

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03993

研究課題名(和文) シリコンカーバイドフォトニック結晶の高度化

研究課題名(英文) Improvement of SiC photonic crystals

研究代表者

浅野 卓 (Asano, Takashi)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30332729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では2光子吸収の抑制や広帯域動作においてSiフォトニック結晶を大きく超える性能が期待されるSiCフォトニック結晶の低損失化に取り組んだ。ベースとなるSiC薄膜自体がその作製工程に由来した線形光吸収を持つことを明らかにし、これを回避する作製手法を考案した。これにより、SiCフォトニック結晶共振器のQ値として最大で30万を実現し、共振器の光損失を本研究開始前の1/30倍に低減させることに成功した。さらにこのような高Q値共振器を用いた2光子吸収のない高効率な非線形効果の発現に取り組み、最も基本的な光非線形効果である二次高調波発生において1400%/Wという高い効率を観測した。

研究成果の概要(英文)：We have improved the optical loss of SiC photonic crystals, which are expected to overcome the issues in Si photonic crystals such as suppression of two-photon absorption, operation at visible range, etc. We have found that thin film SiC of SiC on insulator substrate has linear absorption loss originates from the fabrication process, and proposed a fabrication method to avoid this issue. As a result, a low-loss SiC photonic crystal nanocavity with a Q factor of 300 thousand has been realized, which means that optical loss has been suppressed to be less than 1/30 of the value before this research. Enhancement of optical nonlinearity based on a high-Q SiC nanocavity has been also investigated, and high normalized second harmonic conversion efficiency of 1400%/W has been observed.

研究分野：光ナノデバイス

キーワード：シリコンカーバイド フォトニック結晶 ナノ光デバイス 光共振器 光非線形効果

1. 研究開始当初の背景

シリコン(Si)を用いた光配線、共振器等の光ナノデバイスは近年目覚ましい発展を遂げているが、次世代を見据えて Si の材料限界を超え得る手法の研究を進めておくことも重要と考えられる。

申請者が検討してきたシリコンカーバイド(SiC)光ナノデバイスは、禁制帯幅が大きいため光通信帯域における二光子吸収が原理的に存在せず、Si よりも大幅に高強度の光を取り扱うことが可能である。このため、高密度光配線や光非線形効果に基づく種々の機能の発現において非常に有用であり、さらに可視光域での動作も可能である。

ただしその一方、本研究開始時点では材料自体に起因する線形吸収を完全に抑制できるには至っていないという課題が存在していた。具体的には本研究開始当初の SiC 光ナノデバイスの損失は、共振器の低損失性の指標である Q 値にして 1 万程度までは向上していたが、Si フォトニック結晶共振器で実現されていた Q 値 900 万と比較すると、そこにはまだ厳然とした開きがあった。そしてその原因として SiC フォトニック結晶デバイスを作るために用いている支持基板上の薄膜 SiC(SiC on Insulator (SiCOI)基板)自体に材料吸収があり、それが損失の原因になっている可能性が見え始めていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、SiC 光ナノデバイスの線形吸収を低減し、禁制帯幅が大きい光通信帯域における二光子吸収が原理的に存在せず、Si よりも大幅に高強度の光を取り扱うことが可能であるといった優れた特性を十二分に活用することにある。

3. 研究の方法

上述の材料吸収は、支持基板上の薄膜 SiC すなわち SiCOI 基板を作製する際の水素イオン打ち込み等のプロセスで生じる結晶ダメージ(原子位置の乱れ)に起因すると考えられる。通常の Si 光デバイスに用いられる SOI 基板においてもこのようなダメージは発生しているが、これは熱処理によって修復されている。よって SiCOI においても熱処理等で吸収が低減できる可能性がある。また、SiCOI 基板自体を用いない光ナノデバイスの作製方法も検討する。その場合、コアとなる SiC の周りを光閉じ込めのための低屈折率層で取り囲む必要がある点が問題となる。そこで、申請者が所属する研究室で開発された斜めエッチング技術を用いて、バルク SiC から梁状のナノ構造を直接削り出すという手法を用いる。また、SiCOI と類似の工程を用いつつも、イオン打ち込みを行わずに研磨およびエッチングによって薄膜 SiC を得るという手法も検討する。

