

平成30年 6月26日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05428

研究課題名（和文）ナノ共振器シリコンラマンレーザーの光利得機構の解明と発振特性評価

研究課題名（英文）Study for the optical gain and the lasing characteristics of high-Q nanocavity-based silicon Raman laser

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） 18,900,000円

研究成果の概要（和文）：半世紀の間、シリコンを用いたレーザー光源開発は、夢の科学技術と言われてきた。本課題では、2013年に研究代表者らが開発した高Q値フォトニック結晶ナノ共振器を用いた超低閾値・超小型シリコンラマンレーザーの発振メカニズムを研究した。精緻な顕微分光技術を用いて、共振波長の時間シフトがレーザー性能に大きな影響を与えることを突き止めた。さらに、新たな分光法を開発して、その利得スペクトル測定に成功した。卓越した微細加工技術も利用して、動作波長依存性、温度依存性、結晶方位依存性を調べ、その発振特性を包括的に明らかにした。それらの知見をもとに構造改良をおこなったところ、従来以上の作製歩留まり、出力増大が得られた。

研究成果の概要（英文）：The realization of silicon-based lasers will be important for the energy-saving human lives. In this project, the lasing mechanism for high-Q nanocavity-based Raman silicon laser was studied using the well-developed nano-fabrication technique and microscopic spectroscopy. We found that the dynamical resonance wavelength shift cause a detrimental effect for the laser performances. In addition, we developed a novel technique to investigate the excitation-wavelength dependence of the optical gain. We also measured the frequency difference, operating wavelength dependence, and temperature dependence. Based on these findings, structural improvement was added and as a result, the production yield and output power was increased.

研究分野：シリコンフォトニクス

キーワード：シリコンラマンレーザー フォトニック結晶 高Q値ナノ共振器 誘導ラマン散乱 微細加工 顕微分光

1. 研究開始当初の背景

シリコンを用いた光デバイス研究は、光 LSI チップや、光通信ネットワークの高速・省エネ化、医療・バイオ応用まで幅広い分野をターゲットに行われてきた。長年の間、この分野で最も困難な課題の1つが、実用的なシリコンレーザーの開発である。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ーは、20 mW を超える閾値、1 cm 以上の共振器長、共振器に沿った P-i-N 構造を必要とした。少なくとも 1/100 程度の小型化、低閾値化が必要と言われたが有効な解決方法は出てこなかった。

これら 3 つの致命的な弱点を一気に解決したのが、2013年に我々が開発したナノ共振器シリコンラマンレーザーである。このレーザーは、世界最高 Q 値を持つヘテロ構造ナノ共振器を利用しただけでなく、それまで不用と思われていた第2ナノ共振モードと、応用には不適とされてきた[100]シリコン結晶方向を利用することで、発振閾値 1  $\mu$ W、エネルギー変換効率 4%、出力 120 nW の室温連続発振を 1.55  $\mu$ m 帯で実現した。

