

結晶方位を回転した SOI 基板における新機能シリコン光素子開発

Development of silicon photonics devices fabricated on the SOI substrate with a rotated top silicon layer

大阪府立大学大学院工学研究科電子・数物系専攻 准教授 高橋 和
Department of Physics and Electronics, Osaka Prefecture University, Yasushi Takahashi

要旨

Silicon on insulator (SOI) 基板上に集積作製されたシリコン光素子を用いた小型光回路は、データセンタのエネルギー消費量を抑えるのに有効な技術である。しかし、シリコンは間接遷移型半導体のため、光通信の源泉となるレーザ光の発生には不適な材料である。我々は、3次の非線形光学効果である誘導ラマン散乱を用いた超低閾値シリコンラマンレーザの開発に成功してきた。今後も、非線形光学効果を利用していけば、新たなシリコン光素子が開発可能と期待される。非線形光学効果は、シリコンの結晶方向に強く依存するため、方位を変えたさまざまな基板に対して研究を推進することが肝要となる。本研究では、従来の SOI 基板からトップシリコン層の結晶方向だけを“45度回転”した SOI 基板上に、高 Q 値フォトニック結晶ナノ共振器、シリコンラマンレーザ、多波長フィルターなどを作製して、性能評価を行った。その結果、Q 値については 100 万以上が得られ、ラマンレーザについてはサブマイクロワット閾値での発振を確認した。

1. はじめに

シリコンを用いた光素子（シリコンフォトニクス）は、高純度大口径基板と洗練された CMOS プロセス技術を用いて作製されるため、電子デバイスとの高い融合性を有している。現在、シリコンフォトニクスを集積化した小型光回路は、データセンタのエネルギー消費量を抑えるのに重要な短距離光通信に必要な不可欠な技術として注目されている [1,2]。しかし、シリコンは間接遷移型半導体のため、レーザ開発には不適な材料である [3-5]。シリコン光回路の光源には、化合物半導体レーザが採用されており、夢のデバイスと言われた真のシリコンレーザ開発は、断念されつつある。

現在、室温連続発振するバルクシリコンレーザは、3次の非線形光学効果である誘導ラマン散乱を用いたシリコンラマンレーザのみである [6,7]。なかでも申請者は、超高 Q 値を有するフォトニック結晶ナノ共振器を用いて、閾値 1 μ W、デバイス長 10 μ m を持つシリコンラマンレーザを実現してきた [8]。このレーザは、将来の集積 Si 光回路への応用において、高い潜在力を有している。

2. 研究目的

ラマンレーザのように、非線形光学効果を利用すれば、シリコンフォトニクスに新たな機能を付加することが可能であり、集積光回路の発展に寄与する。ここで注意すべきは、非線形光学効果は、結晶方向に依存するという点である。シリコンフォトニクスの研究プラットフォームとなってきたのは、図 1 (a)に示すような(001) SOI 基板である。この基板上に作製される光素子は、シリコンが劈開可能な[110]結晶方向に沿って作製される（劈開は光導波路端面の形成など幅広く利用される手法である）[9]。しかし、申請者が開発したシリコンラマンレーザは、[100]結晶方向に沿って作製する必要があり、従来素子との集積化に難点を抱える。今後、誘導ラマン散乱以外の非線形光学効果を利用する際にも、同様の問題が生じると予想される。

そこで我々は、トップ Si 層の結晶方向を任意に制御した SOI 基板を用いた研究が重要と考えた。本研究では、その手始めとして、図 1(b)に示すようにトップ Si 層の結晶方向だけを 45 度回転した(100) SOI 基板上に、高 Q 値ナノ共振器を用いたシリコンラマンレーザ、多波長

