CO2 レーザーによるテーパード ファイバーの作製と評価

森永研究室 ZHOU CHENGGONG

令和6年3月8日

1背景と目的

単一光子源は一度に一つの光子を生成す る光源であり、通常特定の物質や特殊な装 置を使用して生成され、 高い制御性と精度 が求められる. 単一光子源は量子暗号通信. 量子コンピュータや量子光情報科学におけ る多くの応用に不可欠なものである。その 中の量子暗号通信は、光ファイバーを利用 する一般的な通信方式とは異なり、単一光 子を使用して通信のセキュリティを強化す ることができる. 光ファイバーにおける通 信では、情報は光の強度によって表現され、 一般的には公開鍵暗号方式が使用されてい る.しかし,量子暗号通信では,光の最小単 位である単一光子を活用することで、物理 的な盗聴に対する高い耐性を実現している. この技術の特徴は、量子力学の原理に基づ いて通信の安全性を確保している点にある. 通信過程での光子の状態を観測すると、そ れが変化し、その変化が通信の双方で検知 されるため, 第三者による盗聴が即座に検 知される.量子エンタングルメントと呼ば れる現象も利用され,通信の端末間で共有 される秘密鍵を安全に交換する. この物理 的な盗聴検知の特性により、量子暗号通信 は重要な機密情報のやりとりやセキュアな 通信に広く利用されつつである.光の最小

単位である単一光子の利用により、従来の 暗号方式に比べて高いセキュリティが確保 され、現代社会において通信のプライバシ ーとセキュリティを向上させる先進的な技 術となる[1].



図1量子暗号通信の概略図

本研究では単一光子光通信を実現させる ため、単一光子源を光の伝送路である光フ ァイバーに伝送する必要がある.光ファイ バーを CO2 レーザーにより加熱して延伸 し先細りさせると、先端部分で光の閉じ込 めが強くなりモード密度が高まる.ファイ バー先端直径が光波長程度の時にモード密 度が最大になりかつ単一モードである.フ ァイバー先端直径が光波長程度かつ断熱条 件を満たしつつテーパー部が最短となるよ うに光ファイバーの加工を目指す.

2 原理

光ファイバーは主に石英ガラスから構成 され,その構造はコア,クラッド,被覆の三 つの層から成り立っている. コアとクラッ ドの屈折率は工夫され, コアの屈折率が高 くなるように設計されている. これにより, 中心のコア部では光が全反射と屈折を繰り 返し, コア部の中心を通って光が伝搬され る. 被覆は主にプラスチック材料で構成さ れ,外圧による伝送損失を抑制し,熱や湿度 による強度特性の劣化を防ぐことができる. 光ファイバーのこの構造により, 高い信号 伝送性能が確保され, 通信やデータ伝送の 分野で広く活用される. その耐久性と信頼 性は, 様々な環境条件下での使用において 重要な役割を果たしている.

光ファイバー内に存在できる伝搬モード の数は規格化周波数Vによってきまる.この 規格化周波数は次の式

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = k_0 a n_1 (\frac{\Delta}{2})^{\frac{1}{2}}$$
$$= \frac{2\pi a N A}{\lambda}$$
(1.1)

で表すことができる. ここで $k_0 = 2\pi/\lambda$, a はコア半径, λ は光の波長である. これら のパラメーターは光ファイバーがシングル モードかマルチモードかを特定するための ものである. V<2.405 のとき,単一のモー ドの光のみが伝搬される. シングルモード ファイバーとマルチモードファイバーは主 にコアの大きさに起因している. 通常マル チモーファイバーのコア半径aはおよそ 25~30 μ m であるのに対し,シングルモー ドファイバーを実現するのに必要な半径は 2~4 μ mである.

テーパードファイバーは光ファイバーの 断面の径を細くしたものであり,細くする 過程で左右のテーパー部分が生じる.図1 はテーパードファイバーの概略図を示して おり,コアークラッド伝搬部,テーパー部, クラッドーエア伝搬部の三つに分けられる. コアー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領域となり,テー パー部では光ファイバーの径が細くなって いく部分である.テーパー部で細くなるに つれてコアだけでなくクラッドも同様に細 くなっていく.半径 19.43µm あたりから コアが小さくなりすぎ基本の伝搬モードを 支えることが出来なくなっていく.そうし ていくと光は徐々にクラッドに漏れていき, 図1のクラッドーエア伝搬部ではクラッド と空気界面の屈折率の違いによってクラッ ド内に光が導かれる.[2]