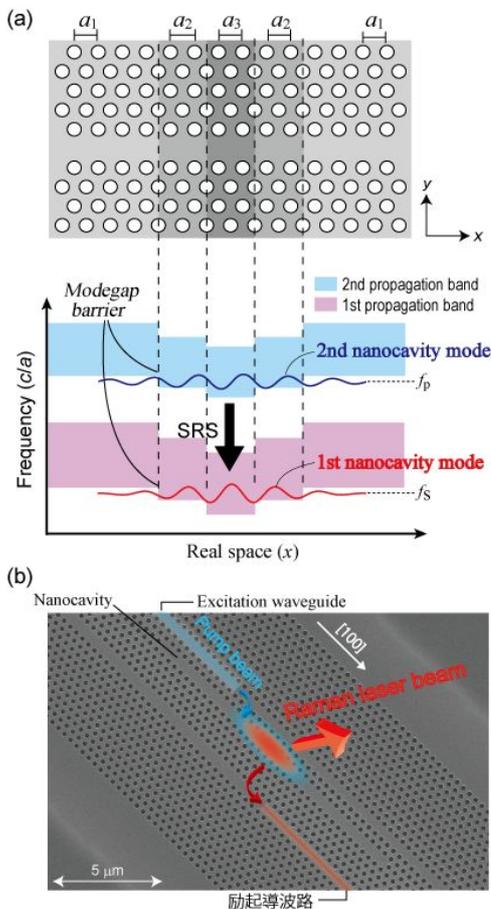


図 1. (a)ラマンレーザーに用いたナノ共振器の構造とバンド図. (b)シリコンラマンレーザーの電子顕微鏡写真と動作イメージ.

2. 研究の目的

我々は、本デバイスを改良していけば、電流注入型ラマンレーザーへの展開が可能と考えている。そのために本研究では、第1に、レーザー発振の温度依存性、動作波長依存性、

パルス動作特性などを調べた。第2に、この規格外のレーザー素子に適用可能な利得スペクトル測定法を開発して、その光利得機構を明らかとした。これにより、現状の性能(歩留り、出力など)を改善するための指針を明確にして、電流注入シリコンレーザー開発への道筋をつけることを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、ナノ共振器シリコンラマンレーザーの【光利得機構】と【発振特性】の2つの項目について、本助成金を活用して、これまで開発してきた卓越した微細加工技術と精緻な顕微分光技術を、さらに発展させることにより調べた。

4. 研究成果

(1) 時間領域測定によるレーザー発振ダイナミクスの解明

図 1(b)において、ナノ秒~マイクロ秒の矩形パルス光を励起に用いて、ナノ共振器から放出される励起光とラマンレーザー光の立ち上がり時の動的変化を、時間範囲と励起強度、励起波長を変えながら系統的に調べた。図 2 に示すように、誘導ラマン散乱による波長変換が明確に観察された。図 3 に示すように、閾値の数倍の励起強度では、ラマン信号は、最初の立ち上がりから数百ナノ秒以内に大きな減少を示し、その後大きく振動することを見出した。しかしながら、ラマンレーザー信号は、立ち上がりの数マイクロ秒後には、安定した連続動作に収束した。これは、応用において優れた性質である。数値シミュレーションにより、これらの動的現象が、キャリアプラズマ効果と熱光学効果による共振波長シフトに由来することを明らかとした。

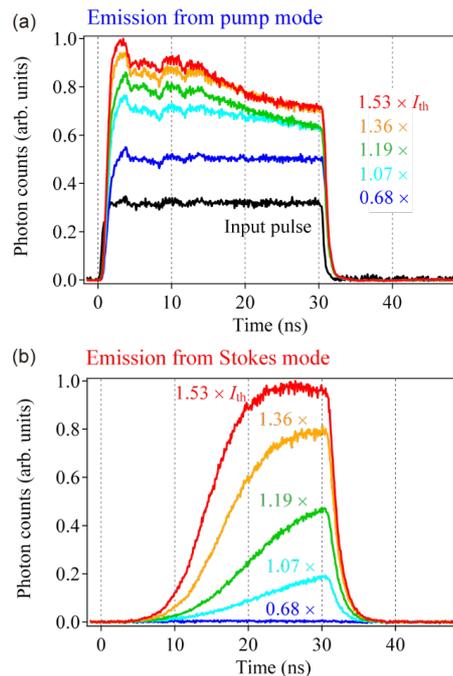


図 2. 閾値付近の励起強度における励起光(a)とラマンレーザー光(b)の時間応答.

