

ガルボミラーを用いたテーパードファイバーの加工の平滑化および評価

森永研究室 原輝斗

1. 研究背景

現在の社会で利用されている光ファイバー通信では、光強度に情報を載せているため、第三者による盗聴が行われたとしても気づくことができない。このような危険から、新しい通信方式として量子光通信が提案されている。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、その変化から盗聴などを防ぐことができると考えられている。我々は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研究を行っており、そ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 光ファイバーとは

光ファイバーとは、石英ガラスやフッ化ガラス、プラスチックなどの素材でできた繊維状の物質であり、光を用いて情報を長距離に渡って伝達する際に用いる光の伝送路として利用されている。光ファイバーは現在の通信分野において主な伝送媒体になっている。

2.2 光ファイバーの構造

光ファイバーは石英ガラス、フッ化物ガラス、プラスチックなどの素材で作られる繊維状の物質であり、中心部にコア、その外側をクラッド、ク

ラッドの周囲を被膜が覆っている三重構造になっている。コア部はクラッド部に比べて屈折率が大きくなっているため、コア内に光を閉じ込めたまま全反射、屈折することで光ファイバー内の中心を通り伝搬していく。以下の図が光ファイバーの内部構造である。

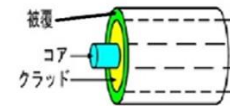


図 2.1 光ファイバーの内部構造

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熱し、引っ張ることで加工して先端を先細りさせた形状のファイバーである。ファイバーを先細りさせることで、先端部ではコアが無視できるほどに極めて細くなるため、先端部ではクラッドがコア、空気または真空がクラッドの役割を果たすことになる。

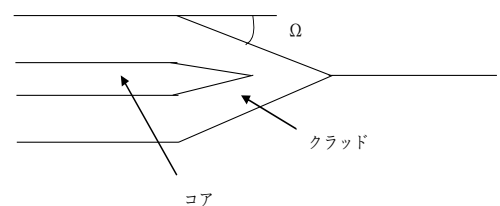


図 2.2 テーパードファイバーの形状

下図は横軸がファイバー半径、縦軸がテーパ角をとり、加工時にモード変換が断熱的になるためのテーパ角の上限値を表している。図中曲線が上限値となっており、ファイバー半径に

おけるテーパ角がこの曲線よりも上にある時はモード変換が非断熱的になり、下にある時は断熱的になる。

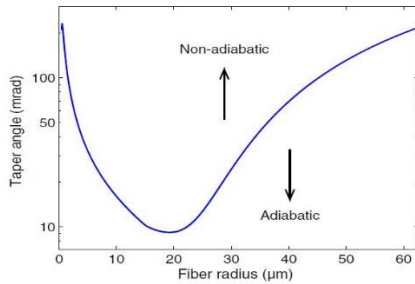


図 2.3 ファイバー半径におけるテーパ角の上限値[1]

2.4 ファイバー加工

テーパードファイバーは光ファイバーをCO₂レーザーで加熱しながら引っ張ることで製作することができる。

加工方法は、左右のステージを同じ方向に速度差をつけて振動させながら動かしていく。進行方向と同じ方のステージを逆側のステージより少し早く動き、徐々に延伸して加工してテーパードファイバーを作製していく。速さが遅い方のステージが動く距離を L 、ステージを動かす速さの倍率を α 、 n 回移動させたときのテーパ部分の半径を r_n とすると、ファイバー加工における模式図は以下である。

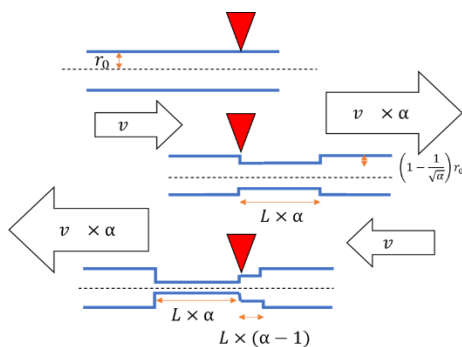


図 2.4 ファイバー加工の模式図

加熱によって延伸する前と後の光ファイバーの質量は保存されているため、加熱された部分のテーパードファイバーの体積は等しくなければならないことからファイバーの最終半径は

$$r_n = \frac{1}{(\sqrt{\alpha})^n} r_0 \quad (2.1)$$

となる。この式から最終的なファイバーの半径は左右のステージの速度比とステージの移動回数によって決定することが分かる。つまり、ステージの速度比と往復回数を変えることで、ファイバー半径を制御することができる。

3. 実験方法

3.1 実験手順

光ファイバーには、単一シリカファイバー（古川電工）を用いる。このときにレーザーを反射させるガルボミラーに三角波の制御電圧をかけて振動させ、ファイバーにCO₂レーザーを照射してステージを動かすことで加工する。

