

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26790034

研究課題名(和文)3次元フォトニック結晶による高Q値光ナノ共振器の実現に関する研究

研究課題名(英文) Investigation toward realizing high-Q nano-cavities in 3D photonic crystals

研究代表者

石崎 賢司 (Ishizaki, Kenji)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：40638524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：立体的に自在な光の操作の実現により、様々な光デバイスの3次元集積化や高機能化が期待される。本研究では、立体的に全方向に光を閉じ込めることが可能な3次元フォトニック結晶光ナノ共振器における高い光蓄積効果の実現に向けた研究を行った。Si系材料の精密な積層融着による立体積層技術の開発を行うとともに、外部空間から結晶内部の状態評価を可能とする立体導波路-ナノ共振器結合構造の設計・解析を行い、解析と対応する少モードナノ共振器の評価に、初めて成功した。

研究成果の概要(英文)：Realization of arbitrary 3D manipulation of photons are expected to be a key for 3D integration of various photonic devices and obtaining high functionalities. In this work, nano-cavities in 3D photonic crystals, which ideally enables all-directional confinement of photons, are studied toward high light confinement characteristics. The high-precision 3D stacking technology of Si-related materials are developed, and the design and analysis of coupled 3D waveguide - nano-cavity system, which enable us to access the cavity embedded inside 3D structure from the outer space, are performed. The nano-cavities with a few resonant modes, which agree well with the analytical results, are successfully observed in experiment, for the first time.

研究分野：光子電子工学

キーワード：フォトニック結晶 ナノ共振器 ウエハ融着

## 1. 研究開始当初の背景

フォトニック結晶などの人工的な「光ナノ構造」の概念が、世界的に活発に研究されている。これは、光の波長オーダー、あるいはそれよりも小さな構造の配列を活用することで、光の振る舞い、すなわち分散特性を人為的に制御し、自在に光（可視光域からテラヘルツ光までを含めて）を操ることを目指したものであり、スローライト・ストップライト効果や、発光現象の根本からの抑制/増強作用など、一般的な光学現象の限界を超える光の操作が実現されてきている。

このような光の操作において、光の波長の3乗程度という、極微小な体積に光を長時間蓄積することを可能とする「光ナノ共振器」は、重要な核となる。光ナノ共振器の特性向上は、微小な空間に集積化された光バッファ機能や、光と物質の相互作用の極限的な増強作用など、自由空間とは大きく異なる機能を創出する基盤となる。さらに、超長時間の光蓄積を可能とすることは、波長軸上で極めて狭い線幅の光が得られ、既存の技術の延長とは異なる高分解・精密計測やセンシング等の応用へも繋がるものと期待される。

これまで、光ナノ共振器は、主に2次元フォトニック結晶と呼ばれる、半導体シリコンに2次元周期構造を施したフォトニック結晶（図1(a)）において検討が行われてきた。しかしながら、このような構造においては、結晶の上下は空気であるため、上下方向への光の漏れ損失、具体的には、サブnmレベルの微小な構造の揺らぎに起因した光散乱損失が、最終的な光の蓄積性能を決定してしまうという課題がある。

これに対して、完全な立体構造をもつ3次元フォトニック結晶（図1(b)）により、全方向に対して光のバンドギャップ効果を得ることで、わずかな揺らぎ等があっても、高い光蓄積性能が得られるナノ共振器の形成へと繋がっていくことが期待される。しかしながら、従来の研究においては、構造内部に埋め込まれた光ナノ共振器に効率的にアクセスする手法がなく、高い性能の共振器を評価することは困難であった。また、十分な性能（品質や面内・面垂直方向の周期数）をもつ3次元構造の実現法も未確立であった。