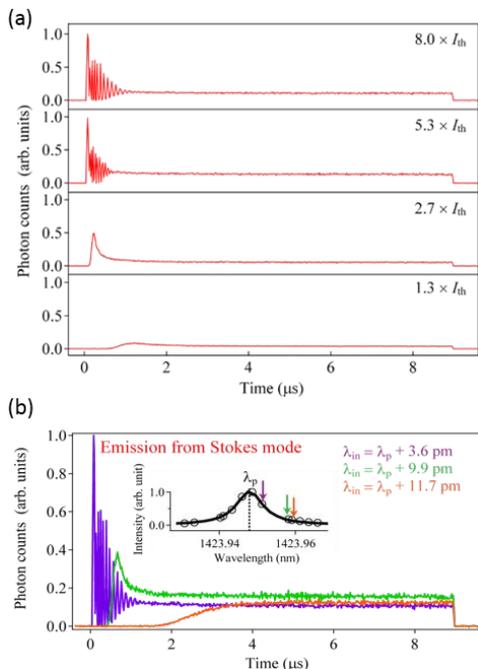


図3. ラマンレーザー光の時間応答. (a) 励起強度依存性. (b) 励起波長依存性.

## (2) ラマン散乱励起スペクトルの開発と光利得の励起波長依存性の解明

高  $Q$  ナノキャビティベースのラマンシリコンレーザーの光学利得の励起波長依存性を調べるために、ラマン散乱ルミネッセンス励起 (RLE) 分光法と呼ばれる技術を開発した。本測定により、図4に示すように、レーザー発振を可能にする励起波長の範囲、最大出力の励起条件、非線形光学損失を含むラマン利得の向上などのレーザー特性が明らかとなった。さらに、2光子吸収によって誘起される自由キャリアによる非線形光学損失が、ある閾値を超える長波長領域で急激に増大し、

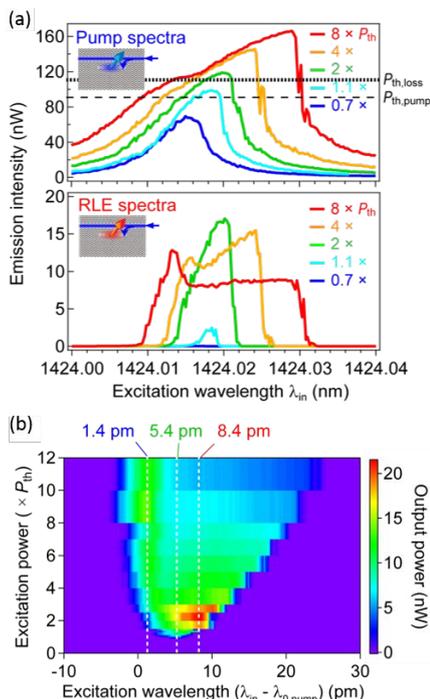


図4. (a) 励起光 (上部パネル) および RLE スペクトル (下部パネル). (b) RLE イメージ.

出力パワーおよびエネルギー効率を低下させることを明らかにした。RLE 分光法は、あらゆるタイプの高  $Q$  値微小共振器を用いたラマンレーザーの利得機構を調べるのに有用であり、デバイスの性能改善に役立つ。

## (3) シリコンラマンレーザーの歩留まりに影響する要因の特定

図1に示したラマンレーザーは、ヘテロ構造ナノ共振器内の2つの高  $Q$  値共振モードを利用しており、その光学特性ばらつきの影響を受ける。そこで、同じデザインを持つ40個のサンプルを測定して、作製歩留まりに影響を及ぼすパラメータを調べた。その結果、 $Q$  値のばらつきは存在するが歩留まりにとっては大きな問題でなく、2つの共振モードの周波数差  $\Delta f$  のばらつきが最も重要と分かった。さらに、結晶方向を変えても、ばらつきには変化が無いことも突き止めた。歩留まりを向上させるためには、空孔の位置や半径の変動を小さくすることが重要であると結論づけた。以上の知見をもとに構造を改良したところ、80%という高い歩留まりが得られた。

