

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03818

研究課題名（和文）テーパ状光ファイバチップを用いた単一光子源の開発

研究課題名（英文）Tapered optical fiber tip coupled to single photon emitter

研究代表者

森永 実（Morinaga, Makoto）

電気通信大学・レーザー新世代研究センター・准教授

研究者番号：60230140

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：微小発光体からの光子を効率よく伝送路である単一モード光ファイバに結合させる簡便なインターフェイスを提供する。具体的にはファイバ端を滑らかなテーパ形状に加工し先端に取り付けた微小発光体からの発光の内ファイバ側に放出されたものを損失なく伝播モードに導く。従来このような意図で作られたテーパ形状は先端部が必要以上に長かったため機械的強度が低く汚れにも弱かった。これに対処するために加熱幅の狭いCO2レーザーを加工に用いたが、滑らかな加工が難しいこと、吸収長より細くなる領域で温度が低下し加工に必要な温度を保てないことの二つの技術課題それぞれについて解決または解決の糸口を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

単一光子の偏光状態を量子ビットとして用いる方式の光通信はセキュアな通信を行う量子通信として実用化に最も近い位置にあるが、その実装においては単一光子発光体からの光を伝送路である単一モード光ファイバに効率よく結合させる必要がある。本研究で採った手法はファイバ端の加工というシンプルな構成で比較的高い結合効率を得ることができ、かつ取り回しやすいものを提供する。このデバイスは微小微弱発光体の光ピックアップとしても実用的なものである。

研究成果の概要（英文）：We have developed a simple interface that couples photons from a micro emitter to the guided mode of a single mode optical fiber with high efficiency. One end of the optical fiber is smoothly tapered and photons from a small emitter attached at the tip emitted toward the fiber are guided without loss into the guided mode of the optical fiber. Such structures had already been fabricated, however they had excessively long thin part near the tip compared to the demand by the adiabatic condition, and thus were mechanically fragile and sensitive to the dirt. To deal with this issues, we used a focused CO2 laser beam as a heat source for the fabrication. Narrow heating width on the other hand makes smooth fabrication difficult. We scanned the laser with a Galvo mirror to make effective heating width wider for the part of the taper where adiabatic condition was critical.

研究分野：量子光学

キーワード：量子光通信 光ピックアップ

1. 研究開始当初の背景

今日インターネット上ではクレジットカード情報など秘匿性が重要となる様々な情報のやり取りが行われているが、秘匿性を担保する暗号化手法は「素因数分解は難しい計算である」ことを前提としたものが主に使われている。一方近年量子計算機の実用化に向けた研究開発が盛んに行われているが、量子計算機にとって素因数分解は難しい計算ではないため、セキュアな通信を行う上で脅威となりつつあった。新しい「量子耐性のある」暗号化の方法が探索される一方、物理法則が安全性を担保する量子通信の実現の模索も始まっていた。単一光子の偏光状態に情報を乗せる通信方式は様々な量子通信方式の中でも実用化に最も近い位置にあった。

2. 研究の目的

単一光子光通信の実装において単一光子源である微小発光体からの発光を効率よく伝送路である単一モード光ファイバーの伝搬モードに結合させるインターフェイスは鍵となる要素の一つであり、様々な方法が提案・研究されている。量子光学技術を結集した精緻なものもあるが、一方で簡便で手軽に扱えるものがあることも重要で本研究ではその開発を目指した。

3. 研究の方法

研究・作成対象のデバイスは光ファイバーの一端をテーパ状に加工したもので先端に微小発光体を配置して使用する(図1)。ファイバー端を単に切り落としたものだと結合効率は2%程度である。これは光ファイバーのコアとクラッドの屈折率差が小さいため軸方向にごく近い角度で入射した光しか全反射を起こさないからである。高い結合効率を得るためのテーパ形状には二つのポイントがある。一つは先端直径で光の波長よりやや小さい程度が要求され、そのとき空気との界面による閉じ込めによる伝搬が単一モードになる(それより細くても単一モードではあるがモードがファイバー外に大きく染み出すのでモード密度が低下する)。なおファイバー材料の屈折率は $\sqrt{2}$ を超えているので幾何光学的にはファイバー側に放出された光子(全立体角の50%)はすべて全反射条件を満たし(単一の)伝搬モードに入る。二つ目のポイントはファイバー径の変化すなわちテーパが十分緩やかなことで、その場合断熱定理によりモード間の遷移が抑制されるので光はテーパ中間部のマルチモードの領域を通過する間も常に最低次のモードに留まり続け最終的に加工されていない領域の伝搬モードに100%接続する。

