

# 単一発光体と結合したテーパードファイバーの作製と評価

森永実研究室 大草聖也

令和元年 3月6日

## 1. 序論

私たちが日常で目にする光には、粒子としての性質と波としての性質がある。そのため、光はその波長を固定すると最小のエネルギー単位を持つ光子という粒子としての性質を持つ。この光の最小単位である光子は量子的な特性を持っており、量子エレクトロニクス分野で広く研究されており、量子コンピューターや量子通信等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、この光子を用いた量子フォトンクス通信という新しい通信技術が提案されている。現在の社会で主として使われている光ファイバーによる通信では、光の強度に情報を載せて通信を行う公開鍵暗号方式が用いられている。しかし、この通信方法においては第三者からの盗聴が行われていたとしても気付くことができず、盗聴された状態のまま通信を行い続けてしまう危険性がある。この危険性をなくすため量子暗号通信と呼ばれる新しい通信方式に向けた研究を行っている。この通信方式では光の最小単位である単一光子と呼ばれる光子一つが情報を持ち、その量子状態を保ったまま伝送される。この単一光子は観測行為により量子状態が変化するという性質を持っており、その変化が分かるため、盗聴を防ぐことができる。本研究はこの単一光子を情報の伝送路である光ファイバーに伝送することを目的として行っており、そのための手法と

してテーパードファイバー先端に単一発光体を結合させたデバイスの作製を行っている。

## 2. 原理

### 2.1 量子ドット

原子数を限定した直径数 nm~10nm の半導体の結晶を量子ドットと呼び、これは核、外殻を持つナノスケールの発光体である。また量子ドットによって蛍光波長の大きさが異なり、材料として用いられている物質あるいは量子ドットのサイズにより変化する。また核、外殻はそれぞれ異なる物質から成っており、核には CdSe、CdSeTe などの比較的狭いバンドギャップを持つ半導体、外殻には ZnS、CdS などの比較的広いバンドギャップを持つ物質が用いられている。このような構造を持つことより表面のトラップサイトを強固に保護でき、かつ励起子を効果的にコアに閉じ込めることができる。また特定の波長の光を放出することや、多くの場合 1 サイクルで 1 つの光子を放出する等の特徴がある。1 つの原子のような働きをするため、単一光子の検出の他にもレーザーなどにも用いられている。

量子ドットは同物質から成るものであっても放出する光の周波数を変化させることができる。これは、量子ドットの粒径の変化による閉じ込め効果の変化によるものである。電子を閉じ込められる範囲を粒径  $L$  として、井戸型ポテンシャルを  $V$  とする。この時三次元のシュレディンガー方程式に代

入して解くと

$$V = \begin{cases} 0, 0 < x, y, z < L \\ \infty \end{cases} \quad (2.1)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m^2} \nabla^2 \varphi + V\varphi = E\varphi \quad (2.2)$$

と表すことができそのエネルギー固有値 E

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2 * L^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2) \quad (n_{xyz} = 1, 2, 3 \dots) \quad (2.3)$$

となる。E は粒径の二乗の値に反比例するため、粒径が大きいほど放出波長も大きくなる。そのため粒径を変化させることにより、様々な発光波長の量子ドットを得ることができる [2]。

## 2.2 光ファイバー

光ファイバーには大きく分けてシングルモードファイバーとマルチモードファイバーの二種類がある。光ファイバー内のコア部とクラッド部の屈折率を  $n$ 、 $n_1$  とするとコア部とクラッド部の相対的な大きさ  $\Delta$  は

$$\Delta = (n - n_1/n_1) \quad (2.4)$$

で与えられ、以下で規格化された周波数を  $V$  とすると

$$V = ak_0(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = k_0 a n_1 \left(\frac{\Delta}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

と表すことができる。これを導波路パラメータ(規格化周波数  $V$ )という。この式中における  $k_0 = 2\pi/\lambda$  であり、 $\lambda$  は光の波長、 $a$  は光ファイバーのコアの半径を表す。またシングルモードファイバーか、マルチモードファイバーであるかの判断は上記の式で行うことができる。光ファイバーの種類により式中のコア半径  $a$  の値が変化し、それに伴い  $V$  の値が変化するためコア半径によりファイバーのモードは判別される。  $V < 2.405$  である時の光ファイバーがシングルモードファイバーであり、  $V \geq 2.405$  の時の