フィルターなどを集積化して、性能評価を行った。

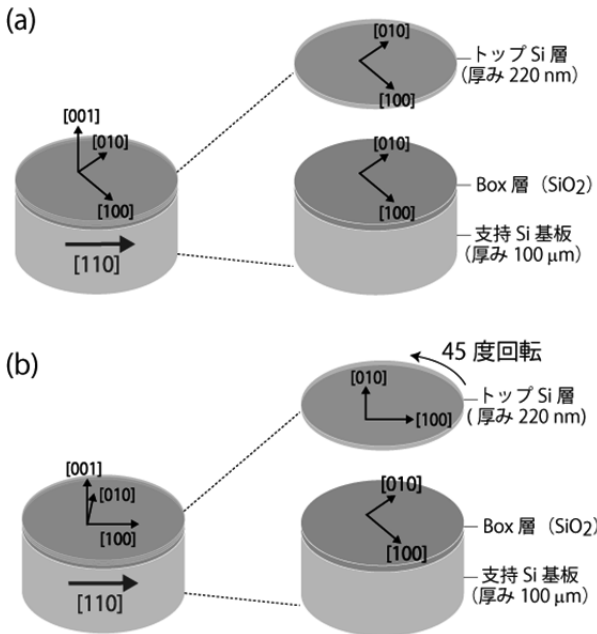


図 1. (a) シリコンフォトニクス素子作製に用いられる従来の(100) SOI 基板。(b) 本研究で用いたトップ Si 層を支持 Si 基板に対して 45 度回転した SOI 基板。[110]結晶方向は、この基板が劈開可能な方向である。

3. 結晶方位を 45 度回転した SOI 基板

SOI 基板は、2 枚の Si 基板を熱融着して作製される。図 1(a)に示すように、従来の SOI 基板は、支持 Si 基板とトップ Si 層の結晶方向を一致させて融着が行われている。一方、図 1(b)に示す SOI 基板では、トップ Si 層を支持 Si 基板に対して 45 度回転させて基板融着を行っている。つまり、支持基板の[110]方向とトップ Si の[100]方向が平行となっている。トップ Si 層の厚みは 220 nm 程度であり、基板 Si の厚みよりも大幅に小さい。そのため、新しい基板の劈開は、基板 Si 層の[110]方向に沿って行われる。つまり、この基板を用いれば、トップ Si 層の[100]方向に沿って作製されたラマンレーザに対して垂直方向に基板を劈開して導波路端面を形成することが可能である。非線形光学効果を用いないシリコンフォトニクス素子の性能は、作製する結晶方向にほとんど依存しないので、それらは[100]方向に作製しても問題ない。

図 2 は X 線回折 (XRD) により、SOI 基板の結晶方位を測定した結果を示している。x 軸は、サンプルの回転角度を示している。図 2(a)は従来基板に対する測定結果、図 2(b)は本研究で用いた基板に対する結果である。図 2(b)の 4 つのピーク位置は、図 2(a)のピーク位置から 45 度シフトしている。図 2(b)の 180 度に見られる小さなピークは、支持 Si 層からの回折信号である。これらの特徴は、図 2(b)のトップ Si 層の結晶方位が、支持 Si 層の結晶方位から 45 度回転していることを確かに示している。

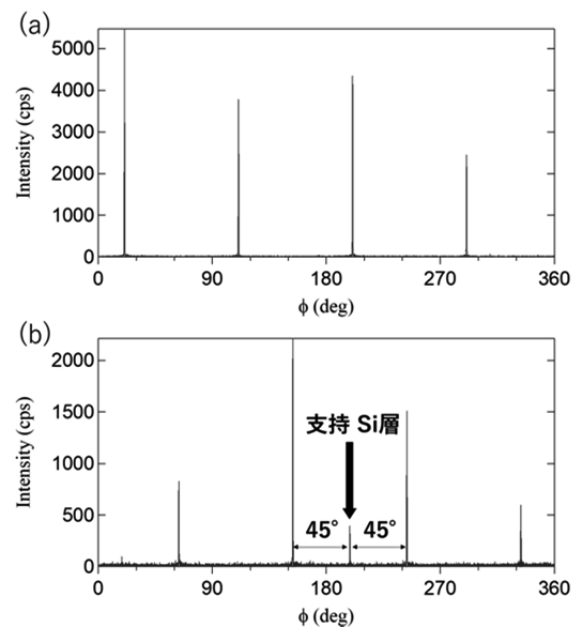


図 2. (a) 従来 SOI 基板の XRD 結果。(b) トップ Si 層を 45 度回転した SOI 基板の XRD 結果。

4. シリコンラマンレーザ構造

図 3 にラマンレーザに用いたヘテロ構造ナノ共振器の模式図とそのバンド図を示す。共振器構造は、文献 [8]と同様で、空気孔半径 130 nm、格子定数が 410-415-420 nm の 2 ステップヘテロ構造ナノ共振器である。フォトニック結晶ナノ共振器は、高 Q 値と微小体積を両立できるので、非線形光学効果を高めることが可能である [10-12]。その中でもヘテロ構造ナノ共振器は、世界最高 Q 値 1100 万を達成している構造である [13]。

