

CMOS 互換プロセスによるナノ共振器シリコンラマンレーザーの作製

Fabricating the nanocavity-based Raman Silicon Laser Using CMOS-Compatible Process



高橋 和 (Yasushi Takahashi, Ph. D.)

大阪府立大学 工学研究科 電子・数物系専攻
電子物理工学分野 准教授

(Associate Professor, Department of Physics and Electronics,
Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University)

応用物理学会、日本光学会、レーザー学会、IEEE

受賞：丸文学術賞(2013年)

研究専門分野：シリコンフォトニクス、半導体光物性

あらまし

シリコン光素子を集積した超小型光回路は、巨大データセンタの省電力化に貢献する技術である。しかし、間接遷移型半導体であるシリコンでは、電流励起型の小型レーザ光源が実現していない。安定した室温連続発振を達成しているのは、光励起型のシリコンラマンレーザ(*1)だけである。我々は、フォトニック結晶ナノ共振器(*2)を用いて、発振閾値 $1 \mu\text{W}$ 以下のシリコンラマンレーザを開発してきた。そのチップサイズは 1mm^2 以下である。将来的には、電流励起型のシリコンレーザ開発を目指している。

これまでの研究では電子線リソグラフィ(*3)を利用してシリコンラマンレーザを作製してきた。シリコンフォトニクスの大きな利点は、シリコン産業で標準的となっている CMOS 互換プロセス(*4)を利用できることである。本研究では、産業技術総合研究所の協力の下、CMOS 互換プロセスを用いてナノ共振器シリコンラマンレーザを 300mm SOI 基板に作製した。結晶方向を 45 度回転した SOI 基板を採用するなどの工夫により、閾値 $1.8\mu\text{W}$ の室温連続発振を達成した。

1. 研究の目的

我々はフォトニック結晶共振器の世界最高 Q 値を、ヘテロ構造ナノ共振器を用いて 1000 万以上に更新し

てきた[1-3]。この技術を生かして、2013年、従来よりもデバイスサイズが1万倍以上小さく、閾値が2万倍低いシリコンラマンレーザを開発した[4]。図1(a)に共振器構造とバンド図、図1(b)にレーザ動作の模式図を示す。格子定数を $410\text{--}415\text{--}420\text{ nm}$ と変えた部分に、モードギャップ閉じ込め効果により2つのナノ共振モードが形成される。励起光を第2ナノ共振モード(励起モードと呼ぶ)に閉じ込め、発生したラマン散乱光を第1ナノ共振モード(ストークスモード)に閉じ込める。レーザ発振のためには、共振器損失を抑えることが第一に重要である。そのために、励起モードでは10万以上の Q 値、ストークスモードは100万以上の Q 値が必要である[5]。第2に、ラマンレーザの源となる誘導ラマン散乱を強めることが重要である。2つのモードの周波数差をシリコンのラマンシフトである 15.6 THz に一致させ[6]、ナノ共振器を[100]方向に作製することで室温連続レーザ発振が達成される[5]。

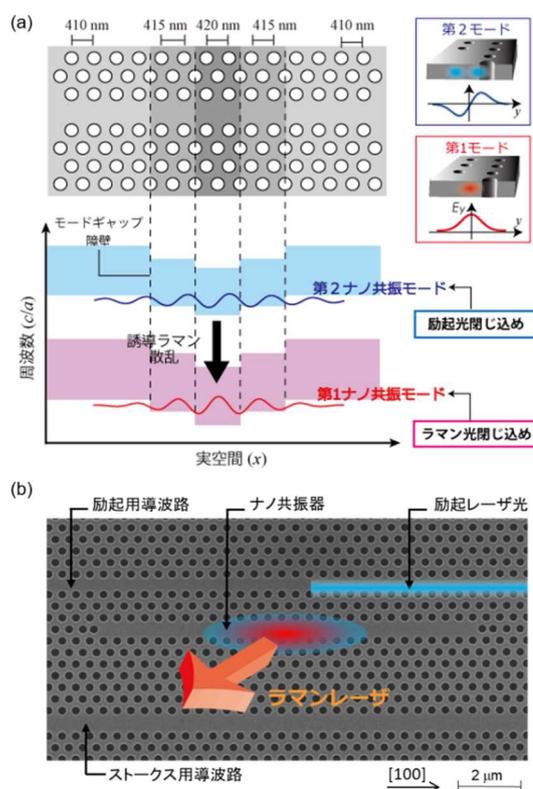


図1. (a) ヘテロ構造ナノ共振器。(b)ナノ共振器ラマンレーザの動作イメージ。

2013年以降の基礎研究により、レーザ発振の時間応

CMOS 互換プロセスによるナノ共振器シリコンラマンレーザーの作製

Fabricating the nanocavity-based Raman Silicon Laser Using CMOS-Compatible Process