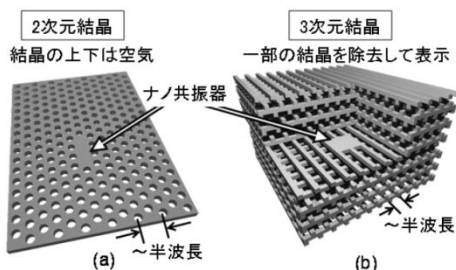


図1. フォトニック結晶による光ナノ共振器。(a) 2次元および、(b) 3次元フォトニック結晶を利用する場合の概念図。

## 2. 研究の目的

3次元フォトニック結晶における光ナノ共振器そのものの構造および導波路との接続構造を設計・解析するとともに、これまでに開発してきた3次元フォトニック結晶構造の作製技術を深化させることで、3次元フォトニック結晶の内部に埋め込まれた高Q値ナノ共振器の実現に向けた基礎を築くことを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず、3次元フォトニック結晶構造の内部に埋め込まれた光ナノ共振器特性を評価する基盤として、内部の共振器へと効率よくアクセスする手法について、電磁界シミュレーションによる検討を行う。さらに、それらの設計に基づいた立体構造を形成するために、3次元フォトニック結晶の形成技術を深化させる。これらを受けて、作製した素子の光学特性の評価を行う。

### (1) 導波路-ナノ共振器結合構造の設計および解析

3次元フォトニック結晶中に埋め込まれた光ナノ共振器の評価が可能なフォトニック結晶の設計・解析を行う。図2のような、導波路とナノ共振器の接続構造を3次元フォトニック結晶中に形成し、2本の導波路をプローブに用いて、共振器特性を評価する系（下方から入力用導波路を介して光を入射し、共振器へと結合させたのちに、出力用導波路を介して、上方に取り出すという系）を検討する。このような系により、3次元結晶の上下から、結晶内部の共振器の特性を詳細に評価することが可能となる。

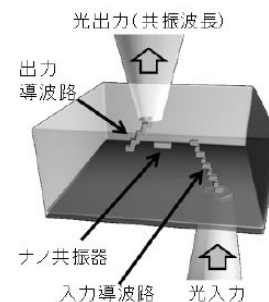


図2. 導波路-共振器の接続構造の例。フォトニック結晶は透視して、その内部の構造のみを示している。

本構造において、共振器そのものの構造や、導波路との相対位置関係によって、導波路との結合効率や共振特性（周波数・Q値）がどのように変化するのか、また、厚さ方向の周期数（すなわち、図1における積層された層の数）によって、Q値はどのように変化するのかについて、時間領域有限差分法(FDTD法)を用いた電磁界シミュレーションにより解析する。また、検出の効率を向上するため

に、フォトニック結晶の外部から効率よく内部に光を導く、あるいは内部から光を取り出すための入出力部の構造についても、表面構造制御による入出射パターン制御による最適化を検討する。また、実際に作製を行った際に想定される3次元フォトニック結晶の構造揺らぎの影響などについても検討を行う。

(2) 3次元フォトニック結晶形成技術の深化  
 パターニングした半導体シリコンを、ウエハ融着法により加熱接着・積層する手法(図3)を深化させ、安定して高精度な3次元フォトニック結晶を形成可能な技術として構築する。本研究では、近赤外波長域(1.5 μm 帯)の動作を考え、パターンの間隔は~600 nm とする。このとき、(1)の検討とも合わせて、積層位置の精度に着目して、画像処理技術を援用した定量的な積層ずれ評価・自動フィードバック補正システムを構築し、位置検出用マーカー形状の最適化や光学系の見直し(画像解析用カメラ解像度や、像倍率等を考慮)により、システムの精度を高めていく。また、より簡便に3次元フォトニック結晶を形成する技術として、図3のように1層ごとに層数を増やしていく手法に加えて、大面積に一括形成した複数層のフォトニック結晶を、積層融着・分離を繰り返すことで、2層・4層・8層と、べき乗で層数を増大させられる新たな技術の検討も行う。

