

令和元年6月21日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K04918

研究課題名(和文) 高精細集束イオンビーム装置を用いた高Q値ダイヤモンド微小共振器の実現

研究課題名(英文) Realization of high Q diamond microcavity using He ion microscope

研究代表者

高島 秀聡 (Takashima, Hideaki)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：00432162

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：光と物質との強い相互作用の実現は、超低消費電力レーザー、高効率波長変換素子、単一光子源などを実現するために重要である。そのために、本研究では、おもに、1. 時間領域差分(FDTD)法を用いた構造計算、2. 高精細集束イオンビーム装置を用いた、Q値4000を超えるナノ光ファイバブラッグ共振器(局所的に直径を数百ナノメートルまで細くしたナノ光ファイバに共振器構造を埋め込んだもの)の作製、3. 高精細集束イオンビーム装置を用いた高純度ダイヤモンド基板上へのナノ微細加工を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により得られたナノ光ファイバブラッグ共振器は、原理的に、単一発光体から発生した光子を、80%を超える効率でシングルモード光ファイバへ結合させることが可能である。それにより、超低消費電力レーザーや高効率波長変換素子などへの光デバイスへの応用が期待できる。また、光子を用いた量子コンピュータや量子ネットワークを実現するために重要な、高効率単一光子源、量子位相ゲート、量子メモリなどへの応用も考えられる。さらに、コンタミネーションが極めて小さい高精細集束イオンビーム装置によるダイヤモンド基板の加工技術は、光共振器だけでなく、ナノエレクトロニクスやナノメカトロニクスへの応用も考えられる。

研究成果の概要(英文)：Realization of strong interaction between light and matter is important for realizing ultra low threshold lasers, high efficient wavelength converters, single photon sources and so on. Therefore, in this research, we have performed 1. calculation of cavity structure using time domain difference (FDTD) method, 2. fabrication of nano optical fiber Bragg resonator exceeding Q value 4000 using a helium ion microscope, and 3. nano-fabrication on high purity diamond substrates using the helium ion microscope.

研究分野：量子光学

キーワード：微小共振器 ダイヤモンド

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー変換効率が高い超低閾値レーザーなどの光デバイスや、単一光子源などの次世代の量子情報デバイスを実現するため、光と物質とを強く相互作用させたシステムの開発が注目を集めている。この光と物質との強い相互作用を実現するシステムのひとつが、光の波長程度の大きさの光共振器（微小共振器）である。可視光域で微小共振器を作製する場合、従来、石英ガラスが用いられてきた。しかし、石英ガラスは、フォノンによる損失が大きいいため、発光効率が結晶よりも低下しやすいという問題、励起状態のコヒーレンスが結晶よりも緩和しやすい（デコヒーレンスの影響が大きい）という問題、非線形性が小さい物質のため、非線形デバイスへの応用が困難という問題がある。新しい光物理の発現や、より高性能なデバイスを実現するには、発光効率が高く、かつ、デコヒーレンスの影響が小さく、さらに、非線形性が大きい物質を用いて共振器を作製し、光と長時間相互作用させる必要がある。

そのため、石英ガラスに変わる材料として、ダイヤモンドに注目した。ダイヤモンドは、紫外域から赤外域まで透明、かつ、不純物ドーピングにより様々な波長での発光が可能である。また、窒素欠陥(NV)中心に代表されるように、一部の不純物欠陥の発光は、発光効率が高く、かつ、デコヒーレンスの影響が小さい。さらに、ダイヤモンドは非線形性が極めて大きい。

そこで、ダイヤモンドの性能を引き出し、光とより強く相互作用させ、従来の性能を凌駕する新規デバイスを実現するには、バルクダイヤモンド単結晶を高精度の微細加工装置で加工し、高Q値ダイヤモンド微小共振器を作製する必要があると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、超低閾値レーザー、高効率波長変換素子、また、単一光子源などの新規デバイスを実現するため、高精細集束イオンビーム装置を用いて、ダイヤモンド結晶中に微小共振器を加工することを目的とする。研究では、以下の項目について研究を行った。

- A. 時間領域差分法(FDTD)を用いた共振器の構造設計
- B. 高精細集束イオンビーム装置を用いた加工条件の探索
- C. 高精細集束イオンビーム装置によるダイヤモンドへのナノ微細加工

3. 研究の方法

高Q値ダイヤモンド微小共振器を実現するため、以下の方法を用いて研究を行った。

- A. FDTDを用いた共振器の構造設計
市販のソフトウェア(Lumerical FDTD solutions)を用い、ダイヤモンドを用いた共振器について計算を行った。
- B. 高精細集束イオンビーム装置を用いた加工条件の探索
加工条件を探索するため、高精細集束イオンビーム装置を用いて、金属やガラス(ナノ光ファイバ)上に微細構造を作製した。
- C. 高精細集束イオンビーム装置を用いたダイヤモンドの加工
ダイヤモンド単結晶上に、高精細集束イオンビーム装置を用いて微細構造の作製を行った。また、高精細集束イオンビーム装置で加工中に発生するチャージアップの抑制を狙い、ナノ光ファイバ上に酸化インジウムスズ(ITO)薄膜のコーティングを試みた。