4. 研究成果

まず、SiCOI 作製時の水素イオン注入に起因する光学損失の大きさを評価するため図 1 に示す SiC フォトニック結晶導波路の横に共振器を 150 μm 間隔で 4 つ配置した構造を SiCOI 基板を用いて作製した。本構造では SiC 導波路を伝搬する光の一部(3~4%)だけが共振器から構造面外に放出され、残りは次の共振器へと伝搬する。SiC 導波路の損失がなければ 4 つの共振器から放射される光の強度はほぼ同じになるが、導波損失が存在すると入射ポートから遠くなるほど放射光強度が小さくなる。

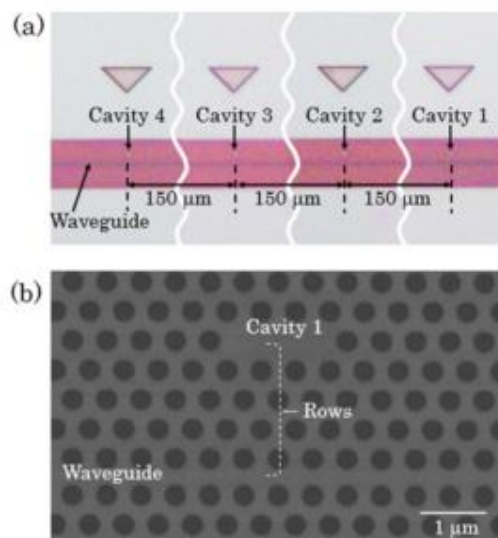


図 1 : SiCOI 基板の光吸収損失を実験的に評価するために設計・作製されたフォトニック結晶構造。(a)模式図、(b)1 ユニット分の走査型電子顕微鏡写真

図 2 に本構造の導波路の左端からレーザー光を導入し、各共振機からの放射光のスペクトルを測定した結果を示す。150 μm の距離を伝搬するごとに 80%程度に強度が低下していることが分かる。このデータから直接導波損失を評価すると 17 cm^{-1} 程度となり、さらに共振器から放射される量を補正して評価を行うと 15 cm^{-1} 程度の損失であることが分かった。本実験に用いた構造の光散乱損失は無視できる程度であることは理論的に確認されているため、この 15 cm^{-1} の損失は SiCOI による吸収損失であると言える。そして、この吸収係数から決まる共振器損失を求め、これを Q 値に換算すると、それは約 1 万程度となることが分かった。この値はこれまでの SiCOI 基板を用いた SiC フォトニック結晶共振器の実験、Q 値(1 万程度)とほぼ一致する。これにより、従来の SiC フォトニック結晶共振器の Q 値が SiCOI 基板の吸収損失によってほぼ決まっており、これを改善しなければ Q 値の向上が見込めないことが確認された。

