

テーパファイバーによるモードフィルターの可能性

電子工学科 植田研究室 松島隆敏

1. 序論

近年、ファイバーレーザーの高出力化にともないモード選択や、モード制御など多くの研究のテーマとなりつつある。

当研究室では、重力波検出用干渉計の光源である fiber-MOPA の開発を行っている。

fiber-MOPA は、高出力・高安定という他に宇宙空間での動作も考え、小型化・機械的な安定性などの条件があるため、ファイバー増幅器によってその実現を目指していた。ハイパワー・ファイバー中の非線形効果 SBS の抑制を行うため、ラージモードエリア(マルチモード)での伝搬をし、その制御を主に“ファイバーの曲げ”によるモード制御で行っていた。しかし、曲げによるモード制御では、高次モードの抑制が不安定、偏光がゆらぐといった問題が生じていた。

本研究では、テーパファイバーの空間モードフィルター効果を用いてマルチモード伝搬してきた光を、高次モードを落としたシングルモードとして出射することを目的とした。

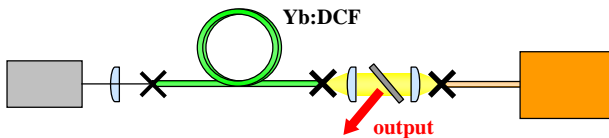


図1 fiber-MOPA の実験系

2. 原理

2.1 テーパーファイバーについて

テーパファイバーは、下図のようにファイバーの一部を熱して引っ張り、部分的に細く引き伸ばしたものであり、カップラー制御、エバネッセント場の発生などを行うために必要な素子である。



図2 テーパーファイバーの形状

ここで、テーパファイバーの図解を図3として、L を徐々に細くなっていくテーパファイバーが構成されている部分(tapered section)、w を最も細くなっている部分

(tapered waist)、 θ を徐々に細くなっていくその角度(tapered angle)とする。

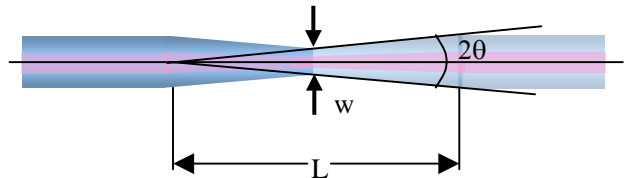


図3 テーパーファイバーの図解

テーパファイバーは、最も細い部分 w での V を 2.405 以下、つまりシングルモードだけが伝搬する条件にすることで、マルチモードで伝搬してきた光をシングルモードのみ通すフィルターの役割をする。また、V は以下の式で表わされる。

$$V = 2 \frac{\pi a}{\lambda} n_1 \sqrt{2 \cdot \Delta}$$

n_1 : コアの屈折率

$2a$: ファイバーのコア径

λ : 光の波長

Δ : コアとクラッドの比屈折率差

$$\Delta \left[\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \cong \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \right]$$

2.2 ダブルクラッドファイバー

高出力ファイバーレーザーを実現した技術的進歩は図4に示したようなダブルクラッドファイバーとクラッド励起の開発である。励起用 LD のビームは第1クラッド内をマルチモード伝搬し、次第に中心コアに吸収されて減衰する。この結果、ファイバーレーザーはクラッドとコアの断面積比に量子効率をかけたパワー圧縮を実現できる。

また、高出力ファイバーレーザー用の第1クラッドでは光通信のような同軸円形断面は不適切である。なぜなら、円形同軸ダブルクラッドファイバーでは、最初にコアに入射する光線は、反射してもコアに照射しつづけるので、効果的に吸収されずなくなってしまうが、一方、最初にコアを外れた光線は、いくら反射を重ねてもコアに遭遇することはなく吸収されないからである。そのため、ダブルクラッドファイバーの 1st clad には、図4

のようなD型や四角形や花びら型などが用いられている。

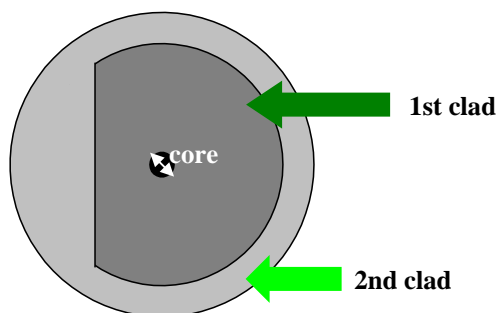


図4 ダブルクラッドファイバー断面図(D型)

