

平成 29 年 5 月 28 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13326

研究課題名(和文)異なる波長帯で動作するシリコン光素子の1チップ集積

研究課題名(英文) Integration of silicon photonic devices operating various wavelength bands

研究代表者

高橋 和 (Takahashi, Yasushi)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20512809

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、異なる厚みを有するシリコン基板を作製して、異なる波長帯で動作する光素子を、単一チップ上に集積することを目指した。

1年目は、サブナノメートル精度でシリコン基板を薄膜化するプロセスを開発した。つづいて、異なる厚みを有するシリコン基板を作製した。

2年目は、この基板の上に、1310nm帯と1550nm帯で動作する2つの高Q値ナノ共振器を同時に作製して、両方でQ値200万以上を達成した。さらに、シリコンラマンレーザの集積化にも実現して、当初計画を大幅に上回る成果を得た。Q値200万は、単一チップでも達成困難であり、ラマンレーザは、作製難易度が極めて高い素子である。今後は本技術の産業移転を行う。

研究成果の概要(英文)：In this research, we challenged to fabricate a silicon-on-insulator (SOI) substrate with different thicknesses and to integrate the silicon photonics devices which operate with different wavelength bands.

In the first year, we developed a new process for thinning the silicon substrate with sub-nanometer precision. Subsequently, we fabricated a silicon substrate having different thicknesses.

In the second year, we fabricated two high-Q nanocavities on a SOI chip, which operate in the 1310 nm and 1550 nm bands. We achieved the Q values more than 2 million in both nanocavities.

Furthermore, we succeeded in fabricating the two Raman silicon lasers on the chip, which worked in the 1310 nm and 1550 nm bands. This achievement is above the initial plan. The Q value of 2 million is difficult to achieve even with a single chip, and the Raman silicon laser is the most difficult device to fabricate. We will conduct the industrial transfer of these technologies.

研究分野：半導体光デバイス

キーワード：シリコンフォトニクス 微細加工 高Q値ナノ共振器 シリコンラマンレーザ

1. 研究開始当初の背景

ポータブル通信機器の爆発的普及に伴い、データセンターにおける消費電力の増大が問題となっている。スマート社会の構築に向けて、これまで銅配線で行ってきたデータ伝送を、光通信に切り替えていくことが不可欠である。そこで、微小光デバイスを低コストで実現できるシリコンフォトニクスの実用化が始まっている。今後は、通信容量の増大に向けて、波長多重通信を高密度に導入していくことが重要となるだろう。

微細加工が容易な SOI (Silicon on insulator) 基板は、大きな屈折率差による強い光閉じ込めが可能のため、シリコンフォトニクスプラットフォームとなっている。シリコンは、全ての光通信波長帯で透明なため、波長多重通信において、大きな可能性を秘める。これまで、細線導波路、リング共振器、フォトニック結晶などが、 $1.30\ \mu\text{m} \sim 1.60\ \mu\text{m}$ の広い波長範囲で開発されてきた。

光素子の性能を変えずに、動作波長だけを変えるには、デバイス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)。現在の半導体微細加工技術では、水平方向のサイズ制御は容易だが、垂直方向の制御は難しい。そのため、プラットフォームとなる SOI 基板のトップシリコン層の厚みが重要となる。幅広い波長範囲でシリコンフォトニクス研究を行うには、シリコン層の厚みを $10\ \text{nm}$ 単位で正確に指定して (理想は $1\ \text{nm}$ 単位) SOI 基板を入手したい。ところが、CMP 研磨の生産性からこれは困難であり、シリコンフォトニクス研究は、基板メーカーの動向に左右されてきた。さらに CMP 研磨は、位置選択性を有さないため、1 つの基板は 1 つの厚みだけを持つ。光通信で重要となる $1.31\ \mu\text{m}$ 帯と $1.55\ \mu\text{m}$ 帯に対して動作する 2 つのシリコンフォトニクス素子を、同一チップ上に集積化することは困難であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下のアイデアを実証することとした。