ファイバーがマルチモードファイバーである。具体的な数値としては、マルチモードファイバーのコア半径はおよそ  $25 \sim 30 \mu\text{m}$  であるのに対して、シングルモードファイバーのコア半径は  $2 \sim 4 \mu\text{m}$  である。 [1]

また通常使用されているシングルモードファイバーの導波モードは  $HE_{11}$  モードであるが、互いに直行する二つの直線偏光の  $HE_{11}$  モードが伝搬可能である。X 偏光のモードを  $HE_{11}^x$ 、Y 偏光のモードを  $HE_{11}^y$  と表す。  $HE_{11}^x$  と  $HE_{11}^y$  の両直線偏光モード間の結合を減少させるためには二つのモードの伝搬定数差  $\Delta\beta = |\beta^x - \beta^y|$  が大きくなる必要がある。応力等の力が加わった光ファイバーでは異なる偏光モードに対して伝搬定数が異なり、複屈折と似たような性質を示す。複屈折とは境界面において屈折する光が一つでなく二つになる現象のことであり、光が物質中を通過するとき振動面の向きによって進む振動が異なることを指す。

伝搬定数差  $\Delta\beta$  の大きさを表すパラメータとして、モード複屈折率  $B$  は次のように与えられる。

$$B = \frac{\Delta\beta}{k_0} \quad (2.6)$$

$\Delta\beta$  が 0 でない場合、電力が同じモードの伝送を行うと、図 2.6 のように直線偏光と円偏光を交互に繰り返すこととなる。これにより光ファイバーを観察すると光の強弱が観測され、この強弱の周期をビート長と呼ぶ。ビート長  $L$  と  $\Delta\beta$  は以下のような関係式で表すことができる。 [1]

$$L = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{B} \quad (2.7)$$

## 2.3 テーパードファイバー

テーパードファイバーとは光ファイバ

ーを加工することにより先端を先細りさせた形状のものである。先細りさせた形状であることにより先端付近ではコアが極細化し、クラッド部に吸収される形になり、クラッド部がコア部、空気または真空がクラッド部の働きをする。

ファイバーに入射する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ファイバーであれば、ファイバー内を伝搬する光はその直径の領域に集中することになり、先端付近で染み出す微小部分も含めて、テーパードファイバー先端付近は光の場のモード密度は伝搬モードの領域に局所的に集中することになる。これにより、単一光体をテーパードファイバー先端に配置すると、発光体は自由空間と異なるモードの密度分布の光の場と相互作用することになる。先端に結合させる原子の準位  $i, j$  間の遷移周波数を  $\nu_{ij}$ 、遷移双極子モーメントを  $\mu_{ij}$  とすると、準位間の自然放出レート  $\gamma_{ij}$  は光の場のモード密度  $\rho(\nu_{ij})$  に比例して

$$\gamma_{ij} = (2\pi) |\mu_{ij}|^2 \rho(\nu_{ij}) \quad (2.8)$$

と表すことができる。この式(2.5)はフェルミの黄金律と呼ばれ、モード密度が増加するほど自然放出レートも増加することがわかる。

このようなことから単に先端を切り落とした形状の光ファイバーよりも光子を導く効率が上がる。しかし形状の変化による光の染み出しにより、通常の光ファイバーに比べ光の伝搬効率は減少する。このロスは光軸に対する先細り角度  $\Omega$  が増加するほど大きくなり、 $\Omega$  を用いてテーパード部の長さ  $Z_t$  を

$$Z_t = \frac{R}{\tan(\Omega)} \quad (2.9)$$

と表すことができる。テーパードファイバーはバーナーやレーザーにより光ファイバーを過熱延伸して作製することができる。光ファイバーの過熱延伸時の模式図が図 2.7 である。図 2.7 における  $Z_0$  は加工時の変化部分の長さ、 $L_w$  は均一なテーパード部分の長さ、 $r_0$  は加工前のファイバー半径であり  $r_w$  はテーパード部分の半径である。両端を延伸する速度が同じ場合には、先細り部分が左右対称な構造をとる。延伸した分の正味の距離  $x$  は延伸後のファイバーの位置 PQ 間の長さから、延伸前の PQ 間の長さを引いたものと等しくなる。また過熱部分の長さ  $L$  が時間  $t$  で変化する関数であるとする

