

機関番号：14301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740297

研究課題名 (和文) 希土類ドープナノファイバーを用いた量子光学デバイスの開発

研究課題名 (英文) Development of quantum optics devices using rare-earth-metal-doped optical nanofibers

研究代表者

吉川 豊 (よしかわ ゆたか)

京都大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：00345076

研究成果の概要 (和文)：

本研究の目的は、希土類ドープ光ファイバーを延伸したナノファイバーとよばれる素子を用いて、単一光子源などの汎用性の高い量子光学デバイスを開発することであった。しかし、市販の希土類ドープファイバーではわずかに含まれる不純物の影響でナノファイバー化が困難であることが判明した。そこで研究計画を多少変更し、ナノファイバーの周囲に漏れ出すエバネッセント光と気体分子を用いて微弱光での非線形光-物質相互作用の実現を目指すことにした。具体的には、波長1.5ミクロンのアセチレン分子をターゲットとして、ナノファイバーを用いた飽和吸収分光を行い、10mW程度の弱いレーザー光でラムディップを観測することに成功した。

研究成果の概要 (英文)：

The objective of this research project was to develop general-purpose quantum optics devices with rare-metal-doped optical nanofibers, such as single photon generators. However, it was revealed that fabricating nanofibers with a commercial rare-metal-doped fiber is practically difficult because of its impurities. Therefore, we decided to change our research plan to observe nonlinear light-matter interaction with low-level laser power by utilizing evanescent field exuding around a nanofiber core. To this end, we fabricated a nanofiber for 1.5-micron lasers and successfully observed saturated absorption spectra of acetylene molecules with a laser power as low as 10 mW.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：量子エレクトロニクス

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス, 量子光学, 光物性, ナノ材料

1. 研究開始当初の背景

近年、リソグラフィや微細加工技術の向上とともに、ナノオプティクスと呼ばれる微小光学分野が盛んに行われるようになった。これらの技術は光学素子の小型化、集積化を達

成し、電気素子では出来ないようなスケールで高速なシステムの構築を可能にする。ナノオプティクスは、情報処理の高速化や省エネルギー化だけでなく、量子情報分野まで幅広い応用が期待されており、実用化に向け

て各方面から研究が行われている。このナノデバイスのひとつに、ナノファイバーと呼ばれる光学素子がある (図 1)。ナノファイバーは光ファイバーの一部を波長オーダーまで細くしたもので、細部から滲み出すエバネッセント光や強い光強度を利用することで、光センシングや非線形光学、原子分光といった様々な研究に応用されている。また、ナノファイバーはシリコン細線導波路に比べて格段に透過損失が少なく、高度な加工装置や化学処理なしで容易に作製することができるため、安価に量産可能であるという利点も持っている。ここ数年の世界的な研究情勢をみても、ナノファイバーの研究は作製などの技術開発、特性評価や基礎研究だけでなく応用実験も多岐にわたって研究が始められており、まさに今が萌芽期と言える。これらの研究は産業的な用途を目的とした場合がほとんどであるが、このナノファイバーに発光体を埋め込んだ単一光子源の開発や量子光学の実験的研究など、基礎研究においても様々な応用が期待できる。

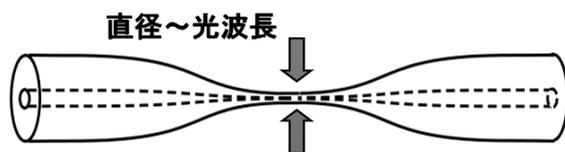


図 1 ナノファイバーの概略図

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の 2 点を実現することであった。

- (1)希土類ドープファイバーを延伸したナノファイバーとよばれる素子を用いて、単一光子源などの汎用性の高い量子光学デバイスを開発すること
- (2)この単一光子源とファイバーリング共振器を組み合わせ、共振器中での自然放出の増強効果(パーセル効果)の定量的な検証実験を試みること