本実験で用いたのも図4と同じD型のYb添加ダブルクラッドファイバーなので、そのファイバーのデータを以下の表にまとめた。

表1 使用したファイバーのデータシート

Core Diameter	25 ± 2.5 μm
Clad Diameter	250 ± 10 μm
Coating Diameter	400 ± 20 μm
Nacore	0.06 ± 0.01
Naclad	0.46
Yb-doping concentration	7252 ppm [mol%]
Coating Material	Low Index Polymer
Operating Wavelength	1060-1115 nm
Birefringence	2.0 × 10 ⁻⁴

3. 実験

3.1 テーパーファイバーの作成

テーパーファイバーの作成は、当研究室でも以前にやっていたが、そのときはCO₂レーザーでファイバーを熱して両端に重りをつけて引っ張って作っていたため制御が不十分で、テーパーファイバーの形状、再現性の問題などがあつた。今回は、ファイバーカップラー製造装置を使うことでコンピュータ制御し、再現性の良いテーパーファイバーを作った。

作ったテーパーファイバーのパラメータを表2にまとめた。

本研究では、コア径の細さによって徐々にモードが削られていく様子も確認したかったので、1.0~8.9 μmと幅広く作成した。また、テーパー部のコアは顕微鏡で側面からみることはできないので、コアとクラッドが同じ比率で延伸されていると考え、クラッド径から

計算した値とした。なおこのクラッド径とコア径は tapered waist のものである。

図2 作成したテーパーファイバー

クラッドφ[μm]	コアφ[μm]	L [mm]	θ	V
36	1	28	3.5	0.5
70	1.9	20	3.3	0.9
130	3.6	11.8	3	1.7
150	4.1	9.4	3	1.9
200	5.5	8.2	2.5	2.6
225	6.2	5.6	1.8	2.9
240	6.6	4.4	1.5	3.1
250	6.7	3.4	1.3	3.2
325	8.9	2.4	0.7	4.2

コア径から計算したVを見ると、1~4.1 μmでは2.405以下なので、シングルモードで伝搬すると考えられる。

3.2 ビームプロファイル測定1

作成したテーパーファイバーのコアモードが、コア径の違いによってどのように変化するか、CCDで出射光のビームプロファイルを見ることで確認した。その実験系を以下の図5に示す。

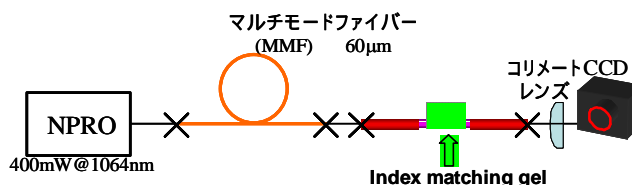


図5 ビームプロファイル測定の実験系

NPROのレーザー光をマルチモードファイバー(MMF)にカップリングさせ、一旦マルチモードとしてからテーパーファイバーに入射した。テーパーファイバーから出射された光のビームプロファイルは、コリメートレンズを通してCCDを見た。また、テーパーファイバーの両端はクリープした端面である。

コアモードだけを確認するのが目的なので、テーパー部にインデックスマッチングジェルを塗り、クラッドモードを除去してからCCDを見た。

この実験を、コア径1.0, 1.9, 3.6, 4.1, 5.5, 6.2, 6.6, 6.7, 8.9 μmのテーパーファイバーとテーパー無しのファイバーで行った。実験の結果が次ページの図6である。

