

蜘蛛の糸の十分の1の細さのガラス糸を用いた、 光を効率良く吸い取るナノデバイスを実現

-量子情報通信への応用に期待-

概要

京都大学大学院工学研究科の竹内繁樹教授、Schell Andreas 特任研究員、高島秀聡特任研究員らは、光ファイバの一部を直径 300 ナノメートル（蜘蛛の糸の十分の1の細さ）の細さにまで引き伸ばしたナノ光ファイバに、光の共振器構造を組み込むことのできるデバイスを実現、このデバイスを用いて、単一発光体からの光を高効率で光ファイバに結合できることを実証しました。本研究成果は、高効率単一光子源など光量子情報通信や光量子コンピュータへの応用だけでなく、単一分子センシングなど生物学や医学を含む幅広い分野への応用が期待されます。なお本研究は、北海道大学、大阪大学、独国フンボルト大学ベルリンとの共同研究です。

1. 背景

光は、光子の集まりで出来ています。近年、この光子を自在に制御することで、盗聴不可能な通信を実現する量子暗号通信や、既存のコンピュータでは解けない問題を解く量子コンピュータの実現に向けた研究が進められています。そこで鍵となるのが、光子を制御するためのデバイスです。特に、人工原子などの単一発光体から発生した光子を、光子の通路である単一モード光ファイバへと結合することは非常に重要な課題でした。

我々は以前、光ファイバの一部を直径 300 ナノメートル（蜘蛛の糸の十分の1、原子千個分程度の細さ）まで引き伸ばしたナノ光ファイバの表面に、単に単一発光体を付着させるだけで、発生した光子を高い効率で光ファイバへと結合できることを見出しました（Nano Lett. 11, 4362 (2011)）その結合効率は7.4%と、大規模な顕微鏡を用いて得られる2~3%よりも十分高いものでした。発光体の発光効率を考慮すれば、結合効率は20%に達しているという関連研究も報告されました。

この効率をさらに高める方法として、我々はナノ光ファイバを微細加工し、光共振器を組み込む方法を理論的に発案（「テーパ光ファイバ」特許第5354605号）、その実現を目指していました。

2. 研究手法・成果

我々は、直径 270nm のナノ光ファイバに、集束イオンビームを用いて周期的な溝（深さ 45nm、周期 300nm）を彫り込むことで、微小光共振器を組み込んだナノ光ファイバの実現に成功しました。さらに、この光共振器内蔵ナノ光ファイバにくわえる張力を調整することで、可視広域で20nm以上と、光共振器の共鳴波長を大きく変化できることを見出しました。固体微小光共振器で、このような大幅に共鳴周波数を可変できるデバイスは殆ど報告されていません。これは、ナノ光ファイバの直径があまりにも細いため、ガラスでありながらゴムのように伸縮できることが理由と考えられます。

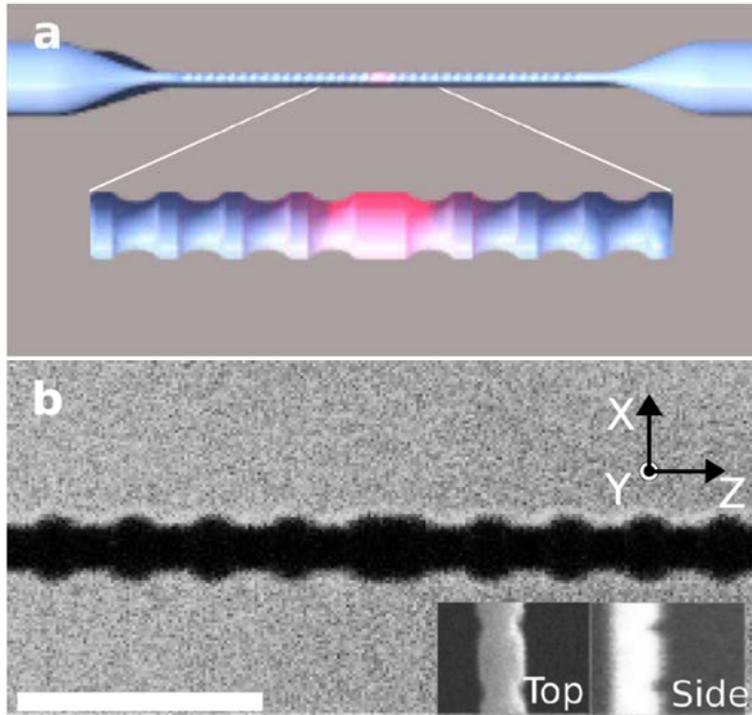


図1 実現した、微小共振器内蔵のナノ光ファイバ。a. 模式図
 b. 作成したデバイスの、走査イオン像(SIM)。白い線は、 $1\mu\text{m}$ (千分の1mm)。ナノ光ファイバの直径は270nm。

