

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301
研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2011～2014
課題番号：23360033
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開発

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

研究代表者

浅野 卓 (Asano, Takashi)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：30332729

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,600,000円

研究成果の概要(和文)：ワイドギャップ半導体であるSiCを用いたフォトニック結晶を実現し、Siフォトニック結晶では不可能な領域へその応用を拡張することに成功した。具体的には二光子吸収の完全抑制によるSiの100倍以上の高密度光を取り扱える光デバイス、光通信波長帯から可視光までを同一チップで取り扱える光回路、コンパクトな高調波発生デバイス等を実現した。また、Siと比較して動作波長変動の温度依存性が1/3程度に抑制できることも示した。フォトニック結晶微小共振器の良さの指標であるQ値については1万4千程度の値を達成したが、これは材料限界ではなく、今後さらに最適化できると期待される。

研究成果の概要(英文)：We realized photonic crystals based on silicon carbide that is a wide gap semiconductor, and succeeded in expanding the application area of conventional photonic crystal made of silicon: (A) A photonic device that can process very high intensity light which is 100 times stronger than that can be processed in silicon device has been demonstrated because of complete suppression of two photon absorption. (B) A photonic circuit that can process a wide wavelength range of light from infrared to visible on a same chip has been achieved. In addition, temperature stability of SiC photonic device has been demonstrated to be about 1/3 of silicon. The Q factor of the photonic crystal nanocavity realized in this study is still 14,000, but it is not limited by the original characteristics of the SiC material. I believe the Q factor can be improved in the future study.

研究分野：光量子電子工学

キーワード：SiC フォトニック結晶 高Q値 二光子吸収抑制 超広帯域 可視光 ハイパワー動作 高調波発生

1. 研究開始当初の背景

フォトニック結晶とは光の波長程度の大きさの周期的屈折率分布をもつ構造体であり、これまでにない自由度をもって光を制御できる新たな光材料として近年大きな注目を集めている。その最大の特徴は、内部において光のモードが存在しない波長帯域、すなわちフォトニックバンドギャップ (PBG) が形成されることである。さらに、フォトニック結晶内の一部の領域の形状を変形させて周期性が減少した領域 (欠陥領域) を作り出すことで、そこに局在した光のモードを作り出し、これによって自在に光を制御することが可能になる。例えば欠陥領域を点状に設ければ共振モードが生じ、適切な設計を行えば体積が波長の3乗程度と小さくかつ低損失な共振器 (高Q値光ナノ共振器) を実現できるため、物理的にも応用上も大変興味深い。

研究代表者はこれまで特に2次元フォトニック結晶スラブ (薄板) を用いて形成した光ナノ共振器の損失の低減と、これを用いた新物理現象の探求およびそのデバイス応用に取り組んできた。このような光ナノ共振器は、その研究が世界的に始まった時点においては、共振器損失の少なさを示す性能指数 (Q値) が100程度と小さく、またその後数年間は5000程度で頭打ちとなっていた。しかし、2003年に研究代表者等によって損失を低減するための構造設計概念が発見され [T. Asano et al., *Nature* 425 944 (2003)]、これによって一気に一桁のQ値の上昇が達成された。申請者はその後も新設計概念の提案 [B. S. Song, T. Asano et al. *Nature Mat.* 4 207(2005)] および作製精度の向上に取り組み、現在では当初と比較すると4桁以上の損失の低減を成し遂げている。研究代表者が見いだした共振器構造は世界中で広く利用されており、研究代表者自身もこれを用いて新デバイス/新現象の研究を行ってきた。例えば、高Q値光ナノ共振器の狭い共振スペクトルと微小なフットプリントを利用して、非常に小さな波長分合波デバイス [B. Song, T. Asano et al., *Appl. Opt.* 48 4899 (2009)] を実現し、また低い損失、すなわち長い光子寿命を利用して光パルスの情報を光の状態のまま共振器に保持する光バッファメモリ [Y. Tanaka, T. Asano et al., *Nature Mat.* 6 862 (2007)] の基本動作の実証に成功していた。

研究代表者は、これらの研究においてSiを用いてフォトニック結晶を作製してきた。また一般に、光通信波長帯域のフォトニック結晶においては他研究機関も含めてSiが主に利用されている。これはSiが1.55 μm 帯において透明で吸収損失がなく、また3.4程度の高い屈折率を示すためPBG発現に必須の大きな屈折率変調を形成でき、さらにナノレベルの精密加工が可能であるために光散乱損失を低減できるという優れた特長を持ったためである。しかし一方で、申請者等はこれまでの研究においてSiの材料的な限界に

