

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686015

研究課題名(和文) シリコンフォトニック結晶ナノ共振器の性能向上と非線形光学効果の増強

研究課題名(英文) Improvements of silicon photonic crystal nanocavity and study on the enhanced nonlinear effect

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) 20,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、第一に、次世代光デバイスとして期待されているシリコンフォトニック結晶ナノ共振器の重要な性能指数であるQ値を向上すること、共振波長のばらつきを低減することを目指し、第二に、ナノ共振器による非線形光学効果の増強を調べた。4年間におよぶ研究の結果、ナノ共振器のQ値を250万から900万まで向上して、共振波長のばらつきを1 nm強から0.2 nmまで低減することに成功した。さらに、この高Q値ナノ共振器を用いて、従来の1万分の1以下の閾値と素子サイズを持つ超低閾値、超小型シリコンラマンレーザーの開発に成功し、高Q値ナノ共振器における非線形効果の増強機構を明らかとした。

研究成果の概要(英文)：The 1st target of this research is to improve the performance of the silicon photonic crystal nanocavities. Especially, I focused on increasing the Q factor and reducing the fluctuation of the resonant wavelength. The 2nd target is to investigate the mechanism of enhancement of the nonlinear effects in the high-Q nanocavities. For these 4 years, I have successfully increased the Q factor to 9 million from 2.5 million and reduced the fluctuation of resonant wavelength to 0.2 nm from a few nm. Furthermore, I have developed a continuous-wave Raman silicon laser using a high-Q nanocavity, with a cavity size of less than 10 micrometers and an unprecedented ultralow threshold of 1 microwatt. These achievements are attracting much attention.

研究分野：半導体光デバイス

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 顕微分光測定 微細加工 光通信 シリコン

1. 研究開始当初の背景

情報処理に関わるエネルギー消費量は、近年急激に増大しており、低消費電力、小型、低コストだけでなく資源・環境問題に適合し、かつ、CMOS 技術との整合性を持つような光デバイスが今後必要となってくる。この難易度の高い要求に答える技術として、図 1 に示すような高 Q 値シリコンナノ共振器が注目されてきた。

この高 Q 値ナノ共振器は、物質と光の相互作用の強さを決める Q/V 値を広い範囲で制御可能であり、従来は利用困難とされてきた光効果に基づく光デバイスが創出可能と期待されてきた。2003 年に Q 値向上の手法が京都大学のグループから発表されて以降、世界中にナノ共振器研究が普及し、共振器の Q 値向上は、新原理発見や斬新なデバイス考案に重要な役割を担ってきた。一方、研究が進展するにつれて、ナノ共振器の共振波長の制御性がボトルネックとなりつつあり、これら 2 つの高性能化を進めることが肝要である。

つづいて、性能が向上したナノ共振器において非線形光学効果がどのように増強するのかを調べるのが重要である。ナノ共振器は、その研究初期から、非線形現象の増強効果が期待されてきたが、検証が不十分である。非線形光学効果は、多彩で有用ではあるが、効率が低いことが欠点であり、増強メカニズムの理解は、大きな波及効果を引き起こすと期待される。

