

Yb 添加ダブルクラッドファイバー レーザーの単一偏光発振

量子物質工学科 植田研究室 上條核

1 研究背景・目的

ファイバーレーザーの高出力化が進む中、非線形波長変換やコヒーレントビーム結合において単一偏光発振とその狭線幅化は重要な課題である。単一偏光発振、またその狭線幅化によって様々なレーザーへの応用が可能になってくるためである。

本実験の前半部分では PM - Yb - DCF (PANDA 型 Yb 添加ダブルクラッドファイバー) とインライン偏光子を用いて PER (偏波消光比) 20 dB を目標として、1064nm ファイバーレーザーの単一偏光発振を目的に実験を行う。PER は次の式によって計算される。

$$PER(dB) = 10 \log \frac{P_{\max}}{P_{\min}}$$

P_{\max} : 偏光子透過最大出力 P_{\min} : 最小出力

また、狭帯域 FBG-HR (Fiber Bragg Grating-High Reflection) と FBG - 15% の 2 つの FBG 間で共振器を作ることによって狭線幅化し、FWHM (半値全幅) 0.1nm 以下の狭線幅化を試みた。

後半部分ではインライン偏光子の耐久性によって制限される高出力化を可能にするために、後に説明する PM-FBG 直交配置による単一偏光化を試みた。

2 原理

2.1 Yb 添加ファイバー

本実験では Yb を添加した PM - Yb - DCF を使用している。Yb の特徴として、まず準三準位構造であることがあげられる。このため、励起波長やレーザー波長における励起状態吸収 (ESA) や高励起状態に移行したフォトンによる光放出 (upconversion) が無いため高密度励起が可能となる。また、濃度消光が少ないため高密度添加が可能で、これによりファイバー長を短くすることができる。また、図 2.1 から見られるように蛍光・吸収スペクトルが広がっている。吸収スペクトルが広いことにより励起用 LD に対する制約も緩和される。

2.2 PANDA ファイバー

単一偏光を行う際、高い PER を得るためにファイバーの偏波保持特性が重要となる本実験では、全ファイ

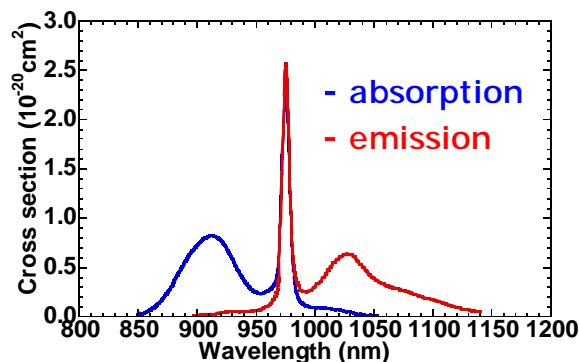


図 2.1 Yb の蛍光・吸収スペクトル

バーにおいて PANDA (Polarization-maintaining AND Absorption-reducing) 型偏波保持ファイバーを用いている。PANDA ファイバーは図 2.2 のようにクラッド部に応力付与部として B_2O_3 添加ガラスが目玉のように配置されている。このとき実効屈折率は目玉の水平方向で最大、垂直方向で最小となりそれぞれ slow 軸・fast 軸と呼ばれ、それぞれで偏光状態が保持されたまま伝播される。

偏波保持光ファイバーの特性評価を行う際、ファイバーの結合長が一つの目安となる。結合長とは直交 2 偏光間の位相差が 2π となる長さで、短いほど偏波保持特性が良い。結合長は

$$L_b = \frac{2\pi}{\Delta n_{\text{eff}}}$$

で表され、これを slow 軸と fast 軸の実効屈折率の差であるモード複屈折率 B を用いると

$$L_b = \frac{\lambda}{B}$$

となる。 B が大きいと結合長が短くなり、偏波保持特性が向上する。よってモード屈折率を大きくすることが重要となる。添加されている B_2O_3 はクラッド部より大きな熱膨張係数を有し、線引き時の急激な冷却過程において熱膨張係数差に起因する残留応力をコアに与え、モード複屈折率を誘起させる。これにより結合長が短くなり、偏波保持特性が向上する。

2.3 インライン偏光子

本実験で用いたインライン偏光子は信光社との共

同研究から得られたもので、TiO₂でのウォークオフによって単一偏光化を行っている。PERは6 dBで、従来のインライン偏光子の耐久性が300mWであるのに対し耐久性10Wとなっている。