2.1 断熱基準

テーパー中の伝搬モード変換はテーパー の形状に強く関係している.図2のテーパ ーの角度Ω(z)が大きすぎる場合,モード変 換は非断熱的になり,損失が観測される.逆 にテーパーの角度を小さくするとテーパー 中のエネルギーが基本モードにとどまり, モード変換はより断熱的になる.角度Ωを用 いてテーパー部の長さz_tを表すと

$$z_t = \frac{R}{\tan(\Omega)} \tag{2.1}$$

となる.ここでRはテーパー部でのファイバ ー半径(クラッド半径)である. Rにおける二 つのモード間のビート長z_bは $z_{b} = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{2\pi}{\beta_{1} - \beta_{2}} = \frac{\lambda}{n_{eff.1} - n_{eff.2}} (2.2)$ で表される. ここで β_{1} は半径Rにおける基本 モードの伝搬定数で β_{2} は同じ対称性を持つ 第一励起モードの半径Rにおける伝搬定数 である(EH11). テーパーファイバーのテー パー長がビート長に比べて十分に長い時 $(z_{t} \gg z_{b})$ にはロスが少なくなり,ファイバ ー中のモード変換は断熱的になる. 図 2 に モード変換が断熱的になるためのテーパー 角の限界値を示す.



図2ファイバー半径におけるテーパー角の 断熱性[3]

図 2.2.2 は横軸がファイバー半径,縦軸は テーパー角度になっていて,モード変換が 断熱的となるためのテーパー角度の限界値 を表している.このグラフは式(2.1)と (2.2)において $z_t = z_b$ となるときの計算結 果となっている.

$$\Omega(z) = \frac{r(\beta_1 - \beta_2)}{2\pi}$$
(2.3)

となるときである. グラフの青線よりも大 きいテーパー角度でファイバーを変化させ たときモード変換は非断熱的になり, グラ フの青線よりも小さいテーパー角度でファ イバーを変化させたときモード変換は断熱 的になる.図2は伝搬効率を上げるための 目安となる.また,式(2.2)より入射波長に よって断熱角度が変化するため,伝搬させ る光の波長に適した光ファイバーの加工を 行う必要がある.[3]

2.2 先端直径

テーパードファイバーチップはテーパー ドファイバーの最も半径が小さい部分で切 断したコーン状または円錐状のような形状 のものである.テーパードファイバーチッ プの概略図を図に示す.



図3テーパードファイバーチップ概略図

単一光子発信機からシングルモード光フ ァイバーへの光子のナノファイバーチップ にカップリングした時は図 4a に示したよ うにナノファイバーチップの半径が α ,光 源からファイバー軸の距離をr,ファイバー への距離をzとした.図4bでは,ナノフ ァイバー半径 $\alpha = 0.32\lambda$, r=z=0の時,カ ップリング効率を最も高く38%であること を示した.さらに金属ミラーを使用すると, 効率が76% まで向上した.シリコン導波 路を使用すると,効率がさらに87% に向 上した[4].



ド光ファイバーへ入射させたときのカップ リング効率と光ファイバー半径の関係 [4].

3 実験

テーパードファイバーチップの作製のため,光ファイバーの加工が行われた.使用 したファイバー加工機の概念図を図5に示 した.



図5光ファイバー加工機の概略図

ステッピングモーター(駿河精機)を左右 に配置し,左のステージ上部には光ファイ バーを固定するための溝があり,溝に沿う ようにファイバーを設置し,マグネットに よって固定している.右ステージの上には ソレノイドの先に3Dプリンターで作成し たキューブの形状の物の中に金属板バネが 入っていてこの金属板バネによって固定を 行っている.板バネの上部にも溝がついて いて,平行になるように設置を行う.ステ ッピングモーターで左右のステージの速度 と移動距離を Arduino で制御した.

ファイバーを加工するためにはファイバ

ーが軟化する程度まで加熱を行う必要があ るため加熱するために本実験では CO2 レ ーザーを用いて加熱を行った CO2 レーザ ーを用いた加熱方法は出力を容易に制御で き,気流やそのほかの湯意外な物質の影響 をファイバーに与えない.ソレノイドはフ ァイバーの直径が小さくなるにつれて加熱 用の CO2 レーザーの吸収が減ることで加 工に必要な温度を保てなくなるため,切断 する際に温度が低下する前に一気にファイ バーを引いて切断するために用いた.



図6光ソレノイドの写真

4 結果

テーパードファイバー加工中の光透過率を 調べるため、図7に示したように532nm レーザーをファイバーの一端から入射させ て、もう一端から出力を図った.



図7透過光強度測定のための実験系

加工中の 532nm レーザーの光の透過率 は下の図 8 に示したようになった.ファイ バー直径におけるテーパー角の断熱性によ って,ファイバー直径が 20µm になるとき に損失が最も少ないことである.そのとき のファイバー光透過率が 96%に上がった.