さらに我々は、この光共振器内蔵ナノ光ファイバの共振器部分に、単一発光体として量子ドットを付着させ、その発光スペクトルを観察しました。その結果、共振器の共鳴波長において、発光強度が2.7倍に増強した鋭いピークが見られました。また、共鳴波長を変化させると、その鋭いピークの波長が追従して変化することを確認しました。これらの結果から、光共振器内蔵ナノ光ファイバにより、単一発光体からの発光が、微小光共振器の効果でさらに効率よく光ファイバに結合出来ていることを実証しました。

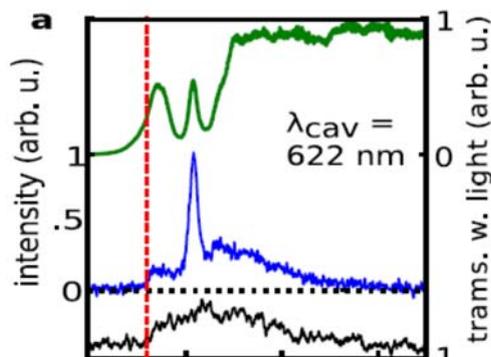


図2 単一発光体からの発光スペクトル。光ファイバからの出力（青）には、共振器の共鳴（緑色線の窪みの中のピーク）に対応した波長で、顕微鏡による検出（黒）にはない鋭い増強ピークが存在する。

3. 波及効果

今回の成果と従来の報告から、共振器の共鳴波長にのみ発光する単一発光体を用いた場合、今回実現したデバイスにより、発光の50%以上を単一モード光ファイバへと結合できると推定されます。この効率は、共振器の性能を高めることにより、理論的には限りなく100%へと近づけることが可能です。

量子暗号通信や光量子コンピュータなどの実現にむけた最大のボトルネックである、100%に近い効率で光子を発生する、オンデマンド単一光子源の実現にむけた大きなステップと考えられます。また、逆に光子を高い効率で単一発光体へ結合できるため、光子の量子状態を、電子スピンの状態に変換して記録する光量子メモリなどの実現も期待されます。

また、発光体としては、分子や蛍光蛋白質などさまざまな物質を結合可能です。このため、例えば抗体などの生体物質を非常に低濃度で、かつ、顕微鏡などの大がかりな装置を利用せずに検出可能なシステムへの応用なども考えられます。

4. 今後の予定

今後は、共振器の性能向上によってさらに高い発光体と光ファイバの結合効率の実現をはかり、これらの波及効果の実現を目指します。

<論文タイトルと著者>

タイトル： Highly Efficient Coupling of Nanolight Emitters to a Ultra-Wide Tunable Nanofibre Cavity (超広帯域共鳴波長可変ナノファイバ共振器への、ナノ発光体の高効率結合)

著者： Andreas W. Schell, Hideaki Takashima, Shunya Kamioka, Yasuko Oe, Masazumi Fujiwara, Oliver Benson & Shigeki Takeuchi

(シェル・アンドレアス、高島秀聡、上岡俊也、大江康子、藤原正澄、ベンソン・オリバ、竹内繁樹)

公表雑誌： Scientific Reports

公表日： 日本時間2015年5月6日(水)18時(英国時間5月6日(水)10時)

<用語解説>

1) 光子 :

光のエネルギーの最小単位で、素粒子の1つ。1ワットの光（可視光）は、毎秒約 10^{19} 乗個の光子から出来ている。

2) 量子暗号 :

不確定性原理を利用して、通信路上の盗聴者の存在を検知しながら、遠隔地間で秘密の乱数鍵を共有する方法。共有した秘密鍵を用いて、暗号通信を行う。

3) 量子コンピュータ :

量子力学的な重ね合わせの原理を利用して、莫大な数の並列演算を実施する、まったく新しい原理に基づく計算機。因数分解など、既存のスーパーコンピュータでは時間がかかりすぎて全く解けない問題を解くことができるとして、注目されている。

4) 光共振器

2枚の鏡を向かい合わせると、その鏡の間隔にちょうど共鳴する波長の光を、一定時間閉じ込めることができる。また、その中に発光体を導入すると、量子光学的な効果により、発光体から発生する光の方向を制御することが可能になる。本研究では、ブラッグ反射鏡とよばれる、周期構造を利用した鏡を1対、ナノ光ファイバに形成している。