$$L_w(t) = L(t) \quad (2.10)$$

となり、テーパード部の長さ  $P$  が等しくなる。さらに過熱による光ファイバーの延伸前と延伸後の質量は保存されている。これにより図 3.1 における時間  $t + \delta t$  における延伸ガラスファイバーの PQ 間の体積は、時間  $t$  における過熱されたガラスファイバー PQ 間の体積に等しくならなければならない。これにより

$$\pi(r_w + \delta r_w)^2(L + \delta x) = \pi r_w^2 L \quad (2.11)$$

が成り立つ。 $\delta r_w$  は円柱部分の半径の変化であり、延伸過程であれば負の値をとる。極限  $\delta t \rightarrow 0$  において、拡張式  $x$  とともに、ウエスト半径  $r_w$  の変化を微分方程式で考えると以下の式で表すことができる。

$$\frac{dr_w}{dx} = -\frac{r_w}{2L} \quad (2.12)$$

また時間変化するウエスト径  $r_w$  の初期状態を  $r_0$  とする。式(2.8)の両辺を積分すると

$$\int_{r_0}^{r_w} dr'_w = -\int_0^x \frac{r'_w}{2L} dx' \quad (2.13)$$

$$\int_{r_0}^{r_w} \frac{dr'_w}{r'_w} = -\frac{1}{2} \int_0^x \frac{dx'}{L(x')} \quad (2.14)$$

$$r_w(x) = r_0 \exp \left[ -\frac{1}{2} \int_0^x \frac{dx'}{L(x')} \right] \quad (2.15)$$

と表せる。

次に延伸前後における距離の関係性を考える。延伸前と延伸後の距離の関係性を式で用いて表すと以下のようなになる。

$$L_0 + x = L(x) + 2z_0 \quad (2.16)$$

$$z_0 = \frac{L_0 + x - L(x)}{2} \quad (2.17)$$

過熱部分が一定であると考え、 $L(x) = L_0$ となるため式(2.12)に代入して考えると

$$r_w(x) = r_0 e^{-\frac{x}{L_0}} \quad (2.18)$$

となる。式(2.15)の変化するテーパ部の長さ $z_0$ は $z_0 = 2x$ であるため式(2.15)は

$$r(z_0) = r_0 e^{-\frac{z_0}{L_0}} \quad (2.19)$$

となる。この式よりテーパ半径は伸ばす延伸距離と過熱部の長さにより変化することがわかる。[2]

### 3 実験方法

#### 3.1 テーパードファイバーの作製

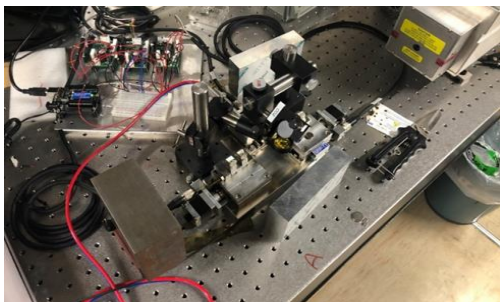


図1 自作したファイバー加工機

自動直動 X 軸ステージ二つを左右に平行に配置し、CO2 レーザーと小型酸素バーナーをセッティングした。左右のステージ上部に光ファイバー用の溝と固定するためのマグネットを配置して左右のステージ上部に光ファイバーを固定している。またこの自動直動 X 軸ステージはステッピングモーターで稼働しており、モーターの最小稼働角は 0.73 度となっている。これにより、一回転するために 500 ステップが必要となり、実際の移動距離から 1 ステップで  $2 \mu\text{m}$  移動することが分かった。この値が通常状態でのステージの最小移動距離となる。このステージを動作させるためドライバとして CRD5 1 0 7 P、SD5107P3-A22(オリエンタルモーター社)を用いた。これを Arduino に書き込んだプログラムで操作しファイバー加熱時の延伸方法を制御した。また図 3.1 上部に配置してある酸素バーナーも左右のステージと同様のモーターとドライバにより動作を制御できるように作成した。また作製したテーパードファイバーの透過率の変化を測定するため、加熱延伸する光ファイバーにフェルルを用いてレーザーを入射させ、ファイバー先端から出射する光量の変化を電圧として測定するための装置を作成し取り付けた。透過率は毎秒 4 回カウントが行われるように設定した。ステージ動作としては三種類を使用し、その内の一つが以下の図 2 である。