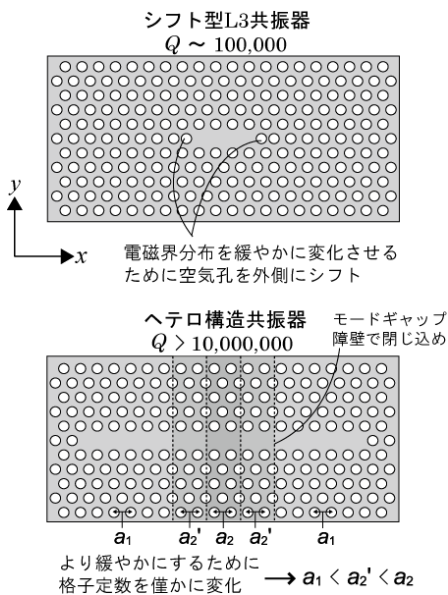


図 1 本研究で用いた 2 つのナノ共振器構造。

2. 研究の目的

以上の背景のもと、研究代表者は、高 Q 値ナノ共振器研究の進展を目的として、以下の 2 つの課題を設定した。

(1) Q 値と波長制御性の向上

これらは、ナノ共振器研究の根幹を支えるパラメータであり、当時の最高値の 4 倍に相当する 1 千万、0.1 nm を目標とする。

(2) 非線形光学現象の増強メカニズム

具体的には、誘導ラマン散乱/高次高調波などの光学現象を、ナノ共振器の Q 値/共振波長/構造対称性などを変えて体系的に明らかにする。

3. 研究の方法

Q 値向上と波長ばらつき低減については、全研究年度にわたって、以下に記した 3 つの戦略を同時進行で行い、非線形光学現象の観測は、助成金を用いて顕微分光測定系の充実を図りながら遂行した。サンプル作製と測定の一部は、京都大学野田進研究室と協力して行った。

(戦略 A) 空気孔揺らぎの低減

ナノ共振器の Q 値が 1 千万に届かない主原因の 1 つは、作製精度に起因する空気孔の位置・半径揺らぎである。また、空気孔揺らぎは波長ばらつきの主要因でもある。微細加工プロセスを改善して、この空気孔揺らぎの大きさを低減させる。

(戦略 B) 光吸収原因の特定と除去

ナノ共振器では、光吸収も Q 値を低減させている。しかしその主原因は、表面由来なのか材料由来なのか不明であり、これを真空測定などで突き止め、除去する手法を開発する。

(戦略 C) 揺らぎに強い構造の設計

空気孔揺らぎに強い構造設計を FDTD 計算で行い、性能劣化の実証を試みる。

4. 研究成果

(1) Q 値と共振波長の統計的評価

当時、Q 値を向上させる努力の一方で、応用上重要なファクターである Q 値のばらつきや共振波長のばらつきについては、評価がされていなかった。そこで、同一構造を持つ多数のナノ共振器を同一基板上に同一プロセスで 80 個作製して統計的な評価を行った。測定には、理論 Q 値 1500 万を持つヘテロ構造ナノ共振器を用いた。

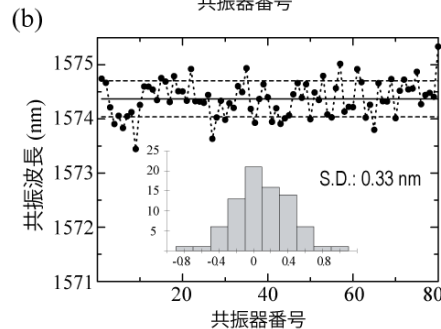
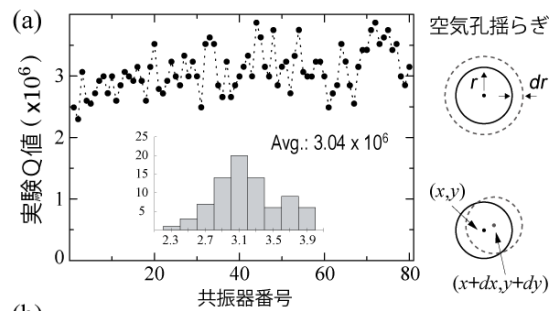


図 2 . 80 個のナノ共振器の測定を行った。

図 2 が測定結果である．まず、80 個の共振器の Q 値は全て 200 万を超えており、高 Q ナノ共振器の作製歩留まりは 100 % である． Q 値のばらつきは、平均 Q 値 300 万を中心に 230 万 ~ 390 万の間でほぼ正規分布状となっており、計算から得られた結果と良く一致した．一方、共振波長も正規分布状に揺らぎはいるが、その標準偏差は 0.33 nm という小ささであり、80 個間の最大差もわずか 1.9 nm であることが明らかとなった．