図 1 に示すような、厚みが異なる SOI 基板を開発すれば、その基板には、動作波長が大きく異なるシリコンフォトニクス素子を集積可能である。

この実証に向けて、以下の 2 つの項目を、達成目標とした。

(1) サブナノメートル精度を有する薄膜化手法の開発と厚みが異なる SOI 基板の作製

薄膜化技術は以下に記す 3 つの特長を有する。

- 基板表面は、原子レベルの平坦性を保持。

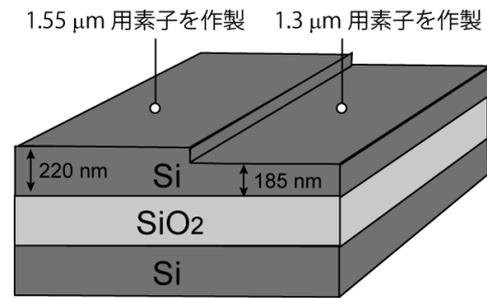


図 1 作製を目指した SOI 基板の模式図。トップ Si 層が 2 つの厚みを持つ。

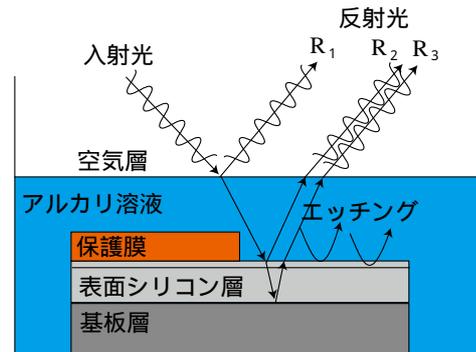


図 2. ナノメートル精度薄膜化手法と基板作製の概要図。

- 任意の位置だけを選択的に薄膜化。
 - サブナノメートル精度でターゲット膜厚を実現。
- (2) デュアル動作波長 $1.31/1.55\ \mu\text{m}$ を持つ高 Q 値ナノ共振器チップの作製

図 1 に示すように、薄い基板上に $1.31\ \mu\text{m}$ 、厚い基板上に $1.55\ \mu\text{m}$ で動作する高 Q 値ナノ共振器を作製して、究極的な加工精度が必要とされる Q 値 100 万以上を、2 つのナノ共振器で同時に達成する。

3. 研究の方法

(1) 薄膜化手法の開発

波長多重通信では、ナノメートル精度の動作波長制御性が要求されるケースが多い。そこで、SOI 基板の厚みは、サブナノメートル精度で制御したい。このような技術は、これまで存在しなかった。我々は、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実現可能と考えた。

溶液中で膜厚計測を行うことは一般的ではないが、光干渉膜厚計測の原理から、可能だろうと申請時点で判断した。また、エッチング条件を最適化すれば、原子レベルで平坦な表面が得られ、保護膜を開発すれば、位置選択エッチングも可能になると予想した。膜厚想定装置は、大塚電子製の FE-300 を用い、エッチング溶液、保護膜とも安価な市販品を

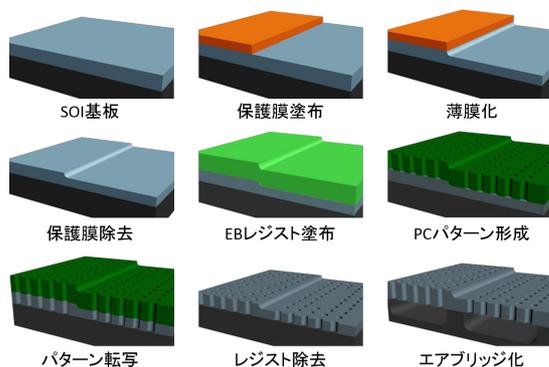


図3. 2波長1310/1550 nm フォトニック結晶の作製プロセスフロー.

用いて、310万円の補助金で達成することを目指した。表面の原子間力顕微鏡（AFM）観察には、ナノテクプラットフォーム（京都大学）を利用した。

(2) デュアル波長動作する光チップの作製
 図3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。まず、市販のSOI基板に保護膜を塗布して、化学エッチングによる部分的な薄膜化を行う。保護膜を除去した後、電子線描画（EB）レジストを基板全体に塗布して、EBによるフォトニック結晶パターン描画を行う。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、測定チップ化、最後に弗酸によるエアブリッジ化を行う。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。困難が予想されたのが、段差を持つ基板に対してEBレジストが均一に塗布できるのか？異なる厚みを持つ基板に対して、構造揺らぎを抑えたプラズマエッチングが可能なのか？という2点であった。 Q 値100万以上を実現するには、空気孔の構造揺らぎを1nm以下に抑える必要がある。そんなことを、異なる厚みを持つ基板に対して実行しようとは、世界中の誰も考えもしなかった。世界最高 Q 値の更新、超低閾値シリコンラマンレーザーの開発などを成功させてきた申請者にしか考えつかない挑戦的アイデアである。なお、EBとプラズマエッチングには、京都大学野田研究室の装置を利用した。

