

プレーナ型コアファイバレーザーの開発

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

講師 藤本 靖

(平成23年度一般研究開発助成AF - 2011206)

キーワード：高出力ファイバレーザー、特殊コアファイバ

1. 研究目的と背景

1.1 高機能性シリカガラスの開発

シリカガラスは非常に優れた光学特性、熱機械特性を持つ。その特性を保持したまま、不純物の添加により機能を与える研究は、新材料の開発という面で非常に興味深い。我々は、そういったシリカガラスの持つ優れた特性を生かしながら不純物添加等により様々な機能を付加させた新しいシリカガラスの開発検討を行ってきた。その中で、Zeolite 結晶のイオン吸着特性と結晶中の配置されるイオンのサイト選択技術との組み合わせにより、それまで困難であったシリカガラスへの希土類元素の独自のドーピング方法（以下 Zeolite 法[1]）を開発し、高濃度シリカガラスの製作が可能となった。この方法により従来法に比べ10倍以上のドーピング濃度を持つ高量子効率の希土類ドーピングシリカガラスを作ることが可能となった。

例えば、1997年には、当時世界最高の量子効率 ($\eta=50\% @ 1.0\text{wt}\%$) を示す事に成功した。以後改良を加え、2006年の段階ではその効率は ($\eta=81\% @ 1.25\text{wt}\%$: 12500ppm に相当) まで改善されている。量子効率の改善によりバルク体での発振を世界で初めて実現し、2007年にはその出力を 37.3J/shot (世界最大) まで増大させた。

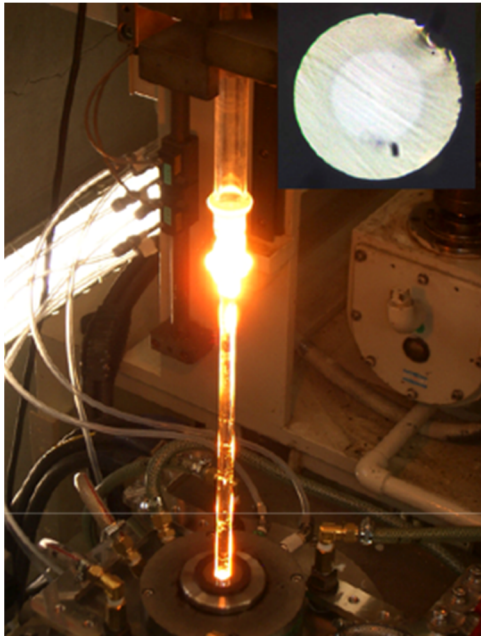


図1 光ファイバ線引き装置と試作マルチモードコアファイバの断面図

1.2 ファイバレーザーに対する要求

一方で、金属加工におけるレーザー、とりわけファイバレーザーの重要性は、その出力の向上、並びにファイバレーザーのメンテナンスフリー特性などからますます増加している。しかしながら、これらの技術は外国製（例えば IPG、SPI など）のものが多く、それらに太刀打ちできる新しいアイデアの加工用レーザー技術が必要である。

こういった要求に応えるために、我々は、ある民間企業から光ファイバ線引き装置(図1)及びガラス旋盤装置(母材製造装置)の移設導入を行った。大学の研究機関としては、初めての試みである。既に、マルチモードコアクラッド構造のファイバの製作を試みており、Zeolite 法によるマルチモードコアファイバの試作(図1右上参照)及び、それを用いたレーザー発振にも成功している。

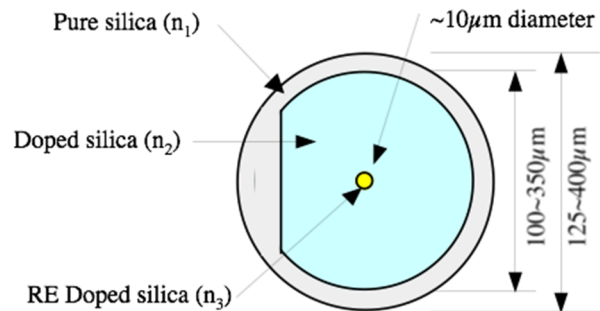


図2(a) ダブルクラッド光ファイバ (D-shape)