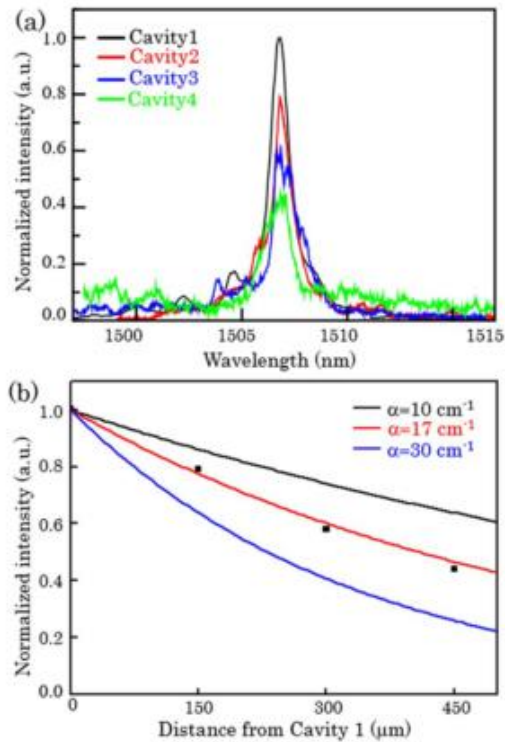


図 2 : 図 1 の構造に対する測定結果

上記の結果を得て、SiCOI 基板に基づく光吸収損失を回避する方法の一つとして、バルク SiC 基板から直接的に共振器を作製する方法について検討を行った。提案する微小梁型光共振器構造の模式図を図 2 に示す。この構造では、フォトニック結晶を微小梁型構造に設け、その格子定数を部分的に変化させることで、導波方向はモードギャップにより、他の 2 方向は大気との屈折率差により光を閉じ込める。この構造を実現するには、プラズマエッチングにおいて、電界制御板を用いてプラズマシースに生じる電界を制御し、斜め方向にエッチングを行うことで微小梁部分と支持基板とを切り離す。今回の検討では構造パラメータは格子定数 $a_1 = 460 \text{ nm}$ 、導波路幅 $w = 1.8a_1$ 、フォトニック結晶孔半径 $r = 0.29a_1$ 、構造作製角度 $\theta = 35^\circ$ とし、 $a_2 = 1.006a_1$ 、 $a_3 = 1.020a_1$ となっている。微小梁型構造が無窮長である理想的な場合、電界分布は図 2(c) のようになり、Q 値は 200 万程度である。ただし実際に作製した微小梁型構造は、プロセス中に破損しない長さである $20 \mu\text{m}$ 程度としたので、梁の両端へ漏れ出る光が生じるため、設計 Q 値は 10 万程度にまで低下する。

作製された共振器構造とその共鳴スペクトルを図 3 に示す。同図(a)から微小梁型構造が確かに作製できていることが分かる。また同図(b)から Q 値 2 万程度が得られていることが分かる。これにより、これまで 1 万程度に留まっていた SiC ナノ共振器の Q 値を、イオン打ち込みダメージを回避することで確かに向上出来ることが明らかになった。

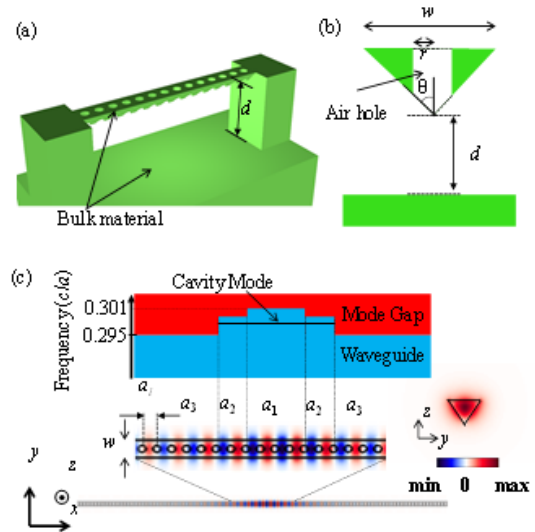


図 3 : 微小梁型フォトニック結晶共振器模式図 (a) 俯瞰図、(b) 断面図、(c) 共振器構造の詳細と共振モードの電界(E_y)分布

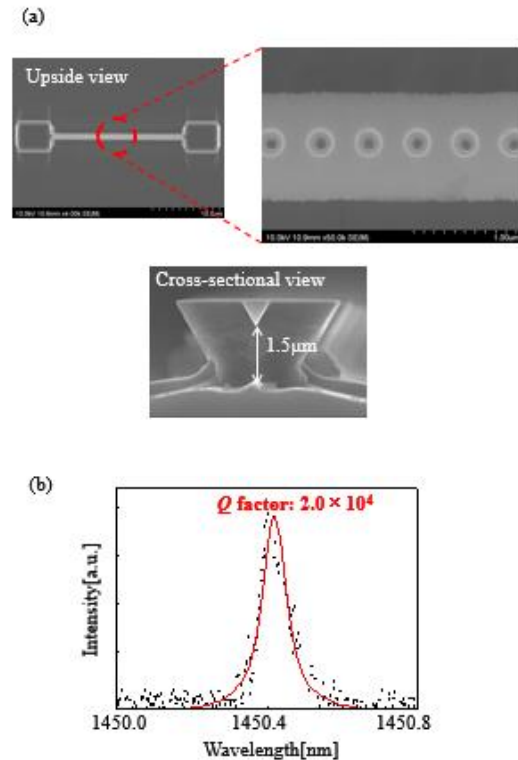


図 4 : 作製された微小梁型フォトニック結晶共振器 (a)電子顕微鏡写真、左、中は上面図、右は断面図 (ただし断面確認のために作製された別サンプル)、(b)共振器の共鳴スペクトルの測定結果