4. 研究成果

(1) サブナノメートル精度薄膜化手法の開発
 図4は、SOI基板をアルカリ溶液に浸して、表面を化学エッチングしながらトップシリコン層の膜厚変化を測定した結果である。赤線が膜厚変化、青線は測定精度を示している。

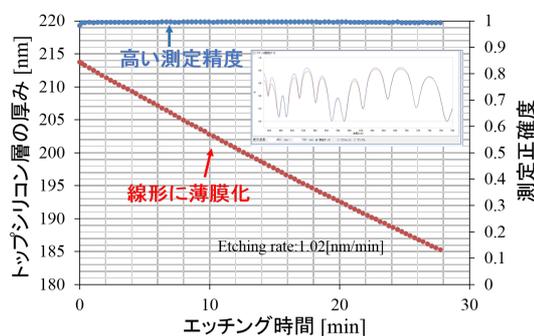


図4. エッチング中のシリコン膜厚のリアルタイム測定結果。挿入図は、膜厚測定で取得した光干渉スペクトル。

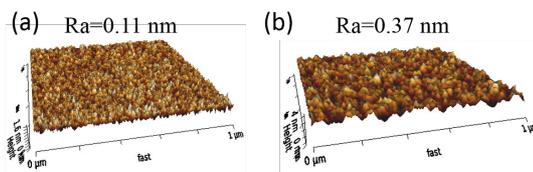


図5. (a) エッチング前の表面 AFM 像。(b) エッチング後。

約215 nmから185 nmまで、線形に膜厚が減少していることが分かる。これは、約85%のサイズ変化になり、1.31 μm と1.55 μm の比に一致している。

エッチングレートを1 nm/minと非常に低速に抑えることで、サブナノメートル精度でのエッチングが実現できた。通常、シリコン基板の化学エッチングは、この1000倍以上のレートで行われるが、溶液条件の最適化により、シリコンフォトニクス用途にも利用可能であることを示した。高い測定精度を維持するために、多数の工夫を施したが、本手法は、まだまだ改善の余地が多い。将来的には、既存の装置に専用ソフトを組み込むなどの産業展開が想定される。

図5は、エッチング前と後で、表面ラフネスをAFMで比較した結果である。エッチング後は、ラフネスが R_a 値で3倍強に増大している。この程度のラフネスは、光素子の性能に大きな影響を及ぼさないが、ポストプロセスを追加することで改善可能と予想しており、研究継続中である。

(2) 異なる厚みを持つSOI基板の作製

我々はさらに、エッチング溶液に耐性のある適切な保護膜を探し出し、位置選択的エッチングを試みた。図6は、2段階の厚みを持つ基板のAFM像と顕微鏡像である30 nmの差を持つ急峻な段差が形成されており、界面付近において目立ったラフネスは見られない。顕微鏡像においても、非常に綺麗な界面形成が確認できている。

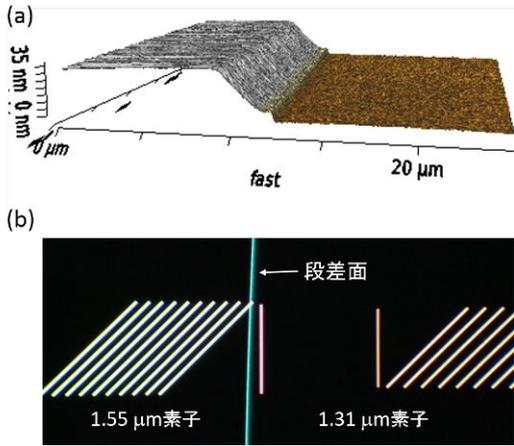


図6.(a) エッチング界面付近のAFM画像。(b) 2段階基板の顕微鏡写真。

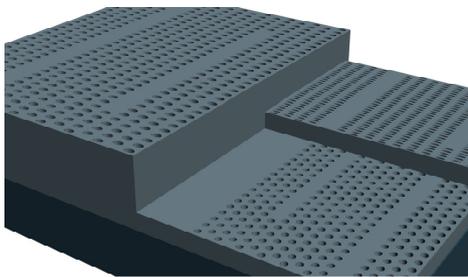


図7. 将来デバイスイメージ。

開発当初は、高い再現性を得ることができなかった。詳細は明かせないが、ノウハウを積み重ねることで、現在では、狙った厚みの基板を確実に作製できるようになっている。今後は、保護膜を正確に塗布する技術を開発して、フォトニック結晶パターンと段差の位置合わせ精度を上げること、3段階、4段階の段差を持つ基板の作製などが課題である。幸いにも、日本板硝子材料工学助成会の援助が得られたので、引き続いて研究を行い、1年以内に、図7に示すような素子を作製予定である。