## (4) 1.31 $\mu\text{m}$ 帯/1.55 $\mu\text{m}$ 帯で発振するラマンレーザーチップの開発

これまで作製してきたラマンレーザーの動作波長は1.55  $\mu\text{m}$  帯のみであった。短波長側での動作は、光通信応用、バンド間遷移を用いたシリコン光源開発に重要となる。また、それらの集積化が将来の光回路応用に貢献すると予想される。そこで、図5に示すような1.31  $\mu\text{m}$  帯と1.55  $\mu\text{m}$  帯で動作するラマンレーザーを集積化した1チップ素子を開発した。基板の膜厚が薄い方に1.31  $\mu\text{m}$  帯で動作するレーザーを、膜厚が厚い方に1.55  $\mu\text{m}$  帯で動作するレーザーを作製した。両方のナノ共振器で  $Q$  値100万以上が得られ、両レーザーとも、サブマイクロワットの閾値で発振した。短波長側のレーザーの閾値は長波長側よりも良化する傾向が確認されており、今後詳しく調べる予定である。

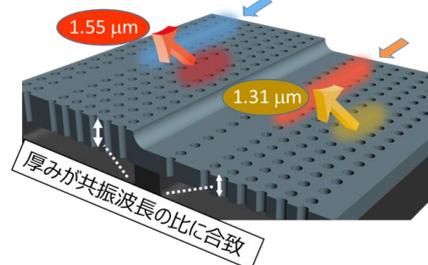


図5. 異なる波長帯で動作するシリコンラマンレーザー素子.

## (5) ラマンレーザーに用いる高 $Q$ 値ナノ共振器の大量作製

本ラマンレーザーには、 $Q$  値が100万を超えるヘテロ構造ナノ共振器を用いているが、この共振器はこれまで、電子線描画を用いて作製されてきた。今回、300 mm 幅の SOI 基板上に、ArF 浸漬フォトリソグラフィを使用して高  $Q$  値ナノ共振器を大量作製した。図6に

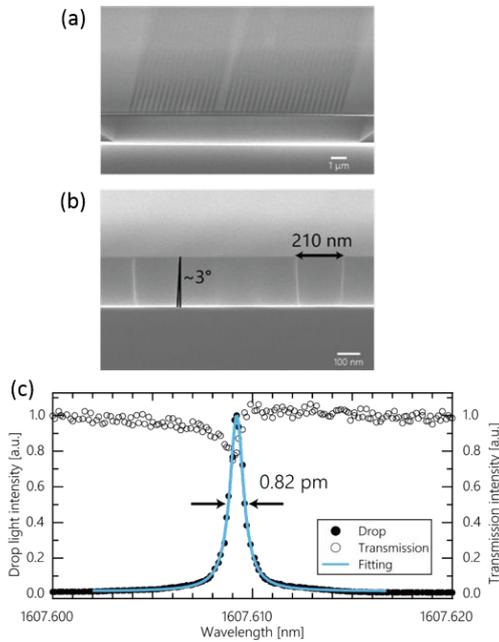


図 6. (a),(b) CMOS プロセスで作製した素子の電子顕微鏡写真 (c)  $Q$  値 250 万の共振スペクトル .

示すように、良好な空気孔が形成できた。その結果、平均  $Q$  値が 150 万、最高  $Q$  値 230 万が得られた。この  $Q$  値は、CMOS プロセスで作製されたフォトニック結晶共振器の最高値であり、ラマンレーザー発振に必要な  $Q$  値も実現可能と予測される。現在は、CMOS プロセスによるシリコンラマンレーザー作製に取り組んでいる。

#### (6) 結晶方位を回転した SOI 基板を用いたシリコンラマンレーザーの作製

我々が開発した超低閾値シリコンラマンレーザーは、図 1 に示したように、(100)SOI 基板の [100] 結晶方向に作製する必要がある。基板が容易に劈開可能な [110] 結晶方向とは平面内で 45 度の回転ずれが生じており、将来の応用において欠点となると予想される。そこで、図 7 に示すように、トップシリコン層の結晶方位が基板シリコン層に対して 45 度回転させてある (100)SOI 基板上にラマンレーザーを作製した。結晶方位を回転しても、従来と同等の  $Q$  値と共振波長が得られ、閾値が  $0.53 \mu\text{W}$ 、エネルギー効率 5.6% を持つ室温連続レーザー発振が得られた。この基板を用いることで、シリコンラマンレーザーは、基板の劈開方向に垂直に作製することが可能となった。本結果は、CMOS プロセスによるラマンレーザーの大量作製や、集積フォトニック回路へのラマンレーザーの導入を容易にすると考えられる。