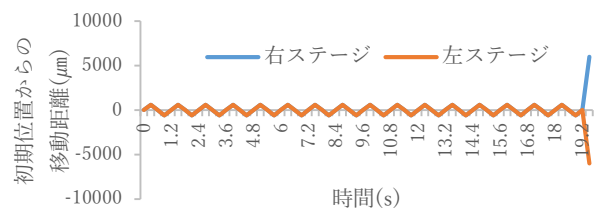


図2 ステージ動作例

### 3.2 量子ドットからの光子検出

テーパードファイバー先端に量子ドットを付着させ、量子ドットからの光子検出を行うに当たり、フォトンカウンティモジュールを光子検出モジュールとつなぎ、そこからの信号をPCで受け取り記録した。

PCは光子検出モジュールの作動中信号を受け取り記録し続けるため量子ドットのブリッキングがあるかどうかを確認するのに適している。

以下図3は量子ドットからの光子検出のための装置である。

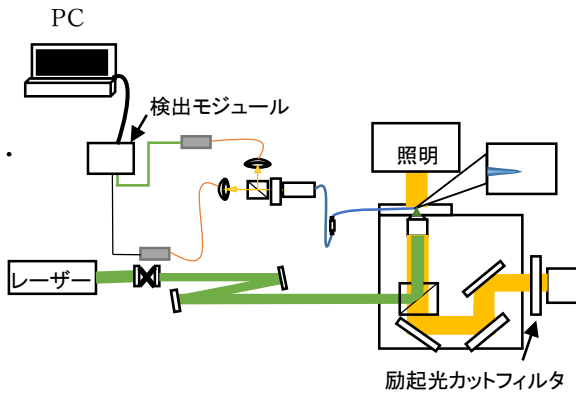


図3 光子検出記録のための装置概要

## 4 実験結果

### 4.1 作製したテーパードファイバーの形状と評価

以下に作製したテーパードファイバー③と④の形状と断熱条件との比較と③作製時の透過率の変化を示す。

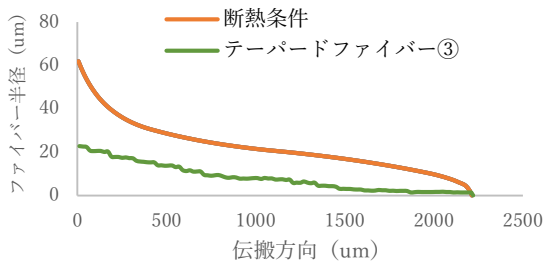


図4 テーパードファイバー③と断熱条件との比較

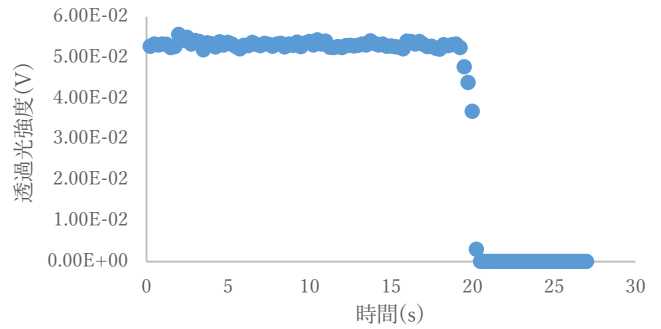


図5 テーパードファイバー③作製時の透過率変化

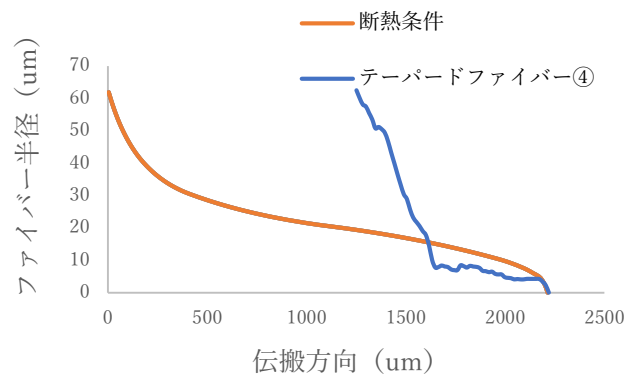


図6 テーパードファイバー④と断熱条件との比較

テーパードファイバー③は酸素バーナーによる加熱により延伸を行った。またステージ動作は図3.8のステージ動作③を使用した。バーナーによる加熱は加熱部が振動なしでも5mm程度あり、そのため結果としてテーパード部は約3000 $\mu\text{m}$ あり、かなり緩やかなテーパードの形状のファイバーとなった。これにより断熱条件との比較ではかなり損失の少ない形状に作製できた。しかし反面テーパード部が長すぎることから機械的強度はかなり小さく取り扱いの難しい形状となった。テーパードファイバー④の作製においてはCO<sub>2</sub>レーザーによる加熱を行い過熱部は91.2 $\mu\text{m}$ 、ステージ動作は図3.7のステージ動作②を用いた。形状は同様の加熱方法とステージ動作を用いたテー

パードファイバー②と似通ったものとなった。しかし、1000  $\mu\text{m}$ かけて延伸されていることから断熱条件との比較においてはテーパードファイバー②よりも比較的損失の少ない形状となった。これはCO<sub>2</sub>レーザーの集光を調整し、加熱部分を若干広くとったことが大きな要因であると考えている。