(3) 動作波長 1.31 μm と 1.55 μm を有する高 Q 値ナノ共振器の1チップ集積

高 Q 値ナノ共振器とは任意の波長の光を微小領域に閉じ込めることのできる光素子であり、Q 値の大きさが性能指標となる。Q 値が大きいほど、センサー感度の向上や省エネルギー化が図れるため、高い Q 値を実現することが重要である。近年は、1千万を超える Q 値も達成されているが、100万以上を達成するのは、単一チップにおいても容易ではない。

図8は、今回、実証に用いたヘテロ構造ナノ共振器を示している。空気孔の間隔が広げられてある中央部分に光が閉じ込められる。その設計 Q 値は1000万以上である。1.31 μm で

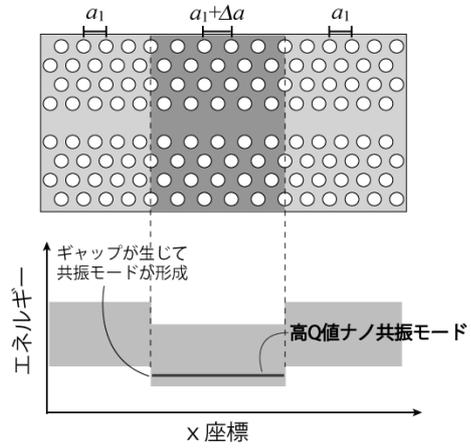


図8. ヘテロ構造ナノ共振器の概要。

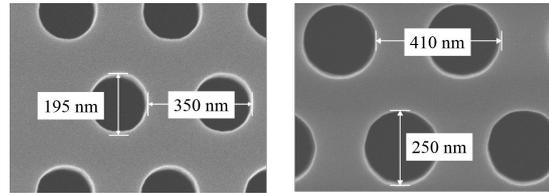


図9. 作製したサンプルのSEM画像。左が1310 nm帯、右が1550 nm帯のフォトニック結晶。

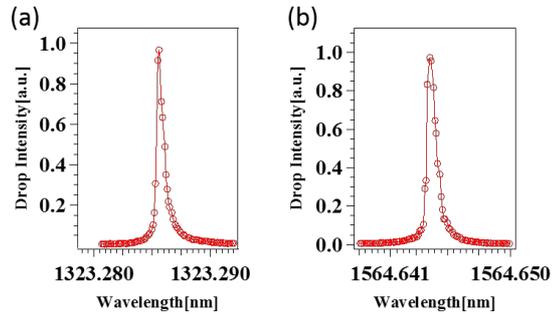


図10. 1.31 μm帯(a)と1.55 μm帯(b)の高 Q 値ナノ共振器の共振スペクトル。

は格子定数 a_1 を 350 nm, 1.55 μm では a_1 を 410 nm とした。

図9は、二段階構造基板に、集積作製したナノ共振器の電子顕微鏡(SEM)写真である。1.31 μm帯のナノ共振器は、スケール側に従って、空気孔径、格子定数、厚みの全てが、1.55 μm帯のナノ共振器の85%前後になるように制御されている。このように、3次元方向にわたってスケール制御された光デバイスを1チップで作製した例は初めてである。

図10は、2つのナノ共振器の共鳴スペクトルである。動作波長がそれぞれ1323.28 nm, 1564.64 nmとなり、狙い通りの波長帯におさまった。Q値は、ピーク波長をその半値全幅で割った値で求められ、それぞれ、214万, 208万が得られた。我々と京都大学のグループ以外は、Q値200万以上を実現できておらず、今回、両波長帯を1チップで達成したことは、驚異的な加工技術を示すものである。

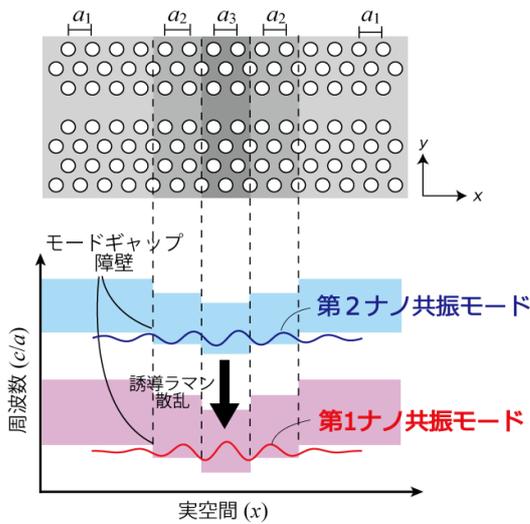


図 11 .ヘテロ構造ナノ共振器を用いたシリコンラマンレーザーの模式図 .