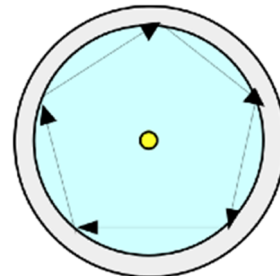


図2(b) スクウェアレイモード

1.3 プレーナ型コア光ファイバの概念[2]

通常の光ファイバはコア・クラッドが同心円状の構造を持つ。近年研究が進んでいる高出力用の光ファイバは同心円状のコア・クラッド光ファイバ構造に、さらに中間クラ

ッドを設け、そのクラッドの一部を平坦(図 2(a) D-shape)にしたり、全体を星形にししたり、中間クラッドの構造を円形以外のものにする事で、スキューレイ(図 2(b))といわれる吸収されない励起光成分を抑制している。また、半導体・太陽電池製造工程に用いられているレーザーアニーリング、クリーニング等といった用途では、ラインビームが良く用いられている。これらのビームは円形のビームを加工してライン状となるようにしており、1)それらの光学系が余分に必要、2)円形をライン状にするので、ライン中心部分の強度が高くなりやすい、等の問題がある。

ここで、発想の転換をする。材料を切る際、包丁のように使うとすれば、カットの進行方向と垂直方向の幅を小さくすると良いのであって、カットの進行方向の幅を小さくする必要は無い。つまり、フォーカススポット形状はライン状で良いことになる。

この問題に対し、我々の提案するプレーナ型コア光ファイバは図 3 に示す様な断面・屈折率分布構造を持っている。一文字形状の planar-core とそれを挟む inner-clad、planar-core と inner-clad を包み込む outer-clad から構成されます。屈折率分布は planar-core(n_1) > inner-clad(n_2) > outer-clad(n_3)となるよう設計されている。

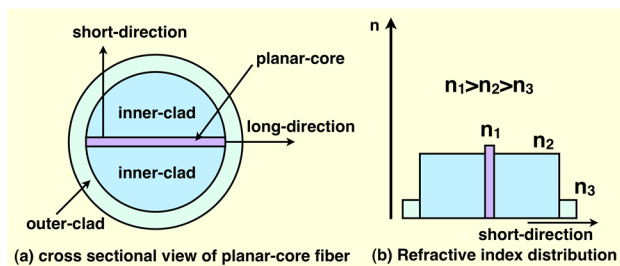


図 3 プレーナ型コア光ファイバの概念的特徴。(a) 断面形状、(b)屈折率分布

この形状のファイバの特徴は下記の通り。

- 1) スキューレイ (コアに吸収されずに伝播する励起光) が発生しない。
- 2) 通常の同心円コアファイバに比べ、コア断面積が増加します。そのため誘導ブリルアン散乱等の非線形現象を押さえる事が可能となり、高出力化が容易。
- 3) ラインビームの形成が容易。
- 4) short-direction をシングルモードとなるように設計する事が可能です。従って、加工用途においては、あたかもシングルモードファイバのように使う事が可能。

以上のファイバは、大阪大学にて開発された Zeolite 法[1]を併用する事により、planar-core 部分の高濃度希土類ドーピングが可能であり、短尺構造にて効率良く励起光を吸収する事が可能となる。

2. 実験方法

2.1 プレーナ型コア光ファイバ製造

希土類ドーブ縦シングルモードのプレーナ型コア光ファイバの製造工程は下記の通りである。

a) 素材の準備

i)導波路 (コア) 用素材として Nd doped silica glass(NdSG) (1.25wt%)を準備した (図 3 の planar-core 部分)。

ii)中間クラッド素材として La doped silica glass(LaSG)

($\text{La}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3=0.8/1.74\text{wt}\%$)を準備した (図 3 の inner-clad 部分)。

