokoyama, K. Koshino, K. Yamada, and Y. Takahashi, *J. Lightwave Technol.* **36** (20), 4774 (2018).
- 6) M. Kuwabara, S. Noda, and Y. Takahashi, *Laser Photon. Rev.* **13** (2), 1800258 (2019).
- 7) 岡田 博子、田中 捺美、浅野 卓、野田 進、高橋 和、2019 年秋季応用物理学会 19p-E207-5 (2019).
- 8) 岡田 博子、田中 捺美、浅野 卓、野田 進、高橋 和、2020 年春季応用物理学会 13p-B401-2 (2020).