(4) 1.31 μm 帯/1.55 μm 帯で動作するシリコンラマンレーザーの集積化

予想以上に研究が進化したため、当初予定にはなかったシリコンラマンレーザーの集積化に挑戦した。シリコンラマンレーザーは、唯一のシリコンレーザーとして知られる。我々は、2013年、ヘテロナノ共振器を用いて、閾値 $1 \mu\text{W}$ のラマンレーザー開発に成功している。

図 11 にそのデバイス構造を示す。ヘテロナノ共振器に形成される2つの高 Q 値共振モードに、励起光とラマン散乱光を強く閉じ込めることでラマンレーザー発振を起こす。第1ナノ共振モードの Q 値は100万以上、第2ナノ共振モードの Q 値は10万以上が必要である。さらに、両者の周波数差は、シリコンのラマンシフトである 15.6 THz に一致する必要があり、そのためには、空気孔の半径をサブナノメートルで制御する必要がある。シリコンフォトニクスのなかでも、もっとも作製難易度の高いデバイスの1つである。

図 12 に測定した共振スペクトルを示す。狙い通りの波長帯に第1ナノ共振モードの波長を設定できている。 Q 値も100万以上が得られた。図 13 は、ラマンレーザー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、ラマンレーザー発振を確認した。現状、効率は低いが、改善可能と考えている。本実証により、シリコンラマンレーザーの光配線応用可能性が高まった。

謝辞

本研究成果は、申請者の指導学生である桑原充輝が、学部4年生から修士1年生の2年間で行ったものである。

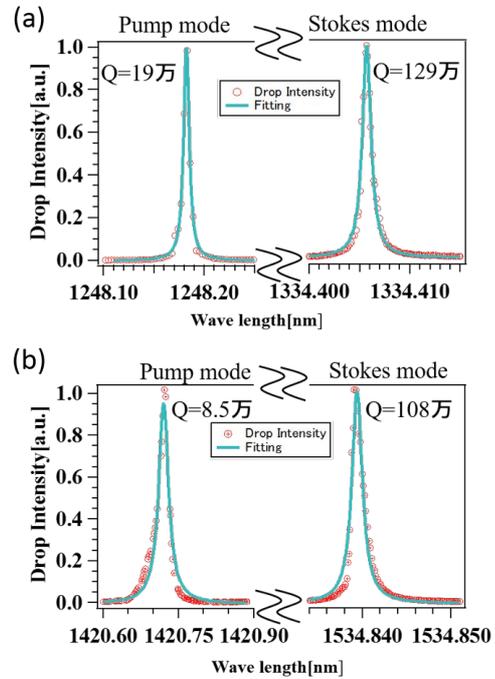


図 12 . ラマンレーザーサンプルの共振スペクトル . (a) 1.31 μm 帯 , (b) 1.55 μm 帯 .

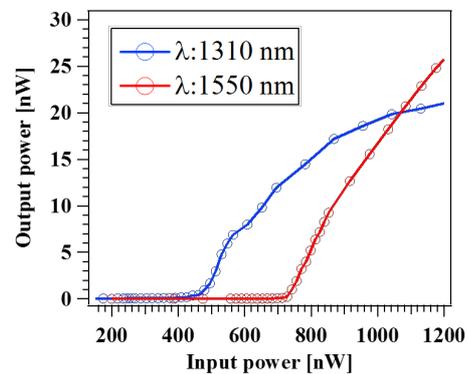


図 13 . 1.31 μm 帯/1.55 μm 帯シリコンラマンレーザーの入出力特性 .