(2) 高 Q ナノ共振器の共振波長拡大

シリコンは室温において 1.12 μm 以上で透明であるため、原理的には全ての光通信波長帯で高 Q 値ナノ共振器が作製可能と予想される．しかし、それまで作製された Q 値 100 万以上のナノ共振器は 1.55 - 1.60 μm の狭い波長範囲に限られていた．1.3 μm 帯も光通信では重要である．そこで、より短波長側で動作する高 Q 値ナノ共振器の作製を試みた．

図 3 は作製したナノ共振器の共振波長と Q 値の関係を示したものである．1.27 μm まで Q 値 100 万以上のナノ共振器を作製することに成功した．短波化に伴い Q 値が単調減少しているのは作製精度の低下によるものと考えられ、波長ばらつきも短波長側で大きかった．このことは、空気孔揺らぎ (図 2 模式図) の低減が重要であることを示している．

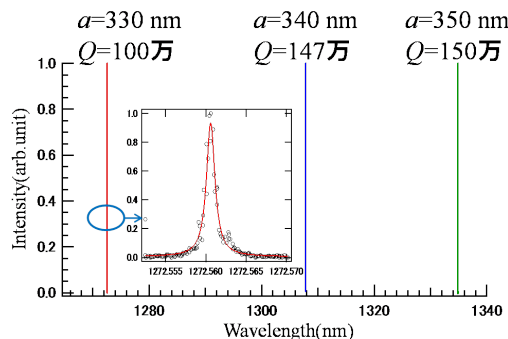


図 3 . 共振波長 1.3 μm . Q 値 100 万以上を持つナノ共振器の作製に成功した．

(3) 最高 Q 値 900 万の達成

Q 値が 400 万程度に抑えられる要因として、表面に付着した水による吸収に注目した．そこで、図 4(a) に示すような測定系を用意して、試料周囲の湿度を変えて高 Q 値ナノ共振器の測定を行った．図 4(b) が実験結果を示している．湿度の上昇とともに損失 Q 値も上昇していることが分かる．これは、湿度上昇とともにシリコンナノ共振器の表面に水分子が付着して、その光吸収が損失をもたらしていると推測される．

次に、シリコン表面の水分子を除去するために、表面状態の改良を試みた．サンプルを DHF に浸して表面酸化膜を除去してシリコン表面を Si-H で覆い、洗浄直後の試料を乾燥雰囲気中に素早く入れて測定したところ、最高 Q 値 900 万が得られた．光子寿命にして 7.5 ナノ秒となり、研究開始時点と比較して約 4 倍の向上を達成できた．

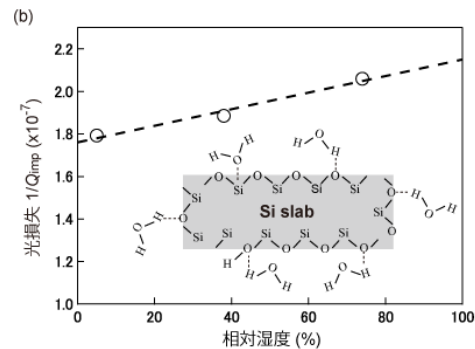
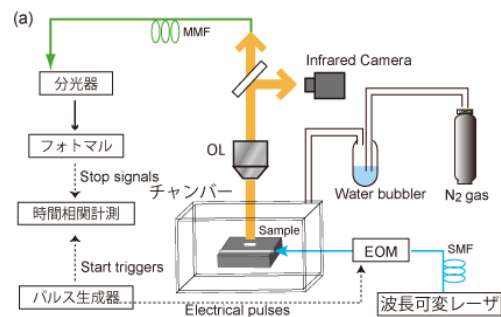