4. 研究成果

- A. 時間領域差分法(FDTD)を用いた共振器の構造設計
厚さ数百ナノメートルのダイヤモンド薄膜上に二組のグレーティングからなる共振器をつけた共振器と、光を導入するためのナノ光ファイバとのカップリングについて計算を行った。その結果、直径300 nmのナノ光ファイバとダイヤモンドでは、実効屈折率が大きく異なるため、ナノ光ファイバの透過率が著しく減少することがわかった。
- B. 高精細集束イオンビーム装置を用いた加工条件の探索
予備実験として、高精細集束イオンビーム装置を用いてアルミニウム基板上に、周期構造の作製を行った。その結果、加工時の視野(FOV)を200 μm程度に広げても、設計通りナノメートルオーダーでの加工が可能なのことがわかった。

また、関連する研究として、高精細集束イオンビーム装置を用いて、ナノ光ファイバ上に共振器構造の作製を行った。図1に、イオンビームをナノ光ファイバの情報から周期的に照射することで作製した、ナノ光ファイバ共振器(NFBC)の操作イオン顕微鏡像を示す。周期的な溝からなるブラッググレーティングが間隔をあけて二組形成できることがわかった。

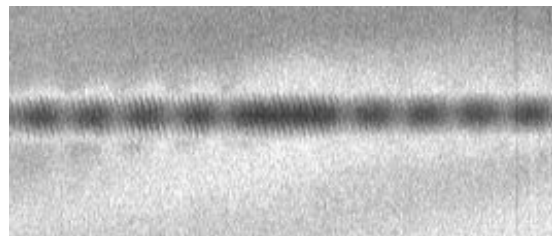


図1 ナノ光ファイバ共振器の走査イオン顕微鏡像。

次に、作製した NFBC の透過スペクトルを測定した。図 2 に、160 周期のブラッググレーティングを持つ NFBC の透過スペクトルを示す。ストップバンドの中に、ひとつの共鳴ピークが観測された。このピークの線幅は 1.5 nm であり、共振器の Q 値 450 に対応している。この Q 値は、同じ周期の NFBC をガリウムイオンを用いた集束イオンビーム装置で作製した場合よりも、1.5 倍程度大きい。このことから、高精細集束イオンビーム装置を用いることで、Q 値の向上に成功したことがわかった。さらに、走査イオン顕微鏡像から推定したパラメータを用い、FDTD 法を用いて共鳴スペクトルを計算したところ、実験結果とほぼ一致するスペクトルが得られた。

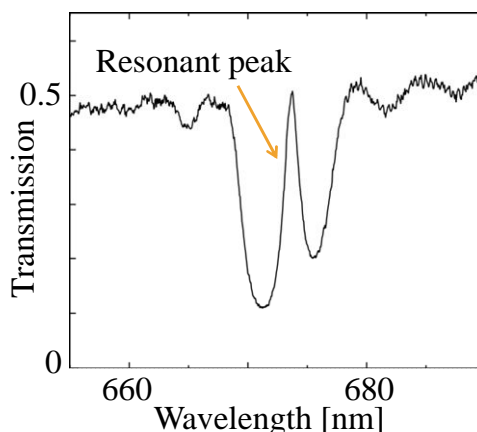


図 2 作製した NFBC の透過スペクトル

さらに、Q 値を向上させるため、グレーティングの周期を 320、および、640 に増やした NFBC を作製した。320 周期の時の Q 値は 1750 となり、640 周期の時の Q 値は、4170 となった。この Q 値は測定に用いた分光器の分解能によって制限された値である。そのため、実際の Q 値は 4170 以上であると推測される。このように、高精細集束イオンビーム装置を用いることで、Q 値を向上できたのは、加工時の分解能が高いことに加え、加工中のサンプルの汚染の影響が極めて小さいためである。

C. 高精細集束イオンビーム装置を用いたダイヤモンドの加工

図 3 に、高精細集束イオンビーム装置を用いて微細加工を行ったダイヤモンド基板の走査イオン顕微鏡像を示す。図中の中央部分がビームを打ち込んだ部分である。また、表面の縞模様は加工時のチャージアップを防ぐためにコートした金薄膜の影響である。図からわかるようにイオンを注入した部分には穴が形成されたが、その周りの部分に膨らみが観測された。これは、シリコン基板でも見られるように、ヘリウムイオンを打ち込むことにより、結晶中でバブリングが発生したためである。