も直面してきた。例えば、光パルスをQ値3000程度の光ナノ共振器に導入する実験を行っている際に、パルス強度が増加すると共振器から出射される光の強度が大幅に減少し、かつスペクトルが大きく歪むことを発見した [浅野卓他 2004 年秋応物学会 4p-ZC-1]。さらに超高Q値ナノ共振器において、 $\square W$ レベルの連続光に対しても非線形応答が生じることを観測し、これらの現象が二光子吸収とそれに伴って生成された自由キャリアのプラズマ効果に起因することを明らかにした [T. Uesugi, T. Asano et al. *Opt. Exp.* 14, 377 (2006)]。このような非線形現象は、微小体積ゆえに光のエネルギー密度が高くなる光ナノ共振器においては本質的であり、強い光の分波や蓄積などに様々な影響を与える。これを積極的に利用したデバイスも検討されているが、線形応答を期待するデバイスにおいては非線形現象は大きな問題となっていた。しかし、その原因となる二光子吸収プロセスを回避するには、原理的に電子バンドギャップが光通信帯域の光子エネルギー ($\sim 0.8 \text{ eV}$) の2倍以上ある光学材料を用いてフォトニック結晶を構成する必要があり、Siを用いている限りは避けられない問題であった。また、今後のフォトニック結晶デバイスの展開としては、光通信帯域だけでなく、より短波長の近赤外や可視光帯域も応用上非常に魅力的であるが、Siはその電子バンドギャップから1 μm 程度以上の波長のみで透明であり、ここにも材料としての限界が存在していた。その他にもSiフォトニック結晶には屈折率変化に由来する温度に対する特性の不安定性、2次元フォトニック結晶に必須の薄膜 (スラブ) 構造の機械的脆弱性なども存在していた。

2. 研究の目的

以上の経緯から、研究代表者はSiフォトニック結晶は高度に発展しつつあるものの、別の方向としてSiでは対応できない領域で利用可能なフォトニック結晶の開発も重要であると確信するに至った。そこで、ワイドバンドギャップ半導体であるシリコンカーバイド (SiC) を用いた新たなフォトニック結晶を実現し、ハイパワー入力に対する安定動作や赤外から可視に至る帯域での動作を達成することで新たなナノ光分野を開くことを目標に研究を行った。SiCはポリタイプにもよるが3.0~3.2 eV程度の大きなバンドギャップを持つため波長430 nm程度まで透明であり、かつ赤外領域では二光子吸収が生じないと期待される。また、その屈折率は赤外域で2.5程度と可視域で透明な材料としては比較的高い。また加工技術に関してSiの優れた特長をある程度引き継げる可能性があること、赤外域における屈折率の温度依存性が小さいこと、機械的に強靱であるためスラブ構造の耐久性が期待できること、熱伝導率が高くハイパワー入力に際しても温度安定性を期待できること、さらには化学的に安定なため

厳しい環境でも利用できる可能性があることなどの特長をもつ。本研究開始時点で、研究代表者はすでに初期的な検討として、サンプル的に入手した SiCOI 基板 (SOI 基板のデバイス層が SiC となっているもの) を用いて光通信帯域のフォトニック結晶の作製を試み、PBG 帯域としては幅 200 nm 程度、また点欠陥ナノ共振器としては Q 値約 600 程度のものを得ることに成功していた。本研究においては、この初期的知見をもとにまず光通信帯域において SiC フォトニック結晶のナノ共振器の Q 値を向上させ、SiC 高 Q 値ナノ共振器のハイパワー入力に対する耐性と温度変化に対する高い安定性を実証することを目指した。つぎに、より高い加工精度が必要とされる可視域においても SiC フォトニック結晶を実現し、フォトニック結晶の新たな応用領域を開くことを試みた。さらに、光通信帯～可視域という広帯域での透明性と二光子吸収が生じないことを活かせば、光ナノ共振器という微小領域に集中した高エネルギー密度の光から高効率に二次高調波あるいは三次高調波を発生させる波長変換デバイスが実現できる可能性を検討した。