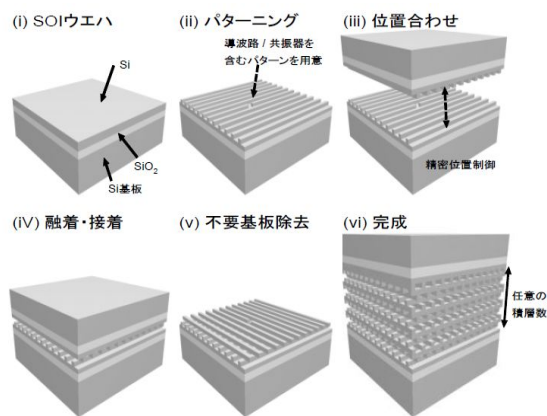


図3. 作製プロセスの概略。

### (3) 光学特性評価

設計・作製した3次元フォトニック結晶構造素子に対して、試料の下方から光を照射し、上方へと結合した光を分光計測する評価系を構築し、白色光照射時のスペクトル測定等により、共振器特性を評価する。様々な共振器構造や、共振器-導波路間の距離の変化による特性の変化を、系統的に評価し、分析する。

## 4. 研究成果

### (1) 導波路-ナノ共振器結合構造の設計および解析

Si ロッドの一部を Si を付加したドナー型

ナノ共振器や、Si を除去したアクセプタ型欠陥について、光のバンドギャップ帯域内に 1~3 程度の少ないモード数(広い周波数間隔)をもつ光ナノ共振器の設計を行った。また、このようなナノ共振器について、導波路との結合特性の解析を行い、評価に必要な設計を行った。共振器特性の評価において、Q 値(光の蓄積時間に比例)を考える場合、共振器そのものの Q 値に対して、導波路との結合による Q 値を同程度とすることで、最も効率よく評価することが可能となる。また、導波路との結合 Q 値が共振器の Q 値よりも高い場合において、導波路との結合を無視した、共振器そのものの Q 値を評価できる。解析を行った結果、導波路と共振器の距離の増加に対して、指数関数的に Q 値が増加する(導波路との結合が弱まる)ことが明らかとなった。また、共振モードのプロファイルに依存して、Q 値が 1 桁程度変化することも明らかとなった。共振器そのものの Q 値についても解析を行った結果、積層構造において、面内は十分広い場合に、16 層で  $\sim 2 \times 10^4$ 、倍増させた 32 層構造では、 $10^7$  以上と見積もられた。以上より、全体の積層数に対して、必要となる共振器-導波路間の距離など、構造作製に必要な設計を明らかにすることに成功した。

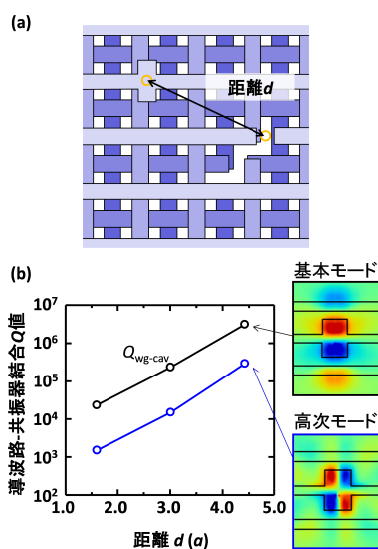


図4. 光ナノ共振器と導波路の結合特性の解析。(a) 構造模式図、(b) 解析結果。

また、このような系の実験的な評価においては、導波路と外部空間との結合特性も重要となる。そこで、結合特性の解析を行った。図2のような、斜め方向導波路の出力特性を解析した結果、導波路方向とは異なる斜め角度(垂直方向から 30-50°)に光入出射が生じることが明らかとなった。これは、導波路を伝搬する光の波数保存則によるものであることが分かった。このような斜め入射特性に対して、面垂直方向への入出射が、波長に依存せずに得られれば、将来的な有用性が高い。そこで、検討を行った結果、斜め導波路の端部に4方向への分岐導波路構造を形成し、

