

コイルを用いた切断装置による

テーパードファイバーチップの作成

森永研究室 霍洋克

1 背景と目的

量子暗号通信とは、光の最小単位である光子に情報を乗せて行う通信のことであり、安全性がかなり確保されている。[1]

量子暗号通信では単一発光体から放出された光子をファイバーに結合させる必要があるが、単純に光ファイバー端の中央に単一光子源を装着するだけでは、結合するのは僅かである。そこで、光ファイバーをテーパード状に引き伸ばして加工することで、結合効率を大幅に向上させることが出来る。本研究では、理想的なコア半径(約 $0.5\mu\text{m}$)に近づけられるようなファイバー加工を目指す。

2 原理

2.1 テーパードファイバー

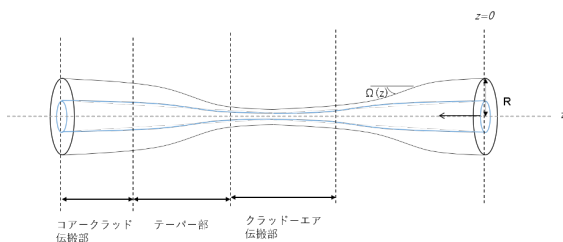


図1 テーパードファイバーの概略図[2]

図1のように、テーパードファイバーは光ファイバーの一部の断面の半径を細くしたものであり、コア-クラッド伝搬部、テーパード部、クラッド-エア伝搬部の三つに分けられる。コア-クラッド伝搬部では、コアとクラッドの屈折率の違いにより、コア内に光が閉じ込められて伝搬していく。また、テーパード部は細くする過程で生じ、光ファイバーの半径が細くなっていく部分である。この際、コアだけでなくクラッドも同様に細くなっていく。[3]

2.2 テーパードファイバーチップ

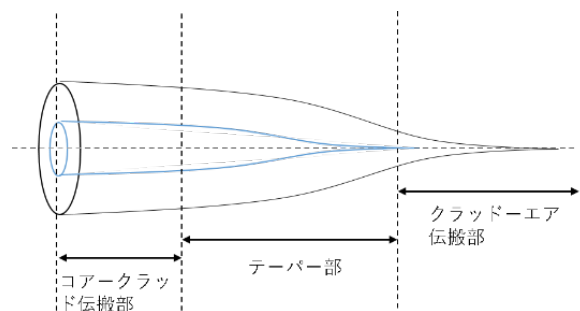


図2 テーパードファイバーチップの概略図[2]

図2は、テーパードファイバーを断面の半径が最も小さい所で切断した

ものである。これを、テーパードファイバチップと呼ぶ。

2.3 ファイバー内への光の結合

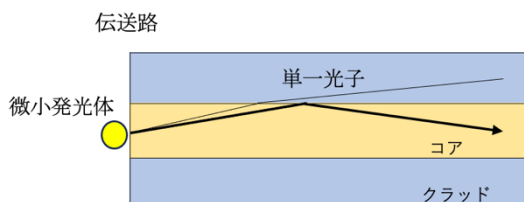


図3 ファイバーへの光子の入射の様子

通常の光ファイバーの端に微小発光体を置いた場合、図3のように、一部の光子は全反射し、ファイバー内部に閉じ込められるが、その他はクラッドの外側から漏れ出し、損失なる。この時の集光率は約1%である。

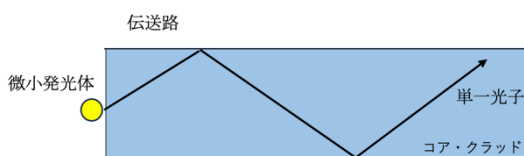


図4 テーパードファイバチップへの光子の入射の様子

それに対し、テーパードファイバチップの場合は、コアとクラッドが一体となっており、空気の屈折率(1)とコア・クラッド内の屈折率($1.45 > \sqrt{2}$)より、ファイバー内に入った光子は必ず伝搬し、その集光率は約50%になると考えられる。

2.4 断熱条件

テーパの形状によって、テーパ内での伝搬モードの変換は大きく異なる。図4において、テーパ角度 $\Omega(z)$ が非常に大きいと、モード変換は非断熱的になってしまい、損失が発生する。逆に、テーパ角度 $\Omega(z)$ が小さい場合、モード変換は断熱的になる。

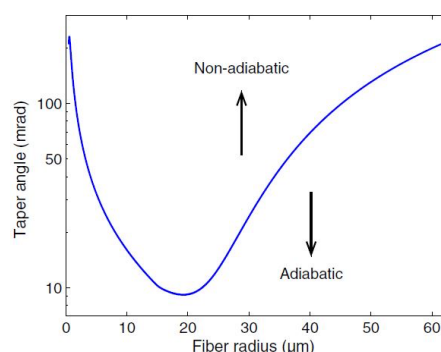


図5 テーパ角の断熱性[2][4]

図5はモード変換が断熱的となるためのテーパ角度の限界値を表しており、横軸がファイバー半径、縦軸がテーパ角度である。青線より上の Non-Adiabatic 領域ではファイバーを変化させると、モード変換は非断熱的になる。逆に、グラフの青線より下の Adiabatic 領域でファイバーを変化させると、モード変換は断熱的になる。 [4][5]

