微小発光体を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

#### 1. はじめに

量子情報工学における多くの応用に単一 光子源は必要不可欠なものである。その中 でも光子に情報を乗せて行う量子暗号通信 は単一発光体から放出された光子を効率よ く単一モードファイバーの伝搬モードと結 合させる必要がある。単一の量子エミッタ からの光子を効率よく単一空間モードに結 合させる方法はいくつかあるが、これらで 集めた光子をさらに単一モードファイバー に結合させるとそこで損失が発生する。

現在単一モードファイバーの結合への追 加損失を防ぐために単一モードファイバー の伝搬モードに単一光子を直接結合させる 手法として、ナノファイバー上に発光体を 配置し、そのナノファイバーの近傍上のエ バネッセント領域からファイバー内へ光子 を導く方法が用いられている[1]。しかし、 ナノファイバーは空気中の埃や塵などの汚 染に弱いため、クリーンルームを用いる必 要があり使用できる環境が限られる。

本研究はナノファイバーのウエスト部分 で切断したような形状であるテーパードフ ァイバーチップを作製し、その先端に発光 体を付着させることで発光体と単一モード ファイバーの伝搬モードを直接結合させた デバイスを作成することを目指した。本研 究で作成するテーパードファイバーチップ はテーパー長を最小とすることで、環境を 選ばずに手軽に用いることが出来る単一光 子源を作ることで量子暗号通信の実験に役 立てることを目標としている。

## 2. テーパーファイバー

テーパー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 20 µ m 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、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。[1]



図1 テーパーファイバー概略図

#### 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1のテーパ ーの角度Ω(z) が大きすぎる場合、伝搬過程 はは非断熱的になりモード変換が起きて、 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。ここで角度Ωを用いてテーパー 部の長さz<sub>t</sub>を表すと

$$z_t = \frac{R}{\tan(\Omega)} \tag{1}$$

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<sub>b</sub>は

$$z_b = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{2\pi}{\beta_1 - \beta_2} = \frac{\lambda}{n_{eff.1} - n_{eff.2}} \quad (2)$$

で表される。ここで $\beta_1$ は半径Rにおける基本 モード(HE11)の伝搬定数で $\beta_2$ は同じ対称 性を持つ他のモードの半径Rにおける伝搬 定数である。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 ー中のモードは断熱的になる。図2にモー ド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断熱条件[2]

図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、モードが断熱的と なるためのテーパー角度の上限値を表して いる。このグラフは式(1)と(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。 つまり

$$\Omega(z) = \frac{r(\beta_1 - \beta_2)}{2\pi} \tag{3}$$

となるときである。グラフの青線よりも大 きいテーパー角でファイバーを変化させた ときモードは非断熱的になり、グラフの青 線よりも小さい角度でファイバーを変化さ せたときモードは断熱的になる。

図2は伝搬効率を上げるための目安となる。



図3 半径による伝搬モードの実効屈折率 [2]

図3はファイバー半径における各モードの 実効屈折率を表している。単一モードファ イバーの伝搬モードが矢印のついている HE11モードである。図2と図3を比較す ると断熱条件のテーパー角度の上限値が大 きいところでは HE11モードとほかのモー ドと離れているためエネルギーが移動しづ らく、テーパー角度の上限値が小さいとこ ろでは HE11モードとほかのモードが密集 しているため、ほかのモードに移動しやす い。また式(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。

テーパードファイバーチップはテーパー ファイバーの最も半径が小さい部分で切断 したような形状で先細りしている。テーパ ードファイバーチップの概形を図4に示す。



図4 テーパードファイバーチップ概形図

このテーパードファイバーチップと発光体 との結合率は数値シミュレーションから求 められ、この結果を図5に示す。



図5 チップ先端の半径aによる発光体との 結合効率[3]

図 5 から先端半径を発光体の発光波長の 0.32 倍にすることによって最大の結合効率 である 38%を得ることが出来る。

# テーパードファイバーチップの作製 3.1 ファイバー加工機

テーパードファイバーチップの作製にあ たり使用したファイバー加工機の概略図と 実際に使用したファイバー加工機の写真を 図 6、7 に示す。



図6 ファイバー加工機概略図



図7 ファイバー加工機

まず、ファイバーを加工するためには軟化 できる程度まで加熱する必要があり、本実 験では出力を容易に制御でき、集光するこ とによって局所的な加熱ができる CO2 レ ーザーを用いた。ファイバーを固定するた めの左右のステージの横にはステッピング モーターを配置し、モーターを Arduino で 制御することでステージの移動速度と移動 距離をコントロールした。ソレノイドはチ ップ作成時にファイバーを切断するために 用いた。ファイバー半径が小さくなるにつ れて放出する熱の割合が大きくなるため、 熱を放出する前に素早く引いて切断するた めにソレノイドを用いた。

#### 3.2 ファイバー加工方法

本実験で用いた加工方法は左右のステー ジを同じ方向に動かし、進行方向側のステ ージを少しだけ早く動かすことによって引 き伸ばし、往復させることで徐々にファイ バーの半径を行った。用いた加工法方法の 概略図を図8に示す。



作回数n-1回目、下図はn回目)