答[7]、誘導ラマン利得の波長依存性[8]、作製歩留りを決める要因[9]を明らかにしてきた。さらに、1.31 μm /1.55 μm 帯での単一チップ動作[10]、発振閾値 100 nW、エネルギー変換効率 20%以上の室温連続発振を達成してきた。我々の最終的な目標は、電流励起型のモノリシックシリコンレーザを開発することである。

以前の高 Q 値ナノ共振器研究は、電子線リソグラフィを用いてサンプルを作るのが当たり前であった。しかし、産業応用に向けては、シリコン産業で標準的となっている CMOS 互換プロセスを利用して作製することが重要である。我々は 2016 年、産業技術総合研究所との共同研究により CMOS 互換プロセス、つまりフォトリソグラフィを用いて、100 万を超える Q 値を有するヘテロ構造ナノ共振器を大量作製することに成功した[11]。2017 年度より開始した本研究では、CMOS 互換プロセスを用いてナノ共振器シリコンラマンレーザを 300mm SOI 基板上に大量作製することを目指した。

2. 研究の背景

巨大データセンタなどにおける大規模情報処理は、未来の IoT 社会を根幹から支える技術である。しかし、爆発的増加をつづける情報流通量を、従来の電子回路技術だけで処理することはエネルギー的に困難であり、シリコンフォトニクスを用いた超小型光回路の商業利用が始まっている[12]。現在では、大規模産業化を検討できる段階に到達しており、我々が研究対象としているフォトニック結晶も、構成要素の 1 つとして期待されている。

長年の間、シリコンフォトニクス研究において最も困難な課題の 1 つが、実用的なシリコンレーザの開発である。2005 年にインテル社が開発した世界初の光励起型シリコンラマンレーザは、デバイスサイズ、エネルギー消費量、作製コストに難点があり、その後の開発は中止された[13]。現在、世界的には、化合物半導体レーザをシリコン基板に貼り付けるなど、シリコン・化合物半導体のハイブリッド方式が主流となっている[14]。ハイブリッド方式は、シリコンラマンレーザの励起光源として利用できるため、本研究との相性が良い。

高機能なフォトニック結晶素子を CMOS 互換プロセスで作製する報告は、2010 年過ぎから見られはじめた[15]。海外のシリコンファウンドリの登場が大きく影響した。シリコンナノ共振器も報告されていたが、100 万以上の Q 値をもつナノ共振器を作製できることはその当時は想像できなかった[16]。国内のファウンドリとの共同研究で高 Q 値ナノ共振器の作製が可能となったことは我々にとって幸運であった[11]。

3. 研究の方法

図 2(a)にサンプル作製のプロセスチャートを示す。フォトリソグラフィとプラズマエッチングには、産業技術総合研究所 TIA-SCR 300mm 試作ラインを利用した。露光には ArF 液浸装置 (Nikon NSR-S610C) を用いた。フォトマスクにはハーフトーン型位相シフトマスクを用いた。マスクサイズは 104 mm \times 132 mm である。これを基板上に 1/4 に縮小投影するので、チップサイズは 26 mm \times 33 mm である。縮小投影することで、サブナノメートル精度でナノ構造パターンを形成することが可能となる。300mm SOI 基板上には同一構造を持つ 60 個のチップが形成される。パターンが形成された後に、レーザステルスダイシングで測定するサンプルサイズまで小さくされる。