3. 研究の方法

まず SiC フォトニック結晶の設計・構造最適化および SiC に対するナノ加工技術の確立を図った。部材として SiC on Insulator (SiCOI) 基板を用い、その作製技術自体も基板メーカーの協力しつつ高度化を行った。これによりまず、光通信帯域において高い Q 値の SiC 光ナノ共振器を実現した上で、そのハイパワー光に対する耐性、高い温度安定性を検証した。次に、より高い加工精度の要求される可視光帯域の SiC フォトニック結晶の作製に取り組んだ。その後、二次および三次高調波発生の実験に取り組み、微小な共振器体積と高い Q 値を利用した高効率な変換デバイスの実現を目指した。

4. 研究成果

基礎特性

まず、SiC フォトニック結晶において PBG の存在を確認するために、欠陥を導入していないフォトニック結晶試料について透過測定を行った。格子定数を $a = 425$ 、 450 、 475 、 500 nm と変化させた各試料における透過スペクトルの測定結果を図 1(a) に示す。同図から $a=500$ nm の試料において約 1270 nm ~ 1460 nm まで約 190 nm の幅をもつ PBG が確認できる。また格子定数が 25 nm ずつ小さくなるにしたがって、PBG の波長域が約 40 nm ずつ短波長側にシフトしていることが分かる。格子定数 $a = 500$ nm の W062 型線欠陥導波路の構造および導波特性を図 1(b) に示す。波長 1350 ~ 1450 nm にかけて PBG 内に帯域幅約 100 nm の導波モードが確認できる。点欠陥共振器に関しては $a_1 = 540$ nm、 $a_2 = 550$ nm、孔半径 $r = 0.26a_1$ の 2 ステップヘテロ構造共振器の構造および共鳴特性を

図 1 (c)(d) に示す。同図からこの共振器の Q 値は約 10,000 であり、光波長レベルの微小領域への低損失な光を閉じ込めが実現していることが分かる。この構造の理論 Q 値は 50 万であり、また構造の作製精度は十分に高いため、理論 Q 値と実験 Q 値の差は材料に若干の吸収が存在することが原因と考えられる。吸収に関しては、高温のアニーリング処理を施した SiCOI 基板を用いることで、Q 値が 1.5 万程度の共振器も作製できるようになっており、今後、さらなる Q 値の向上が期待できる。

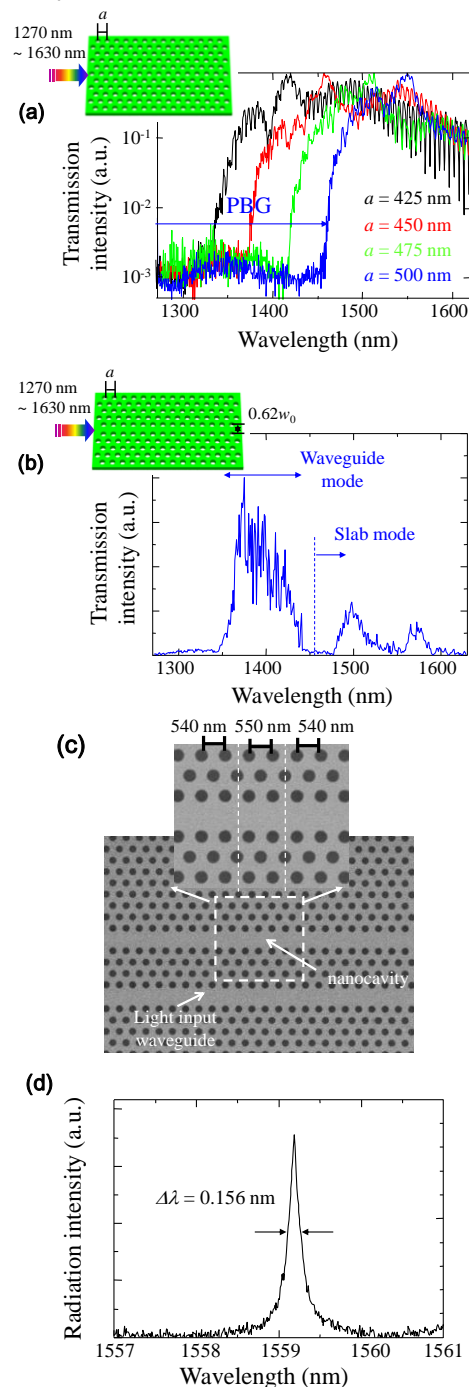


図 1:(a)欠陥無しフォトニック結晶および (b)線欠陥導波路の透過スペクトル、 (c)ヘテロ構造共振器の走査型電子顕微鏡写真、 (d)ヘテロ構造共振器の共鳴スペクトル