このインライン偏光子を用いているときの出力限界は次の式によって得られる。

$$P_-(L) = P_+(L) = \sqrt{R_1} \frac{P_{out}}{1 - R_1}$$

FBG - 15% ($R_1 = 0.15$)が $z = 0$ 、FBG - HR ($R_2 = 1.0$)が $z = L$ にあるとして、 z ($0 < z < L$)にあるインライン偏光子へ負・正の方向それぞれからの入射強度をそれぞれ $P_-(L)$ 、 $P_+(L)$ とする。 P_{out} は出力強度。インライン偏光子の耐久性は10Wで、片道5Wまでの耐久性なので $P_-(L)$ 、 $P_+(L)$ はそれぞれ5Wとなる。これらの数値を式に代入するとこのインラインインライン偏光子が耐えられるのは約11Wの出力までとなる。

3 インライン偏光子での単一偏光発振

3.1 実験装置

実験装置は図3.1のようにになっている。まず2つのFBG、FBG 1 (FBG - HR : $B_{SLOW}^{HR} = 1063.88\text{nm}$ 、 $\Delta n = 0.05\text{nm}$)とFBG 2 (FBG - 15% : $B_{SLOW}^{15\%} = 1063.85\text{nm}$ 、 $\Delta n = 0.1\text{nm}$)で共振器を組み、それをインライン偏光子で単一偏光化している。FBG 1は普通のPANDAファイバーであるのに対しFBG 2はダブルクラッドファイバー(PM-GDF)で作られている。端面においてはフレネル反射を防ぐために一端には8°の角度がついたPM-FCAPC、他端は12°に研磨した。

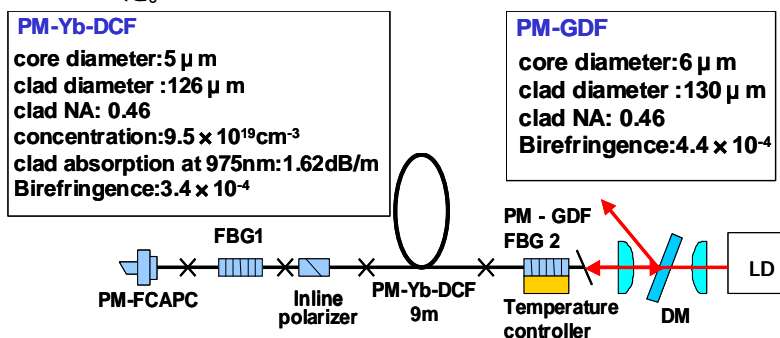


図 3.1 実験装置

FBG - 15%では励起光による温度上昇によってBragg波長がシフトしてしまうのを抑えるために温度制御を可能にした。この温度制御は銅製ホルダーにファイバーを図3.2のように固定し、ペルチェを下面に付けることで行っている。FBGの部分はコーティングがないためクラッドが直接ホルダーについてしまうと全反射条件が崩れるのでホルダーにくぼみを作り、そこに水を入れることで温度調整を可能にした。

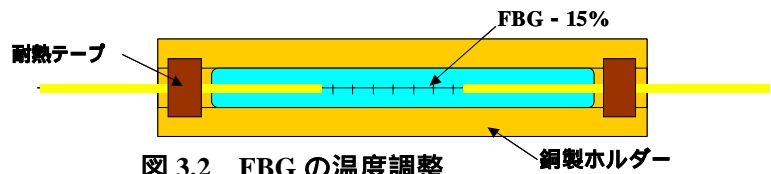


図 3.2 FBGの温度調整

このときの融着損失、PERは、それぞれ融着損失 11.9% 8.7%、PER 23.6dB 21.8dBとなった。

3.2 出力特性とスペクトル特性

このとき得られた出力特性およびスペクトル特性はそれぞれ図3.3、3.4のようになった。

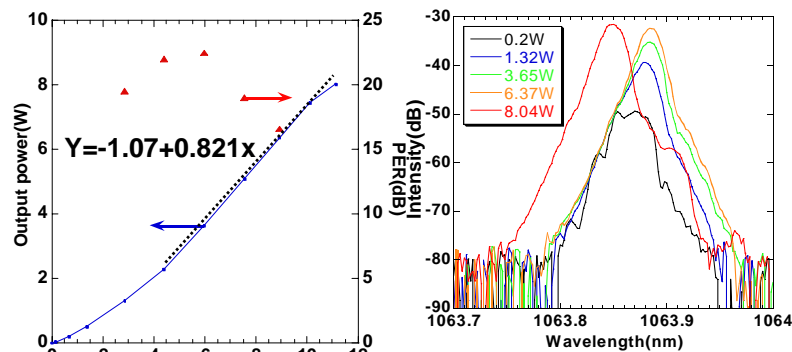


図 3.3 出力特性

図 3.4 スペクトル特性

このとき、Bragg波長のマッチングを行うために温度調整を行い、約10で測定している。図3.2より、スローブ効率約82%、最大入射励起パワー11.12Wに対し最大出力パワー8.04W、最大PERは22.5 dBとなった。また、図3.3より全出力においてFWHMが約0.03nmとなることがわかった。ただし、最大出力8.04W時においては温度調整限界に達したため温度上昇を防ぎきれず、スペクトルが短波長側にずれてしまった。