図 4. 湿度と Q 値の関係 (a) 測定系 (b) 実験結果．湿度に比例して光損失が上昇することを発見．

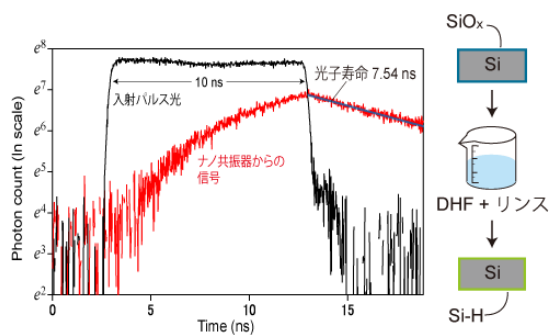


図 5 . 表面酸化膜を除去したナノ共振器により、世界最高 Q 値 900 万を達成した．

(4) 波長ばらつき 0.2 nm を持つ 32 チャンネル波長フィルタの実現

卓越したナノ共振器の作製プロセスを用いて、高密度波長多重通信で用いられているグリッド間隔 100 GHz (0.8 nm) で 32 チャンネル動作する波長フィルタの作製を試みた．実験には、シフト型 L3 共振器を用いた．図 6 にサンプル構造を示している．導波路に計 32 個のナノ共振器を隣接してあり、それぞれの共振器の格子定数は動作波長が 100 GHz 間隔で変わるように、398.375 nm から 410.0 nm まで 0.375 nm づつ変化させてある．デバイスサイズは、光通信で実用化されているアレイ導波路グレーティングと比べて 4 ~ 5 桁小さい．

図 7 は測定された 32 個のフィルタの動作波長と格子定数の関係を示したものである．共振器の動作波長は、格子定数に比例して 1.55 μm 付近で変化しており、直線近似による 32 個のフィルタの平均波長間隔は狙い通り 0.80 nm となった．直線近似からの各共振器の波長ずれは、正規分布状となり、その標準偏差は最少で 0.21 nm となった．研究

期間中、さらなる低減を試みたが困難であった。サンプル作製に用いている基板の表面ラフネスの影響が大きいと考えている。

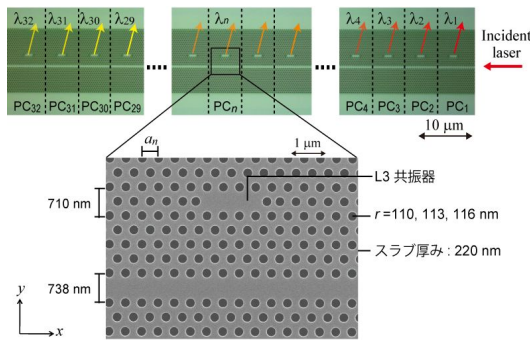


図 6. 32 チャンネル波長フィルターのレーザー顕微鏡像（上）と電子顕微鏡像（下）。

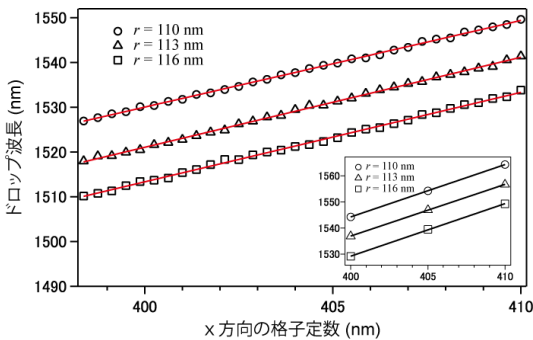


図 7. 32 チャンネル波長フィルターの動作波長プロット。

(5) 誘導ラマン散乱を増強する方法の発見と超低閾値シリコンラマンレーザーの実現

電子デバイスの中心材料であるシリコンを用いて光デバイスも作ることができれば、電子機器や光通信ネットワークの高速・省エネ化だけでなく、医療・バイオ分野までその恩恵が行きわたると期待されている。しかしながら、シリコンは間接遷移型半導体であり、光技術の源泉であるレーザー光を生み出すことが物理的に困難である。現在、我々の暮らしの中に無数に存在している半導体レーザーのほぼ全てが、3 族と 5 族の 6 つの元素（アルミ、ガリウム、インジウム、窒素、リン、ヒ素）を組み合わせられており、これらはシリコンとの相性が良いとはいえない。

