

キラル結合コアファイバーによる高出力レーザーの研究

白川晃研究室 B4 大森 慎也

1. 研究目的

CCC (Chirally-Coupled Core,キラル結合コア) ファイバーは一般的なシングルモードファイバーよりコア径が大きく、高出力動作が可能になると期待されている。しかし文献が少なく、十分な知見が得られているとは言えない。本研究では、将来の高エネルギー超短パルスレーザーへの応用を視野に入れ、CCC ファイバーレーザーを実際に CW 動作させ、出力特性や近視野像の光強度分布を調べ、シングルモード性を実現できるかどうか検証実験を行った。

2.原理

2.1. ファイバーレーザー

ファイバーレーザーとは、Yb 等の希土類イオンを添加したファイバーを媒質に用いた固体レーザーの一種である。光ファイバー中に光を閉じ込め伝搬や増幅を行い、レーザー発振する事が出来る。クラッドを伝搬する励起光が Yb を添加した中心のコアを通過する度に Yb を励起する。波長 975nm の半導体レーザー (LD) を励起光に用いることで、基底準位 ${}^2F_{7/2}$ の最下準位と励起準位 ${}^2F_{5/2}$ の最下準位間の遷移を引き起こして吸収および放出を行い、コアでレーザー発振する。Yb は LDr 励起により電気エネルギーを効率よく光エネルギーに変換でき、1000~1200nm の広範囲で様々な波長の光を放出することができる。

2.2. CCC ファイバー

CCC ファイバーは、Fig.1 のようにコアにらせん状のコアが巻き付いた構造をしており、コアのシングルモード性を保ったままコアサイズを増大させるための方法の一

つである。コアの高次モードとサイドコアのモードがカップリングし、さらにサイドコアは曲げ損失が大きいいためサイドコアから高次モードがクラッドに放出されるため、高次モードが選択的に除去される。基本モードはコアに残るので、一般的なシングルモードファイバーより大きなコア径でシングルモード動作できる。コア径が大きいいため出力の大きいシングルモードレーザー動作が可能になる。

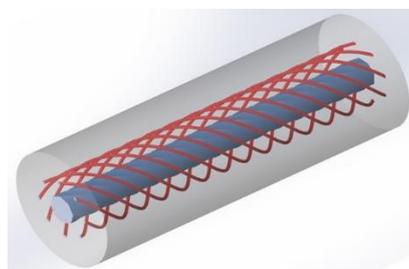


Fig.1 CCC ファイバーの構造[1]

3. 実験

Fig.2 に実験配置図を示す。

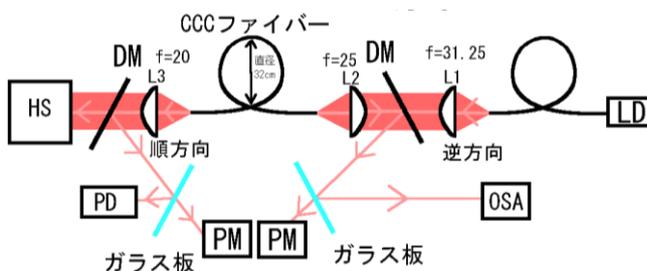


Fig.2 実験装置

Table.1 CCC ファイバーの特性

コア径	33 μ m
サイドコア径	13.3 μ m
クラッド径	250 μ m
長さ	5.1m
コアのNA	0.06
クラッドのNA	0.46
サイドコアの数	1
Vパラメータ	5.96
スロープ効率	79.80%

Table.1 に CCC ファイバーの詳細をまとめた。なお、直径 32cm のリールに巻いて使用した。今回用いた CCC ファイバーの写

真は Fig.3 の通りである。懐中電灯を用いてファイバーに入射させて明るくしてから写真を撮影した。コアよりサイドコアの方が明るくはっきりとした写真が撮れた。この CCC ファイバーはサイドコアが一本であった。黒く見える点は空孔である。

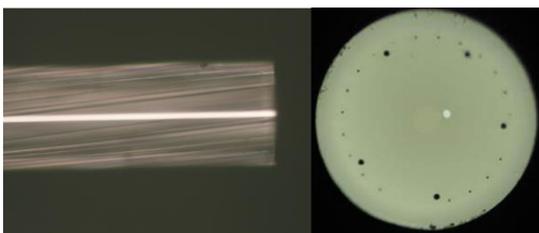


Fig.3 顕微鏡で撮影した CCC ファイバーの写真

発振波長は 1043nm、発振閾値は多少の揺らぎがあったものの 13.0A~13.1A 程度であった。

3.1. 出力特性

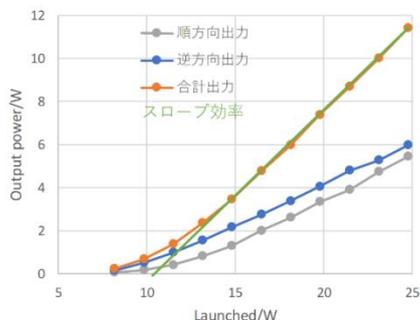
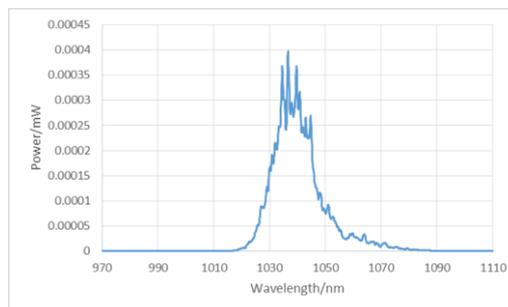