対称性の高い出射端を形成すれば、ほぼ垂直 ( $<10^\circ$ ) な光入射が可能となり、光の入射結合効率を 2.5 倍程度向上できることが見出された。また、出射時の外部空間との結合効率を解析した結果、フォトニック結晶表面が空気と接している場合には、表面伝搬モードへの結合損失が、30%程度生じることが明らかとなった。また、このような損失については、最表面層を格子状として表面モードギャップを形成することで、抑制できることをも明らかにした。

以上のような系について、積層位置ずれの影響についても解析を行い、揺らぎの標準偏差が 50 nm (3  $\sigma$  で  $\sim 150$  nm) 程度であれば、ほぼ理想的な共振器特性が得られ、また導波路における光導波も可能であるという知見が得られた。

(2) 3次元フォトニック結晶形成技術の深化  
 上記のように設計した3次元フォトニック結晶構造を、精密に形成していく技術として、十分に広い面積に対して、高い精度で位置合わせ積層を実現可能なシステムの開発を推進した。特に、図 5(a)のような、画像処理によるパターンマッチングに基づく誤差検出機構と、その結果をもとにステージを nm 精度でフィードバックする位置合わせ積層システムを構築した。図 5(b)に示すような位置合わせ用のマーカーを用意し、システムにおける誤差の読み取り精度を評価した結果が、図 5(c)である。同図に示されるように、意図的に導入したシフト量を、目標とする精度に対して充分な、 $3\sigma \sim 40$  nm という小さな誤差範囲で検出することに成功した。

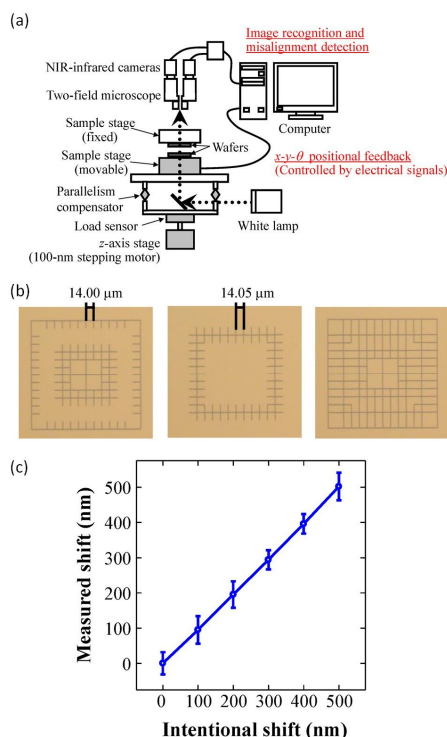


図 5. 位置合わせ積層システムの構築。(a) 模式図、(b) SOI 基板上に形成した画像認識用のマ

ーカー、および(c)検出精度の評価結果。

また、実際に、SOI ウエハの対をシステムに導入し、相対位置誤差を読み取り、その結果をもとにステージを駆動した結果を、図 6 に示す。同図より、 $x$ - $y$  の 2 軸方向に対して、位置補正を行った結果、1 ステップ目から速やかに誤差を  $\sim 50$  nm 以下に抑制することができた。同様の原理で、図 5(a)において 2 点の同時観察を行うことで、回転  $\theta$  補正も実現可能とした。

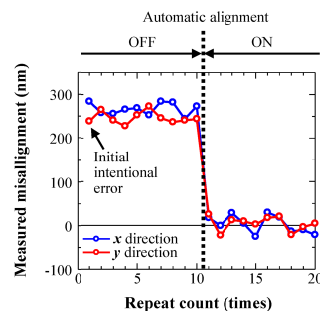


図 6. パターニングした SOI ウエハ対に対する自動位置合わせ動作。

以上では、位置合わせ精度について検討を行ったが、さらに、図 3 のように SOI 基板を用いた積層を実現する際には、SOI ウエハの歪が、接合を阻害する可能性がある。特に、3次元フォトニック結晶の形成においては、棒状の構造同士の接触面積が小さいことから、接合を剥離する方向の力が強くなると、適切な構造が得られなくなる可能性がある。そこで、SOI 構造における歪の解析を行い、特に、 $\text{SiO}_2$  層の厚さを 1  $\mu\text{m}$  程度と薄くすることが重要であることを見出した。また、実験的にも、歪が生じることを SOI ウエハの反りの評価を通じて検証し、先述の指針が妥当であることを示した。