室温連続発振するシリコンレーザーは、2005 年にインテル社が開発したシリコンラマンレーザーのみである。しかし素子サイズが 1 センチ以上もあり、発振閾値も 20 ミリワットと非常に高い。さらに、P-i-N ダイオードを付加した作製コストの高い構造であり、これらはシリコンのメリットを大きく損なっている。

我々は、図 8(a) に示すようなヘテロ構造ナノ共振器におけるラマン散乱の増強メカニズムを精緻な試料作製と顕微分光測定を駆使して調べた。その結果、インテルのデバイスより 1 万倍以上小さく、2 万倍低い閾値を持つラマンシリコンレーザーを開発するこ

とに成功した。以下にその概要を説明する。

ヘテロ構造ナノ共振器では、局所的に光を強く閉じ込めるためのナノ共振モードが 2 つ形成される。我々は、第 2 ナノ共振モードを励起光を閉じ込めるために、第 1 ナノ共振モードをラマン散乱光を閉じ込めるために利用した。前者の共振モードは Q 値 10 万以上、後者では 100 万以上が得られ、両者の周波数差は空気孔の直径を変えることでシリコンの格子振動数に一致させることが可能という特長がある。

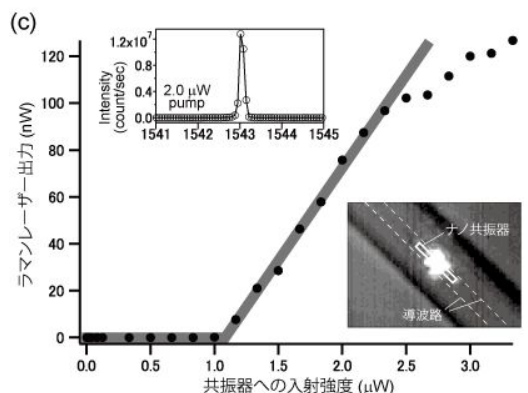
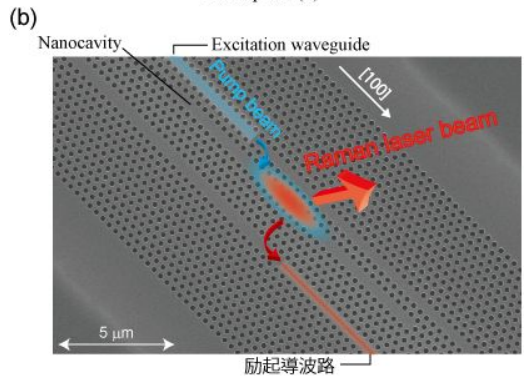
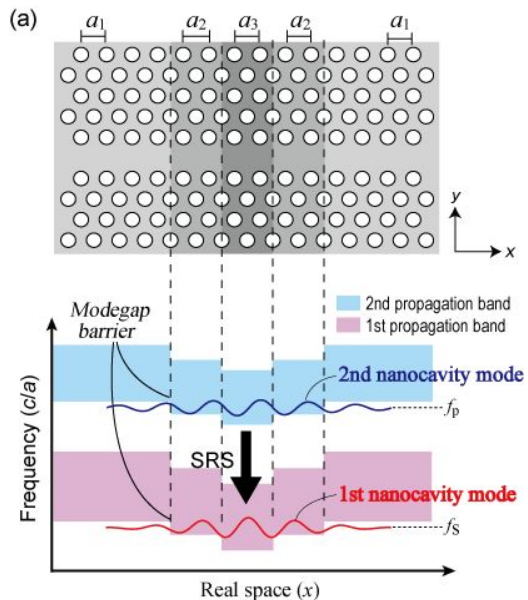


図 8. (a)ラマンレーザーに用いたナノ共振器の構造とバンド図。(b)ラマンシリコンレーザーの電子顕微鏡写真とデバイスの動作イメージ。(c)レーザーの入力 - 出力特性。挿入図は発振直後のナノ共振器の赤外カメラ写真。