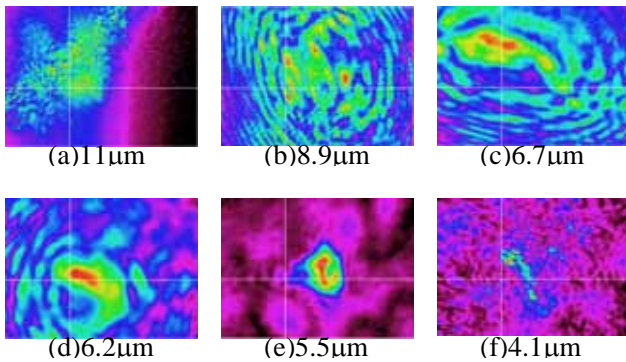


図6 各径でのビームプロファイル

コア径が細くなるにつれて、ビームプロファイルの山が減っているのがわかる。これはすなわち、モードの数が減っているとも言える。この結果から、(d)・(e)がシングルモードに近い形であるのがわかる。

また、(f)以下の径では、光がほとんど伝搬せずビームを見ることが困難だったため省略した。これは、コア径が細すぎてコアモードに大きな損失を与えているため光がほとんど伝搬しなかったからだと考えられる。

3.3 ビームプロファイル測定 2

最もシングルモードに近いビームプロファイルを得た 5.5, 6.2 μm のテーパファイバーを対象として、コアモードをよりはっきり見ようと実験した。

方法としては、出射端面の研磨、コリメート後にアイリスを入れることを行った。

クリープした端面では、ファイバーが欠けてしまい、(a)のようにビームプロファイルに大きく影響してきてしまうので、端面を研磨して余計な干渉をできる限り無くした。また、出射後にアイリスを挟んだのは、index matching gel を塗って一旦クラッドモードを除去したが、出射するまでのファイバー中でまたクラッドモードになってしまうモードもあるので、その干渉を避けるためアイリスを使った。その結果が以下の図7である。

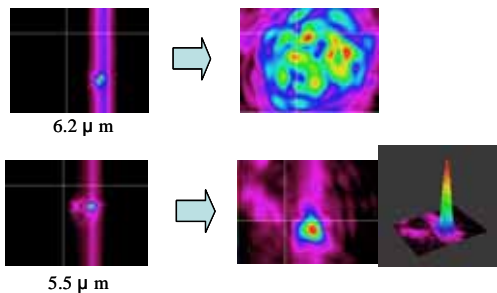


図7 近視野と遠視野のコアモード

左の画像2つが近視野の画像である。これを見ると2つともシングルモードのように見えるが、実際は集光されてこのような形になっていることも考えられるため、さらに距離をおいて見たのが右の2つである。右の画像から 6.2 μm はマルチモードで、5.5 μm はシングルモードに近い形をしているのがわかる。そこでシングルモードを確認するためこのビームの M^2 を測定した(図8)ところ、1.02 以下という値になった。このことからコア径 5.5 μm のテーパファイバーにより、高次モードを落としたシングルモードが出射できたと言える。

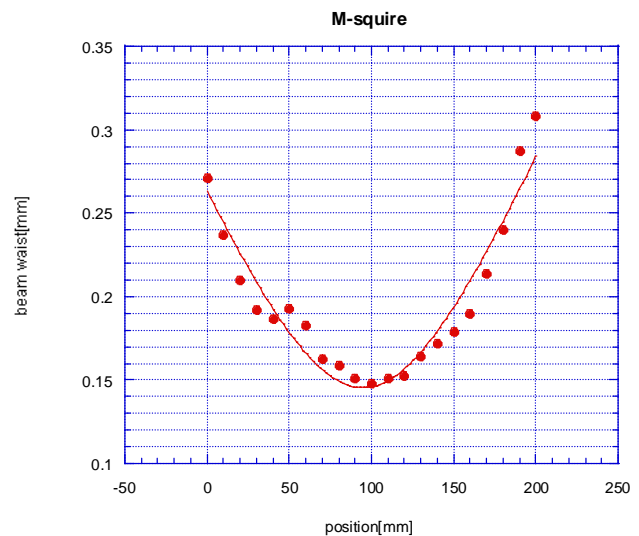


図8 5.5 μm テーパーから出射されたビームの M^2

3.4 クラッド励起の損失実験

テーパファイバーをファイバー増幅器の中に組み込むことを考えたとき、大きな問題となってくるのが励起光の損失である。この実験ではテーパ無し Yb:DCF とコア径 5.5 μm のテーパファイバーをクラッド励起してその結合効率を比較することで損失を調べた。以下にその実験系を示す。