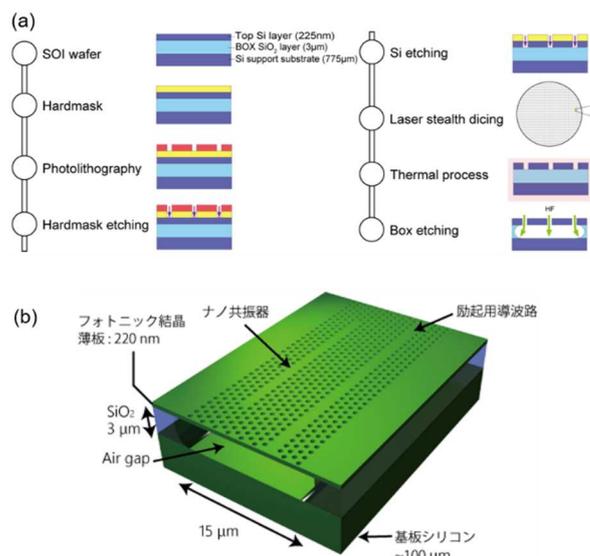


図 2. (a) サンプル作製チャート。(b) 測定したデバイスのイメージ。その後の工程は我々の研究室で行った。レーザ発振に必要となる高 Q 値を得るためには、洗浄プロセス、

CMOS 互換プロセスによるナノ共振器シリコンラマンレーザーの作製

Fabricating the nanocavity-based Raman Silicon Laser Using CMOS-Compatible Process

アニール処理の開発が重要であった。最適なプロセス条件を見いだすことが、ラマンレーザー発振に重要な貢献をした。図 2(b)は最終的に作製されたサンプルイメージである。フォトニック結晶薄板が空中に浮いたエアブリッジ構造である。シリコン薄板下層の SiO₂ 層はフッ酸により除去された。

図 3 に作製されたシリコンラマンレーザーの電子顕微鏡写真を示す。格子定数は図 1(a)に示した通りである。共振器に 2 本の励起用導波路が平行に形成されている。空気孔は良好な円形を有しているが、垂直性については改善の余地がある。作製したサンプルの光学特性は顕微分光測定により調べた。

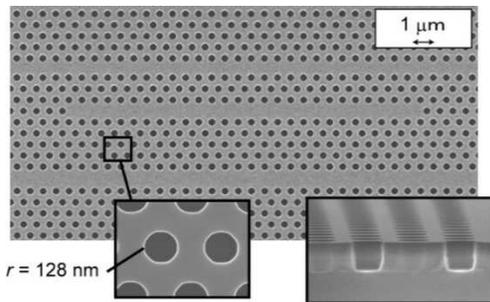


図 3. CMOS 互換プロセスで作製したラマンレーザーの電子顕微鏡写真。

図 4(a)は、ラマンレーザーの作製に用いた SOI 基板の模式図である。図 1 に示したラマンレーザーは、シリコンの [100] 結晶方向に作製する必要がある。ところが、シリコンは [110] 方向で劈開可能である。劈開方向と共振器の作製方向の不一致は、実用化の際に様々な問題を引き起こすことが想像できる。そこで本研究では、図 4(b)に示す従来 SOI 基板から、トップシリコン層だけ 45° 回転させた基板を用いた。劈開は、支持シリコン基板の結晶方向に沿って行われることを確認した [17]。

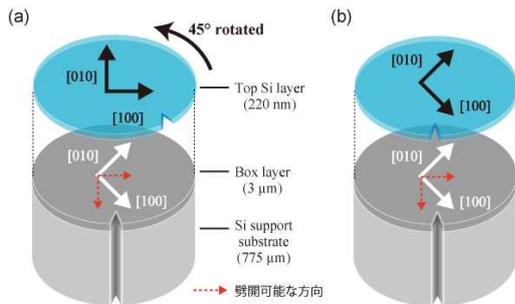


図 4. (a) CMOS 作製に使用した SOI 基板。 (b) 従来研究で使用された SOI 基板。

4. 300mm 基板上に作製された高 Q 値シリコンナノ共振器の統計的評価

ラマンレーザーを調べる前に、ヘテロ構造ナノ共振器に形成される第 1 ナノ共振モードの統計的評価を行った。ラマンレーザーを実現するには、前述したように、第 1 ナノ共振モードで 100 万以上の Q 値が必要となる。ヘテロ構造共振器の格子定数は図 1(a)に示した通りである。空気孔の半径は、図 3 に示した SEM 像よりも小さい 110 nm である。

図 5(a)は、最大 Q 値が得られたサンプルの共振スペクトルを示している。共振波長をスペクトル線幅で割って見積もれる Q 値は 250 万である。これは、フォトリソグラフィで作製されたナノ共振器の最高 Q 値である。