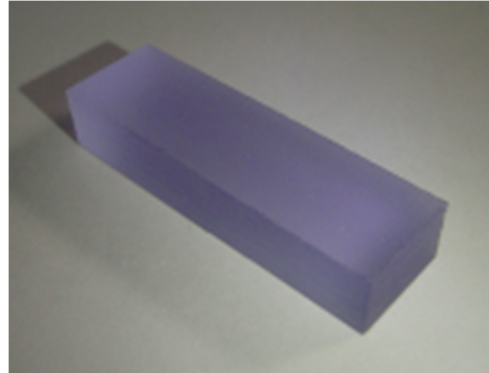


図4 NdSG(1.25wt%)の写真

以上の素材を用い、以下のb)とc)の手順に従ってプレーナ型コア光ファイバを製作した。ここで、i)のNdの濃度を ii)のLaの濃度より高くし、Nd/Al及びLa/Alの比率は同じにして、屈折率がNdSG>LaSGとなるように設定した。

b) NdSG と LaSG の張り合わせ

以下に、上述したa)にて準備したガラスの張り合わせ加工の図面を示す。

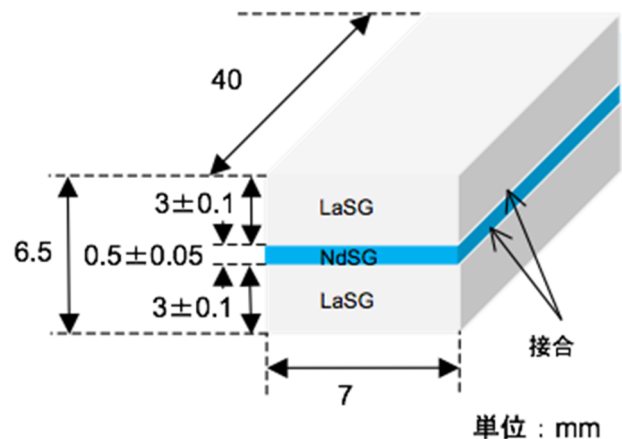


図5 張り合わせ設計図

張り合わせの手順を以下に示す。厚さ3mmのLaSGを準備する。この場合、NdSGとの接合面は光学的に研磨されている必要が有る (実際は両面研磨)。次に厚さ2~3mm程度のNdSGを準備し、LaSGとの接合面を光学研磨した後、オプティカルコンタクトを利用して接合する。接合後、NdSGのもう一方の面を研磨し、厚みを0.5mmまで減ずる。最後に両面を研磨したLaSGを準備し、NdSGの研磨面と接合を行うことで目的のサンドイッチ構造を製作した。図6

より、NdSG及びLaSG界面に隙間や、ガラス内のクラック等が無く、異種石英ガラスの張り合わせがうまくいっている事が解る。

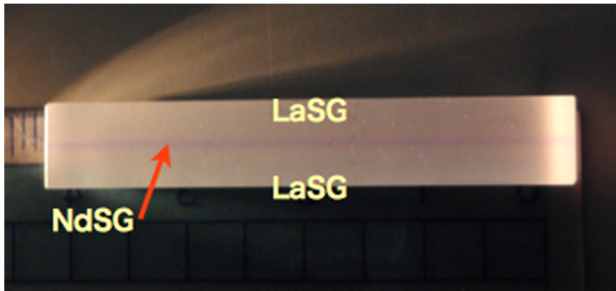


図6 張り合わせ処理後の写真

以上により得られた、異種の石英ガラスを張り合わせた成形体を切削加工してロッド形状にし、下の写真に示すようなプレーナ部分の厚みが0.5mm、直径が4.8mm、長さが約40mmのロッドを得た。



図7 ロッド形状加工品 (4.8mmφ, プレーナ部分厚み0.5mm)

2.2 プレーナ型コア光ファイバ

図 8(a)に製作したプレーナ型コア光ファイバを示す。planar-core は Nd ドープシリカ (1.25wt%)、inner-clad は La ドープシリカ、outer-clad はシリカチューブである。屈折率はそれぞれ $n_1=1.4542$, $n_2=1.4472$, and $n_3=1.4430$ である。図 8(b)に励起による ASE 光の発生を示す。810nm の励起光 (inner-clad に導入) が効率よくコアで吸収され、発光している様子がうかがえる。