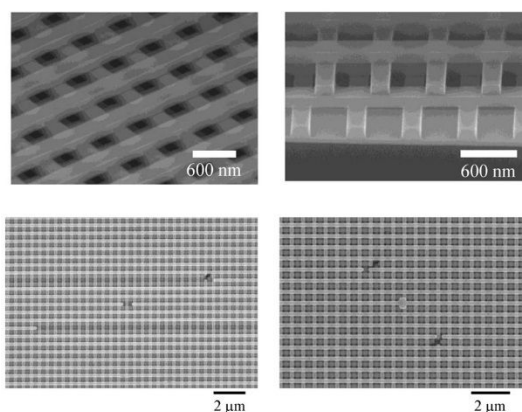


図 7. 作製した 3次元フォトニック結晶の電子線顕微鏡像。

以上のような検討に基づいて作製した 3次元フォトニック結晶の例を図 7 に示す。Si からなる矩形のロッドを維持して、複数層の積層が得られており、さらに、光ナノ共振器や、それにアクセスするための各種の導波路

構造を、積層構造中に自在に形成することにも成功した。本研究では、さらなる発展として、より簡便に3次元フォトニック結晶を形成する技術についても検討を行った。図3の方法では、1回の融着によって1層ずつ層数が増加していくため、N層の構造形成には、N-1回の積層プロセスが必要であり、時間を要する。そこで、あらかじめ、複数層分のフォトニック結晶パターンを、1枚のウエハ上に形成しておき、それを、積層後に分割し、積層を繰り返していくことで、 $\log_2(N)$ 回の積層回数で3次元構造が作製可能な技術を構築した。この場合には、初期の面積が大きくなるが、本研究では、図5(a)のシステムの位置誤差計測用の光学系の光軸の傾きの補正、ウエハ間の並行度に着目し、それらが位置合わせ接触時の誤差発生に与える影響を分析し、位置合わせ積層システムを改善した。この結果、30mmという大面積のウエハにおいても、面内全体の位置誤差として、 $3\sigma \sim 110$ nmという、高精度な積層を実現することに成功した。

### (3) 光学特性評価

作製した3次元フォトニック結晶について、図2に示したような上下方向からの評価が可能な光学系を構築し、特性の評価を行った。図8は、16層の積層構造において、ドナー型のナノ共振器を、導波路を介して測定した結果を示している。同図のように、150nm程度の幅広い波長域の中に、2つの共振モードが観察され、 $\sim 5000$ 程度のQ値が得られた。また、実際に作製した構造における積層位置を考慮して解析結果と比較したところ、図4で示したような基本モード/高次モードに対応した共振モードが形成できていることが示唆された。同様のことが、アクセプタ型共振器においても、確認できた。従来の研究では、より大きな体積をもち、多数の共振モードをもつ共振器についての検討が報告されていたが、本研究では、導波路-ナノ共振器の結合系を用いることで、初めて、非常に微小な体積をもつナノ共振器についても、評価することに成功し、共振モードの特定まで含めた詳細な分析を行うことに成功した。

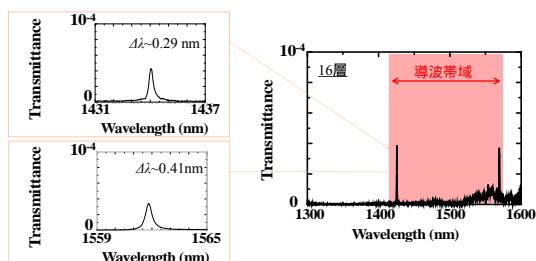


図8 3次元フォトニック結晶中に埋め込まれた光ナノ共振器特性の評価。

以上により、今後、より多層の3次元フォトニック結晶における高Q値ナノ共振器を作製し、評価するための、基盤を構築するこ

とができた。さらなる多層化の初期的実験として、32層構造に導波路と極薄( $\sim 200$ nm)空隙を導入した構造の作製にも成功している。本構造において、入力用の導波路から入射した光が、極薄空隙内で面内方向に伝搬し、その後、出力用の導波路から上方へと取り出される様子が観察されており、設計してきた系がさらなる多層化時の共振器特性の評価においても有用であることが示唆された。今後、大面積一括積層技術等を総合し、ナノ共振器を導入していくことで、3次元フォトニック結晶における高Q値ナノ共振器の実現に繋がることが期待される。