この結果よりPERは全出力においては目標としていた20 dBに達しなかったが、十分単一偏光しているといえる値は得られた。また、FWHMも目標としていた0.1nmより狭線幅となった。

4 PM-FBG直交配置による単一偏光発振

4.1 PM-FBG直交配置の原理

上記のインライン偏光子での単一偏光発振における最大出力を見ると、インライン偏光子の出力限界11Wに非常に近い8.04Wとなっている。ここで、より高出力化を可能にするためにインライン偏光子を用いずに、PANDAファイバー同士の融着の際に目玉が直交するように融着することで単一偏光化を行うPM-FBG直交配置による発振を試みた。

まず、通常の融着においては、図4.1のようにFBG - HRおよびFBG - 15%からのPANDAファイバーの目玉同士が合うように融着を行う。それによって二つ

のFBGの透過スペクトルにおけるX軸・Y軸それぞれの偏光が両方発振する。説明のため座標軸を図のようにとる。

それに対してPM-FBG直交配置の融着ではインライン偏光子を用いた実験装置で使したものと同じFBG-15%が温度を変化させて長波長側に透過スペクトルがずれているものを考える。その状態において通常と同じように融着を行うと(図4.2のFBG-HRとその上のFBG-15%の融着)FBG-HRのX軸偏光はFBG-15%のX軸方向に、Y軸偏光はY軸方向に入るが波長が違うため共振器を構成せず発振しない。そこでFBG-15%を90度回転させ融着を行うと、Y軸偏光は波長が違うため発振されないがX軸偏光は波長が同じであるため発振される。これによって単一偏光発振させることが出来るという方法である。

PM-FBG直交配置において、温度調整によって透過スペクトルが長波長側にずれているものを用いると上述したが、室温からどの程度温度を調整しなければならぬかは以下の式によって得られる。

$$\Delta T = \frac{\Delta \lambda}{\left(\frac{d\lambda_B}{dT}\right)}$$

T: 必要な温度上昇

: 二つのFBGの相等するBragg波長の差

図4.2ならFBG-HRのslow軸とFBG-15%のfast軸に対応して

$$= (\lambda_{B_HR_SLOW} - \lambda_{B_15\%_FAST})$$

$$= 1063.91 - 1063.57 = 0.37\text{nm}$$

また、 $d\lambda_B/dT$ は計算より 8.62×10^{-12} となる。

以上の数値を代入すると $T=39$ となる。

この計算値を参考に、温度を上げていったときのFBG-15%のBragg波長の変化とそれぞれの温度で得られるスペクトルを実際に測定した。得られたスペクトルの代表的なものは図4.4のようになった。

