

1178nm 単一偏光ファイバーレーザーの高出力化

電子工学科 植田研究室 丸山 裕輝

1. はじめに

Yb は準 3 準位構造をもち、量子効率がよく、吸収スペクトルが広く半導体レーザーの負担を軽減できるなど多くの利点があるため、近年盛んに研究が行われている。しかし、シリカファイバーに添加された Yb の長波長領域(1150nm ~)は、利得が小さくレーザー発振させるのが難しいので、この領域で発振させたという報告は少ない。

また、近年様々な応用が見込める可視域のレーザー光源の開発が盛んに行われている。その中で、波長 589nm のコヒーレント光は波面補償光学装置の精度を上げるためのレーザーガイドスターや、医療応用、ナトリウム原子の高分解分光などに必要とされている。その光源開発のため 1178nm レーザーの第 2 高調波より発生させる方法がある。その中で、ファイバーラマンレーザーにより 1178nm レーザーが開発されているが、共振器長が長い線幅が広がってしまい、その結果、第 2 高調波発生過程の波長変換効率が低いという欠点を持っている。

そこで本研究では、第 2 高調波から 589nm 光発生可能な 1178nm において、Yb 添加ダブルクラッドファイバーレーザーを用いて直接発振させ、第 2 高調波を発生させるために単一偏光化し高出力化させることを目的とし、実験を行った。

2. Yb ファイバーの特性

Yb ファイバーの吸収・放出断面積は図 2-1 のようになる。図からわかるように、1178nm の放出断面積に比べ 1000 ~ 1100nm での放出断面積が非常に大きいので、1178nm でレーザー発振させるのは難しいことが予想される。

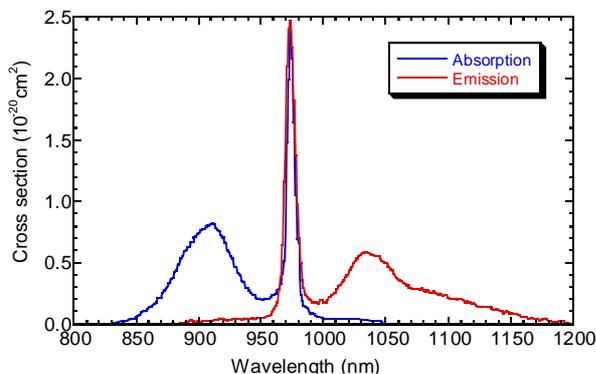


図 2-1 Yb ファイバーの吸収・放出断面積

また、図 2-1 の吸収・放出断面積からモデリング

された小信号利得は図 2-2 のようになった。この図から、1178nm でレーザー発振させるには利得が非常に大きな 1000 ~ 1100nm での寄生発振を抑制することが重要になることがわかる。

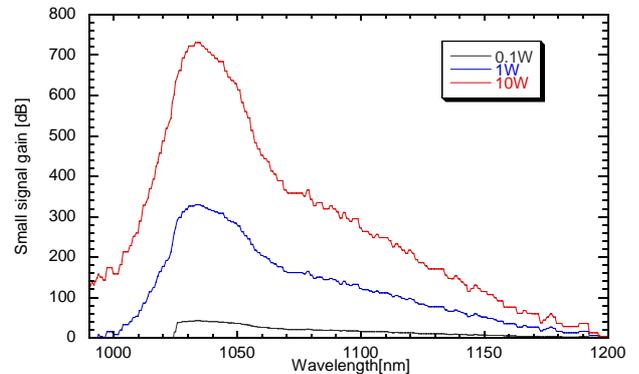


図 2-2 小信号利得のモデリング

3. 寄生発振の抑制

本研究では、寄生発振を抑制するために高反射率共振器を構成した。図 3-1 に、ファイバーレーザー共振器の片端面の反射率 R_1 を HR(99% 以上) に固定し、もう一方の反射率 R_2 を変化させたときの 1178nm の発振閾値を計算したものを示した。ここで端面反射を -50dB と仮定すると、寄生発振の閾値が 200mW となる。したがって、共振器の反射率 R_2 は 23% 以上にする必要があった。反射率 R_2 を大きくすると、共振器内パワーが非常に大きくなり、数多くの上準位原子が 1178nm のレーザー光として引き抜かれるので、寄生発振が抑制される。しかし、反射率 R_2 を大きくしすぎると高出力できなくなってしまう。逆に高出力を目的に反射率を低くすると、発振後寄生発振の閾値が低下する恐れがあるので、最適値を求める必要があった。ここでは、過去に行われた実験結果をもとに HR-81% の反射率を用いて共振器を構成した。