ステージで加工したファイバーの直径は10 μ m 程度になったとき、ファイバーがそれ 以上細くならなかった、図9に示した.



図9加工したファイバーの写真

原因と考えられるのはファイバー 直径が 10µm 程度なると CO2 レーザーがファイ バーに透過するようになり温度が低下する. 対策としてはファイバーの直径を約 20µm まで加工した後,ステージを停止, CO2 レ ーザーの再び出力 ON,十分溶けた状態で, ソレノイドを使って素早く引っ張る. CO2 レーザーの再び出力 ON からソレノイドを 引っ張る時間を Δt として, CO2の出力を P とした.まず CO2 レーザーON にしてか らソレノイドの動作させる遅延時間 Δt を Oms から 100ms まで,変えて加工を行った. 結果を図 10 に示した.加工したファイバー 直径が 10μm より細くならなかった. 原因 は加熱のパワー不足だと考えられる.



ソレノイドを動作させる前の加熱, CO2
レーザー出力(元は 3.0W である)を
8.0W から 10.0W に上げて加工した. CO2
レーザー出力が 8.75W (35%)より大きい
時,加工したファイバー先端直径が 10 µ m
より細くなった図 11 に示した.



図 11 加工したファイバー直径

図 11 の実験結果を比較すると CO 2 レーザ ーの出力を 9.25W, 10.0W にしたときファ イバー先端の直径が 1 μ m 程度になって, 8.75W の 5 μ m に比べて目標の先端直径に 近くなった.また,図 3.2.26 のファイバー 全体の直径を比べると,10.0W のときの先 端部分が長く引き伸ばされ,約 1mm とな って,テーパー長が 3.5mm となり目標のテ ーパー長より長くなった. CO 2 レーザーの 出力を 9.25W にした時の結果は先端直径が 1μ m 程度で,テーパー長が 2.5mm,ファ イバー直径が 20 μ m近くではテーパー角度 が小さくて断熱条件を守られ,損失が少な くシングルモードで伝搬されると考えられ る[3].従って,図 11 の CO 2 レーザーの 出力を 9.25W にした時の結果は望ましいテ ーパードファイバーチップ考えられる.図 12 に示したのは CO 2 レーザーの出力を 9.25W にした時のファイバー全体の写真で ある.



5まとめ

本研究では単一光子光通信を実現させる ため、単一光子源を光の伝送路である光フ ァイバーに伝送する必要がある.光ファイ バーを CO2 レーザーにより加熱して延伸 し先細りさせると、先端部分で光の閉じ込 めが強くなりモード密度が高まる.ファイ バー先端直径が光波長程度の時にモード密 度が最大になりかつ単一モードである.フ ァイバー先端直径が光波長程度(0.5µm程 度)かつ断熱条件を満たしつつテーパー部 が最短となるように光ファイバーを目指し て、加工を行った[4].

先行研究のファイバー加工方法にしたが って,ファイバーの直径を 20 µ m にし て、そのときの光透過率を96%にあげ
 た.また、ソレノイドの使用により、先端
 直径 1.0 μm、テーパー長が 2.5mm のテー
 パードファイバーチップを作製することが
 できた。

6 今後の展望

今後目標先端直径 0.5µm 程度に加工す るには、ソレノイドの改良が必要と考えら れる.現在使用されているソレノイドの速 度と移動距離が調節できなく、先端直径の 加工は CO2レーザーの出力で制御してい た.ソレノイドの改良により、速度・移動距 離と先端直径の相関性が調べられ、より望 ましい先端直径が加工できると考えられる. また、テーパードファイバー加工中での断 熱性をもっと詳しく評価する必要があると 考えられる.先端直径が 0.5µm 程度かつ断 熱条件が守られるテーパードファイバーを 作成できたら、量子ドットと結合させ、単一 光子状態ができているか相関計測を行って 確かめる

参考文献

1. Mario Krenn, M.M., Thomas Scheidl and Anton Zeilinger, Quantum communication with photons. Optics in Our times, 2007: p. 455-482.

2. Nayak, K.P., et al., Nanofiber quantum photonics. Journal of Optics, 2018. **20**(7).

3. Ravets, S., et al., Intermodal energy transfer in a tapered optical fiber: optimizing transmission. J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2013. **30**(11): p. 2361-71.

4. Chonan, S., S. Kato, and T. Aoki, Efficient single-mode photon-coupling device utilizing a nanofiber tip. Sci Rep, 2014. **4**: p. 4785.