温度依存性

SiCはバンドギャップが大きいこと、Siと比較して熱光学係数（屈折率の温度依存性）が小さい。このため、SiC光ナノ構造は温度変化に対してより安定な動作が期待できる。共鳴波長がほぼ等しいSiおよびSiCフォトニック結晶のL3型共振器を準備し、それらの温度を25°Cから200°Cまで、25°C刻みで変化させつつ、共鳴スペクトルを測定した結果を図2(a)および(b)にそれぞれ示す。同図より、SiよりもSiCのほうが同じ温度上昇に対する共鳴波長の変化が小さいことが分かる。温度上昇に対する波長シフト量をグラフにしたものを図2(c)に示す。これより共振波長のシフト量は温度に対してほぼ線形になっており、その直線の傾きは、Siの場合は0.0694 nm/K、SiCの場合は0.0232 nm/Kと見積もられ、SiCはSiの約1/3程度の温度依存性を示すことが分かる。

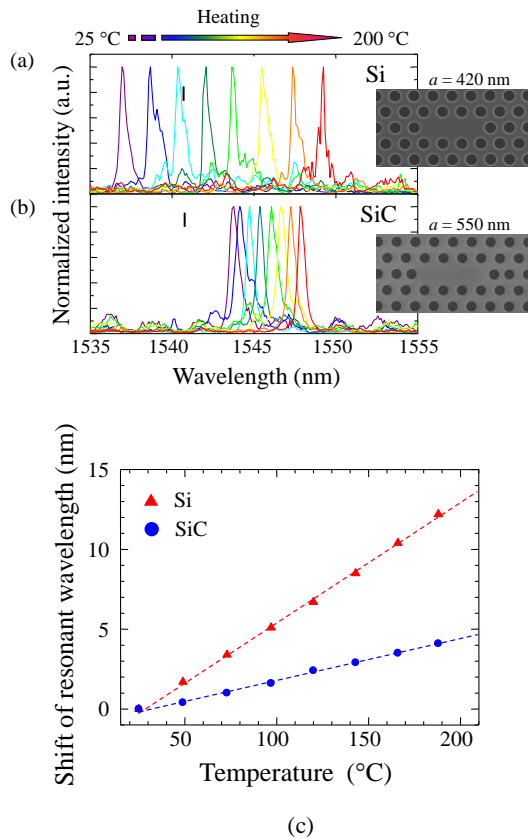


図2: 様々な温度における(a)Siおよび(b)SiCフォトニック結晶共振器の共鳴スペクトル。(個々のスペクトルは最大値で規格化)(c)温度上昇に対する共振波長シフト量の比較。

多光子吸収の抑制

バンドギャップが1.1eV程度のSiと異なり、SiCはバンドギャップが3eV程度と大きいこと、光通信帯域の光(~ 0.8 eV)に対しては、二光子吸収は起こらないと期待される。これを実証するため、測定対象として、同程度のQ値および共振波長をもつSiCおよびSiフォトニック結晶共振器を用意し、高強度入力光に対する共鳴スペクトルの変化を測定した。

SiC共振器は $Q \sim 10000$ 、共振波長1558.9 nmのダブルヘテロ構造であり、Si共振器は $Q \sim 8000$ 、共振波長1539.7 nmの空気孔シフトL3型構造である。測定には、時間幅4ps、繰り返し2MHzの可変波長パルスレーザーを用いた。図3に、波長を線形共鳴波長に合わせた光パルスを、その強度を変化させつつ共振器に入力し、共振器から放出される光のスペクトルを測定した結果を示す。なお、同図中には微弱なCWレーザー測定した、線形領域における共鳴スペクトルも併せて破線で示している。Si共振器においては、入力エネルギーが0.6 pJを超えるとスペクトルの形状が歪み始めるが、SiC共振器においては、本測定系における最大入力エネルギー64 pJにおいても、スペクトル形状の変化は見られなかった。数値シミュレーションによって、Siの結果は二光子吸収および発生キャリアによる屈折率変化・光吸収で良く再現され、またSiCの結果は、三光子吸収までが完全に抑制されており、かつ四光子吸収係数が $2.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^5 / \text{GW}^3$ 以下とすることで再現できることが分かった。この結果は、SiC光ナノ構造に $1 \text{ GW} / \text{cm}^2$ の高強度光が入力されたとしても、多光子吸収損失が $2.0 \times 10^{-5} / \text{cm}$ 以下であることを意味しており、SiCにおける多光子吸収の抑制を実証する結果と言える。