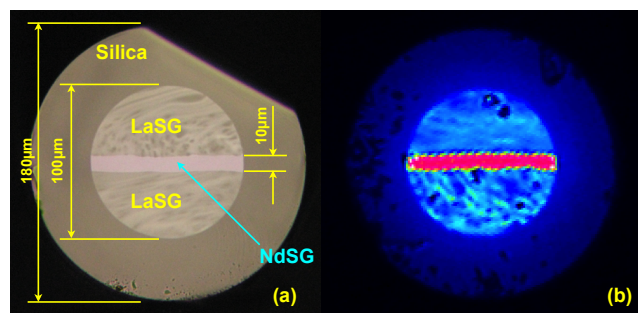


図 8 (a)プレーナ型コア光ファイバの断面図、(b) 励起による ASE 光の導波特性

2.3 ファイバレーザー発振実験

図 9(a)に示す発振実験系にてレーザー発振実験を行った。

図 9(b)はその写真である。810nm LD は最大 2W の励起が可能であるファイバ出射型のものを用いた。励起光源の出射コア径は 50µm で、プレーナ型 NdSF のコア径 100µm より小さく、これにより両者を効率よく結合することが可能である。出射ミラーは反射率 80% (透過 20%) の誘電体ミラーを使用した。

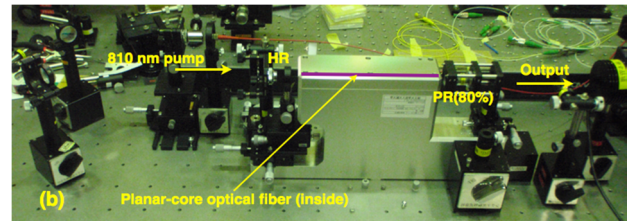
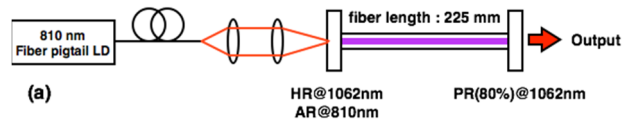


図9 プレーナ型コア光ファイバレーザーの発振実験系。

(a) 発振実験系、(b) 発振実験系写真。

図 10 に、開発したプレーナ型コア光ファイバを用いてレーザー発振させたときのスペクトルを示す。図で、810nm のピークは励起の漏れ光によるものである。1062nm においてスペクトルの狭帯域化が確認される。このスペクトルの狭帯域化により、レーザー発振が得られたことが推察される。

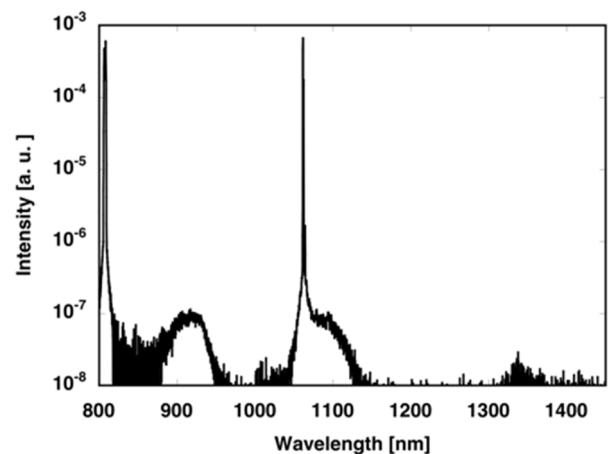


図10 レーザー発振スペクトル

図 11 に示すように、レーザーの出力は最大 75.1mW (励起 1.66W : 吸収パワーではない)、発振閾値は 0.48W であり、発振スペクトルの狭帯域化、入出力特性に閾値が存在する事から、レーザー発振の事実を確認した。ただし、このときのスロープ効率は 6.1%で、目標とした 50%より大幅に低い値であった。この原因は、共振器構成の問題と考えられ、その影響の大きいものから順に以下に列挙する。

i) 共振器ミラー突き当てによる接触ロスが存在する。

ファイバ端面に対する直接誘電体コーティングにより、解決可能。

ii) 共振器ミラーの最適化がなされていない。

共振器ミラーは、RearMirror=100%, OutputMirror=80%、としているが最適値ではない。共振器ミラーや、ファイバ長を最適化により、出力向上が期待できる。