CO₂ レーザーを用いた光ファイバー加工と透過率測定の様式図を図 3.2 に示す。

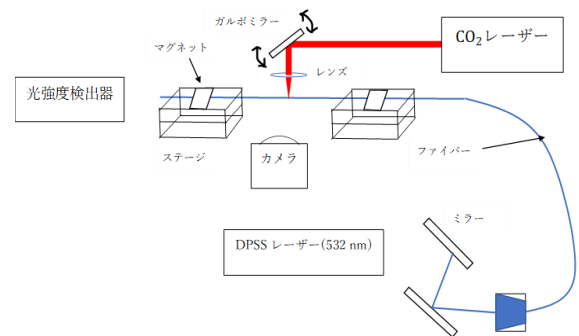


図 3.1 ファイバー加工の様式図

3.2 ステージ動作

ファイバーを加工する際、両ステージを同じ方向に移動させ、左右のステージに速度差をつけて振動させながら延伸を行った。

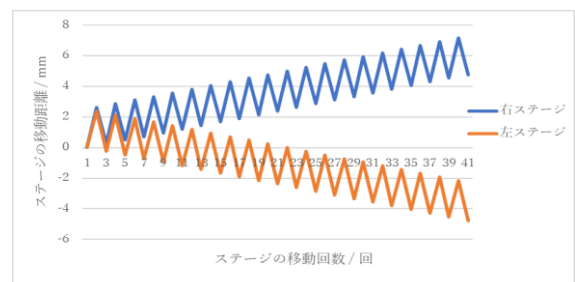


図 3.2 ステージ動作

ステージ動作は上の図 3.2 である。左ステージと右ステージの速さの比率は 1.1 倍とし、パルス間隔を $3000\mu\text{s}$ 、送信する総パルス数を 2500、往復回数を 20 回に設定した。ただし、ステージが右側に動く時を移動距離の正の向きとした。また、ガルボミラーを振動させないと図 2.4 のような階段状になってしまう。このような形状であると、段差のところで断熱条件が満たされないため光の損失が発生すると考えられる。以上のことからこのステージ動作で、図 3.2 のミラーに 0 V, 1.0 V, 3.0 V の 3 種類の電圧をかけて振ることでファイバーの平滑化を行い、加工をした。