#### (7) シリコンナノ共振器発光におけるパーセル効果の直接的観測

我々は、最終的には高  $Q$  値ナノ共振器を用いた電流注入型のシリコン光源開発を目指している。その実現には、バンド間遷移を増強する必要がある。シリコンナノ共振器におけるパーセル効果は、これまで直接観測されて

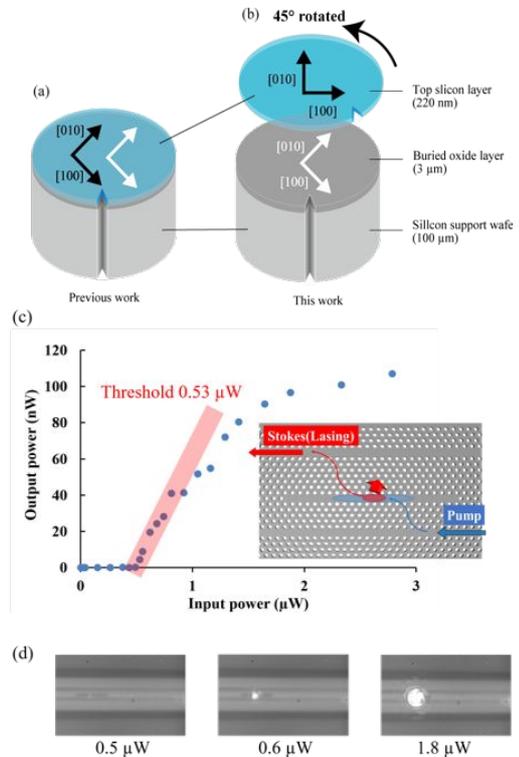


図 7. (a) 従来の SOI 基板 . (b) 基板方位を 45 度回転した SOI 基板 . (c) 入力 - 出力プロット . (d) レーザ発振前後の赤外カメラ画像 .

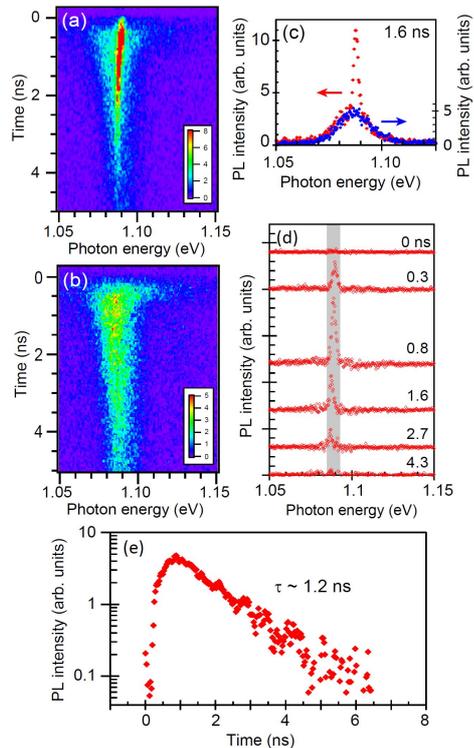


図 8 . (a) ナノ共振モードからの時間分解発光画像 . (b) ナノ共振器が無い位置からの時間分解発光画像 . (c) 1.6 ns における両者のスペクトルの比較 . (d) 0 ns から 4.3 ns までの共振モード発光の時間変化 . (e) 共振モード発光の時間減衰 .