図 8(b) は作成したサンプルの電子顕微鏡写真にラマンレーザーの動作イメージを重ねたものである。P-i-N ダイオード構造は付けておらず、純粋にシリコンだけで作られている。空気孔を埋めた 3 本の線欠陥が平行に構築しており、長さが 10 マイクロメートル程度の中央の欠陥がヘテロ構造ナノ共振器である。通常、シリコン光素子は[110]方向に作製されるが、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慮すると 45°傾いた[100]方向に作製したほうがレーザー発振に有利となる。

発振メカニズムを簡単に言うと、以下のとおりである。Q 値が 10 万程度の第 2 ナノ共振モードに閉じ込められた励起光はシリコンの格子振動と相互作用してラマン散乱光を効率的に発生させる。生じたラマン散乱光は Q 値 100 万以上の第 1 ナノ共振モードにさらに強く閉じ込められる。[100]方向に共振器を作製したことで両モードは強く結合して、ラマン散乱が増幅されレーザー発振が起こる。

図 8(c) は、ナノ共振器から垂直方向に放射されたレーザー光の強度をプロットした結果と発振前後での共振器の赤外カメラ写真である。約 1 マイクロワットの入射強度で明瞭なレーザー発振が確認されていることが分かる。本測定は大気中にて行われたが、バルクシリコンのみをレーザー発振の材料に用いていることから堅牢であり、測定を繰り返すことによる性能劣化は見られていない。

本研究成果により、今後の高 Q 値ナノ共振器研究の展望が明るくなったと考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 9 件)

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

“Raman shift and strain effect in high-Q photonic crystal silicon nanocavity”

Optics Express, **23**, 3951-3959 (2015).

査読有 DOI: 10.1364/OE.23.003951

Yasushi Takahashi and Susumu Noda
(Invited paper)

“A Microwatt threshold Raman silicon laser”

IEEE Photonics Journal **6**, 0700105 (2014).

査読有 DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2310218

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

“Ultra compact 32-channel drop filter with 100 GHz spacing”

Optics Express **22**, 4692-4698 (2014).

査読有 DOI: 10.1364/OE.22.004692

Hiroshi Sekoguchi, Yasushi Takahashi, Takashi Asano, and Susumu Noda

“Photonic Crystal Nanocavity with a Q-Factor of ~9 million”

Optics Express **22**, 916-924 (2014).

査読有 DOI: 10.1364/OE.22.000916

Yasushi Takahashi, Yoshitaka Inui, Masahiro Chihara, Ryo Terawaki, Takashi Asano, and Susumu Noda

“High-Q resonant modes in the photonic crystal heterostructure nanocavity and applicability to a Raman Silicon laser”

Physical Review B **88**, 235313 (2013).

査読有 DOI: 10.1103/PhysRevB.88.235313

Yasushi Takahashi, Yoshitaka Inui, Masahiro Chihara, Takashi Asano, Ryo Terawaki, and Susumu Noda

“A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold”.

Nature **498**, 470-474 (2013).

査読有 DOI:10.1038/nature12237

Ryo Terawaki, Yasushi Takahashi, Masahiro Chihara, Yoshitaka Inui, and Susumu Noda

“Ultrahigh-Q photonic crystal nanocavities in wide optical telecommunication bands”.

Optics Express **20**, 22743-22753 (2012).

査読有 DOI: 10.1364/OE.20.022743

Yoshiya Sato, Yoshinori Tanaka, Jeremy Upham, Yasushi Takahashi, Takashi Asano, and Susumu Noda

“Strong coupling between distant photonic nanocavities and its dynamic control”.

Nature Photonics **6**, 56-61 (2012).

査読有 DOI: 10.1038/nphoton.2011.286

Yuki Taguchi, Yasushi Takahashi, Yoshiya Sato, Takashi Asano, and Susumu Noda

“Statistical studies of photonic heterostructure nanocavities with an average Q factor of three million”.

Optics Express **19**, 11916-11921 (2011).

査読有 DOI: 10.1364/OE.19.011916

[学会発表](計 47 件)

Yasushi Takahashi and Susumu Noda
(Invited)

“Microwatt-threshold Raman silicon laser using photonic crystal high-Q nanocavity”

Photonics West 2015, San Francisco, USA 2015/2/10.