4. 実験結果

まず初めに、ミラーに 0 V の電圧をかけた時のファイバー直径の変化のグラフと透過率変化のグラフを以下の図 4.1, 図 4.2, に示す。

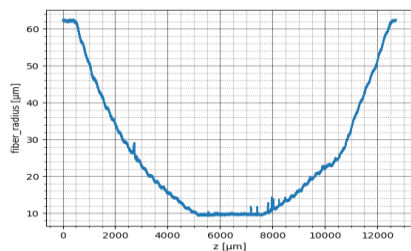


図 4.1 0V のときのファイバーの半径変化

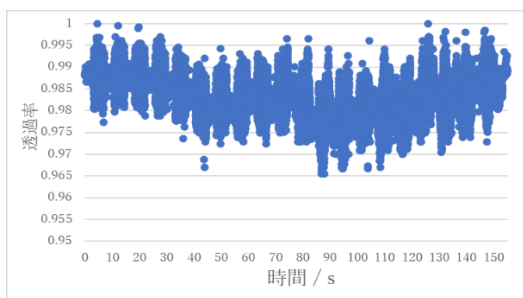


図 4.2 0V のときの時間変化による透過率

次に、ミラーに 1.0 V の電圧をかけた時のファイバー直径の変化のグラフと透過率変化のグラフを以下の図 4.3, 図 4.4 に示す。

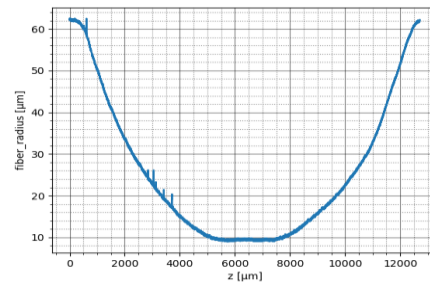


図 4.3 1.0V のときのファイバーの半径変化

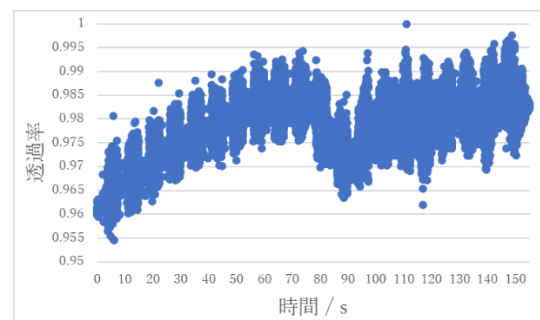


図 4.4 1.0V のときの時間変化による透過率

最後に、ミラーに 3.0 V の電圧をかけた時のファイバー直径の変化のグラフと透過率変化のグラフを以下の図 4.5, 図 4.6 に示す。

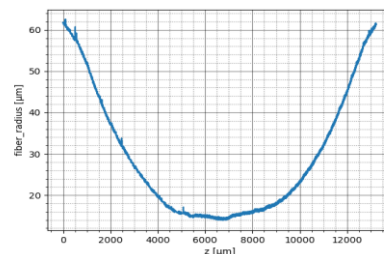


図 4.5 3.0V のときのファイバーの半径変化

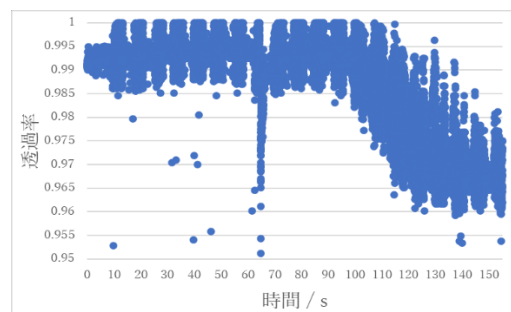


図 4.6 3.0V のときの時間変化による透過率

式(2.1)を用いて加工したファイバーの半径の計算値と実験値を比較する。

まず式(2.1)から速度比は 1.1、ステージの移動回数は 40 回、加工前のファイバーの直径は 125 μ m であるので

$$r_{40} = \frac{1}{(\sqrt{1.1})^{40}} \times 62.5$$
$$= 9.29 \mu\text{m}$$

以上の値を表にまとめると以下の表 1 になった。

表 1 ミラーの電圧変化によるファイバー半径の実験値と理論値

ファイバー半径/ μ m		
ミラーに加えた電圧/V	実験値	計算値
0	10.0	9.29
1.0	9.80	
3.0	14.3	

次にガルボミラーに加えた電圧によって測定した透過率の変化をまとめると以下の表 4.2 となった。

直径の変化のグラフは click measure を使用してファイバーの直径を 125 μ m であることを利用してピクセル数から直径を求めた。

表 4.2 ガルボミラーに加えた電圧による透過率変化

ミラーに加えた電圧	透過率 / %
0	98.9
1.0	98.3
3.0	99.2

5. まとめと今後の展望

ミラーを振らなかったときの図 4.1 から分かるようにファイバーの直径変化のグラフから凸凹になっているので、ファイバーのテーパー部分が階段状になってしまっていることが視覚的に分かる。この段差になってしまっている部分で非断熱的になり、光のモードが遷移してしまうことで光の損失が発生してしまうと考えられたが、表 4.2 から分かるようにガルボミラーを振らなかった 0 V の時の透過率はガルボミラーを振ったときと比べて低くなると予想していたが、結果はほとんど変わらない値となった。これは透過率測定の際にファイバーの中に入れるレーザー光が温度変化により、強度が変化してしまうことで測定される透過強度が変わってしまうことでこのような結果が引き起こされているのではないかと考える。これは透過率を求める際の入射される光の強度 I_0 と透過されてくる光の強度 I を同時に測定しているためであるので、レーザー光をファイバーの中に入射させる前に、光を 2 つに分けて片方を I_0 として読み取り、もう片方をファイバーに入射させて I として読み取る必要があると考える。

参考文献

[1]S. Ravets, J. E. Hoffman, P. R. Kordell, J. D. Wong-Campos, S. L. Rolston, and L. A. Orozco "Intermodal energy transfer in a tapered optical fiber: optimizing transmission" Vol 30, No. 11, November 2013

[2] Kali P Nayak Mark Sadgrove, Eamachandrarao Yalla, Fam Lam Le Kein and Kohzo Hakuta "Nanofiber quantum photonics" J.Opt.20(2018)

[3]修士学位論文 「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」 大草聖也 基盤理工学専攻 物理工学プログラム 令和 1 年度

[4]卒業論文 「単一光子伝送実現のためにテーパードファイバーの作製と評価」 相馬康人 基盤理工学専攻 物理工学プログラム 令和 2 年度

[5]Mario Krenn,Mehul Malik, Thomas Scheidl, Rupert Ursin,Anton Zeilinger "Quantum Communication with Photons" pp455-482(2016)

[6] Zhihai Liu,Chengkai Guo, Jun Yang, and Libo Yuan" Tapered fiber optical tweezers for microscopic particle trapping: fabrication and apprication" Optical society of America (2006)

[7] G.Brambilla"Optical fibre nanowires and microwires : a review" J.Opt.12 (2010) 043001 (19p)