300 mm SOI 基板上には、図 5(b)に示すように、同一のフォトマスクから作製された約 60 個のチップが作製される。我々は、着色してある 9 つのチップを抜き出して、ナノ共振器の Q 値と共振波長を調べた。それぞれのチップについて 4 つのナノ共振器を測定した。4 つの共振器の設計は同一であるが、厳密にはフォトマスク上の異なるパターン部分から露光されたものである。フォトマスクの空気孔パターンも、フォトマスク作製時の精度により、それぞれ異なっていることが予想される。そのため、4 つの共振器では、Q 値が高くなりやすいもの、小さくなりやすいものが生じるはずである。

図 5(c)は、36 個の測定結果を示している（データの無い 4 共振器は発光が弱くて測定できなかった。）。測定できた全てのサンプルで 100 万以上の Q 値が得られ、平均 Q 値は 190 万となった。A8 のチップは、他のチップと比べて明らかに Q 値が低いが、これはレーザーステルスダイニング後のプロセスエラーによるものと考えている。最も疑わしいのは洗浄後の乾燥プロセスである。A8 の 3 つの共振器を除いた場合の平均 Q 値は 200 万である。

32 個のサンプルの Q 値は一見ランダムに分布しているように見えるが、各チップに注目すると、4 番目の共振器が最大値を示す頻度が高い。これは、上で述べたフォトマスクのパターン揺らぎが、作製されたナノ共振器にも引き継がれる可能性を示唆している。Q

CMOS 互換プロセスによるナノ共振器シリコンラマンレーザーの作製

Fabricating the nanocavity-based Raman Silicon Laser Using CMOS-Compatible Process

値のばらつき方は、EB で作製したサンプルと同程度であったため、CMOS プロセス特有の損失要因は少ないと考えている。

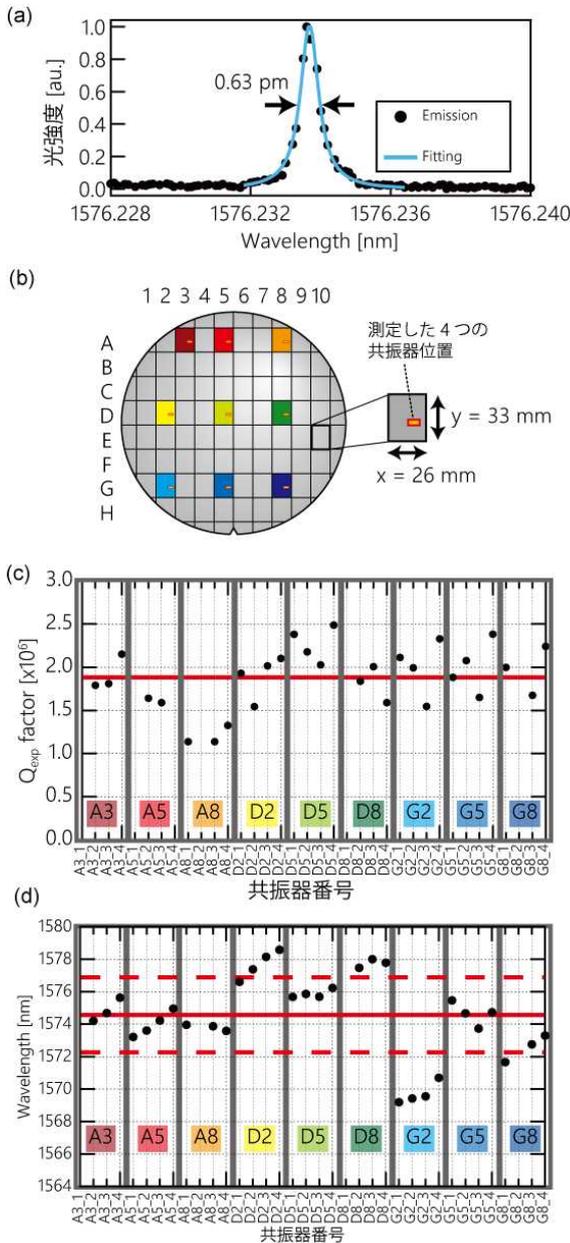


図 5. (a) 最高 Q 値 250 万を持つナノ共振器の共振スペクトル。(b) 測定した 9 チップの 300 mm SOI 基板上での位置。(c), (d) 36 個のナノ共振器の Q 値と共振波長。実線は平均値、点線は標準偏差。