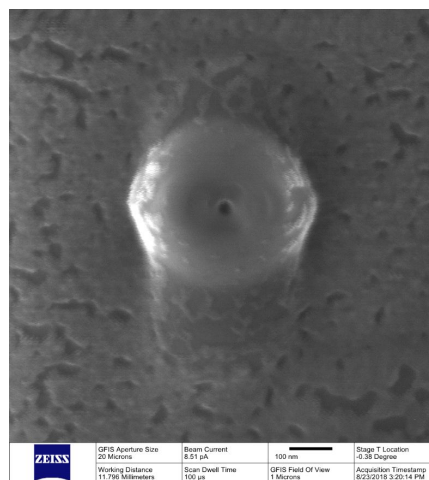


図 3 加工したダイヤモンド基板の走査イオン顕微鏡像

このバブリングのため、ヘリウムイオンを用いて設計通りのナノ微細光像をダイヤモンド上に作製することは困難なことがわかった。

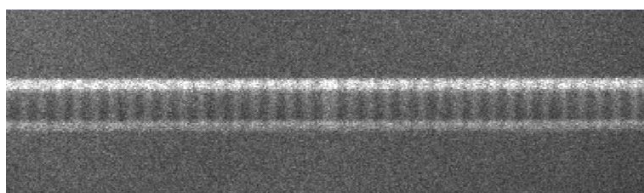


図 4 ITO コートした NFBC の走査イオン顕微鏡像

高精細集束イオンビーム装置で加工中に発生するチャージアップの抑制を狙い、ITO 薄膜のコーティングを試みた。図 4 に、ITO 薄膜をコートした後、加工を行った NFBC の走査イオン顕微鏡像を示す。加工時のチャージアップが抑制されているため、正確に周期構造が加工されていることがわかる。また、

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

Hideaki Takashima, Fukuda Atsushi, Maruya Hironaga, Tashima Toshiyuki, Andreas W. Schell, and Shigeki Takeuchi, "Fabrication of a nanofiber Bragg cavity with high quality factor using a focused helium ion beam," Optics Express, 27, 6792-6800, (2019).

Hi ronaga Maruya, Yasuko Oe, Hideaki Takashima, Azusa N. Hattori, Hidekazu Tanaka,

and Shigeki Takeuchi, "Non-contact detection of nanoscale structures using optical nanofiber," *Optics Express*, 27, 367-376, (2019).

高島秀聡、竹内繁樹、"マイクロ共振器で光子を操る"、*パリティ*、Vol. 33, No. 08, 26-32, (2018)

[学会発表](計 27件)

H. Takashima, A. Fukuda, T. Tashima, K. Fukushige, and S. Takeuchi, "Realization of nanophotonic quantum devices using a He ion microscope" 第66回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム 2019年3月11日

H. Takashima, A. Fukuda, T. Tashima, A. W. Schell and S. Takeuchi, "Development of nanofiber Bragg cavity with high Q factor using a He ion microscope" European Optical Society Biennial Meeting (EOSAM)2018 2018年10月8日

福田純、岩端祐介、A. Schell, 高島秀聡、阿部浩之、小野田忍、大島武、竹内繁樹、「シリコン欠陥内包ナノダイヤモンドの作製」日本物理学会 2018年秋季大会 2018年9月9日

福重一樹、A. Persch, 岩端祐介、田嶋俊之、高島秀聡、竹内繁樹、「ダイヤモンド室素欠陥中心の軸方向同定に向けた3次元磁場制御」日本物理学会 2018年秋季大会 2018年9月9日

高島秀聡、「ヘリウムイオン顕微鏡による高Q値ナノファイバブラッグ共振器の開発」第二回ヘリウムイオン顕微鏡セミナー 2018年7月6日

岩端祐介、福田純、高島秀聡、A. Schell, 阿部浩之、小野田忍、大島武、竹内繁樹、「シリコン欠陥中心内包ナノダイヤモンドの作製」第37回量子情報技術研究会(QIT37) 2017年11月16日

田嶋俊之、丸谷浩永、岩端祐介、高島秀聡、竹内繁樹、「共振器内臓ナノ光ファイバによるダイヤモンドナノ粒子の直接励起の検討」日本物理学会 2017年秋季大会 2017年9月21日

H. Takashima, A. Fukuda, Y. Iwabata, H. Maruya, A. Schell and S. Takeuchi, "Fabrication of high Q nanofiber Bragg cavity using a He ion milling system," The 24th Congress of the International Commission for Optics 2017年8月25日

H. Takashima, A. Fukuda, H. Maruya, Y. Iwabata, A. Schell, M. Fujiwara and S. Takeuchi, "Highly efficient collection of Photons emitted from Quantum Light Emitters using an Optical Nanofiber," The first international symposium of QST-Quantum life sciences- 2017年7月25日