その一方で、得られた値は設計 Q 値(10 万)と比較すると小さいため構造不完全性の影響があると考えられる。詳しい計算の結果、フォトニック結晶孔が微小梁型構造の中心からずれることによる光学損失が大きいことがわかった。この損失は、今後、梁の長さを増して、構造を最適化することで低減でき

ると考えられる。しかし、本構造は1次元構造のため結合共振器等の複雑な構造への展開がやや困難という課題も抱えているため、従来の2次元フォトニック結晶構造の検討も行った。

2次元フォトニック結晶共振器構造の検討ではまず、熱処理によってこのダメージを低減し、光吸収損失を減少させることを試みた。上述の材料吸収は、支持基板上の薄膜SiCすなわちSiCOI基板を作製する際の水素イオン打ち込み等のプロセスで生じる結晶ダメージに起因すると考えられる。通常のSiフォトニック結晶等の光ナノ構造デバイスの作製に用いられるSOI基板においても、薄膜Si剥離工程においてこのようなダメージは発生しているが、その後の熱処理によって修復されている。本研究で用いたSiCOI基板もSOI基板と同様の1000°C程度での熱処理が行われているが、SiCの場合、これでは温度が不十分な可能性がある。しかし、SiCOI基板の構造は支持用の厚いSi基板の上にSiO₂層があり、その上に薄膜SiC構造が貼り付けられているものであるため、その熱処理の上限温度はSiによって制限される。そこで、熱処理温度は1400°Cとし、不活性ガス中で30分間のアニーリングを行った。アニーリング後の共振スペクトルの代表例と、アニーリング前後でのQ値の変化を図5に示す。

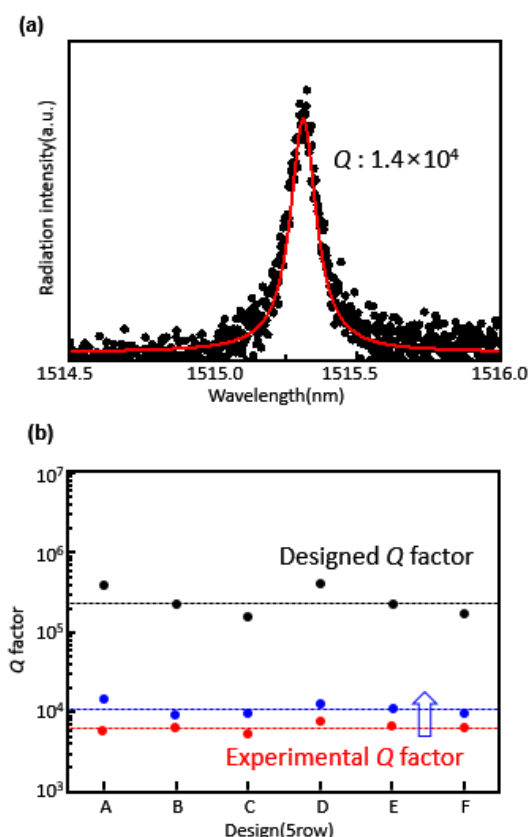


図5: (a)1400°Cアニーリング後の2次元SiCフォトニック結晶共振器の共振スペクトル。(b)アニーリング前後のQ値と理論Q値の比較。

同図から、1400°C、30分のアニーリングによってQ値が1万4000程度にまで向上していることが分かる。しかし、本手法では装置の制限からこれ以上アニール温度を上げることが困難であった。