3. 研究の方法

本研究では最初に、希土類元素を添加したナノファイバーを作製し、単一光子源として利用することを目指した。申請者は以前から低損失ナノファイバーの作製技術に関するノウハウを有していた。作製したナノファイバーは世界でもトップレベルの低透過損失を達成し(1mm 当り 0.1 dB 以下)、国内ではこれよりも良質なナノファイバーを作製できる研究グループは他にいない。光子源となる単一イオンは、適当なドープ濃度のファイバーをセラミックヒーターを用いて加熱・延伸し、ドープイオン間隔を数 μ メートルまで広

げることによって準備する。この方法には、ダイヤモンド中の不純物や半導体中の量子ドットなどとは異なり、ある程度ドープイオンの位置を制御できるという長所がある。さらに、ドープイオンはファイバー中に閉じ込められているため、励起光をファイバーの動径方向から照射することで、イオンの発光を直接ファイバーの伝播モードに結合させ、取り出すことができる。これは将来的に光子の長距離転送などを行う際に光学系の簡略化や低損失化につながるため、非常に有利な点と言える。現在、ファイバーにドープできる希土類イオンの種類は様々であり、原理的に可視光域から通信波長帯と広い波長範囲で単一光子源の開発が可能となる。

また本研究では、希土類ドープナノファイバーを用いた量子光学研究の一例として、作製した単一光子源に共振器構造を組み込み、共振器量子電気力学 (Cavity quantum electrodynamics : Cavity QED) の検証実験、特にパーセル効果の系統的な観測を行うことも目的とした。パーセル効果とは、共振器中の原子の自然放出が増強される現象であり、これまでにファブリーペロー型共振器やフォトニック結晶共振器中に導入した中性原子や量子ドットを用いて研究が行われてきた。一方、本研究では、希土類ドープナノファイバーをファイバーリング共振器内に組み込み、リング内の周回モードと希土類イオンを強く相互作用させる。リング共振器の利点の一つは、共振器長や共振器内の光の周回回数 (フィネス) の自由度の高さである。例えば、光入出力用のファイバーとの結合を変えることでフィネスを 1 から 300 程度まで自由に選ぶことができ、さらにはファイバー長を変えることで数 10 cm から数 10 m オーダーの幅広い共振器長を持った共振器を作ることができる。この特徴を利用することで他の共振器では実現できない広範囲の実験パラメータでパーセル効果の検証が可能となる。

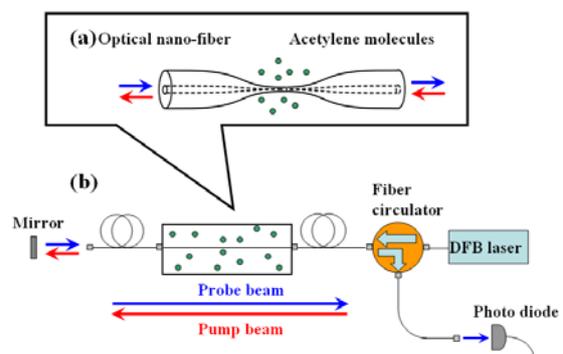


図 2 ナノファイバーを用いた分光計

しかし、研究成果の欄に示すように、希土類ドープファイバーではナノファイバー化が困難であることが判明したため、急速ナノファイバー周囲のエバネッセント光と気体分子の非線形相互作用を観測することを試みた。この際の実験装置の概略を図2に示す。ナノファイバーを希薄なアセチレン分子の封入された真空容器内に導入し、10mW程度のレーザー光を往復させる。その後、復路の光のみをファイバーサーキュレータで取り出し、光検出器で測定する。このとき、ナノファイバー部では光のモード断面積が非常に小さくなっているため(波長の2乗程度)、入射パワーが低くても非常に大きな光強度を長距離にわたって作りだすことができる。この特徴を利用することで遷移強度の小さい分子の振動遷移の高精度分光を、非常にコンパクトな分光計で実現することができる。