H. Takashima, A. Fukuda, Y. Iwabata, H. Maruya, A. Schell and S. Takeuchi, "Realization of a high-Q factor nanofiber Bragg cavity using a He focused ion beam milling system," CLEO/EUROPE-EQEC 2017 2017年6月29日

H. Maruya, Y. Oe, H. Takashima, A. N. Hattori, H. Tanaka and S. Takeuchi, "Non-contact Detection of Nano-scale Structures Using Optical Nano fiber," CLEO/EUROPE-EQEC 2017 2017年6月28日

高島秀聡、福田純、岩端祐介、丸谷浩永、A. W. Schell, 竹内繁樹、「ヘリウムイオン顕微鏡を用いたナノファイバブラッグ共振器の開発」ヘリウムイオン顕微鏡セミナー 2017年4月25日

福田純、高島秀聡、丸谷浩永、A. Schell, 竹内繁樹、「ナノファイバブラッグ共振器の高Q値化」日本物理学会 第72回年次大会(2017年) 2017年3月18日

高島秀聡、福田純、丸谷浩永、岩端祐介、S. Schell, 竹内繁樹、「ヘリウムイオン顕微鏡を用いたナノファイバブラッグ共振器の開発」第64回応用物理学会春季学術講演会 2017年3月16日

高島秀聡、岩端祐介、藤田慎司朗、藤原正澄、竹内繁樹、「ダイヤモンドナノ結晶結合ナノ光ファイバを用いた光量子デバイスの実現に向けて」第64回応用物理学会春季学術講演会 2017年3月15日

H. Takashima, A. Fukuda, A. W. Schell, M. Fujiwara and S. Takeuchi, "Toward the realization of photonic quantum devices using a nanofiber Bragg cavity," International Symposium on Photonics and Electronics Science and Engineering 2017年3月10日

A. W. Schell, T. T. Tran, I. Aharonovich, H. Takashima and S. Takeuchi, "Efficient extraction of photons from a single defect in hBN using a nanofiber," SPIE.Photonics West 2017 2017年2月2日

A. W. Schell, T. T. Tran, I. Aharonovich, H. Takashima, and S. Takeuchi, "Nonlinear excitation of single quantum emitters in hexagonal boron nitride," SPIE.Photonics West 2017 2017年2月1日

A. W. Schell, H. Takashima, H. Maruya, A. Fukuda and S. Takeuchi, "Nanofiber bragg grating cavities," SPIE.Photonics West 2017 2017年1月31日

H. Takashima, A. W. Schell, S. Fujita, A. Fukuda, Y. Oe, S. Kamioka, M. Fujiwara and S. Takuuchi, "Toward the realization of photonic quantum devices using an

- optical nanofiber,” ONNA 2016 The 4th International workshop on Optical Nanofiber Applications” 2016年10月24日
- 21 高島秀聡、シェルアンドレアス、藤田慎司朗、福田純、大江康子、上岡俊也、藤原正澄、竹内繁樹、「ナノ光ファイバブラッグ共振器を用いた光量子デバイスの実現に向けて」第77回応用物理学会秋季学術講演会 2016年9月14日
 - 22 丸谷浩永、大江康子、高島秀聡、服部梓、田中秀和、竹内繁樹、「テーパ光ファイバからのエバネッセント光を用いたナノスケールセンシングの実現に向けて」第77回応用物理学会秋季学術講演会 2016年9月14日
 - 23 福田純、高島秀聡、A.Schell, 竹内繁樹、「ナノファイバブラッグ共振器の偏光透過特性」日本物理学会2016年秋季大会 2016年9月13日
 - 24 H. Takashima, A. W. Schell, A. Fukuda, S. Fujita, Y. Oe, S. Kamioka, M. Fujiwara and S. Takuuchi, “Coupling efficiency of a single light emitter coupled to a nanofiber Bragg cavity,” CLEO 2016 2016年6月10日
 - 25 丸谷浩永、大江康子、高島秀聡、服部梓、田中秀和、竹内繁樹、「テーパ光ファイバからのエバネッセント光を用いたナノスケールセンシングの実現に向けて」量子情報技術研究会(QIT34) 2016年5月30日
 - 26 福田純、大江康子、A.Schell, 高島秀聡、竹内繁樹、「ナノファイバブラッググレーティング共振器のQ値向上に向けて」量子情報技術研究会(QIT34) 2016年5月30日
 - 27 H. Takashima, A. W. Schell, A. Fukuda, S. Fujita, Y. Oe, S. Kamioka, M. Fujiwara and S. Takuuchi, “Photonic quantum devices using single light emitters,” OPTICS & PHOTONICS International Congress 2016 (OPIC 2016) 2016年5月18日

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

なし

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。