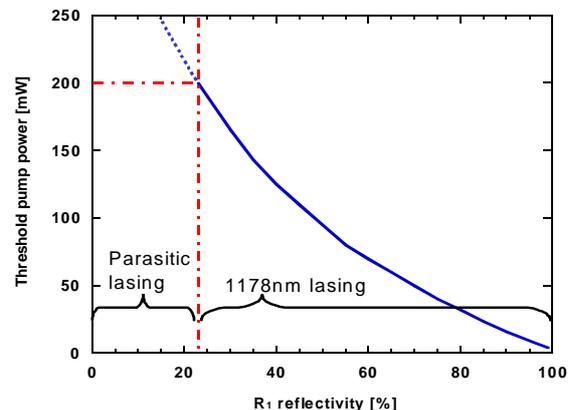


図 3-1 1178nm レーザー発振閾値

4. 直交融着法

第2高調波を効率良く発生させるために、1178nm レーザ光を単一偏光化する必要があった。過去に本研究室では、インライン偏光子を用いて単一偏光化していた。しかし、インライン偏光子には破壊閾値(10W)があり、レーザー光の出力が1.25Wに制限されてしまった。また、この方法では損失が大きいため、高出力化に臨めない。

そこで、直交融着法という画期的な方法をとることによって損失の少ない共振器の構築が可能となった。また、共振器が全てファイバーで構成されているため、数百Wクラスの出力を可能にし、インライン偏光子で問題となった出力制限を克服した。この直交融着法について簡単に説明する。

偏波保持ファイバー(PANDA ファイバー)にファイバーブラッググレーティング(FBG)が書き込まれているとき、そのファイバーの透過スペクトルは図4-1のようになり、2つのブラッグ波長を持つことが確認できる。短波長側でfast軸に偏波する光のブラッグ波長がFBGで反射する。同じFBGが書き込まれたPANDAファイバーを応力付加方向を一致させて融着すると、2つのPANDAファイバーで図4-2のx,y軸のブラッグ波長がそれぞれ一致するため、2つの偏光が発振する。そこで、図4-3のように、FBG1のfast軸のブラッグ波長と、FBG2のslow軸のブラッグ波長が一致するように、各FBGを設計する。それらのファイバーを応力付加方向が互いに直交するように融着する。すると、x軸方向に偏波する光のみ2つのPANDAファイバーでブラッグ波長が一致するため、単一偏光が発振する。

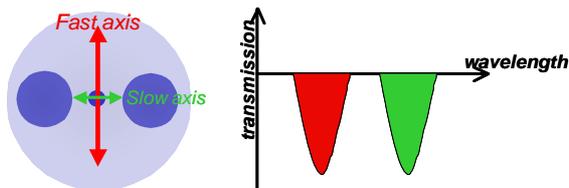


図4-1 PANDAファイバーの断面図と透過スペクトル

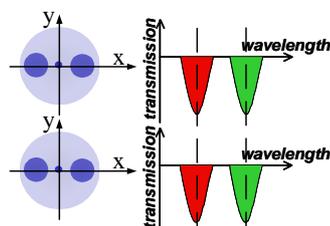


図4-2 応力付加方向を同一で融着した場合

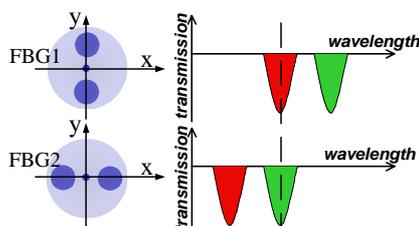


図4-3 直交融着法

5. 実験装置

本研究で用いた実験装置を図5-1に示す。PM-Yb-DCFと2つのFBGより共振器を構成した。PM1060-GDFに書き込まれているFBG1は反射率:>97.5%、slow軸中心波長:1178.15nm、FWHM:0.19nmであり、980PANDAに書き込まれているFBG2は反射率:81.8%、slow軸中心波長:1177.79nm、FWHM:0.07nmである。本実験では偏光を保持するため、すべてのファイバーでPANDAファイバーを用いた。直交融着法により共振器にインライン偏光子はない。FBG2に温度制御装置を付けている。励起波長は976nmである。