バンド図に示すように、格子定数を広げた中央部分に、2 つの導波モードに起因する 2 つの

高 Q 値ナノ共振モードが形成される。両者の周波数差 Δf は、シリコンナノ共振器のラマンシフトである 15.606 THz に一致するように作製してあり [14]、励起光とストークスラマン散乱光をそれぞれ 2 つの高 Q 値ナノ共振モード（ポンプモードとストークスモードと呼ぶ）に閉じ込める。2 つのナノ共振モードの電磁界分布とシリコンのラマン選択則を考えると、シリコンの [110] 結晶方向ではなく、[100] 結晶方向（またはそれと等価な方向）に沿って共振器を作製した方が、誘導ラマン利得を 20 倍高めることができることが理論的に明らかとなっている [9]。

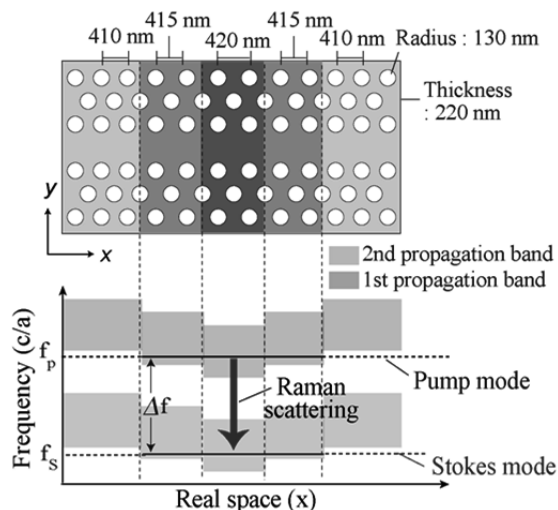


図 3. シリコンラマンレーザに用いた高 Q 値フォトニック結晶ヘテロ構造ナノ共振器。

図 4 は、図 1 (b) に示した結晶方位を 45 度回転した SOI 基板上に作製したラマンレーザ試料の電子顕微鏡写真である。フォトニック結晶パターンは電子線描画により形成され、トップ Si 層への空気孔の転写はプラズマエッチングにより行われた。他グループのシリコンラマンレーザは、P-i-N 構造を導入しているが、我々のレーザはドーピング、金属蒸着などは一切行っておらず、トップ Si 層に穴をあけただけの、全バルクシリコン素子である。シリコンラマンレーザの中でも、真のシリコンレーザと呼べるデバイスである。中央の線欠陥がヘテロ構造ナノ共振器、上部の線欠陥導波路はナノ共振器にポンプ光を入射するためのものである。下部の

導波路はストークスモードを調べるために付加されたもので、レーザ動作に直接は関与しない。従来基板では、導波路端面がこれらの導波路に対して 45 度傾いていたため、入射損失が大きかったが、新基板においては解消できることを確認した。ナノ共振器の Q 値は、空気孔の位置・大きさの不完全性が大きくなると、低下する [16]。我々は、電子顕微鏡観察以外にも多角的に試料分析を行ったが、結晶方向を変えたことによるフォトニック結晶構造の劣化は一切確認できなかった。

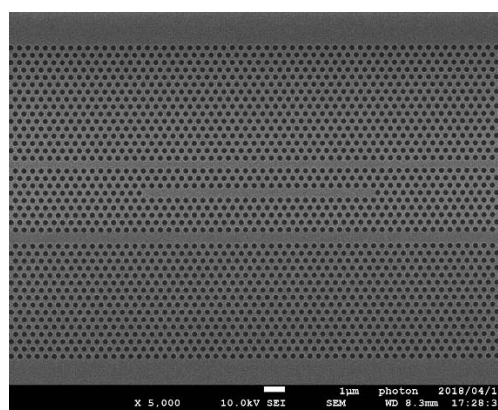


図 4. 作製したシリコンラマンレーザ素子の電子顕微鏡写真。

5. 実験結果

図 5(a), (b) は、図 4 に示したラマンレーザ試料のポンプモード、ストークスモードの共振スペクトルを示している（測定方法については割愛する [9,15]）。スペクトルから見積もられたポンプモードの波長は 1429.168 nm、 Q 値は 12 万、ストークスモードの波長は 1544.175 nm、 Q 値は 180 万、2 つのモードの周波数差は 15.61 THz であった。2 つのモードの波長と Q 値は、従来の SOI 基板上に作製されたラマンレーザと同様である。我々は、数 10 個のサンプルを測定したが、 Q 値については、従来基板と同様か、僅かに高い値が得られた。これは、今回用いた基板の方が、サンプル作製精度が僅かに高くなること示している。これは、サンプル作製に用いた電子線描画装置の特性に起因しており本質的な現象ではないが、CMOS プロセスを用