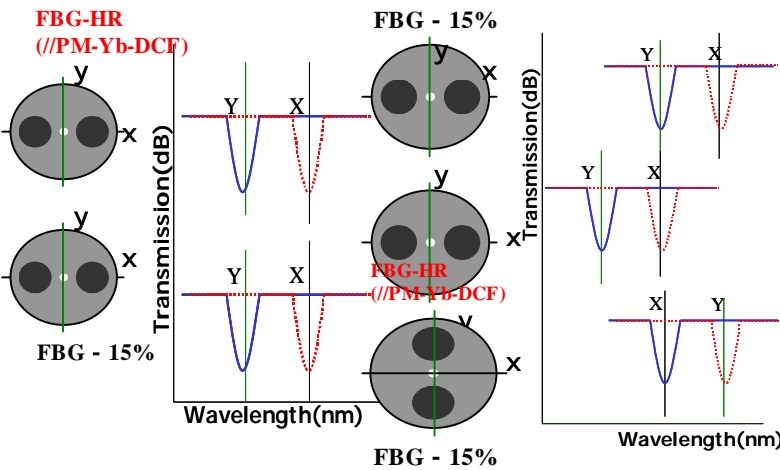


図 4.1 通常の融着

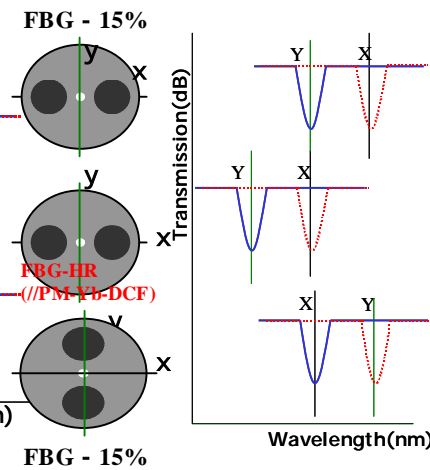


図 4.2 PM-FBG直交配置の融着

4.2 実験装置

実験装置は図4.3のようになっている。

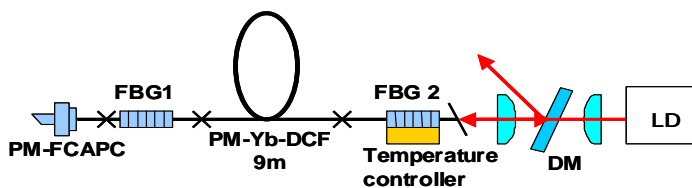


図 4.3 PM-FBG直交配置の実験装置

これはインライン偏光子を用いていた図3.1と比べてインライン偏光子を除いただけで、FBG1およびFBG2は同じものである。図4.3中のの部分においてPM-FBG直交配置の融着を行った。

このときの融着損失、PERは、でそれぞれ

融着損失 4.7% 4.9%
PER 28.2dB 26.6dB

となった。

4.4 温度調整によるFBGのマッチング

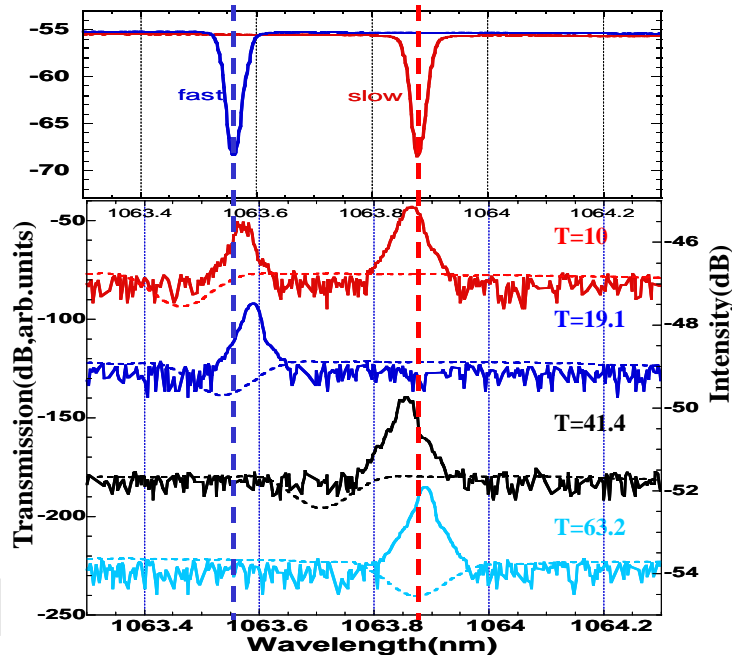


図 4.4 温度毎のFBGマッチング

図4.4は上段にFBG-HRのBragg波長、下段の点線がそれぞれの温度でのFBG-15%のfast軸、実線が得られるスペクトルとなっている。図からもわかるように10ではFBG-HRとFBG-15%のBragg波長がslow、fastともに重なっているため両方がスペクトルに現れている。室温の19.1ではFBG-15%のBragg波長が少し長波長側にずれ、fast軸偏光しか現れていない。温度を上げていき41.4ではFBG-HRのslow軸とFBG-15%のfast軸の反射帯が少し重なった。これによりスペクトルが現れているが、不安定である。

また温度を上げ計算値と近い値である室温から約 43 上昇した $T=63.2$ ではちょうど FBG - HR の slow 軸と FBG - 15% の fast 軸の Bragg 波長のマッチングがとれ、きれいなスペクトルを得ることができ発振も安定であった。