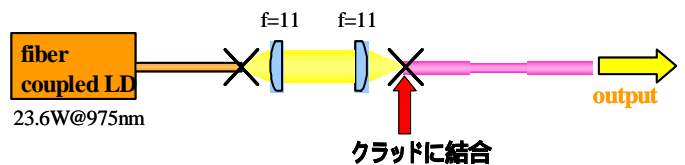


図9 クラッド励起の実験系

表 3 測定結果

	Pmax[W]	coupling efficiency
no tapered	16.7	70.4%
5.5 μ m	11.0	47.4%

テーパ無しの場合、結合効率 70.4%、最大出力 16.7W、テーパ部 5.5 μ m の場合、結合効率 47.4%、最大出力 11.0W と約 20% ほどの差がでた。これはファイバーの形状による損失なので、ファイバーの端面を励起する実験系では、出射側にテーパファイバーを置くことは、出力の低下になるのでむずかしいと考えられる

4. 結論と今後の課題

本実験では最終的に、コア径 60 μ m のマルチモードファイバーから出射された光を、5.5 μ m のテーパ部をもつテーパファイバーによって、 M^2 が 1.02 以下のシングルモードだけを取り出すことに成功した。しかし、クラッド励起した場合、その出力はテーパなしのファイバーに比べて結合効率が 20% 下がった。

以上の実験結果を考慮して、テーパファイバーの fiber-MOPA への組み込みかたを表わしたのが下の図である。

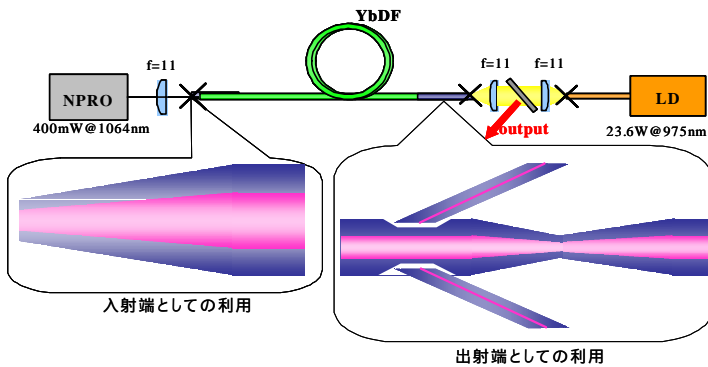


図 10 fiber-MOPA への応用案

入射側に使う場合は、図 10 のようにテーパ部の一番細い部分を入射端として使うことで、確実に LP_{01} がカップリングしていることを確認することができる。

出射側に使う場合は、出射端からの励起ではなく、図 10 のように横方向励起をし、さらにその位置をテーパ部よりも前にすることでテーパ部でのクラッド励起した光が損

失を受けるのを避け、またシングルモードでの出射が可能だと考えられる。

今後の課題としては、5.5 μ m のテーパファイバーが、出射されたシングルモードのビームに損失を与えている可能性があるため、Yb の吸収のない長波長のシングルモードの光を通し、テーパ部での損失について評価をすること。また、同様の方法で他の径のテーパファイバーの損失も測定し、テーパ形状との関連付けをし、テーパ形状の最適化を行うことを考えている。そして最終的には、fiber-MOPA の実験系に組み込んで実験する予定である。

参考文献

- ・植田憲一、「ファイバーレーザーの基礎と将来」 レーザー研究、2001 年 2 月
- ・「宇宙を探る新しい目 重力波」 古在由秀 編、株式会社クパプロ
- ・「レーザー物理入門」 霜田光一 著、岩波書店
- ・平成 15 年度卒業論文 「 CO_2 レーザーを用いたテーパードファイバー作成の研究」 渡辺嵩仁
- ・「ヤリーヴ 光エレクトロニクス 基礎編」 多田邦雄、神谷武志 監訳 丸善株式会社
- ・OPTICS LETTERS / Vol.26, No.14 / July 15, 2001 「Tapered holey fibers for spot-size and numerical-aperture conversion」 G.E.Town and J.T.Lizier
- ・CLEO'99 「Mode selection in high power cladding pumped fibre lasers with tapered section」 J.A.Alvarez-Chavez