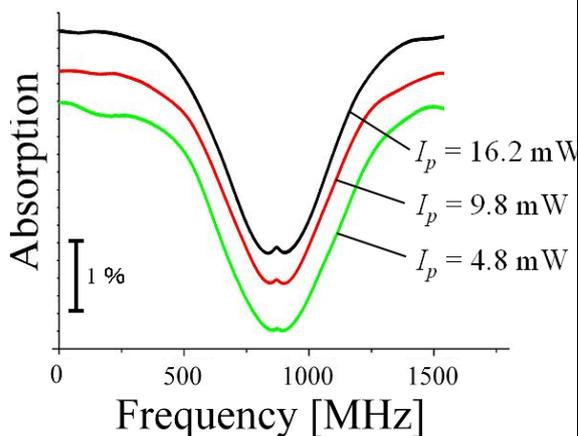


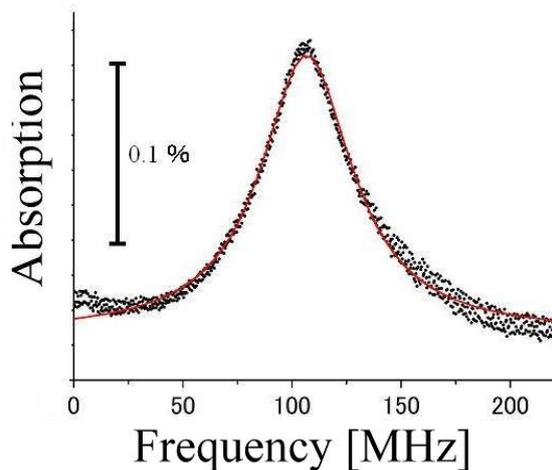
図3 観測された飽和吸収スペクトル

4. 研究成果

研究初年度は希土類ドープファイバーを用いたナノファイバー作成を試みたが、わずかに含まれるドープイオン以外の不純物の影響で加熱・延伸がうまくいかず、ナノファイバー化は断念せざるを得なかった。一方で、(ドープされていない)普通のシングルモードファイバーを用いた波長1.5ミクロンのレーザー光用のナノファイバー作成は問題なく行うことができた。最も細いもので直径400nm程度、透過率はシングルパスで95%以上という非常に優れた特性が得られている。さらにこれを用いてアセチレン分子の飽和吸収スペクトルをわずか10mW程度のレーザーパワーで観測することに成功した。観測されたスペクトルを図3に示す。ドップラー広がりを持つ広い吸収スペクトルの中心部に細いラムディップが現れていることが分かる。ラムディップの拡大図を図4に示す。半値全幅は50MHz程度であり、理論との比較の結果、主に圧力幅によって決まっていることが分かった。これはアセチレンのガス圧を下

げることさらに線幅の狭窄化が可能であることを示唆している。

この分光計は、これまでのものに比べて非常に実験系が簡単、且つ、ローパワーのレーザーで動作するため、光通信波長帯におけるポータブルな光周波数標準などへの応用が期待できる。また、より強い遷移強度を持つアルカリ原子をドープイオンの代替光子源として用いることで当初の目的であった量子デバイスが実現できると考えられる。



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1件)

[1] M. Takiguchi, Y. Yoshikawa, T. Yamamoto, K. Nakayama, and T. Kuga, "Saturated absorption spectroscopy of acetylene molecules with an optical nanofiber," *Optics Letters* **36**, 1254 (2011), 査読有

[学会発表] (計3件)

[1] M. Takiguchi, Y. Yoshikawa, T. Yamamoto, K. Nakayama, and T. Kuga, "A Compact Low-power Spectrometer of Acetylene Molecules with an Optical Nanofiber," 16th Microoptics Conference, Hsinchu City, Taiwan, 2010. 11. 2.

[2] M. Takiguchi, Y. Yoshikawa, and T. Kuga, "Saturated absorption spectroscopy of acetylene molecules with an optical nanofiber," 19th International Conference on Laser Spectroscopy, Kussharo, Hokkaido, Japan, 2009. 6. 9.

[3] 滝口雅人, 吉川豊, 久我隆弘, 「ナノファイバーを用いたアセチレン分子の飽和吸

収分光」, 日本物理学会, 熊本大学, 2009. 9. 27.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 豊 (よしかわ ゆたか)
京都大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号 : 00345076

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :