

# 単一光子伝送実現のためのテーパードファイバーの作製と 評価

森永研究室 相馬康人

## 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単一光子は量子的な特性をもっており、量子エレクトロニクス分野で広く研究されており、量子コンピュータや量子通信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。

現在の社会で利用されている光ファイバーによる公開鍵暗号方式では第三者からの盗聴に気づくことができず、セキュリティの堅牢度が数学的推測に依存している。しかし、量子コンピュータは計算速度が大幅に発達したため現在とは異なる通信方法の発見を余儀なくされた。この新しい通信方法として光子を用いた量子暗号通信が提案されている。

量子暗号通信という通信技術は光子一つが情報を持ち、量子状態を保ったまま伝送される。単一光子は観測行為により量子状態が変化する性質をもっており、その変化を検知することにより第三者からの盗聴を防ぐことができる。我々はこの単一光子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るためのテーパード光ファイ

バーチップの作製を行っている。

## 2. 原理

### 2.1 光ファイバー

光ファイバーは中心部にコア、その周囲にクラッドが存在しその周りを被覆が覆っていることによる三重構造になっている。コア部はクラッド部よりも屈折率が高くなっていることにより、全反射、屈折をするような構造になっているため、光ファイバー内部の光は全反射によりコア内に閉じ込められた状態のまま光ファイバー内の中心を通り伝搬していく。光ファイバーには大きく分けてシングルモードとマルチモードの二種類がある。光ファイバー内のコア部とクラッド部の屈折率を $n_1, n_2$ とするとコア部とクラッド部の比屈折率は

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \cong \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

となる。 $k = 2\pi/\lambda$ 、 $\lambda$ を波長、光ファイバーのコアの半径を $a$ とし、規格化された周波数を $V$ として

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = k_0 n_1 a (\Delta)^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

と表すことができる。これを規格化周波数という。規格化周波数の大きさによって導波される全モード数が決まり、シングル

モードファイバーか、マルチモードファイバーかの判断を行うことができる。 $V \leq 2.4$  となるときのファイバーがシングルモードファイバーであり、 $V \geq 2.4$  となるときはマルチモードファイバーになる。クラッドの直径はシングルモードファイバーとマルチモードファイバーともに  $125\mu\text{m}$  であるが、コアの直径はシングルモードファイバーでは数  $\mu\text{m}$  であるのに対し、マルチモードファイバーでは約  $50\mu\text{m}$  である。

## 2.2 ビート長

光ファイバーは応力などの力が加えられると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。複屈折とは光波が結晶中を伝搬するとき伝搬の方向と磁界の向きによってその速度が異なる場合があり、互いに直行する方向の偏光に対して異なる屈折率を持っている結晶に入射した光が結晶内で異なる経路をたどり、結晶から二つの光に分かれて出てくる現象のことであり、光が物質中を通過するときに振動面の向きによって進む振動が異なることを示す。モード屈折率  $B$  は

$$B = \frac{\Delta\beta}{k_0} \quad (2.3)$$

となり、 $\Delta\beta$  は伝搬定数差である。 $\Delta\beta$  が 0 でないとき、電力が等しいモードの伝送を行うと、図のように直線変更と円偏光が交互に繰り返されるようになる。これにより光の強弱が光ファイバーで観測され、この強弱の周期をビート長と呼ぶ。ビート長を  $L$  とすると

$$L = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{\beta} \quad (2.4)$$

のように表すことができる。

## 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して先端を先細りさせた形状のファイバーである。形状を先細りさせることにより先端付近ではコアが極細化するため、この部分ではクラッドがコアの役割を果たし、空気または真空がクラッドの役割となる。テーパーの先端直径が入射光の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モード密度の伝搬モードの領域に局所的に集中することになる。これより、単一発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

$$\gamma_{ij} = (2\pi) |\mu_{ij}|^2 \rho(\nu_{ij}) \quad (2.5)$$

と表すことができる。この式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分かる。テーパードファイバーは太さを変化させるためモード変換が生じて光の染み出しが起こる。これを防ぐための加工の指標を図 1 に示す。