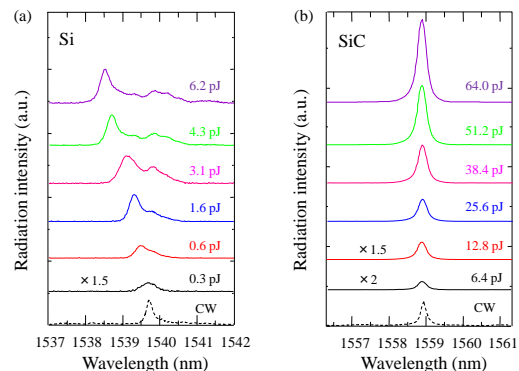


図3: 様々な入力エネルギーに対するフォトニック結晶共振器の共鳴スペクトル (a) Si、(b) SiC

赤外～可視にわたる広帯域動作

SiCはバンドギャップが大きいこと可視領域まで含めた広帯域光ナノ構造、量子情報の保持に有効な欠陥準位との相互作用、可視域発光体との融合といったSiでは不可能な展開が期待できる。これを実証するため、格子定数を600nmから150nmまで25nm刻みで変化させたフォトニック結晶と共振器をSiC層厚さ180nmのSiCOI基板上に作製し、その共鳴波長の測定を行った。測定結果を図4に示す。同図からSiCフォトニック結晶共振器が波長550～1450 nmの非常に広い帯域において動作しうることが実証できた。

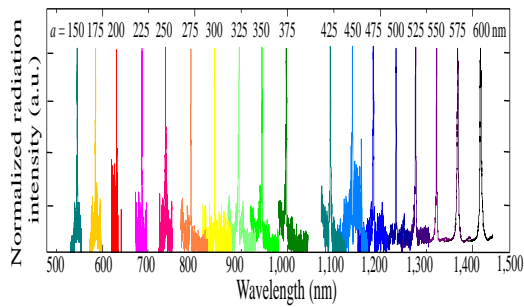


図 4: 様々な格子定数のフォトニック結晶共振器からの放射スペクトル

まとめ

SiC フォトニック結晶の温度安定性、多光子吸収抑制、広帯域動作などの優れた特性を紹介した。また、高調波発生、和周波発生等についても有用性を示すことができた。SiC は Si の材料限界を超える次世代の光ナノ構造の材料として期待される。

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) B.-S. Song, S. Yamada, T. Asano, and S. Noda, "Demonstration of two-dimensional photonic crystals based on silicon carbide," *Opt. Exp.*, 19, 12 (2011) 11084.
- 2) S. Yamada, B.-S. Song, T. Asano, and S. Noda, "Experimental investigation of thermo-optic effects in SiC and Si photonic crystal nanocavities," *Opt. Lett.*, 36, 20 (2011) 3981.
- 3) S. Yamada, B.-S. Song, J. Upham, T. Asano, Y. Tanaka, and S. Noda, "Suppression of multiple photon absorption in a SiC photonic crystal nanocavity operating at 1.55 μm ," *Opt. Exp.*, 20, 14 (2012) 14789.
- 4) S. Yamada, B.-S. Song, T. Asano, and S. Noda, "Silicon carbide-based photonic crystal nanocavities for ultra-broadband operation from infrared to visible wavelengths," *Appl. Phys. Lett.*, 99, 20 (2011) 201102.
- 5) S. Yamada, B.-S. Song, S. Jeon, J. Upham, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, "Second-harmonic generation in a silicon-carbide-based photonic crystal nanocavity," *Opt. Lett.*, 39, 7 (2014) 1768.
- 6) S. Jeon, B. S. Song, S. Yamada, Y. Yamaguchi, J. Upham, T. Asano, and

S. Noda: "Multiple-channel wavelength conversions in a photonic crystal cavity", *Optics Express* vol. 23, no. 4, pp 4524–4529 (2015).