iii) 集光光学系の最適化

コリメートレンズや集光レンズ等の集光光学系の NA 値や励起 LD との位置関係を最適化することにより出力増大が望める。

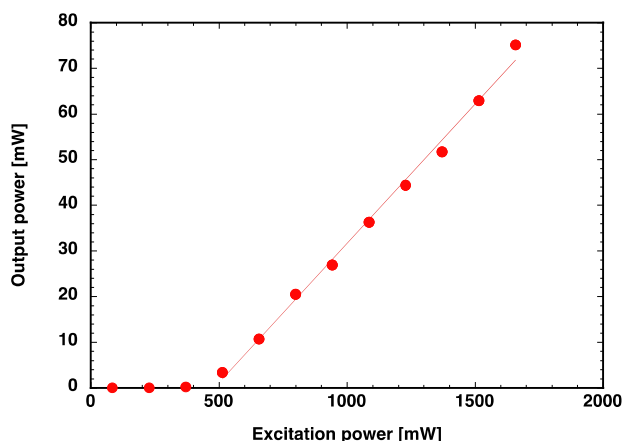


図 11 プレーナ型コア光ファイバレーザー発振実験結果

3. 今後の展開

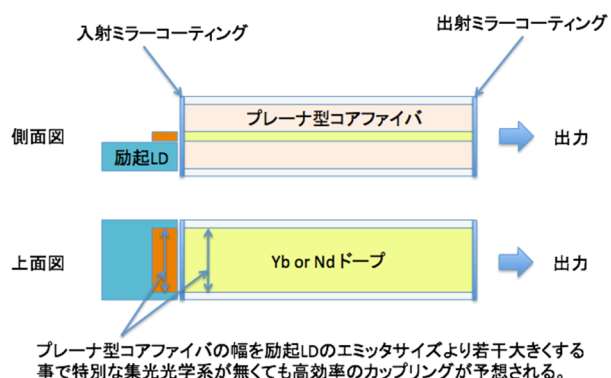


図 12 超小型プレーナ型コア光ファイバレーザー

最終的に目指す共振器の形状は図 12 に示す通り、光学素子を極力減らした構造であり、プレーナ型コア光ファイバは小型・コンパクト高効率高出力をもたらす光ファイバとして期待できる。従って、現在、より高効率で小型のファイバレーザー開発めざし、ミラー一体型のファイバ共振器を開発中である。図 13 は開発中の共振器の写真である。

プレーナ型コア光ファイバレーザーの利点を列挙する。

- 1) ファイバレーザーの出力向上（コア断面積拡大）は、ライン方向長さの延伸にて達成されるので、円形ビームの様にコア断面積を拡大するためにコアクラッドの屈折率を精密制御する（開口数（NA）調整）必要がない。→高出力化が容易である。
- 2) 励起用高出力 LD の出射面形状は $95\mu\text{m} \times \text{数}\mu\text{m}$ で 12W のものが市販されている。プレーナ型コアファイバと

のマッチングが良い。

3) 半導体・太陽電池製造工程に用いられているレーザーアニーリング、クリーニング等といった用途では、ラインビームが良く用いられている。プレーナ型ビームからは円形ビームより容易にラインビーム出力が得られることが予想される。

4) ドープする希土類を他の元素（例えば Tm、Ho）に展開することで、他の波長への展開も可能である。従って、応用範囲は広い。特に Tm ($2\mu\text{m}$) は近年報告が多く、医療用レーザーとしても期待できる。



図 13 ミラー一体型のファイバ共振器（開発中）

4. まとめ

我々は製作されたプレーナ型コア光ファイバを用い、世界で初めてレーザー発振を達成した。ファイバ長は 225mm と従来のファイバレーザーに比べ短尺であり、小型コンパクトな小型高出力ファイバレーザーが期待出来る。

高出力ファイバレーザーは、現在主要技術のほとんどを外国（ドイツ、アメリカ、ロシア等）に握られているが、プレーナ型ファイバはこれらとは全く異なるアイデアであり、国産技術力の強化につながる事が期待される。

謝辞

公益財団法人天田財団平成 23 年度一般研究開発助成（AF02011206）に関する報告であり、本助成により大きな研究の進展が得られたことを明記し、深く感謝の意を示します。

参考文献

1. Y. Fujimoto and M. Nakatsuka: 'A novel method for uniform dispersion of the rare earth ions in SiO₂ glass using zeolite X', *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1997, **215**, pp. 182-191.
2. Y. Fujimoto, M. Murakami, H. Nakano, T. Sato, and H. Shiraga: 'Planar-core optical fibre laser', *Electronics Letters*, 2012, **48**, pp. 642-644.