図 5(d) は共振波長の測定結果を示している。 Q 値の結果とは一変して、チップ間の平均波長差が最大で 8 nm 生じている。チップの位置が基板中心から遠くなるほど波長が短波にシフトする傾向が現れている。この原因が、空気孔の半径が基板の外側ほど大きくなっ

ていることと確認した。基板全面でプロセス条件を均一化することが、今後の大きな課題である。各チップに注目すると、4 番目の共振器でもっとも長波長が得られる傾向が表れている。これも、フォトマスクパターンの特徴がナノ共振器へと引き継がれる可能性を強く示唆している。本章の研究成果については参考文献 [18] にまとめた。

5. CMOS 互換プロセスで作製したシリコンラマンレーザー

つづいてシリコンラマンレーザーを CMOS 互換プロセスを用いて 300mm SOI 基板に作製した。作製したサンプルの電子顕微鏡写真は図 3 に示した。ラマンレーザーでは、2 つのナノ共振モード（励起モードとストークスモード）の周波数差を 15.6 THz に一致させる必要がある。周波数差は空気孔の半径に比例して、0.15 THz/nm の傾きで変化する [9]。15.6 THz が得られる半径は図 3 に示したように 128 nm である。現状の CMOS 互換プロセスでは、半径の大きさを正確に制御することは困難である。そこで、少しづつ半径を変えたサンプルパターンを持つフォトマスクを準備した。

図 6(a)(b) は、発振が確認されたサンプルの共振スペクトルを 2 つのモードについて示している。挿入図は、測定時のサンプルの励起方法を示している。励起モードの Q 値が 13 万、ストークスモードの Q 値が 100 万である。2 つのモード間の共振周波数差は 15.603 THz である。

図 6(c) にレーザーの入出力特性を示す。閾値は $1.8 \mu\text{W}$ 、最大エネルギー効率は 0.23% であった。励起パワーが $4 \mu\text{W}$ を超えるとレーザー出力の飽和が確認できる。これは、2 光子吸収によって生成された自由キャリアが、ラマン散乱光を吸収することで起こる [19]。図 6(d) に示した各励起強度における赤外線カメラ像より、レーザー発振が明瞭に確認できる。

観測されたレーザーの性能は、電子線リソグラフィを用いて作製した先行研究よりも劣る結果ととなった。閾値で 3~5 倍大きくなり、効率は 1 桁以上低かった [17]。さらに、レーザー発振するサンプルの作製歩留りも先行研究の 1/10 程度まで悪化した [9]。その理由としては、励起モードの Q 値を上げるために熱処理を繰り返したため、ストークスモードの Q 値が小さくなっ

CMOS 互換プロセスによるナノ共振器シリコンラマンレーザーの作製

Fabricating the nanocavity-based Raman Silicon Laser Using CMOS-Compatible Process

たことがあげられる。前章の第1ナノ共振モードに関する研究では、CMOS プロセスに起因する Q 値低下はほとんど見られなかった。一方、ラマンレーザーに利用する第2ナノ共振モードでは、大きく Q 値が低下した。今後、原因を特定する必要がある。本章の研究成果については参考文献[20]にまとめた。