図 8 の様にステージが左側に動くときにス テージの移動距離をb倍させることによっ て、緑の矢印の長さ(次に半径の変化が生じ るまでの長さ)が $L_s \times (\alpha - b) \times b^n$ となる。 このbの値を調整することによって緑の矢 印の長さを制御することが出来ることから テーパー角の大きさを制御することが出来 る。今回作成するテーパードファイバーチ ップは右側のみを使用するため、ステージ を左側に動かすときのみ移動距離をb倍さ せた。

# 3.3 実験

3.3.1 ファイバー加工パラメータ 今回の実験に使用した 3.2 で示した加工方 法での移動距離の変化倍率bの変化と実験 でのパラメータのテーパー角の変化を図9、 図 10 にそれぞれに示す。



図9 加工中のbの変化



図 10 図 9 でのパラメータ設定値の角度変 化

テーパー長を最小化させるため、図 10 のよ うにの断熱条件の半径によるテーパー角の 上限値が大きいところでは角度を大きくす るためにbを大きくとることによってーパ ー角度Ω(z)を大きくさせ、テーパー角の上 限値が小さいところでテーパー角が小さく なるようにbを変化させた。遅い方のステー ジの移動速度v<sub>s</sub>は 0.162[mm/s]、速い方の ステージの移動速度は 0.171[mm/s]に設定 し、左右のステージの移動速度の比αは 1.05 とした。加工は四段階に分けて行った。設定 したパラメータを表1に示す。

$\backslash$	加工	初期b	一往復ご
	方法		とのbの
			変化
(1)	2	1.036	-0.001
(2)	2	1.018	-0.002
(3)	1)	1	0
(4)	2	1.007	+0.002

表 3.1 加工のパラメータ

計算値では第一段階(1)ではファイバー半 径が 62.5~42.3 $\mu$ m、第二段階(2)では 42.3  $\mu$ m~25.9 $\mu$ m、第三段階(3)では 25.9 $\mu$ m~18.4 $\mu$ m、第四段階(4)では 9.7 $\mu$ m の変 化となるようにパラメータの設定を行った。

#### 3.3.2 実験結果

3.3 で示したパラメータを用いたテーパ ードファイバーチップの半径の変化の計算 値と実験値、上限角から求めた半径の変化 のグラフを図 11 に示す。加えて実際に作製 したテーパードファイバーチップの写真を 図 12 に示す。



図 11 作製したファイバー半径の比較



図 12 作製したファイバーの写真 青線が図 2 の断熱条件のテーパー角の上限 値で加工した時のファイバー半径で、黄色 が実験値、緑が先ほどのパラメータでの計 算値を表していて、実験値と計算値を比較 すると今回の加工方法ではほとんど計算値 通りに加工を行えた。そして先端の半径は 3.8µmとなった。作製したテーパードフ ァイバーチップの先端の写真を図 13 に示 す。



図13 作製したファイバーの先端の写真

目標ではファイバー先端の半径をサブ波長 程度にすることだったが、最終的には 3.8 μmとなった。この原因として CO2 レー ザーの加熱が不十分なままソレノイドで引 いて切断しまったことが原因と考えられ る。

断熱的なテーパー角度で加工を行えてい るかを確認するために光ファイバーの一端 からレーザーを入射し、もう一端から出た 光の強度を測定しつつ、その間で光ファイ バーを加工することで加工中の透過光の強 度から透過光の強度の変化から断熱条件を 満たせているかを評価することが出来る。 透過率測定のための実験系を図 14 に示



図 14 透過率測定のための実験系の模式図

図 14 での実験系を用いて透過光の強度の 変化を測定した。実験結果を図 15 に示 す。



図 14 加工中の透過率の変化

図4では青線が透過率、オレンジの線がス テージの動作を表しておりそれぞれのパル スの塊が第一段階~第四段階までを表して いて、(1)~(4)の間ではパルスが High にな っているときにステージが右側に動いてい て、Low になっているときにステージが左 側に動いている。(4)の終了時ではすでに ファイバー半径が10µm以下になっていて、 切断前にファイバー半径をより細くするた めに右ステージのみを動かして延伸した。 そのあとはソレノイドを起動して切断を行 い、図 14 から最終的な透過率は 80%であ った。実際に作製したテーパードファイバ ーチップのテーパー角が断熱条件を満たせ ているかを確認する必要があるため作製し たファイバーのテーパー角の変化を図 15

に示す。求めたテーパー角は z 方向に 10 µ m ごとの半径の変化の平均値から角度を求 めたものである。



図 15 作製したファイバーの角度変化

図 15 から半径 20µm 付近のところでテー パー角が断熱条件の上限値よりも大きくな ってしまったことがわかる。図 14 の透過率 と比較すると第一段階(1)'と第二段階(2)で は透過率は大きく低下しておらず、第三段 階(3)で透過率が 85%程度まで減少し、第四 段階(4)で 80%程度まで低下してしまった ことから透過率の改善するためには第三段 階(3)と第四段階(4)でテーパー角をより小 さくとる必要がある。そして機械的強度を 強くし、汚染に強くするために、高い透過率 のままテーパー長を最小限に抑える必要が あるため、第一段階(1)と第二段階(2)の加 工ではテーパー角を今よりも大きくとる必 要があると考える。

## 参考文献

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

[2] 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.
[3] Chonan, S., S. Kato, and T. Aoki, Efficient single-mode photon-coupling device utilizing a nanofiber tip. Sci Rep, 2014. 4: p. 4785.