

ナノ光ファイバーの作製と、それを用いた量子ドットの特性評価

森永実 研究室 竹村 武士

平成 29 年 3 月 10 日

1. 序論

光が波動であるのと同時に粒子であるということは量子力学において導入的なものであり、他にも我々の生きる巨視的な世界では起こりえないことが観測される。多くの特性を検証された光子は、今現在も、多くの研究がなされている。量子光学の分野では、その光子一つ一つ制御するための研究が進められており、それらの研究は、量子コンピューター、量子通信などの量子を用いた情報処理の基盤となる技術になっている。また、単一光子を用いた量子フォトニクス通信技術という新しい通信技術が提案されている。これは光子 1 個がその量子状態に情報を持ち、それを保ったまま伝送される技術であり、現在使われている通信技術で起こりうる、盗聴の危険をなくすことが出来る。量子は観測されると、その量子状態が変化してしまい、その変化が分かってしまうため、原理的に盗聴する事が不可能になる。

量子である光子を制御する導波路として、サブ波長の大きさまで極細化された光ファイバーの上に微小光源を置くと、その光応答特性の制御、操作する事が出来ると考えられている。本研究は、単一光子操作の足掛かりとなる、ナノ光ファイバーの高精度での作製、ナノ光ファイバー上での半導体量子ドットの特性評価を実験の目的としている

2. 原理

2.1 ナノ光ファイバー

ナノ光ファイバーは単一モードの光ファイバーの一部分を極細化し、その直径が伝搬光の半波長程度の大きさになったものである (300~600nm)。入射光が可視光範囲であるとする、直径がそのサブ波長程度のナノファイバーであれば、伝搬光はその直径の領域に集中することになり、しみ出し部分も含め、ナノファイバー近傍の光の場のモード密度は伝搬モードの比重が高くなる。これにより、ナノファイバーの近くに原子を配置することで、原子は自由空間と異なるモード密度分布の光の場と相互作用することになる。ファイバー中に入る効率が最大になるのは、ナノ光ファイバーの直径が約 0.46λ の時であると計算されている。この時に発生光の約 24% がファイバー中に侵入する事が分かっている。[1]



図 1. ナノ光ファイバーの模式図

2.2 量子ドット

量子ドットは、核、外殻を持つ、ナノスケールの発光体である。大きさは様々であり、5~10nm 程度である。後述するが、量子ドットによって蛍光波長の大きさが異なる

り、物質あるいはドットのサイズによって変化している。量子ドットは発光する状態の ON 状態と、ほとんど光を発生しなくなる OFF 状態が存在する。この状態を繰り返すことをブリンキングという。[2]

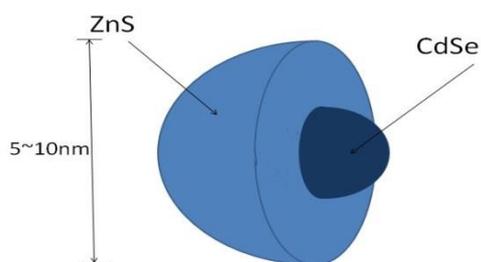


図 2. 量子ドットの模式図

2.3 単一光子状態の検出

単一光子状態にあるのかを判定するには二つの APD を用いた、ハンブリー・トゥイスの干渉計を用いた。この測定系に入る光はビームスプリッターを用いて二つの経路に半分ずつに分けられる。光が単一光子状態で放出されていると、APD1 にて光子が検出された時に、APD2 で同時刻にて光子が検出されることは、起こりえない。それぞれの APD で光子を検出した時刻の時間差 τ を取り、規格化された強度相関 $g^{(2)}(\tau)$ (時間差でやってくる確立に比例) で表すと、 $g^{(2)}(0) = 0$ となる。[3]