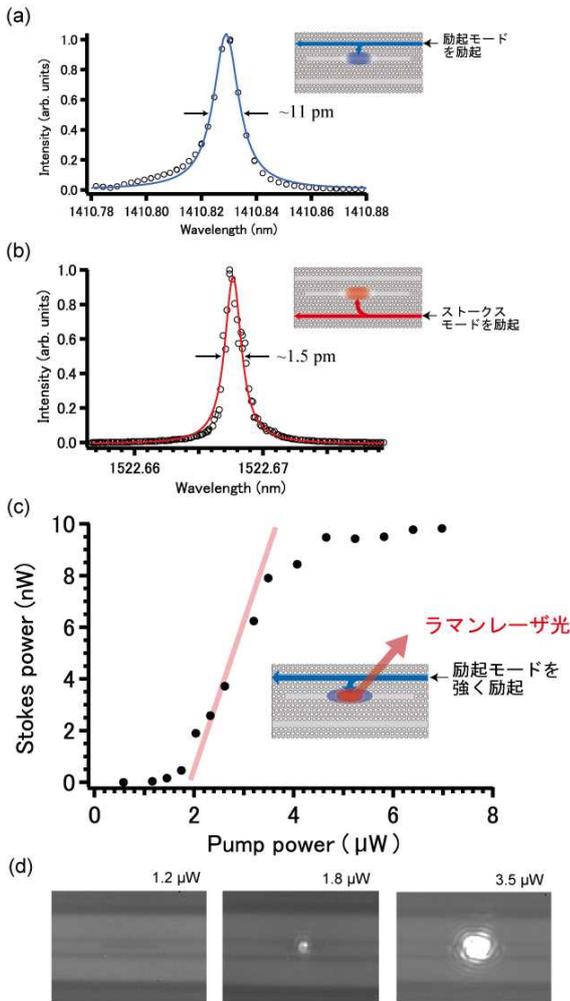


図 6. CMOS 作製したラマンレーザーの特性。(a),(b) 励起モードとストークスモードの共振スペクトル。(c) ラマンレーザーの入出力特性。(d) 赤外線カメラによって撮影されたレーザー発振の様子。

6. 将来展望

作製歩留りに課題は残るが、作製試行回数は2回だけであり、プロセス改善の余地は大きい（フォトマスクの設計から実際にサンプルを受け取るまでに長い時間を要するのがフォトリソグラフィを用いた研究の弱点である）。CMOS 互換プロセスでナノ共振器ラマン

レーザーを作製できたことで、今後の研究の幅が大きく広がる。異分野研究者へのラマンレーザーサンプルの提供と、応用出口として本デバイスを用いた静電気センシング研究に力を入れていく予定である。

おわりに

本研究では、ArF 液浸露光リソグラフィと CMOS 互換プロセスによって作製した高 Q 値ナノ共振器を用いて、シリコンラマンレーザーの室温連続発振を実証した。フォトリソグラフィ法を用いてフォトニック結晶レーザーを作製した初めての例である。発振閾値、最大エネルギー効率などのレーザー性能は、電子線リソグラフィを用いて作製されたサンプルよりも劣っていた。今後のプロセス改善が重要である。本研究で得られた結果は、化合物半導体を用いたフォトニック結晶レーザーの製造にも重要な知見を与えるだろう。

謝辞

ここで紹介した研究成果は、大阪府立大学の博士前期課程学生であった芦田紘平、山口悠起子、安田孝正によるものである。本研究は岡野誠氏（産業技術総合研究所）、浅野卓准教授（京都大学）、野田進教授（同）との共同研究により行われた。

用語解説

*1 ラマンレーザー

誘導ラマン散乱を用いた光励起型のレーザーである。ファイバラマンレーザーが特に有名であるが、様々な材料によるラマンレーザーが製品化されている。

*2 フォトニック結晶ナノ共振器

空気孔による周期的な屈折率変化によるフォトニックバンド効果を用いて作られる体積の非常に小さな共振器。小さい体積にも関わらず高い Q 値を実現できる。そのため、光非線形効果である誘導ラマン散乱を強めることができる。

*3 電子線リソグラフィ

電子線を用いて微細パターンを描画するため、光を用いてパターン描画を行うフォトリソグラフィより分解能が高い。一方で描画時間が長いのが欠点とされる。

*4 CMOS 互換プロセス

シリコン産業で一般的となっている微細加工プロセス。フォトリソグラフィを用いるため大量作製に優れている。レジスト塗布、化学洗浄、マスク形成、プラズマ

CMOS 互換プロセスによるナノ共振器シリコンラマンレーザーの作製

Fabricating the nanocavity-based Raman Silicon Laser Using CMOS-Compatible Process