4.4 出力特性とスペクトル特性

このとき得られた出力特性およびスペクトル特性はそれぞれ図 4.5、図 4.6 のようになった。

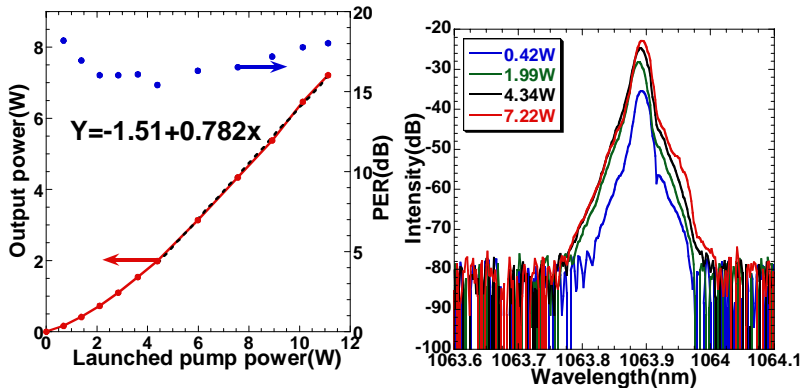


図 4.5 出力特性

図 4.6 スペクトル特性

このとき温度調整により Bragg 波長のマッチングがとれ安定した場所で測定をしている。図 4.5 よりスロープ効率は 78%、最大入射励起パワー 11.12W に対して最大出力パワーは 7.22W となった。また、図 4.6 より全出力において FWHM が 0.02nm 以下となることがわかった。これは光スペクトルアナライザの分解能が 0.02nm であることから 0.02nm 以下とした。

5 結論

まず得られた結果をまとめると表 5.1 のようになった。

	スロープ効率	PER	FWHM
インライン偏光子	82%	MAX22.5dB 16dB以上	約0.03nm
PM-FBG直交配置	78%	MAX18.2dB 15dB以上	0.02nm以下

まず PER について。目標としていた 20 dB までは達しなかったが、インライン偏光子・PM - FBG 直交配置どちらにおいても 16 dB 以上、15 dB 以上と単一偏光しているというには十分な値を得た。

FWHM に関しては目標としていた 0.1nm より狭い線幅を得ることができた。本研究室における今までの単一偏光ファイバーレーザーの研究で得られた FWHM(半値全幅)は約 0.2nm であった。非線形波長変換の結晶として擬似位相整合 $MgO:LiNbO_3$ (酸化マグネシウム・ドープ・ニオブ酸リチウム) を用いた場合を考える。スペクトル許容度の制約のため FWHM が 0.2nm のときに利用可能な結晶長は 10mm で、このと

きの波長変換効率は 10W クラスのレーザーの場合 20% であった。それに対し今回の結果によって利用可能な結晶長は 50mm 以上になり、それに伴い波長変換効率も 50% 以上と以前と比べて高効率な波長変換が可能になると期待される。

以上より実験目的であった Yb 添加ダブルクラッドファイバーレーザーの単一偏光発振において、インライン偏光子を用いる方法と PM - FBG 直交配置の二通りで成功した。

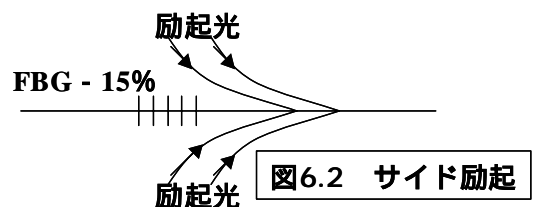
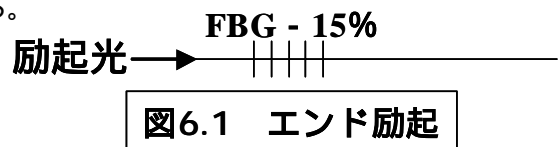
6 今後の展望

主に PM - FBG 直交配置による単一偏光発振において改善すべき点あげる。

実験の際問題となったのが励起光の導入により FBG 15% の温度が上昇してしまい Bragg 波長がシフトしてしまうことであった。また、これによってファイバーのクラッド表面に水泡が出来、出力の低下にもつながってしまう。これは FBG のクラッド表面のコンタミネーションによるものと推測される。

この解決法としては 2 つあり、一つ目の手段として図 6.1 のようにエンド励起をせずに図 6.2 のようにサイド励起を用いて実験装置を組むというものがある。

これによって温度上昇自体をなくすることが可能になる。



解決策の二つ目として、FBG のクラッド表面をリコートすることがあげられる。こうすることで FBG のクラッド表面へのコンタミネーションを避けることができ、温度調整も直接行うことができるようになる。

これらの問題を解決することで PM - FBG 直交配置のスロープ効率および出力はよりよくなることが予想される。本実験においてはインライン偏光子を用いた場合よりも出力は低くなっているが、原因としては主にファイバーのクラッド表面の状態による励起パワーの低下が考えられる。今後はいかにより安定した状態の中で測定を行えるかが重要な課題となる。