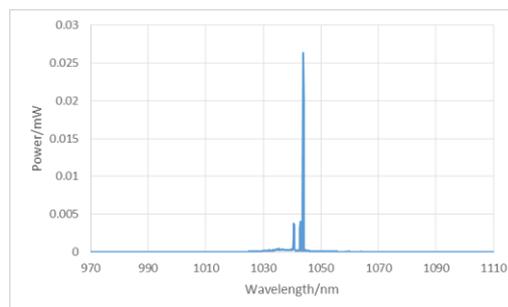
Fig.4 順方向、逆方向それぞれの出力特性

今回の実験で用いた CCC ファイバーのスロープ効率は 79.8%であった。出力特性の測定では、LD の駆動電流を 10A から 20A の値で変化させた。順逆方向出力、スペクトル、時間波形、近視野像については 16A までとした。なぜなら 16A になると緩和発振が激しくなり、ジャイアントパルスが発生してファイバーを痛めてしまう可能性があったためである。

3.2. スペクトル

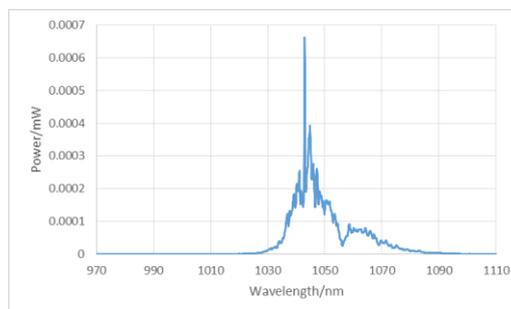


A

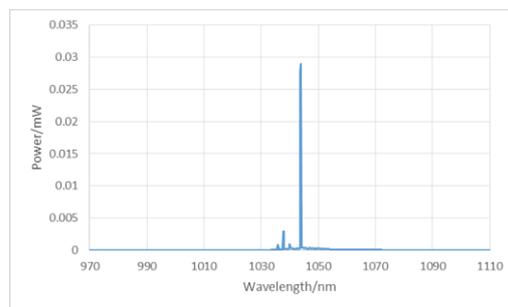


B

Fig.5 A: ILD=13A, D:ILD=16A,のときの逆方向出力のスペクトル



A

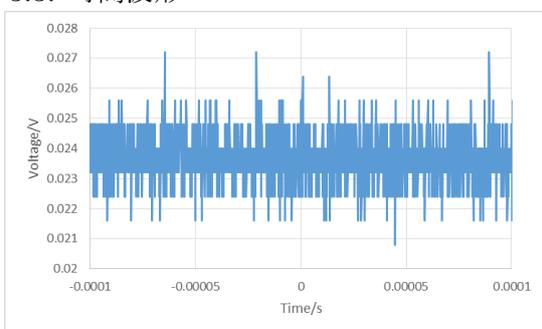


B

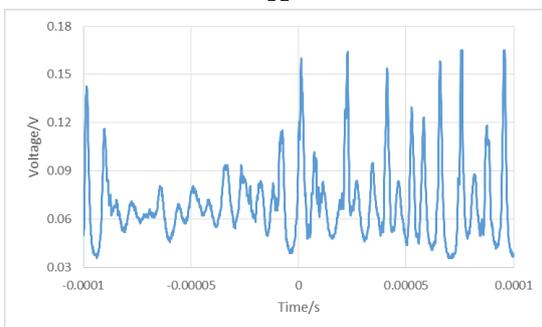
Fig.6 A: ILD=13A,B:ILD=16A のときの順方向出力スペクトル

順方向逆方向それぞれのスペクトルは同時に計測したわけではないので多少のずれが生じている。逆方向順方向それぞれの出力のスペクトル 13A で増幅自然放出光 (ASE) が確認された。発振閾値の 13A を超えると鋭いピークが発生した。16A のときにレーザー発振していることがわかる。順方向に関しては発振閾値が 13A で 1043nm なのに対し 14A,16A で 1044nm であった。

3.3. 時間波形



A



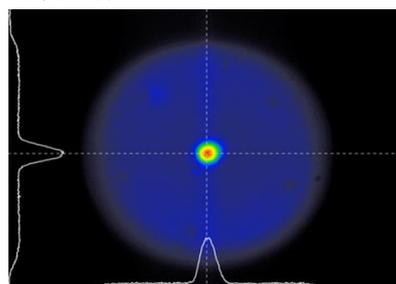
B

Fig.7 A: ILD=13A, B:ILD=16A のときの時間波形

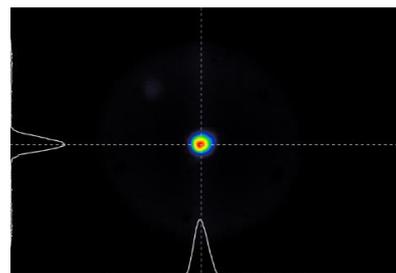
時間波形は逆方向出力側で測定した。LD 電流値 13A (発振閾値付近) では、ASE が支配的のため時間波形が安定している。細かな変動はオシロスコープのデジタルノイズである。レーザー発振は緩和発振で得られ、電流値を上げていくと変動が激しく