3 実験

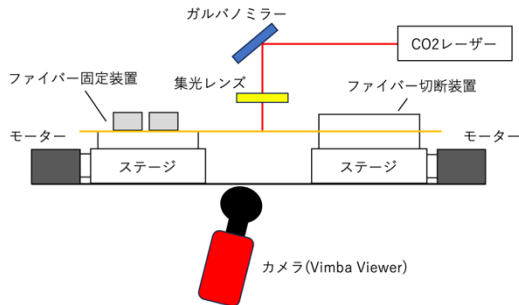


図6 加工装置の概略図

図6は加工装置の概略図である。両側のステージ上に光ファイバーを固定し、CO2レーザーを集光して加熱する。そして、両側のモーターを動作させてステージを動作させ加工を行う。

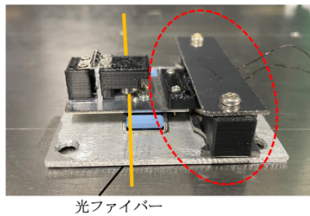


図7 コイルを用いた切断装置

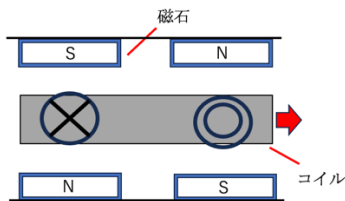


図8 切断装置の動作原理

また、図7は実際に作成したコイルを用いた切断装置である。動作原理

は図8の通りである。

更に、ファイバーの透過によるファイバーの温度の低下を防ぐため、以下のようにステージ動作による加工と切断装置による加工に二段階に分けて加工を行う。

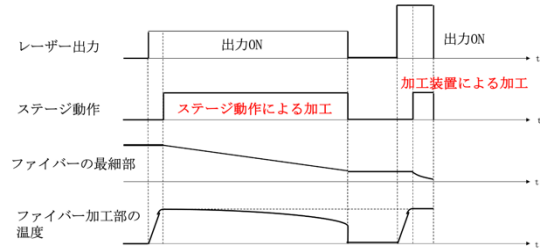
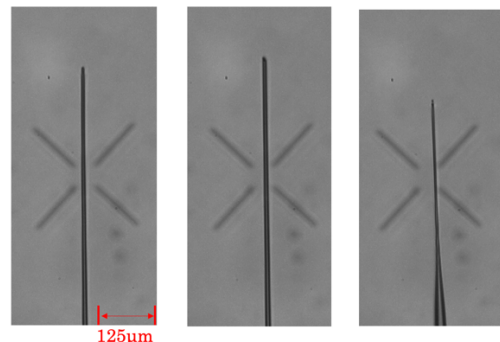


図9 加工の流れ

4 結果

直流電源の設定を① 設定電圧：5V、設定電流：10A ② 設定電圧：8V、設定電流：10A ③ 設定電圧：8V、設定電流：30A の三種類に分けてファイバーの加工を行った。なお、CO2レーザーの出力は6.25Wに設定した。それぞれの加工結果は以下のようになった。



① 設定電圧：5V 設定電流：10A ② 設定電圧：8V 設定電流：10A ③ 設定電圧：8V 設定電流：30A

図10 それぞれの加工結果

また、加工後のファイバーの先端を画像処理してグラフに表すと以下のようになる。

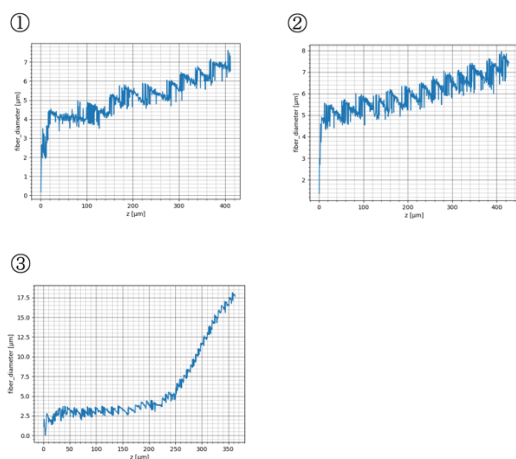


図 11 それぞれの画像処理結果

グラフより、加工後の先端直径は① $3.8\mu\text{m}$ 、② $4.9\mu\text{m}$ 、③ $2.5\mu\text{m}$ となった。①、②より、設定電圧を上げたのに、コア半径は小さくはならなかったことが分かる。これは、電源の保護回路によって、出力電圧が大幅に低下し、①と②のコイルにかかる電圧（切断装置の速度）がほとんど変わらなくなってしまったことが原因であると考えられる。

5 まとめと今後の展望

今回の実験では、新たにコイルを用いた切断装置を作成し、ファイバーの加工を行った。その結果、理想的な細さまで加工することは出来なかったが、比較的細く加工することが出来た。しかし、電源の保護回路により、コイルへかかる電圧が減少し

てしまい、切断装置の速度が落ちてしまった。そのことにより、外的要因による影響が大きく出てしまい、理想的な加工を行うことが出来なかった。

今後の展望としては、切断装置動作時の速度測定装置を開発し、加工結果の要因を明確にすることや、CO2レーザーの出力変化やコイルの設定電圧を調整し、より先端を細く加工することを目標にする。そして、最終的には、微小発光体を取り付け、単一光子状態の検証を目指す。

参考文献

- [1] 'Quantum communication with photons' Thomas Scheidl and Anton Zeilinger, Optics in Our times, 2007, P. 455-482
- [2] '微小発光体と結合させるためのテーパードファイバーチップの作製と評価', 森永研究室 相馬康人, 2023
- [3] 'Nanofiber quantum photonics', Nayak, K.P., et al, Journal of Optics, 2018, 20(7)
- [4] 'Intermodal energy transfer in a tapered optical fiber: optimizing transmission', Ravets, S., et al, J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2013, 30(11), P. 2361-2371
- [5] 'Optical fibre nanowires and microwires: a review, Brambilla, G, Journal of Optics, 2010, 12(4)