Yasushi Takahashi (Invited)

“Raman silicon laser using photonic crystal nanocavity”

Photonics Asia 2014, 9277-20, Beijing, China 2014/10/10

Yasushi Takahashi, Yoshitaka Inui, Takashi Asano, and Susumu Noda

“Ultralow-threshold Continuous-wave Raman Silicon Laser Using a Photonic Crystal High-Q Nanocavity”

Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, USA 2013/06/13 査読有

Ryo Terawaki, Yasushi Takahashi, Masahiro Chihara, and Susumu Noda
“Extension of the operating wavelength range of high-Q photonic crystal heterostructure nanocavities”

International Symposium on Advanced Nanostructures and Nano-Devices, Hawaii, USA
2011/12/06

Masahiro Chihara, Yasushi Takahashi, Ryo Terawaki, Yoshitaka Inui, Takashi Asano, and Susumu Noda

“Enhanced Raman Scattering from Silicon High-Q Photonic Crystal Nanocavity”

International Symposium on Advanced Nanostructures and Nano-Devices, Hawaii, USA
2011/12/06

Yasushi Takahashi, Ryo Terawaki, Masahiro Chihara, Takashi Asano, and Susumu Noda

“First Observation of Raman Scattering Emission from Silicon High-Q Photonic Crystal Nanocavities”

Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Baltimore, USA 2011/05/04 査読有

高橋和 (チュートリアル)

フォトニック結晶デバイスの現状と将来性
Si フォトニクス・微小光学セミナー (科学技術館・東京) 2014/11/20

高橋和 (招待講演)

高 Q 値微小共振器による誘導ラマン散乱の増強

日本物理学会 (東海大学 湘南キャンパス: 神奈川) 2014/3/27

高橋和, 野田進 (招待講演)

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

レーザー学会 (北九州国際会議場: 福岡) 2014/1/20

高橋和 (成果展示)

フォトニック結晶ナノ共振器シリコンラマンレーザーの開発

Nano tech 2013 (東京ビッグサイト: 東京) 2013/1/30-2/1

(他 37 件)

[図書] (計 7 件)

高橋和

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

固体物理 2014 年 8 月号 p.11-18.

高橋和

シリコンフォトニック結晶による光励起ラマンレーザー発振

応用物理 2014 年 6 月号 p.448-451.

高橋和, 野田進

高 Q 値フォトニック結晶ナノ共振器を用いた超小型ラマンシリコンレーザーの開発

レーザー加工学会誌, Vol.21, No.2, p.123-126 (2014).

高橋和, 乾善貴, 浅野卓, 野田進
フォトニック結晶ナノ共振器ラマンシリコンレーザー

レーザー研究 (レーザー学会誌) 2014 年 3 月号 p.250-255.

高橋和, 乾善貴, 千原賢大, 浅野卓, 野田進

極微小・超低閾値ラマンシリコンレーザー
月刊オプトロニクス 2013 年 9 月号 p.93-97

高橋和

“フォトニック結晶ナノ共振器の Q 値増大と波長制御”

機能材料 5 月号, p.19-25 シーエムシー出版 (2011).

(他 1 件)

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: ラマン散乱光増強デバイス, ラマン散乱光増強デバイスの製造方法

発明者: 高橋和, 乾善貴, 千原賢大, 浅野卓, 野田進

種類: 特許

番号: 日本特許第 5401635 号

取得年月日: 2013/11/1

出願年月日: 2012/8/24

国内外の別: 海外(米国, 韓国, 中国) 他 3 カ国審理中

[研究室ホームページ]

<http://www.pe.osakafu-u.ac.jp/pe9/>

<報道関連情報> (15 件以上, 海外含)

日経産業新聞 2013/07/12

科学新聞 2013/07/12

朝日新聞 2013/07/01

日刊工業新聞 2013/06/27

<受賞>

第 17 回丸文学術賞

受賞者: 高橋和

授与団体: 一般財団法人 丸文財団

授賞式: 2014/03/06

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

(4) 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