### 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)

K. Ishizaki, K. Suzuki, and S. Noda, "Fabrication of 3D photonic crystals toward arbitrary manipulation of photons in three dimensions," *Photonics*, 査読有, vol. 3, 2016, 36.

<https://doi.org/10.3390/photonics3020036>

K. Kitano, K. Ishizaki, K. Gondaira, Y. Tanaka, and S. Noda, "Light propagation in ultra-thin gap in 3D photonic crystals," *Photonics and Nanostructures- Fundamentals and Applications*, 査読有, vol. 24, 2017, 58-62.

<https://doi.org/10.1016/j.photonics.2017.03.003>

K. Gondaira, K. Ishizaki, K. Kitano, T. Asano, and S. Noda, "Control of radiation angle by introducing symmetric end structure to oblique waveguide in three-dimensional photonic crystal," *Optics Express*, 査読有, vol. 24, 2016, 13518-13526.

<https://doi.org/10.1364/OE.24.013518>

K. Gondaira, K. Ishizaki, M. Koumura, T. Asano, and S. Noda, "Role of surface mode on light out-coupling characteristics of waveguide in three dimensional photonic crystals," *Journal of Lightwave Technology*, 査読有, vol. 33, 2015, 4531-4535.

<https://doi.org/10.1109/jlt.2015.2477439>

K. Kitano, K. Suzuki, K. Ishizaki, and S. Noda, "Three-dimensional photonic crystals fabricated by simultaneous multidirectional etching," *Physical Review B*, 査読有, vol. 91, 2015, 155308.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.155308>

K. Suzuki, K. Kitano, K. Ishizaki, and S. Noda, "Three-dimensional photonic crystals created by single-step multi-directional plasma etching," *Optics Express*, 査読有, vol. 22, 2014, 17099-17106.

<https://doi.org/10.1364/OE.22.017099>

〔学会発表〕(計 15 件)

北野圭輔、石崎賢司、権平皓、野田進、“3次元フォトニック結晶への導波路-ナノ共振器結合構造の導入(II)”, 2014年第75回応用物理学会秋季学術講演会、北海道大学、17a-P14-8、2014年9月17日。

北野圭輔、石崎賢司、権平皓、野田進、“3次元フォトニック結晶内部の極薄空隙面における光伝搬の観測”, 2015年第62回応用物理学会秋季学術講演会、東海大学、12p-A10-14、2015年3月12日。

北野圭輔、石崎賢司、権平皓、野田進、“複数層一括融着による3次元フォトニック結晶作製の検討”, 2015年第76回応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場、15a-PA4-1、2015年9月15日。

北野圭輔、石崎賢司、権平皓、野田進、“複数層一括融着による3次元フォトニック結晶作製の検討(II)”, 2016年第63回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学、20p-P4-19、2016年3月20日。

K. Gondaira, K. Ishizaki, K. Kitano, T. Asano, and S. Noda, “Improvement of out-coupling of the oblique waveguide in three-dimensional photonic crystals by introducing a symmetric end structure,” 2016 IEEE Photonics Conference (IPC), Hawaii, USA, 2-6 Oct. 2016.

北野圭輔、石崎賢司、権平皓、野田進、“複数層一括融着による3次元フォトニック結晶作製の検討(III)”, 2016年第64回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、14p-P7-1、2017年3月14日。

他9件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石崎 賢司 (ISHIZAKI, Kenji)  
京都大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号： 40638524