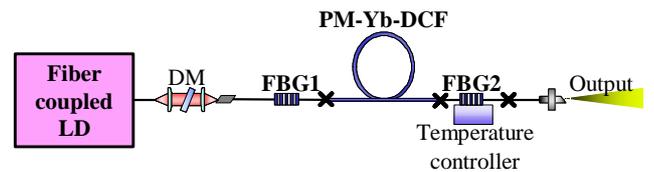


図5-1 1178nm単一偏光ファイバーレーザー実験図

6. 出力再現性と共振器内損失

図5-1の共振器を用いて発振実験を行った。このときの出力特性を図6-1に示した。表6-1に発振実験の回数と最大出力、共振器内損失についてまとめた。これらからわかるように、発振実験を行うにしたがって最大出力は低下し、共振器内損失は大きくなるばかりであった。最大出力を決めるパラメータには、LDの励起パワーの出力限界があり、回目の発振実験ではそのことが理由となった。しかし、回目の発振実験で最大出力を制限していたのは寄生発振であった。寄生発振がセルフQスイッチに転じると、共振器内に蓄えられた膨大なパワーを一気に共振器から引き抜こうとするため、非常にエネルギーが大きなジャイアントパルスに成長する。そのジャイアントパルスは共振器の励起側端面から出射するとき、その端面を破壊し、共振器の機能を停止させてしまう。ASEが成長すると寄生発振が発生しやすく前記のように端面を破壊する可能性が高い。この寄生発振の発生は本研究にとって非常に厄介な問題であった。そこで、この寄生発振を生じ易くさせていると考えられる共振器内損失増加の原因を追及する必要があった。

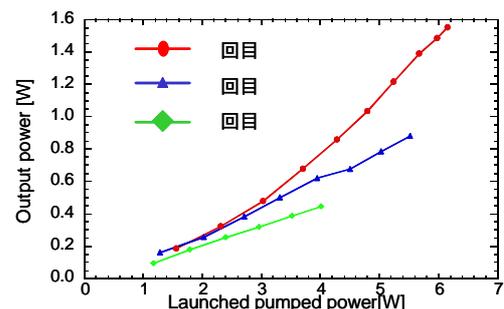


図6-1 出力特性

表 6-1 最大出力と共振器内損失

	共振器内損失 [dB]	最大出力 [W]
	0.55	1.55
	0.86	0.88
	1.3	0.48

7. 共振器内損失の評価

共振器内損失には融着損失と PM-Yb-DCF の伝送損失が含まれる。そこで、カットバック法を用いて PM-Yb-DCF の伝送損失を測定した。その結果を表 7-1 に示した。

表 7-1 PM-Yb-DCF(7m)の伝送損失

	共振器内損失[dB]	伝送損失[dB]
	0.55	< 0.08
	0.86	0.25
	1.3	0.77

表 7-1 より PM-Yb-DCF の伝送損失は発振実験を行うにしたがって増加していることが確認できた。この原因をさらに追及するため PM-Yb-DCF の吸収スペクトルを測定した。その結果が図 7-1 である。本来ならば Yb ファイバーの吸収スペクトルが波長 800 ~ 1100nm に現れるのだが、その吸収は非常に大きいので吸収飽和が生じ分光器が正確に計測できなかった結果、図のように歪な形になってしまった。図 7-1 で問題となるのは、600nm 付近では通常の Yb ファイバーでは見られない大きな吸収が生じたことである。これはカラーセンターという現象でフォトダークニングが起きたと考えられた。[1] 図 7-1 において、共振器内損失測定で用いた LD 波長 1310nm、また発振波長 1178nm の吸収を拡大してみると、図 7-2 のようになった。この図からも通常 Yb ファイバーでは吸収を示さない 1100nm 以上の波長域でも吸収が生じ、1310nm では 0.11dB/m の吸収を持っていることがわかった。

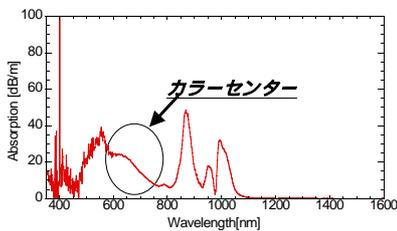


図 7-1 発振後の PM-Yb-DCF の吸収スペクトル

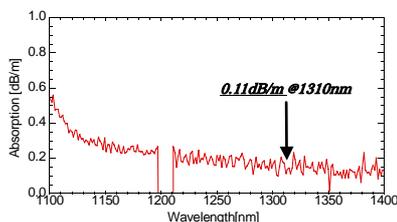


図 7-2 図 7-1 の 1100 ~ 1400nm の拡大図

以上のことから、本研究では 1178nm でレーザー発振させるため高反射率共振器を構成した。その結果共振器内パワーが非常に大きくなり、フォトダークニングが生じやすい共振器になってしまった。そのため、発振実験を重ねるにしたがってフォトダークニングによる吸収または散乱が共振器内損失を増加させ、寄生発振の閾値が低下したと考えられた。