そこで、次に水素イオン打ち込みを用いずに、直接SiCを薄膜化してSiCOI基板を作製する手法を検討した。作製手法の詳細はまだ公表できないが、従来のSiCOI基板と同様の支持用の厚いSi基板の上にSiO₂層があり、その上に薄膜SiC(厚さ~300nm)が貼り付けられている構造を水素イオン打ち込み無しに作製した。さらにそのSiCOI基板を用いて2次元フォトニック結晶共振器を作製し、その共振スペクトルを測定した結果の1例を図6に示す。同図から半値幅7pm、Q値20万という非常に低損失な共振器が作製できていることが分かる。これは本研究開始前のSiCフォトニック結晶共振器のQ値を10倍以上上回る値であり、本研究の目的である線形損失低減に成功したと言える。

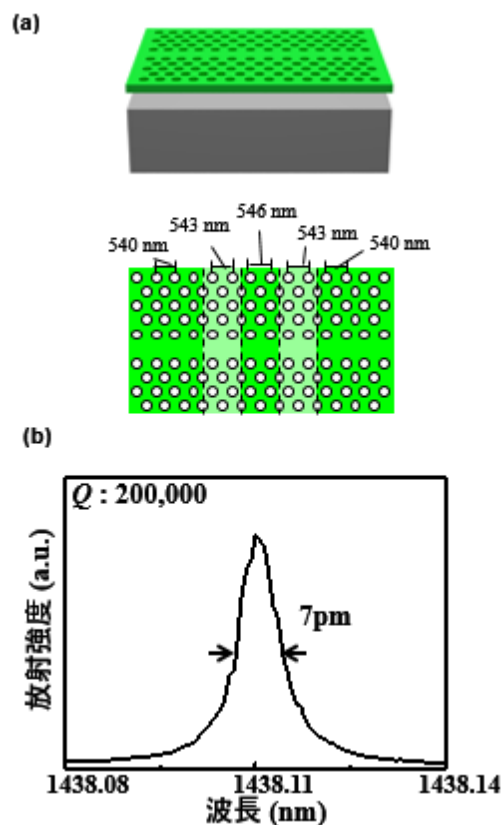


図6: 水素イオン打ち込みを用いずに作製したSiCOI基板を用いて作製した2次元フォトニック結晶共振器の(a)構造と(b)共振スペクトルの一例。

図7は2光子吸収抑制効果をこのQ値20万のSiC共振器に対して確認した結果である。比較対象として同じくQ値が20万程度のSiフォトニック結晶共振器を用意し、入射光パワーを変えながらスペクトルを測定した。同図から、Si共振器では10μW程度の入射パワ

一から2光子吸収と2伴うスペクトルの歪みが見られるのに対して、SiC共振器では500 μ W程度でもそのような歪みは見られない。若干の変化は温度によるものと考えられる。これにより、高Q値化されたSiCフォトニック結晶共振器でも、2光子吸収を抑制した高強度光の操作が可能であることが示された。

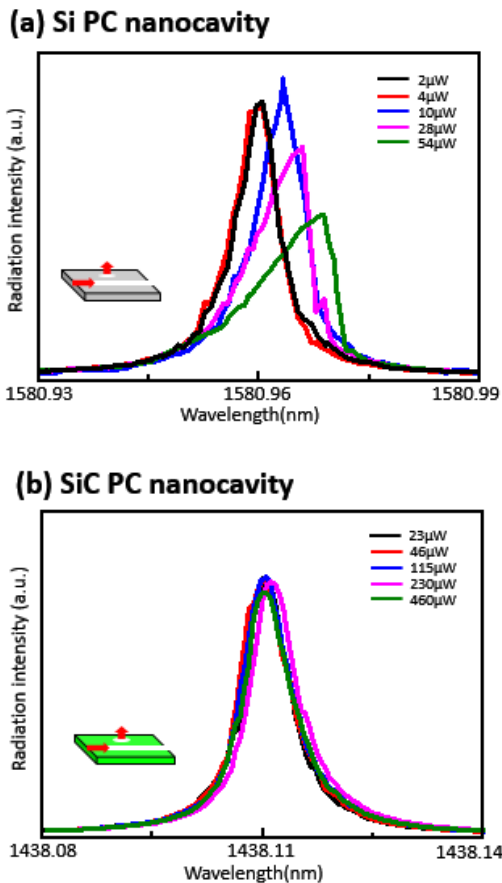


図7: Q値20万程度の共振器の高強度光に対する共鳴スペクトル。スペクトルの縦軸は入射光強度で規格化してある。(a)Siフォトニック結晶共振器。(b)SiCフォトニック結晶共振器。