< 引用文献 >

R. Terawaki, Y. Takahashi, M. Chihara, Y. Inui, and S. Noda, *Opt. Express* **20**(20), 22743-22752 (2012).
H. Hagino, Y. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, *Phys. Rev. B* **79**(8), 085112 (2009).
S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, *Nature* **407**(6804), 608-610 (2000).
T. Asano, Y. Ochi, Y. Takahashi, K. Kishimoto, and S. Noda, *Opt. Express* **25**(3), 1769-1777 (2017).
B. S. Song, S. Noda, T. Asano, and Y. Akahane, *Nat. Mater.* **4**(3), 207-210 (2005).
Y. Takahashi, Y. Inui, M. Chihara, T. Asano, R. Terawaki, and S. Noda, *Nature* **498**(7455), 470-474 (2013).
D. Yamashita, Y. Takahashi, T. Asano, and S. Noda, *Opt. Express* **23**(4), 3951-3959 (2015).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Kenichi Maeno, Yasushi Takahashi, Tatsuya Nakamura, Takashi Asano, and Susumu Noda
“Analysis of high- Q photonic crystal L3 nanocavities designed by visualization of the leaky components”
Optics Express, **25**, 367-376 (2017).
査読有 DOI:10.1364/OE.25.000367

Tatsuya Nakamura, Yasushi Takahashi, Yoshinori Tanaka, Takashi Asano, and Susumu Noda
“Improvement in the quality factors for photonic crystal nanocavities via visualization of the leaky components”
Optics Express, **24**, 9541-9549 (2016).
査読有 DOI:10.1364/OE.24.009541

〔学会発表〕(計 16 件)

桑原 充輝, 高橋 和, 野田 進
“1310/1550 nm 帯で動作するシリコンラマンレーザーの 1 チップ集積”
レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会, 徳島大学 2017/1/7.

Yasushi Takahashi (Invited)
“Toward the current-injection silicon laser”
The 10th NanoSquare Workshop, Osaka Prefecture University, Sakai, 2016/11/4.

Yasushi Takahashi (Invited)
“Ultralow threshold Raman silicon lasers using photonic crystal nanocavities”
The 5th KIST-OPU-ECUST-TKU Joint Sympo., Seoul, Korea 2016/9/26.

高橋 和, 野田 進 (招待講演)
“高 Q 値フォトニック結晶ナノ共振器を用いた超小型シリコンフォトニクス素子”
平成 28 年電気関係学会関西連合大会, 大阪府立大学 2016/11/23.

桑原 充輝, 高橋 和
“ウェットエッチングを用いた SOI 基板のサブナノメートル精度薄膜化”
2016 年秋季応用物理学会, 朱鷺メッセ 2016/9/15.

桑原 充輝, 高橋 和, 野田 進
“1310/1550 nm 波長帯で動作する高 Q 値ナノ共振器の 1 チップ集積”
2016 年秋季応用物理学会, 朱鷺メッセ 2016/9/15.

Yasushi Takahashi (Invited)
“Ultralow threshold Raman silicon lasers using photonic crystal nanocavities”
The 2nd FZU-OPU Joint International Symposium, Fuzhou, China, 2015/11/6

〔図書〕(計 3 件)

高橋和
「高 Q 値ナノ共振器シリコンラマンレーザー」
光アライアンス 2016 年 8 月号, p52-55

高橋和, 浅野卓, 野田進
「フォトニック結晶ナノ共振器を用いた超低閾値ラマンシリコンレーザー」
月刊オプトロニクス 2016 年 3 月号 p76-80

高橋和
「マイクロワット閾値を持つシリコンラマンレーザー」
化学工業 2016 年 2 月号 p28-31

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)
半導体基板の薄膜化技術について出願を検討したが, 類似特許が多く存在した. 企業にも話を持ちかけたが, 類似する研究を今まさに進めており, 競合するとの理由で断念した.

〔その他〕
< 研究室ホームページ >
<http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/pe9/>

< 報道関連情報 > (10 件以上)
本研究課題とは, 直接関連しないが, Q 値 100 万を超えるシリコンナノ共振器の大量作製について, 産業技術総合研究所との共同プレスリリースを 2016 年 3 月 16 日に出し, 日刊工業新聞, 化学工業新聞, Yahoo ニュースなど 10 を超えるメディアに掲載された.

< 受賞 >
第 37 回レーザー学会年次大会優秀論文発表賞
「1310/1550 nm 帯で動作するシリコンラマンレーザーの 1 チップ集積」
受賞者: 桑原充輝
授与団体: 一般社団法人 レーザー学会
授賞式: 2017/05/31

6. 研究組織

(1) 研究代表者
高橋 和 (TAKAHASHI YASUSHI)
大阪府立大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 20512809

(2) 研究協力者
野田 進 (NODA SUSUMU)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号: 10208358

浅野 卓 (ASANO TAKASHI)
京都大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 30332729