いて大量作製を考える際には重要な利点になると考えられる。

図 5(c)は、ラマンレーザの入出力特性を示している。挿入図にあるように、ポンプモードを隣接した導波路を介して励起して、共振器の垂直方向に放出されるラマン散乱光を測定している。ポンプパワー0.53 μW 付近から出力の急激な増加がみられ、明瞭な室温連続レーザ発振が確認された。閾値前後において2桁以上の出力増強が見られ、エネルギー効率は最大で5.6%に達した。これは、従来 SOI 基板上に作製されたラマンレーザと同等の性能である。出力は100 nW 程度であり、向上が今後の課題である。

図 5(d) は閾値前後におけるラマンレーザの赤外線 (InGaAs) カメラ像である。長波長透過フィルターを挿入してポンプ光はカットして、ストークス光のみを測定している。閾値を挟んで、レーザ発振を示す輝点がカメラ像でもはっきりと確認できる。本デバイスは10 μm 程度の長さしかもたないため、100 個以上を1 mm 長の導波路に集積することも可能である。今後は、そのような実証も行っていく。

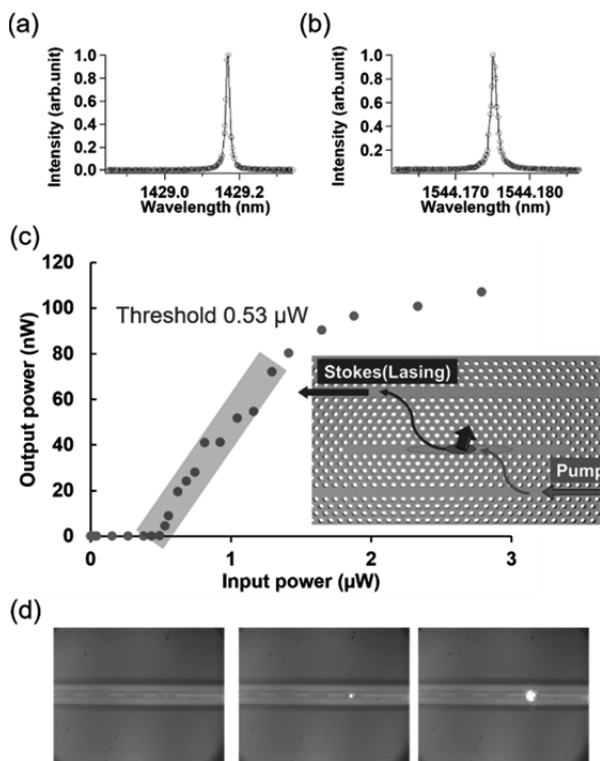


図 5. (a) ストークスモードの共振スペクトル。(b) ポンプモードの共振スペクトル。(c) 入出力特性(挿入図は測定の概要)。(d) ラマンレーザサンプルの赤外線カメラ像。左から励起パワー0.5 μW 、0.6 μW 、励起パワー1.8 μW 。

6. まとめ

トップ Si 層の結晶方位を45度回転した SOI 基板に高 Q 値ナノ共振器を用いたシリコンラマンレーザを作製した。その結果、従来基板と同等の閾値、エネルギー効率、レーザ出力が得られた。新基板では、ラマンレーザの導波路に対して垂直方向に劈開して導波路端面を形成することが可能である。本研究成果は、誘導ラマン散乱以外の非線形光学効果を利用したシリコンフォトニクス素子の研究にも役立つはずである。

本稿ではスペースの関係上触れなかったが、同時に作製した多波長フィルター、その他の高 Q 値ナノ共振器構造でも従来と同等の性能が得られた [17]。そのため、その他のシリコンフォトニクス素子も [100] 方向に作製しても問題ないと思われる。今後、多数の素子を同時集積する研究を進めることが可能となった。さらに我々は、本研究成果により、CMOS プロセスを用いた大口径 SOI 基板へのラマンレーザの大量作製への道が開かれたと考えている。近いうちに CMOS プロセス作製した試料でもレーザ発振を達成したい。