次に光非線形効果に関する検討を行った。同じ入力パワーであっても、基本的にQ値に比例して共振器内の光エネルギーの密度が増加するため、あらゆる光非線形効果は増大する。そして、SiCフォトニック結晶共振器では、上で示したように赤外光に対する2光子吸収がほぼ完全に抑制できるので、他の光非線形効果が大きく発現すると考えられる。ここでは代表的な光非線形効果として2次高調波発生(2nd Harmonic Generation, SHG)の検討を行った。図8(a)に図6の共振モードに共鳴する波長のレーザー光を入射させつつ、赤外線カメラおよび可視カメラで共振器からの放射光を観測した結果を示す。同図から、共鳴光が赤外線カメラで観測されると同時に、可視カメラでも放射光が観測されていることが分かる。この可視カメラでの観測像は理論計算で求めた2次高調波の放射パターンと良く一致しており、またそ

の波長は、入射光のちょうど半分の波長であった。このことから、可視光カメラで観測されている像はSiC共振器で発生した2次高調波であると考えられる。さらに入射光強度と可視光カメラの画像の積分値を換算して求めたパワーの関係をプロットしたのが図8(c)である。両者が2次関数の関係になっており、その係数から規格化2次高調波発生効率が1400%/Wと非常に高い値であることが分かった。ただし、この値は実際に共振器に入射しているパワーおよび実際に共振器から放射されている2次高調波パワーを、実験で観測できる放射光や入射光強度から推定する際に用いるレンズ結合効率の理論値等の実験的には確認しにくいパラメータに大きく依存しているため、値の確定には今後さらなる詳細な検討が必要である。

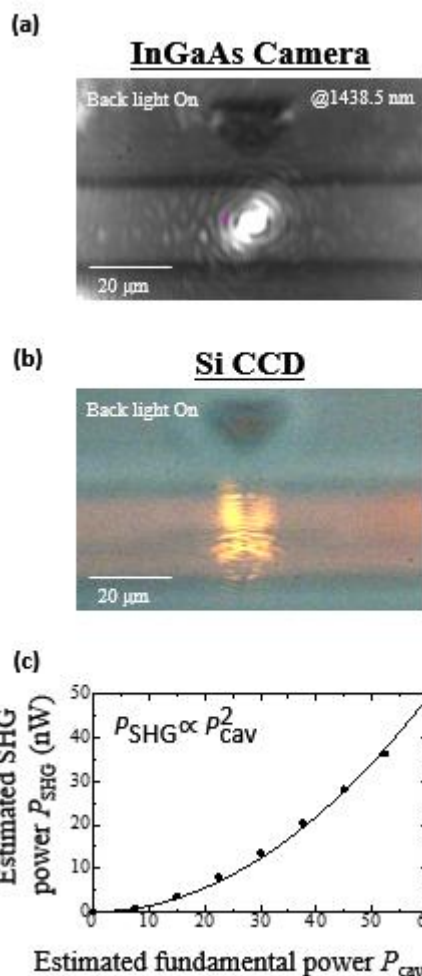


図8: 図6の共振器における2次高調波発生の結果。(a)基本モードの放射光パターン(1438.5nm)、(b)発生した2次高調波の放射パターン、(c)共振器への入射光強度と発生した2次高調波強度の測定結果。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