いなかった。図 8 に示すように、我々は、低温 10K において、電子正孔液滴発光の発光レートがナノ共振モードにより増強されてい

ることを、時間分解 PL 分光法により直接観測することに成功した。注意深く発光寿命を分析した結果、EHD の発光効率がナノ共振モードを介した発光においては、60%まで増強されていることを突き止めた。

(8) シリコンラマンレーザーの温度依存性応用に向けて、レーザーの温度特性を調べることは重要である。我々は、室温から 100 までの温度依存性を測定した。温度を上げると発振閾値、エネルギー効率がともに減少していき、100 では発振しなくなった。今後、測定系を改良して、さらに広い温度範囲における入出力特性、特に室温以下で評価して、最高出力が得られる温度、発振可能温度範囲などを明らかにしていく予定である。

(9) シリコンラマンレーザーの SLD 光源励起ラマンレーザーの将来応用に向けて、ブロードな光源による安定励起が必要になってくる。そこで、図 9 に示すように、SLD を励起光源に用いて、共振波長が異なる 8 個のナノ共振器を一括励起できることを確認した。さらに、SLD 励起によるレーザー発振の研究も進めており、ラマンスペクトル測定にも成功している。現在は、インコヒーレント光を用いた世界初のラマンレーザー発振を目指している。

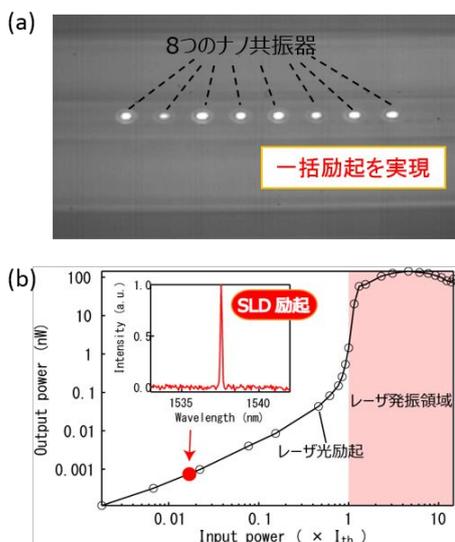


図 9 . (a) SLD 光源を用いた 8 つのナノ共振器の一括励起 .(b) ラマンレーザーの SLD 励起実験結果 .

(10) ナノ共振器の高 Q 値化  
シリコン光源開発においては、ヘテロ構造ナノ共振器の  $Q$  値向上が重要となる。我々は、吸収損失を減少するポストプロセス法を開発して、その最高値を 1100 万まで向上した。また、L3 型ナノ共振器でも 200 万という  $Q$  値を達成した。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

Kohei Ashida, Makoto Okano, Minoru Ohtsuka, Miyoshi Seki, Nobuyuki Yokoyama, Keiji Koshino, Masahiko Mori, Takashi

Asano, Susumu Noda, and Yasushi Takahashi (Editor's Pick)

“Ultrahigh- $Q$  photonic crystal nanocavities fabricated by CMOS process technologies”

*Optics Express*, **25**, 18165-18174 (2017).

査読有 DOI: 10.1364/OE.25.018165

Toshiyuki Ihara, Yasushi Takahashi, Susumu Noda, and Yoshihiko Kanemitsu

“Enhanced radiative recombination rate for electron-hole droplets in a silicon photonic crystal nanocavity”

*Physical Review B* **96**, 035303 (2017).

査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.96.035303

Takashi Asano, Yoshiaki Ochi, Yasushi Takahashi, Katsuhiko Kishimoto, and Susumu Noda

“Photonic crystal nanocavity with a  $Q$  factor exceeding eleven million”

*Optics Express*, **25**, 1769-1777 (2017).