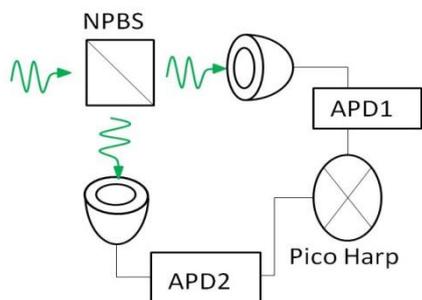


図 3. 強度相関測定の概略

3 実験方法

3.1 ナノ光ファイバーの作製

ナノ光ファイバーは通信用シリカファイバーを加熱、延伸し、テーパファイバ化する事で作った。図は、その製造機であり、中央部分に被覆を取り除いたシリカファイバーを乗せ、加熱、延伸した。塵、埃などの影響を大きく受けるため、ファイバーにそれらが付着しないようにクリーンに保つ必要があった。

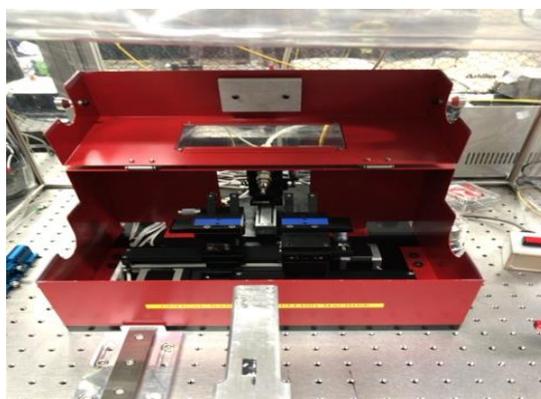


図 4. ナノ光ファイバー製造機

3.2 量子ドットの配置

ナノスケールの量子ドットをナノ光ファイバーの表面に付加するためには、トルエンによって希釈された量子ドット溶液を用いる。ニードルディスペンサーを用いて、ニードル(5 μm)先端に、量子ドット溶液を付着させ、ナノ光ファイバーに配置する。溶媒であるアセトンは揮発して無くなるため、量子ドットのみがファイバー表面に残る仕組みである。倒立顕微鏡で x、y 軸、ニードルディスペンサーで z 軸の制御をして配置する。光をファイバー中に伝搬させながら行い、ドットによる光の散乱を見る事で、量子ドットが配置された事を確認した。ド

ットの配置は 20 μm 間隔で行った。

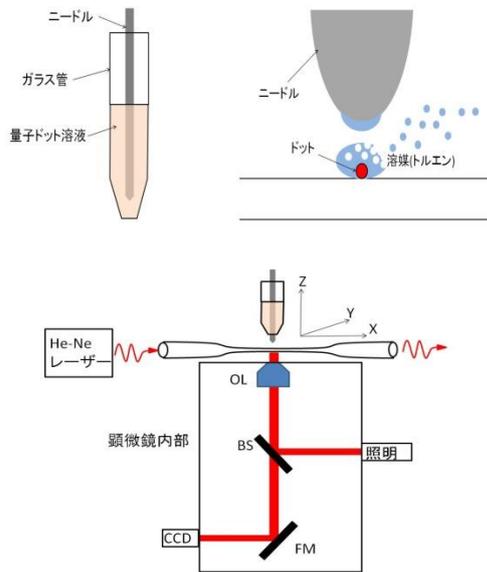


図 5. 量子ドット配置の実験系

3.3 強度相関、スペクトル検出

量子ドットを発光させるために、530nm のレーザーを用いた。レーザーは対物レンズで集光され、1つの配置場所を励起する。レンズフィルターで 530nm のレーザー光をカットし、発光した光のみをスペクトル測定器、強度相関測定系でそれぞれ測定した。

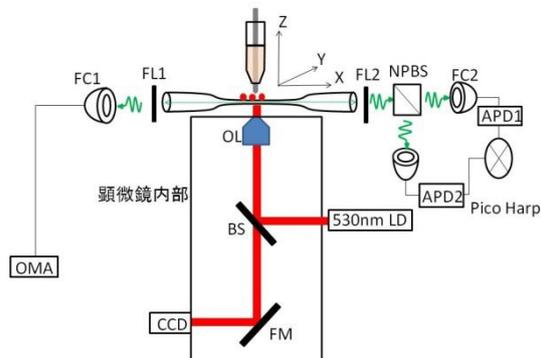


図 6. 量子ドットの特性評価

4. 実験結果、考察

4.1 ナノ光ファイバー

図 7 は横軸にファイバーの位置、縦軸に直径の大きさを取ったものである。2-4mm の位置で直径がほぼ均一になっており、量子ドットの配置に適した構造を創ることが出来た。また、このファイバーの透過率は 99% であり、ほとんどロスなく延伸が出来た。