現状、シリコン光回路の光源には、III-V 族化合物半導体レーザが用いられている。世界中でシリコンレーザ研究は行われているが、シリコン基板上に化合物半導体レーザを結晶成長するもの、基板融着により貼り付ける手法が盛んに行われているが、生産性、低コストにおいて大きな課題を抱えている。我々は、半世紀の間、物性研究者の夢といわれてきた真のシリコンレーザ開発を CMOS プロセス作製により成功させて、全シリコン回路への道を開き、シリコンフォトニクスを情報通信の基幹技術に押し上げることを目指す。

謝辞

本研究は、京都大学大学院工学研究科の野田進教授、産業技術総合研究所の岡野誠研究員との共同研究です。また、本研究を援助していただいた公益財団法人京都技術科学センターに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] D. A. Miller, Proc. IEEE, **97**, 1166 (2009).
- [2] T. Tsuchizawa, K. Yamada, T. Watanabe, S. Park, H. Nishi, R. Kou, H. Shinojima, and S. Itabashi, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **17**, 516 (2011).
- [3] S. S. Iyer and Y. H. Xie, Science, **260**, 40 (1993).
- [4] D. Liang and J. E. Bowers, Nature Photon. **4**, 511 (2010).
- [5] T. Ihara, Y. Takahashi, S. Noda, and Y. Kanemitsu, Phys. Rev. B **96**, 035303 (2017).
- [6] R. Claps, D. Dimitropoulos, V. Raghunathan, Y. Han, and B. Jalali, Opt. Express **11**, 1731-1739 (2003).
- [7] H. Rong, R. Jones, A. Liu, O. Cohen, D. Hak, A. Fang, and M. Paniccia, Nature **433**, 725-728 (2005).
- [8] Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, Nature **498**, 470 (2013).
- [9] Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, Phys. Rev. B **88**, 235313 (2013).
- [10] S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, Nature **407**, 608 (2000).
- [11] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, Nature **425**, 944 (2003).
- [12] B. S. Song, S. Noda, T. Asano, and Y. Akahane, Nature Mater. **4**, 207 (2005).
- [13] T. Asano, Y. Ochi, Y. Takahashi, K. Kishimoto, and S. Noda, Opt. Express **25**, 1769 (2017).
- [14] D. Yamashita, Y. Takahashi, T. Asano, and S. Noda, Opt. Express **23**, 3951 (2015).
- [15] K. Ashida, M. Okano, M. Ohtsuka, M. Seki, N. Yokoyama, K. Koshino, M. Mori, T. Asano, S. Noda, and Y. Takahashi, Opt. Express **25**, 18165, (2017).
- [16] H. Hagino, Y. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, Phys. Rev. B **79**, 085112 (2009).
- [17] Y. Takahashi, T. Asano, D. Yamashita, and S. Noda, Opt. Express **22**, 4692 (2014).

研究成果発表

- 1) Y. Yamauchi, and Y. Takahashi, “Ultralow threshold Raman silicon nanocavity laser fabricated on (100) SOI substrate with a 45 度 rotated top silicon layer”, Joint Symposium of Asia Five Universities, Osaka, Nov. 2017, Best Poster Award 受賞
- 2) 山内 悠起子, 浅野 卓, 野田 進, 高橋 和, “結晶方位 45 度回転 SOI 基板を用いた 超低閾値ナノ共振器シリコンラマンレーザ”, レーザー学会第38回年次大会(京都市みやこめっせ)、2018 年 1 月
- 3) 山内悠起子、野田 進、高橋 和、“結晶方位を 45 度回転させた SOI 基板上へのナノ共振器シリコンラマンレーザの作製”, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE) 芦原温泉、2018 年 5 月
- 4) Yukiko Yamauchi, Makoto Okano, Susumu Noda, Yasushi Takahashi, “High-Q Nanocavity-Based Raman Laser Fabricated on a (100) SOI Substrate with a 45-Degree-Rotated Top Silicon Layer”, CLEO Pacific Rim 2018, Hong Kong, China July 2018.
- 5) 高橋和、浅野卓、野田進、“光ナノ共振器の超高 Q 値化”, 応用物理 vol.87, No.10 (2018).