なる。16A の時は最小と最大の電位差がとも大きくなりこのまま更に電流値を大きくしていくとジャイアントパルスが発生し、ファイバーが破壊される恐れがあった。17A では Q スイッチにまでなったのでやめた。

3.4. 近視野像



A



B

Fig.8 A:10A,B:13A のときの近視野像と出力分布

CCD カメラを用いてビーム形状を測定した。Fig.2 のレンズ L3 を微調節し、CCD カメラ上に近視野像を像転送した。10A のときは発振していてもパワーが低いため、相対的にクラッドの残留励起光が見えている。レーザー発振閾値の 13A を超え、レーザー発振したときはコアの光が相対的に強くなり、整ったビーム形状をしている。13A のときはレーザー発振しているためコアの光が圧倒的に強くなり、CCD カメラの最大値が飽和しないように調節する機能によりクラッドの光は見えなくなっている。

3.5. M^2 測定

今回の実験で用いた CCC ファイバーのシングルモード性を確認するために M^2 測定を行い、ビームの横モード品質を表す指標である M^2 を求めた。LD の電流値を14A,16A と変化させて測定を行った。

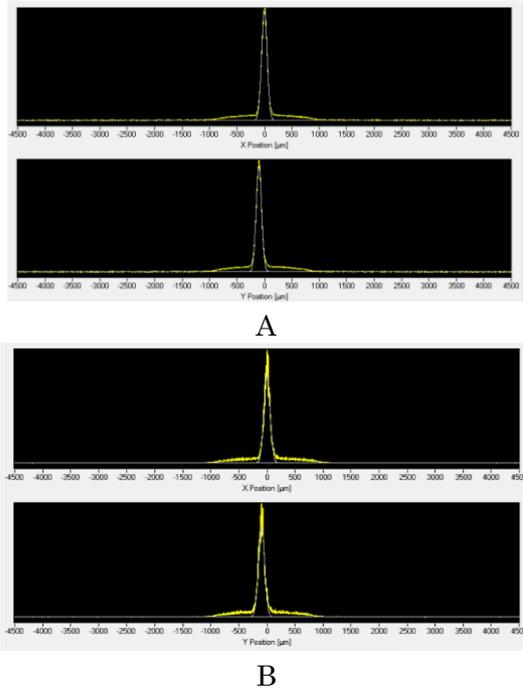


Fig.9 A:14A B:16A のときのビームプロファイル

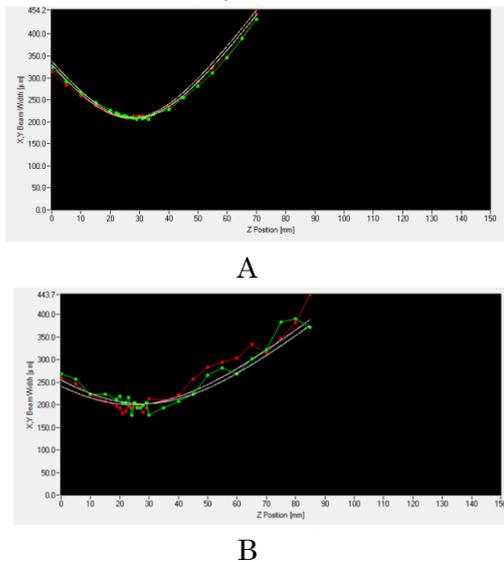


Fig.10 A:14A B:16A のときの M^2 測定結果

14A では $M^2=1.453$ と求めることができたが 16A では $M^2=0.839$ となってしまう、 M^2 が 1 以下はあり得ないため正確な測定できなかった。これは緩和発振が発生したことによって発生したゆらぎによるものと思われる。

4. 結論及び今後の展望

以上より、CCC ファイバーのシングルモード性を検証することができた。閾値は高くなったが考えられる原因としてファイバーの端面を研磨することによって CCC ファイバーの入射側端面にアングルが付き、端面の反射率が低下したためと考えられる。CCC ファイバーのコアに入射可能な最大入射角の大きさが小さいため、いかに CCC ファイバーが繊細かわかる。

今後の展望としては、今回の実験で不十分なビーム品質の測定 (M^2 測定) やパルス発振による端面破壊を防止するためにエンドキャップを取り付けたうえで更なる高出力実験を行いたい。さらに、CCC ファイバーを用いた高エネルギーモード同期ファイバーレーザーや高エネルギー長短パルスレーザーへの応用へ役立てたい。

参考文献

[1] Xiuquan Ma,* Cheng Zhu, I-Ning Hu, Alex Kaplan, and Almantas Galvanauskas, “Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than $50\mu\text{m}$ diameter cores,” ,P4,22, 9206-9219 (2014).