この問題を克服するため、フォトダークニングが生じにくい PM-Yb-DCF に変更して発振実験を行った。(Yb 原子の互いの距離を遠ざけるため Al が多く添加されている。)

8. 出力特性

PM-Yb-DCF をフォトダークニングが生じにくいものに変更して共振器を構成したところ、共振器内損失は 0.33dB となり非常に小さく抑えられた。FBG が室温状態で出力特性は図 8-1.a のようになった。8.76W 励起したとき最大出力 3.03W が得られた。これ以上励起パワーを大きくした時点で、寄生発振が発生したため、このときを最大出力とした。図 8-1.b よりレーザー光は ASE に対して強度比が 42dB あることがわかり、ASE の抑制が十分できたと言える。図 8-1.c は 1178nm 近傍のスペクトルで、半値全幅は 0.04nm であり、インライン偏光子を用いた場合よりも 0.05nm 狭くすることができた。また、図 8-1.d に偏波消光比特性を示した。最大出力時では、14.5dB となりインライン偏光子を用いたときとほぼ同等な値で十分に単一偏光化できたとと言える。

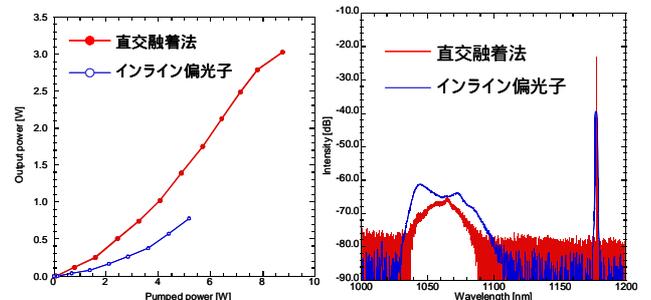


図 8-1.a 出力特性

図 8-1.b 発振スペクトル(全体)

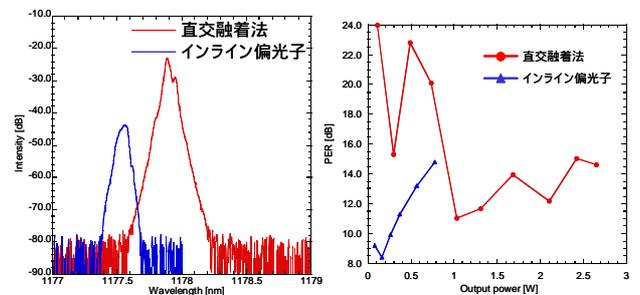


図 8-1.c 発振スペクトル(近傍)

図 8-1.d 偏波消光比特性

9. FBG2 温度制御の評価

最大出力時では図 8-1.c を見てわかるように、ピークを 2 つ持つスペクトルが得られたことは、FBG の温度変化によるブラッグ波長の不一致が

原因であることを示唆する。これは、励起光を 8W 以上にしたときに現れた。そこで、FBG2 の温度制御を行った。励起パワーを 4.88W にして、FBG2 の温度を 15 から 42 程度まで変化させたとき温度に対する出力、発振波長と半値全幅は図 9-1 のようになった。図 9-1.a と図 9-2.b から、出力が小さいとき ASE の抑制が充分できていることがわかる。その理由に、ブラッグ波長が一致しているとき共振器の反射率は最も高くなるため出力は小さくなるということが挙げられる。またそのとき、共振器内パワーが最も強くなり励起された上準位の原子の大部分が 1178nm で誘導放出され上準位の原子数は少なくなる。したがって、他の波長で発光する原子は少なく 1000~1100nm での ASE が抑制されたと考えられる。このことから、利得が大きい波長での発振を抑えて利得の小さい波長で発振させたい場合には、反射率が高い FBG で共振器を構成することが良法であると言える。

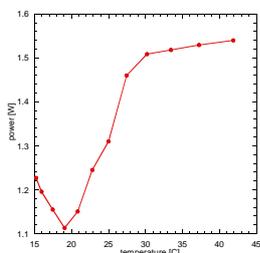


図 9-1.a 出力特性

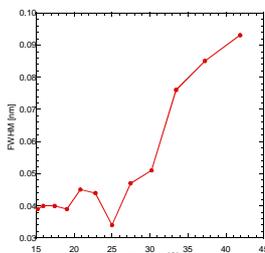


図 9-1.b 半値全幅

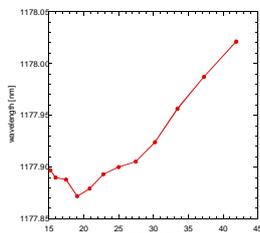


図 9-1.c 発振波長

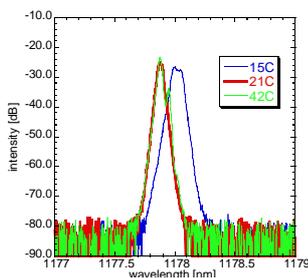


図 9-2.a 発振スペクトル (1178nm 近傍)

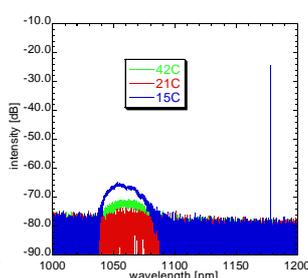


図 9-2.b 発振スペクトル (全体)

10. 第 2 高調波発生

図 10-1 に第 2 高調波発生の実験装置を示す。使用した非線形結晶は PPMgOLN で、結晶の長さは 26mm、入射断面は 1 辺 0.5mm の正方形を成している。第 2 高調波である 589nm の出力は基本波 1178nm のパワーの 2 乗に比例するため、効率よく結晶の中に 1178nm 単一偏光レーザーを入

射する必要がある。本実験で用いた結晶では、Boyd and Kleinman 曲線[1]より最適ビーム径は 28 μm であった。このビーム径に絞り込むため、焦点距離 11mm と 75mm のレンズを使用した。また、結晶の温度が 79.1 で一定になるように温度調節した。その結果、図 10-2 のような出力特性が得られた。入力 3.03W の時最大出力 205mW であった。理論値は入力 3.03W で 251mW と計算できるため、入射光のアライメント、結晶の温度調節を最適化することで更なる高出力が予想される。

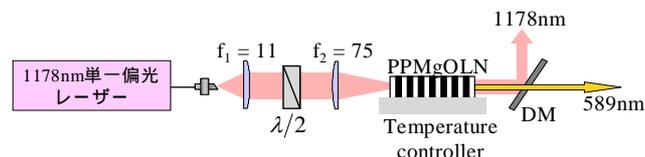


図 10-1 第 2 高調波発生実験図

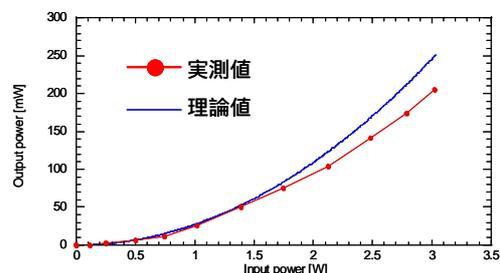


図 10-2 第 2 高調波出力特性

11. 結論

本研究では、高反射率共振器を構成することで寄生発振を抑制し、かつ直交融着法を用いることで損失の少ない高出力可能な 1178nm 単一偏光ファイバーレーザー共振器の開発に成功した。1178nm 単一偏光ファイバーレーザーは最大出力 3.03W、ASE との強度比 42dB、半値全幅が 0.04nm、偏波消光比が 14.5dB とインライン偏光子を用いたときに比べ、大いに改善された。第 2 高調波の 589nm 光は入力 3.03W で 205mW の出力が得られた。

12. 今後の予定

フォトニックバンドギャップファイバー(PBF)を用いた増幅も予定している。PBF はフィルター特性を持っているため、問題の ASE を透過せず、1178nm レーザーのみを増幅させることができる。これにより、更なる高出力化が可能となり、目標の 10W 出力も期待できる。

参考文献

- [1] J.J. Koponen, M.J. Soderlund, H.J. Hoffman & S.K.T. Tammela, *Measuring photodarkening from single-mode ytterbium silica fiber*, Opt.Exp, 14, 11539 (2006)
- [2] G.D.Boyd, D.A.Kleinman, *Parametric Interaction of Focused Gaussian Light Beams*, J.Appl.Phys. 39,3597 (1968)