このような発想によるデバイスは既に作られているがテーパ部の延伸加工にガストーチまたはセラミックヒーターといった加熱幅をあまり小さくできない熱源を用いていたため細い先端部が断熱条件の要求に比べて遥かに長く機械的に脆かつ汚れにも弱かった(文献1)。そこでこれらの弱点を克服するため本研究では加熱源に局所的に加熱できるCO₂レーザーを使い、扱いやすいデバイスの作成を試みた。

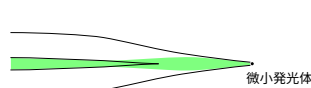


図1: テーパー状光ファイバーチップ

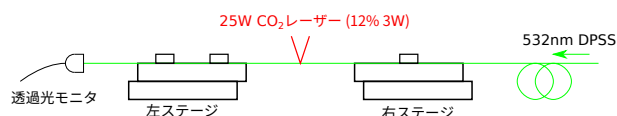


図2: 加工機の概略

4. 研究成果

加工は図2のように二つの自動ステージの間に張った光ファイバーに集光したCO₂レーザーをあてて加熱し、左右ステージを同時に往復動作させつつステージ間距離を徐々に広げてファイバーを延伸させるのが基本動作である。

(1) 任意形状のファイバーの作成

加熱幅固定の単純延伸ではファイバーに沿ったファイバー径の変化の関数形は \cosh のようになる。構築した加工機では自動ステージの移動および CO_2 レーザーの出力はマイコンによって制御されておりそのプログラミングによりある程度自由なファイバー径変化を実現できる。図 3 はそれぞれファイバーが均一な太さおよび円錐状になるようにプログラミングして加工した例である。

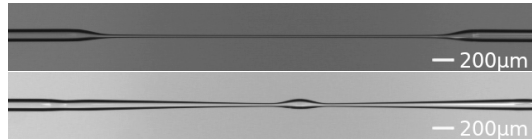


図 3: 均一径および円錐形状に加工した例

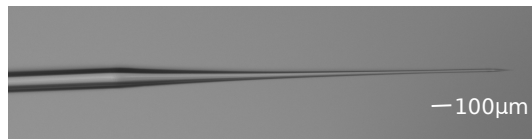


図 4: ファイバーチップの加工例

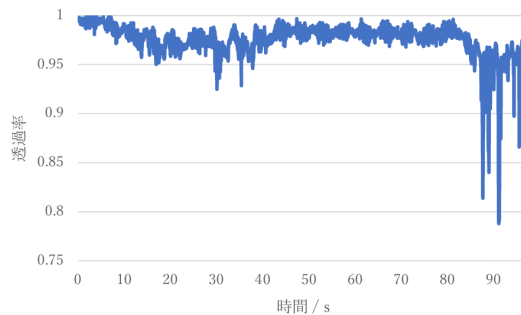


図 5: 加工中の透過率の変化

(2) ファイバー先端の微細化

ファイバー直径が CO_2 レーザーのおおよその吸収長である $10\mu\text{m}$ 程度以下になってくると加熱はレーザーが当たっている体積で効き、一方放熱は面積で効く要素があるため温度が低下し延伸が進まなくなる。レーザーの出力を動的に変えたりもしているがファイバーを磁力で急速に引いて温度が低下する前に切断する機構を加工機に付け加えた。図 4 はその加工例である。ただし引くタイミングが微妙で現状では先端直径は $4\mu\text{m}$ 程度とまだ改善する必要がある。

(3) テーパー形状の平滑化

集光した CO_2 レーザーによる加工は加熱幅が狭い分滑らかな加工が難しく、特にステージが折り返すときに階段状になりやすい。そこで集光レンズの直前に Galvo ミラーを配置し、断熱条件が厳しくなる半径 $20\mu\text{m}$ 前後の領域の加工ではレーザー光を振り実効的な加熱幅を広げることを行った。図 5 は加工中の光透過率の変化の様子であるが、加工後（切断直前）で 90%以上の透過率があり、これはデバイス全体の結合効率の最大理論値が 30%台であることを考えると十分な値である。

<参考文献>

- 1: T. G. Tiecke, K. P. Nayak, J. D. Thompson, T. Peyronel, N. P. de Leon, V. Vuletić, and M. D. Lukin, *Optica* 2, 70 (2014)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 森永実, 齊藤樹征, 相馬康人
2. 発表標題 微小発光体と結合するテーパ-状光ファイバ-チップの試作
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森永実, 相馬康人, 齊藤樹征
2. 発表標題 微小発光体と結合する光ファイバ-チップの最適形状とその製作
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 相馬 康人, 森永 実
2. 発表標題 微小発光体と結合させるためのテーパ-ドファイバ-チップの作製と評価
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------