#### 4.2 量子ドットからの光子検出、光子相関の結果

100倍希釈の量子ドット溶液を用いて、テーパードファイバー先端に量子ドットを結合させたものからの光子検出と光子相関の実験における結果のグラフを作成した。

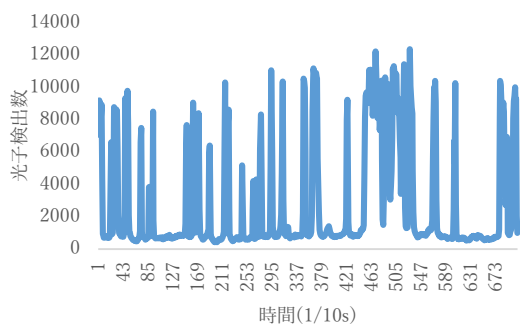


図7 テーパードファイバー③からの検出結果

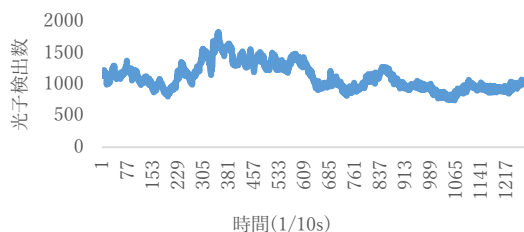


図8 テーパードファイバー④からの検出結果

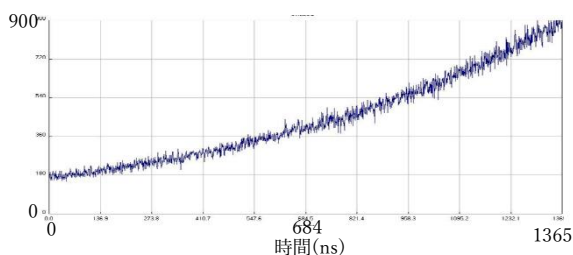


図9 確認した光子相関の観測結果

#### 5 結論、考察

作成した光ファイバー加工機を用いたテーパードファイバーの作製において、過熱部分の長さが明確にテーパー部の大きさに影響しており、それを過熱方法とステージ動作によって調整し実際にテーパー部の長い断熱条件と比較して損失の少ない形状のテーパードファイバーを作製することができた。また光子検出の結果については準備した光子検出の装置で光子の観測は問題なく行うことができた。しかし量子ドット一つのみが発光していることを示すブリンクの確認を行うことができず量子ドット一つのみを励起し、それによる光子検出は行うことはできなかったと考えている。これは準備した溶液における量子ドットの濃度が適切でなかったためであると考えておりより適切な濃度の量子ドットの溶液を作る必要があると考えられる。また光子相関の観測結果についても単一光子状態の確認はできなかったため用いる溶液の濃度調整を再度行い、光子検出の実験においてブリンクを確認した後光子相関をとることで単一光子状態の観測を行いたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] 「非線形ファイバー光学」 G.P. アグラワール著 (吉岡書店 2004 年)
- [2] A.Timothy, W.Birks and Youwei Li “The Shape of Fiber Tapers” Journal of lightwave technology Vol.10 No4. April 1992
- [3] Ramachandrarao Yalla “Single Photon Generation and Spectroscopy Using Quantum Dots on Optical Nanofibers” December 2012