エッチングなど、基板の直径に応じて各装置が開発されている。本研究では、直径が 300mm の基板に特化した装置群を用いた。

参考文献

- [1] Y. Taguchi, Y. Takahashi, Y. Sato, T. Asano, and S. Noda, "Statistical studies of photonic heterostructure nanocavities with an average Q factor of three million," *Opt. Express* **19**, 11916 (2011).
- [2] H. Sekoguchi, Y. Takahashi, T. Asano, and S. Noda, "Photonic crystal nanocavity with a Q factor of ~ 9 million," *Opt. Express* **22**, 916 (2014).
- [3] T. Asano, Y. Ochi, Y. Takahashi, K. Kishimoto, and S. Noda, "Photonic crystal nanocavity with a Q factor exceeding eleven million," *Opt. Express* **25**, 1769 (2017).
- [4] Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, "A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold," *Nature* **498**, 470 (2013).
- [5] Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, "High- Q resonant modes in a photonic crystal heterostructure nanocavity and applicability to a Raman silicon laser," *Phys. Rev. B* **88**, 235313 (2013).
- [6] D. Yamashita, Y. Takahashi, T. Asano, and S. Noda, "Raman shift and strain effect in high- Q photonic crystal silicon nanocavity," *Opt. Express* **23**, 3951 (2015).
- [7] D. Yamashita, Y. Takahashi, J. Kurihara, T. Asano, and S. Noda, "Lasing dynamics of optically-pumped ultralow-threshold Raman silicon nanocavity lasers", *Phys. Rev. Appl.* **10**, 024039 (2018).
- [8] D. Yamashita, T. Asano, S. Noda, and Y. Takahashi, "Strongly asymmetric wavelength dependence of optical gain in nanocavity-based Raman silicon lasers", *Optica* **5**, 1256 (2018).
- [9] J. Kurihara, D. Yamashita, N. Tanaka, T. Asano, S. Noda, and Y. Takahashi, "Detrimental Fluctuation of Frequency Spacing Between the Two High-Quality Resonant Modes in a Raman Silicon Nanocavity Laser," *IEEE J. Select. Topic Quantum Electron.* **26**, 8300112 (2020).
- [10] M. Kuwabara, S. Noda, and Y. Takahashi, "Ultrahigh- Q photonic nanocavity devices on a dual thickness SOI substrate operating at both 1.31- and 1.55- μm telecommunication wavelength bands," *Laser Photon. Rev.* **13**, 1800258 (2019).
- [11] K. Ashida, M. Okano, M. Ohtsuka, M. Seki, N. Yokoyama, K. Koshino, M. Mori, T. Asano, S. Noda, and Y. Takahashi, "Ultrahigh- Q photonic crystal nanocavities fabricated by CMOS process technologies," *Opt. Express* **25**, 18165 (2017).
- [12] 山田浩治, 他, "実用が射程圏内に入ったシリコンフォトニクス," *OPTRONICS*, No.417, June 2016.
- [13] H. Rong, R. Jones, A. Liu, O. Cohen, D. Hak, A. Fang, and M. Paniccia, "A continuous-wave Raman silicon laser," *Nature* **433**, 725 (2005).
- [14] 西山信彦 "III-V 族半導体の Si への異種基板接合技術と光源応用," *レーザー研究*, 42 巻第 3 号, 240 (2014).
- [15] 馬場俊彦 "CMOS プロセスを用いたシリコンフォトニクス," *レーザー研究*, 42 巻第 3 号, 223 (2014).
- [16] 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," *Sci. Rep.* **5**, 11312 (2015).
- [17] Y. Yamauchi, M. Okano, H. Shishido, S. Noda, and Y. Takahashi, "Implementing a Raman silicon nanocavity laser for by using a (100) SOI wafer with a 45-degree-rotated silicon top layer," *OSA Continuum*, **2**, 2098 (2019).
- [18] K. Ashida, M. Okano, M. Ohtsuka, M. Seki, N. Yokoyama, K. Koshino, K. Yamada, and Y. Takahashi, "Photonic Crystal Nanocavities with an Average Q factor of 1.9 million Fabricated on a 300-mm-Wide SOI Wafer Using a CMOS-Compatible Process", *J. Lightwave Technol.* **36**, 4774 (2018).
- [19] T. Liang and H. Tsang, "Nonlinear absorption and Raman scattering in silicon-on-insulator optical waveguides," *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* **10**, 1149 (2004).
- [20] T. Yasuda, M. Okano, M. Ohtsuka, M. Seki, N. Yokoyama, and Y. Takahashi, "Raman silicon laser based on a nanocavity fabricated by photolithography," *OSA Continuum*, **3**, 814 (2020).

CMOS 互換プロセスによるナノ共振器シリコンラマンレーザーの作製

Fabricating the nanocavity-based Raman Silicon Laser Using CMOS-Compatible Process

この研究は、平成28年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成29～令和元年度に実施されたものです。