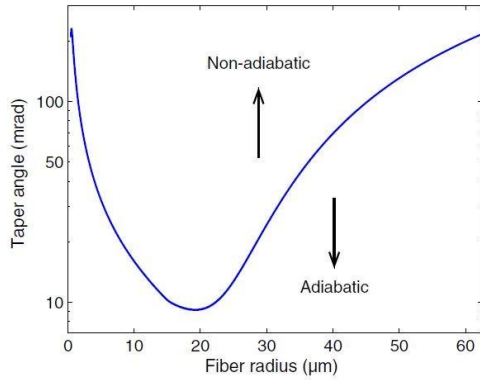


図 1.加工の指標[2]

図 1 の横軸がファイバー半径、縦軸はテーパ部分の角度となっていて、加工時にモード変換が断熱的になるためのテーパ部分の角度の上限値を表している。これはテーパードファイバー作製時に伝搬効率を上げる目安となる。またビート長は入射する光の波長により変化するため伝搬する光の波長により、その都度適したテーパードファイバーを製作する必要がある。

#### 2.4 ファイバーの半径の変化

ファイバーの加工方法は左右のステージの速度を変えることで引き延ばしそれを往復させて複数回行うことで徐々にファイバーを細くさせた。このときの遅いほうのステージが動く距離を $L$ 、ステージ速度の比率を $\alpha$ 、 $n$ 回往復させたファイバーの半径を $r_n$ とする。このときのファイバーの模式図を図 2 に示す。

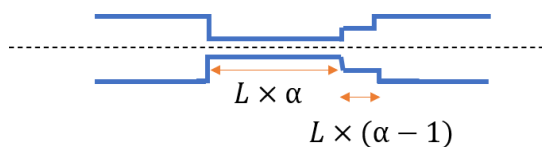


図 2.加工中のファイバー模式図

加工範囲のファイバーの体積は加工前と加

工後で等しいため加工前と加工後のファイバーの体積を比較すると

$$\pi r_0^2 L = \pi r_n^2 L \alpha + \pi \sum_{k=1}^n r_{k-1}^2 L (\alpha - 1) \quad (2.8)$$

が成り立つ。これより

$$r_n = \frac{1}{(\sqrt{\alpha})^n} r_0 \quad (2.10)$$

と求めることができる。しかし、実際に作成されるファイバーは曲線形状になるためテーパードファイバーの細くなり始める点を原点に伝搬方向に $z$ 軸をとり、縦軸を半径とした。 $z$ 軸に対する半径 $r(z)$ を考えると

$$\begin{aligned} r(z) &= r_0 \alpha^{-\frac{z}{2L}} \\ &= r_0 \alpha^{-\frac{z}{(\alpha-1)L}} \end{aligned}$$

となる。ここで $\gamma = (\alpha - 1)$ とおくと

$$\begin{aligned} r(z) &= r_0 \left[ (1 + \gamma)^{\frac{1}{\gamma}} \right]^{-\frac{z}{L}} \\ r(z) &\cong r_0 e^{-\frac{z}{L}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

となる。

### 3. 実験

#### 3.1 テーパードファイバーの作製

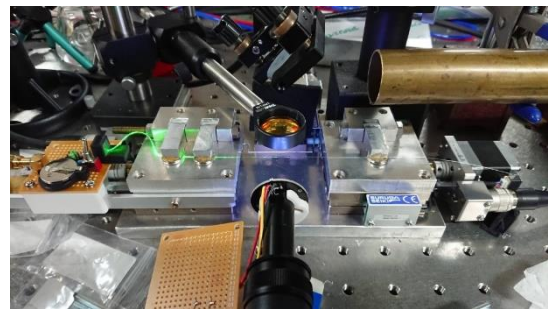


図 3.使用したファイバー加工機

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度は 0.73 度となっている。モーターを左右に平行に配置し、マグネットで光ファイバーを固定し、CO<sub>2</sub>レーザーで加工