1. T. Asano, Y. Ochi, Y. Takahashi, K. Kishimoto, and S. Noda, "Photonic crystal

- nanocavity with a Q factor exceeding eleven million,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 3, pp. 1769-1777, (2017).
2. K. Maeno, Y. Takahashi, T. Nakamura, T. Asano, and S. Noda, “Analysis of high-Q photonic crystal L3 nanocavities designed by visualization of the leaky components,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 1, pp. 367-376, (2017).
 3. S. Jeon, H. Kim, B.-S. Song, Y. Yamaguchi, T. Asano, and S. Noda, “Measurement of optical loss in nanophotonic waveguides using integrated cavities,” *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 23, pp. 5486-5489, (2016).
 4. T. Nakamura, Y. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, “Improvement in the quality factors for photonic crystal nanocavities via visualization of the leaky components,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 9, p. 9541-9549, (2016).
 5. S. W. Jeon, B. S. Song, S. Yamada, Y. Yamaguchi, J. Upham, T. Asano, and S. Noda, “Multiple-channel wavelength conversions in a photonic crystal cavity,” *Opt. Express* **23**, pp. 4524–4529 (2015).
 6. Y. Yamaguchi, S.W. Jeon, B.S. Song, Y. Tanaka, T. Asano, S. Noda, “Analysis of Q factors of structural imperfections in triangular cross-section nanobeam photonic crystal cavities,” *J. Opt. Soc. Am. B* **32**, pp. 1792-1796 (2015).
- [学会発表] (計 11 件)
1. T. Asano, Y. Takahashi, and S. Noda: “High-Q Nanocavities based on Two-Dimensional Photonic Crystals”, Asia Communications and Photonic Conference (2017, 11/12), The Garden Hotel, Guangzhou, Guangdong Province, China. (Invited)
 2. T. Asano and S. Noda: “Recent Progress in Photonic Crystals”, Emerging Optical Materials Workshop, Boston Chapter of the IEEE Photonics Society (2017, 4/26), Boston, USA (Invited).
 3. Heungjoon Kim, Bongshik Song, Takashi Asano, Susumu Noda: “Design of triangular cross-section nanobeam photonic crystals for complete PBG”, 2017 年春季 第 64 回 応用物理学関係連合講演会, パシフィコ横浜, 2017/03/14-17
 4. Yuki Yamaguchi, Seungwoo Jeon, Bong-Shik Song, Takashi Asano and Susumu Noda: “Efficient conversion of second harmonic generation in high-Q SiC photonic crystal nanocavities”, 2016 IEEE Photonics Conference (IPC2016), Hilton Waikoloa Village, 69-425 Waikoloa Beach Dr, Waikoloa, Hawaii 96738, 2016/10/02-06
 5. 山口祐樹、田昇愚、宋奉植、浅野卓、野田進: 高 Q 値 SiC フォトニック結晶ナノ共振器における第二高調波発生(2),

- 2016 年秋季 第 77 回 応用物理学関係連合講演会, 朱鷺メッセ (新潟県新潟市), 2016/09/13-16
6. 山口祐樹, 田昇愚, 宋奉植, 浅野卓, 野田進: 高 Q 値 SiC フォトニック結晶ナノ共振器における第二高調波発生, 2016 年春季 第 63 回 応用物理学関係連合講演会, 東工大 大岡山キャンパス, 2016/03/19-22
 7. Y. Yamaguchi, S.W. Jeon, B.S. Song, T. Asano, Y. Tanaka, S. Noda: “Fabrication of SiC nanobeam photonic crystal cavities”, The 5th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence - Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems - (ISPEC 2015), University of Tokyo, 2015/11/30-02
 8. T. Asano and S. Noda: “Advanced light manipulation with photonic crystal nanostructures”, The 5th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence - Advanced Nanophotonics and Silicon Device Systems - (ISPEC 2015), University of Tokyo, 2015/11/30-02
 9. 田昇愚, 山口祐樹, 宋奉植, 浅野卓, 野田進: 高 Q 値 SiC フォトニック結晶ナノ共振器の多光子吸収抑制, 2015 年秋季 第 76 回 応用物理学秋期学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/09/13-16
 10. 山口祐樹, 田昇愚, 宋奉植, 浅野卓, 野田進: SiC を用いた高 Q 値 2 次元フォトニック結晶共振器の作製, 2015 年秋季 第 76 回 応用物理学秋期学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015/09/13-16
 11. 山口祐樹, 田昇愚, 宋奉植, 浅野卓, 田中良典, 野田進: Design and fabrication of SiC nanobeam photonic crystal cavities, 第 34 回電子材料シンポジウム, ラフォーレ琵琶湖, 2015/07/15-17

[図書] (計 件)

なし

[産業財産権]

なし

[その他]

ホームページ等

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅野卓 (ASANO, Takashi)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 30332729

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

宋奉植 (SONG, Bong-Shik)

成均館大学・電子電機工学部・教授