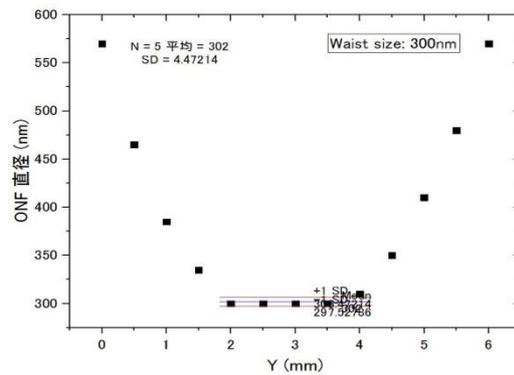


図 7. ナノ光ファイバーの直径

4.2 量子ドットの特性評価

図 8 は、量子ドットの規格化された強度相関を表している。時間差 0 の部分で大きく値が下がっており、時間差が大きくなるにつれ、強度相関の値も指数関数的に増加し、およそ一定の値を取っている。 $g^{(2)}(0)$ の値は 0.147 となっており、完全ではないが、単一光子状態の光を観測することが出来た。

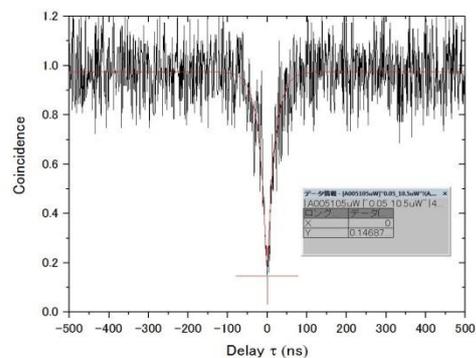


図 8. 量子ドットの強度相関

図9は量子ドットのスペクトルを表している。中心ピークの波長は642nmであり、その半値幅は23nmとなっている。量子ドットのスペクトルは鋭いピークを持っておらず、ある程度の幅を持つ事が分かる。

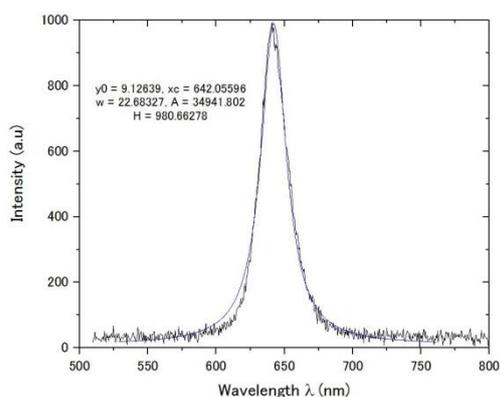


図9. 量子ドットのスペクトル

5. まとめ、展望

ナノ光ファイバーという、近傍の光のモード密度が伝搬モードに大きく集中している伝送路を用いる事で、単一光子発生源として用いた量子ドットの発光の特性を見た。量子ドット一つだけ配置することで、その単一光子発生源であることを確認することが出来た。

量子ドットのスペクトルなどの振る舞いは未だ解明されていない事が多い。冷却機内でスペクトルを測定するとピークがいくつかに分かれる事が観測されており、その原因を解明することが課題である。ナノ光ファイバーの使用によって、24%程度の光をファイバーに入れることが出来るが、残りの光は外部に放出されてしまっている。ファイバーに入る効率を増加させるために、は共振器などを用いる方法がある。

参考文献

- [1] Hakuta Kohzo “[Optical Nanofibers for](#)

[Manipulating Single Atoms and Single Photons\(Experimental Development](#) “日本物理學會誌 70(1), 36-44, 2015-01-05

- [2] Ramachandrarao Yalla “Single Photon Generation and Spectroscopy Using Quantum Dots on Optical Nanofibers” December 2012
- [3] 修士学位論文「半導体ナノ粒子が放出する単一光子の強度相関とスペクトル」芥川 嘉成 広域科学専攻 相関基礎科学系 平成 23 年度