を行った。

図1のモード変換が起きないための条件で最も厳しいテーパ角度の条件が半径が $15\sim 20\mu\text{m}$ のときであるため、最小半径が $20\mu\text{m}$ になるようなテーパードファイバーの作製を行った。行ったステージ動作を図4に示す。

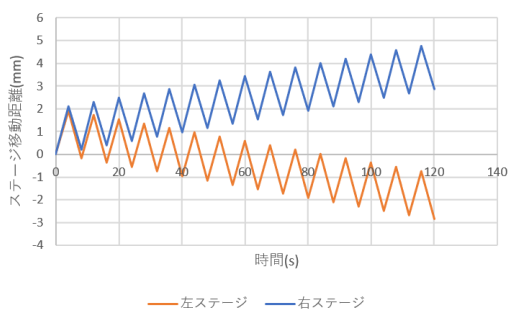


図4.ステージ動作

このとき左右のステージの速度を変えて複数回往復させることによって徐々にファイバーを引き延ばしていった。図3では左右のステージの速度比率は1.1倍にし、15回往復させた。一方向での移動で右と左のステージが合計4mm移動するように行った。

### 3.2 実験結果

作製したファイバーの透過光強度の変化と半径の変化を図5、6に示す。

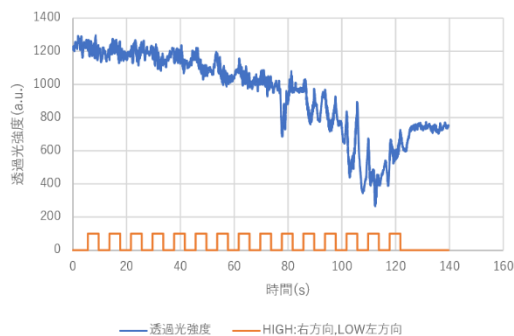


図5.透過光強度の変化

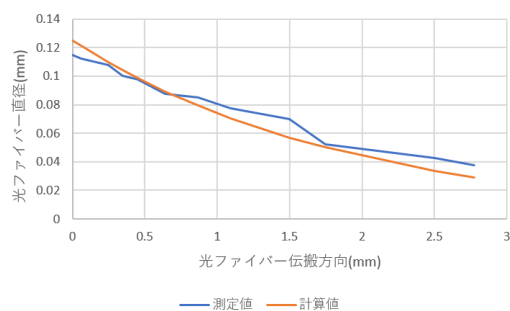


図6.ファイバーの半径の変化

図5より作成したファイバーの透過率は58.％となり、図6より最小部分の半径は $0.019\text{mm}$ となった。

### 4. 結論

作製したファイバーの透過率は58%、最小部分の半径は $0.019\text{mm}$ となった。より透過率を改善のために加熱範囲 $L$ を大きくしてテーパ角の急激な減少を防ぐ必要があるが、加工範囲を大きくすると機械的強度が下がるため、ファイバーの半径によって図1に従って $L$ を変える必要がある。図6で半径が小さくなるにつれて測定値の方が計算値よりも大きくなってしまっている。これはファイバーの直径が小さくなるにつれて加熱用の $\text{CO}_2$ レーザーによる加熱が不足が原因と考えられる。半径の変化による $\text{CO}_2$ レーザーの出力の調整も課題となっている。

### 5. 参考文献

- [1]光ファイバ通信入門改定5版 末松安晴・伊賀健一共著 オーム社
- [2]Kali P Nayak Mark Sadgrove, Eamachandrarao Yalla, Fam Lam Kein and Kohzo Hakuta “Nanofiber quantum photonics” J.Opt.20(2018)073001(52pp)
- [3]Mario Kreen, Mehul Malik, Thomas Scheidl, Rupert Ursin, Anton Zeilinger “Quantum Communication with Photons” pp455-482(2016)