査読有 DOI: 10.1364/OE.25.001769

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

(他査読有り 6 件)

〔学会発表〕(計 51 件)

山内悠起子, 岡野誠, 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ーの作製”  
電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 福井, 2018/5/24

Daiki Yamashita, Takashi Asano, Susumu Noda, and Yasushi Takahashi

“Excitation Wavelength Dependence of a High- $Q$  Nanocavity-based Raman Silicon Laser”

*Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, USA, 2018/5/18, 査読有

安田 孝正, 山内 悠起子, 浅野 卓, 野田 進, 高橋 和

“高  $Q$  値ナノ共振器を用いたシリコンラマンレーザーの温度特性評価”

2018 年春季応用物理学会, 東京, 2018/3/20

山下 大喜, 浅野 卓, 野田 進, 高橋 和

“ナノ共振器シリコンラマンレーザーの SLD 光源励起”

2018 年春季応用物理学会, 東京, 2018/3/19

高橋和, 山下大喜, 浅野卓, 野田進  
(招待講演)  
“フォトニック結晶シリコンラマンレーザー”  
レーザー学会第 38 回年次大会, 京都,  
2018/1/26

山下大喜, 高橋和, 浅野卓, 野田進  
(Poster Award)  
“ナノ共振器シリコンラマンレーザーの励起  
波長依存性”  
2017 年秋季応用物理学会, 福岡, 2017/9/5-8  
汐崎梨紗, 伊藤隆浩, 芦田紘平, 高橋和  
“ナノ共振器を多数配置したデバイスの  
SLD 光源による一括励起”  
2017 年秋季応用物理学会, 福岡, 2017/9/5-8

Daiki Yamashita, Yasushi Takahashi Takashi  
Asano, and Susumu Noda  
“Lasing dynamics of microwatt-threshold Raman  
silicon lasers using high- $Q$  nanocavities”  
Photonics West 2017, San Francisco, USA,  
2017/2/1, 査読有

桑原充輝, 高橋和 (優秀論文発表賞)  
“1310/1550nm 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, 2017/1/7

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,  
2016/11/23

芦田紘平, 岡野誠, 大塚実, 関三好, 横山  
信幸, 越野圭二, 森雅彦, 高橋和  
(注目講演)  
“フォトリソグラフィで作製した  $Q$  値 100 万  
を超えるシリコンフォトニック結晶ナノ共  
振器”  
2016 年春季応用物理学会, 東京, 2016/3/19-22

高橋和 (招待講演)  
“高  $Q$  値フォトニック結晶共振器を用いた  
低閾値シリコンラマンレーザー”  
第 23 回シリコンフォトニクス研究会 金沢,  
2015/12/11  
(他 39 件)

〔図書〕(計 6 件)

高橋和, 岡野誠, 浅野卓, 野田進  
「超高  $Q$  値シリコンフォトニック結晶光ナ  
ノ共振器の進展」  
応用物理 2018 年 10 月号.

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.  
(他 2 件)

〔産業財産権〕  
○出願状況 (計 1 件)  
名称: フォトニック結晶光回路および発光装置  
発明者: 高橋和, 高橋幸司, 河西秀典, 浅野  
卓, 野田進  
権利者: 大阪府立大学, シャープ株式会社,  
京都大学  
種類: 特許  
番号: 2017-161646 号  
出願年: 2017  
国内外の別: 国内

〔その他〕

<研究室ホームページ>  
<http://www2.pe.osakafu-u.ac.jp/pe9/index.html>

<大阪府立大学学術情報リポジトリ>  
<http://repository.osakafu-u.ac.jp/>

<新聞報道>  
日刊工業新聞 2016/03/17  
化学工業新聞 2016/03/28

<受賞>

第 9 回応用物理学会シリコンテクノロジ  
ー分科会研究奨励賞  
第 78 回応用物理学会秋季学術講演会  
Poster Award  
第 37 回レーザー学会年次大会優秀論文  
発表賞  
(他 2 件)

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

(3) 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

金光 義彦 (KANEMITSU YOSHIHIKO)  
京都大学・化学研究所・教授  
研究者番号: 30185954

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

岡野 誠 (OKANO MAKOTO)  
産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製  
造領域・主任研究員  
研究者番号: 10443178

井原 章之 (IHARA TOSHIYUKI)  
京都大学・化学研究所・助教  
研究者番号: 10619860