[学会発表] (計 16 件)

- 1) 山田 翔太, 宋 奉植, 田中 良典, 園木 悠司, 浅野 卓, 野田 進: 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), 2011 年秋季 第 72 回応用物理学学会学術講演会, 31a-ZR-9, 山形大学 小白川キャンパス, 山形市, 2011 年 8 月 31 日.
- 2) S. Yamada, B. S. Song, T. Asano, Y. Tanaka, and S. Noda: "Complete Suppression of Two-photon Absorption in SiC-based Photonic Crystal Nanocavities", JSPS International Schooling on Si Photonics, 2011(11/16-11/19), Kyoto University, Kyoto, Japan.
- 3) 山田 翔太, 園木 悠司, 宋 奉植, 田中 良典, 浅野 卓, 野田 進: "SiC フォトニック結晶ナノ共振器における和周波発生", 2012 年春季 第 59 回 応用物理学関係連合講演会, 15p-E5-12, 2012(3/15-18), 早稲田大学
- 4) 山田 翔太, 宋 奉植, 浅野 卓, 田中 良典, 野田 進: SiC フォトニック結晶ナノ共振器における差周波発生, 2012 年秋季 第 73 回応用物理学学会学術講演会, 13a-PA5-19, 愛媛大学・松山大学, 松山市, 2012 年 9 月 13 日.
- 5) T. Asano and S. Noda: "Recent Progress and Future Prospects of Photonic Crystals", 3PL1-1, International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications, 2012(6/04-6/07), Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan. (plenary).
- 6) S. Yamada, B. S. Song, T. Asano, Y. Tanaka and S. Noda: "Second Harmonic Generation in a Silicon Carbide Photonic Crystal Nanocavity", P-45, ISPEC2012, The 2nd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence, 2012(12/03-12/05), Ito International Research Center, University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- 7) 田 昇愚, 山田 翔太, 宋 奉植, 浅野 卓, 田中 良典, 野田 進: "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 (3)", 2013 年春季 第 60 回 応用物理学関係連合講演会, 29p-PA7-14, 2013(3/27-30), 神奈川工科大学.
- 8) 田 昇愚, 宋 奉植, 浅野 卓, 田中 良典, 野田 進: "SiC フォトニック結晶ナノ共振器の高 Q 値化に向けた基礎検討", 2013

- 年秋季 第 74 回 応用物理学会秋季学術講演会, 17a-P14-7, 2013(9/16-20), 同志社大学京田辺キャンパス.
- 9) S. Jeon, B. Song, T. Asano, Y. Tanaka and S. Noda: "Investigation on the Q Factor of SiC-Based Photonic Crystal Nanocavity", P-17, 3rd International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC 2013), 2013(11/18 ~ 11/20), University of Tokyo, Tokyo, Japan.
- 10) 田 昇愚, 山口祐樹, 宋 奉植, 浅野 卓, 田中良典, 野田 進: "SiC フォトニック結晶ナノ共振器の高Q 値化に向けた基礎検討(2)", 2014 年春季 第 61 回 応用物理学関係連合講演会, 17p-E16-11, 2014(3/17-20), 青山学院大学相模原キャンパス.
- 11) 山口 祐樹, 田 昇愚, 宋 奉植, 浅野 卓, 田中 良典, 野田 進: "SiC ナノビームフォトニック結晶共振器の設計", 2014 年春季 第 61 回 応用物理学関係連合講演会, 17a-PA1-8, 2014(3/17-20), 青山学院大学相模原キャンパス.
- 12) 山口 祐樹, 田 昇愚, 宋 奉植, 浅野 卓, 田中 良典, 野田 進: "SiC ナノビームフォトニック結晶共振器の設計(2)", 2014 年 第 75 回 応用物理学会秋季学術講演会, 17p-PA2-6, 2014(9/17-20), 北海道大学札幌キャンパス.
- 13) 田 昇愚, 山口 祐樹, 宋 奉植, 浅野 卓, 野田 進: "SiC ナノビームフォトニック結晶共振器の作製", 2014 年 第 75 回 応用物理学会秋季学術講演会, 17p-C8-1, 2014(9/17-20), 北海道大学札幌キャンパス.
- 14) B. S. Song, S. Yamada, S. Jeon, T. Asano, S. Noda: "Demonstration of multiple-channel wavelength conversion in a photonic crystal nanocavity", Advanced Photonics for Communications (Nonlinear Photonics) 2014(7/27-7/31). Barcelona, Spain.
- 15) 浅野 卓, 野田 進: SiC 材料による可視～赤外域フォトニック結晶, 第 21 回シリコンフォトニクス研究会, 2014/7/29, 東京工業大学 大岡山キャンパス.
- 16) 山口 祐樹, 田 昇愚, 宋 奉植, 浅野 卓, 田中良典, 野田進: "SiC ナノビームフォトニック結晶共振器の設計(3)", 2015 年春季 第 62 回 応用物理学関係連合講演会, 13a-A10-6, 2015(3/11-14), 東海大学湘南キャンパス.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

[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)
京都大学工学研究科・准教授
研究者番号: 30332729

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: