

1178nm Yb 添加ダブルクラッドファイバーレーザーの開発

電子工学専攻 植田研究室 太田 淳

1. はじめに

レーザーの利得媒質として使用される希土類には、Er、Nd、Yb、Pr、Sm、Ho などが知られている。その中で、準 3 準位構造で量子欠損が少ない、吸収スペクトルが広く半導体レーザーの負担が軽減されるなど、多くの利点を持っている Yb の研究が近年盛んに行われている。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が難しいので、この領域でレーザー発振を実現したという報告は少ない。

また、近年様々な応用のために可視域のレーザー光源開発が盛んになってきている。特に、波長 589nm のコヒーレント光は、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 [1]。589nm レーザーは色素レーザーや固体レーザーと周波数変換技術により発生可能であるが、複雑でコストが高いという欠点がある。それゆえ、これらの問題を解決するために、冷却効率がよく、丈夫でコンパクトであるという特徴をもつファイバーレーザーで 589nm レーザーを開発することが強く望まれてきた。実際、Er 添加ファイバーレーザーと液体窒素で冷却した Nd 添加ファイバーレーザーの和周波混合によって、589nm レーザーが得られたという報告があるが、この方法もかなり複雑である [2]。一方、1178nm レーザーの第二次高調波発生により 589nm レーザーは簡単に得ることができる。ファイバーレーザーではなく、ファイバーラマンレーザーにより 1178nm レーザーは開発されてきたが、バンド幅が広く、その結果、第二次高調波発生過程において変換効率が低いという欠点がある [3]。

以上のことから本研究は、第二次高調波発生により 589nm を得ることが可能な 1178nm において、Yb 添加ダブルクラッドファイバー (Yb-DCF) を用いて直接レーザー発振させ、さらに第二次高調波発生のために単一偏光化させることを目的としている。

2. Yb

シリカファイバーに添加された Yb の吸収断面積と蛍光断面積を図 1 に示す。1178nm の利得は 1000~1100nm の利得に比べて極めて小さく、この波長での発

振が難しいことが分かる [4]。

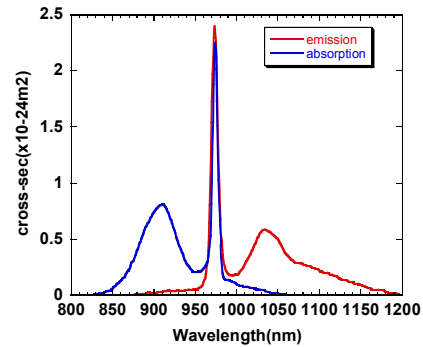


図 1: シリカファイバーに添加された Yb³⁺ の吸収断面積と蛍光断面積

3. モデリング

小信号利得の式から本実験で使用した Yb-DCF の単一通過での小信号利得を求めた結果を図 2 に示す [4]。この時の Yb-DCF 長は 6m で、励起波長は 975nm である。シリカファイバーに添加された Yb³⁺ の放出スペクトルは、1000nm~1200nm の領域に広がっているが、1050nm 付近の領域と 1178nm には利得に大きな差がある。それゆえ、1178nm レーザーを得ることは大変難しく、他の波長の発振を抑制することが重要である。

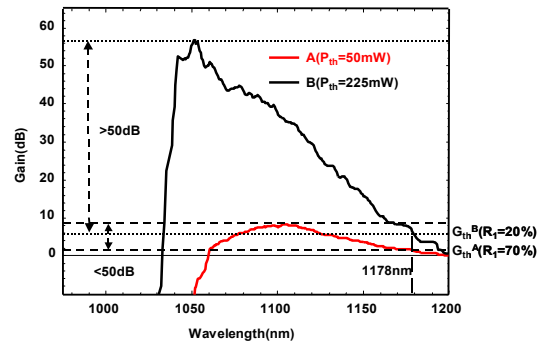


図 2: Yb-DCF の小信号利得スペクトル

(A ($R_1=70\%$, $P_{th}=50mW$), B ($R_1=20\%$, $P_{th}=225mW$),
 G_{th}^A, G_{th}^B : 閾利得)

次に、 R_1 反射率と 1178nm 閾励起パワー特性を図 3 に示す。点線領域は、寄生発振が生じる領域であることを示している。ここで、 R_1 と R_2 はレーザー共振器ミラーの反射率で、 G は小信号利得である。 $G^2 R_1 R_2 = 1$ において、 R_2 を高反射率 (HR) に固定し、 R_1 を変化させる。本モデリングにおいて、1178nm の閾利得に比べて他の波長の閾利得は 50dB 以上大きいと仮定している。

これは、ファイバー端面でのフレネル反射を防ぐためにファイバーの両端面が 8° のへき開面にしてあるためである。1178nm でレーザー発振するためには、他の波長よりも先に 1178nm の利得が閾利得に達しなければならないが、レーザー共振器ミラーの反射率が低下すると、レイリー散乱やその他の散乱により、1050nm 付近の利得が 1178nm よりも先に閾利得に達してしまい寄生発振が生じる。よって、1178nm レーザーを得るためには、少なくとも反射率 23%-HR の Q 値の高い共振器が必要である。

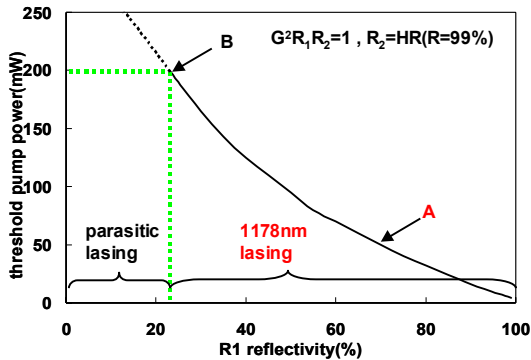


図 3 : R₁ 反射率と 1178nm 閾励起パワー特性

4. 1178nm Yb-DCF レーザー

前述した小信号利得のモデリング結果とファイバー最適長のモデリングを行った結果を考慮し、1178nm ファイバーレーザーを構築した。図 4 に実験装置図を示す。Yb-DCF と 2 つのファイバーブラッググレーティング (FBG) で共振器を構成した。Yb-DCF (コア径 5.0μm、クラッド径 126μm、クラッド開口数 0.46、ファイバー長 6m) の励起光入射面側には融着損失をなくすために、コアに直接 FBG1 (反射中心波長 1178.7nm、反射率 96%、反射帯域半値全幅 (FWHM) 0.7nm) を書き込み、終端に FBG2 (反射中心波長 1178.3nm、反射率 HR (99% 以上)、反射帯域半値全幅 (FWHM) 1.5nm) を融着し、共振器を構成した。ここでの、融着損失は測定の結果 5% 以下であった。また、ファイバー端面でのフレネル反射による寄生発振を防ぐために、両端面を 8° のへき開面とした。このファイバーを、ファイバー出力半導体レーザー (LD) (ピーク波長 976nm、最大出力パワー 23.3W) を使用して、最大励起パワー 19W でクラッド励起した。

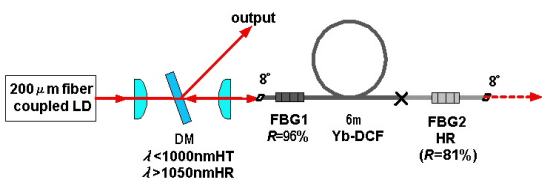


図 4 : 1178nm Yb-DCF レーザー実験装置図

96%-HR 共振器、励起パワー 19W の時のレーザー発振スペクトルを図 5 に示す。図 5 から、1178nm レーザー、975nm 励起光の散乱と 1000nm~1100nm 領域に広がっている ASE があることが確認できる。また、この時 ASE に対し 50dB 以上の強度比の 1178nm レーザー出力であることも確認できる。出力パワー特性を図 6 に示す。出力パワーは単調に増加しているが、励起パワーが約 10W になったところで、パワー増加率が低下した。これは、ASE の増加による損失が原因であると考えられる。励起パワーが 19W の時に最大 6.5W 出力パワーを得ることができた。モデリング 結果では最大出力パワーは 8.9W であった。

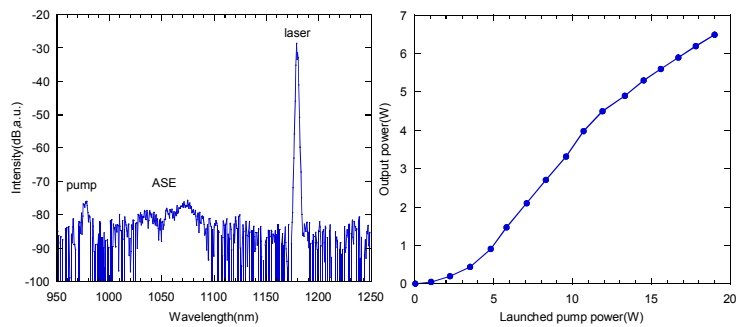


図 5 : 1178nm レーザー発振スペクトル (950nm~1250nm)

図 6 : 出力パワー特性

1176nm~1181nm でのレーザー発振スペクトルを図 7 に示す。出力パワーが増加するに従い、レーザー発振波長が長波長側にシフトした。最大出力パワー 6.5W の時のスペクトルシフト量は、約 1.2nm であった。また、スペクトルが二つのピークを持った構造になっている。図 8 に共振器内スペクトルとファイバー両端面での出力スペクトルを示す。共振器内スペクトルは、Yb-DCF と FBG2 を書き込んだ HI-1060 ファイバーの融着部分での散乱光を測定することで得た。ファイバー両端面での出力スペクトルが二つのピークを持った構造になっているのに対して、共振器内スペクトルは単一ピークを持った構造である。これは、Q 値の高い共振器構成になっていることにより、共振器内パワーが大きくなり (最大出力パワー 6.5W 時に概算で約 160W)、共振器内スペクトルが広範囲に広がり、FBG を透過する際に反射が起こったためであると考えられる。これらの問題を解決するために、FBG の反射中心波長の制御と共振器 Q 値の最適化が必要である。

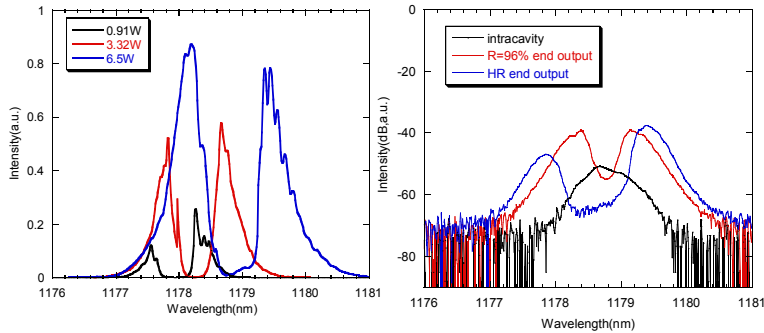


図 7 : 1178nm レーザー発振スペクトル(1176nm~1181nm)

図 8 : 共振器内スペクトルとファイバー両端面出力スペクトル

96%-HR 共振器では、Q 値の高い共振器構成が原因で、出力スペクトルが二つのピークを持った構造になってしまったので、その問題を改善するために、FBG2 の反射率を HR から 81%にして、96%-81%共振器を構築し同様の実験を行った。FBG2 の特性は、反射中心波長 1178.19nm、反射率 81%、反射帯域半値全幅(FWHM) 0.26nm である。レーザー出力は、FBG2 ファイバー端面側から得た。

96%-81%共振器の出力パワー特性を図 9 に示す。励起パワー7.54W で、出力パワー2.5W の 1178nm レーザーを得ることができた。1177.4nm~1178nm でのレーザー発振スペクトルを図 10 に示す。単一ピークであり、スペクトル線幅は、FWHM で 0.08nm であった。しかし、励起光パワーを 7.54W から増加させると、その他の波長(1050nm~1100nm)が発振し始め、不安定発振状態になった。これは、FBG2 の反射率を小さくし共振器の Q 値を小さくしたために、1178nm の発振閾値が上がり、他の利得の大きい波長が発振しやすくなったためである。さらに、励起光パワーを約 10W に増加させると、Yb-DCF が破壊され、レーザー発振しなくなった。この原因は、誘導ブリリユアン散乱 (SBS) を種とする自己 Q スイッチパルスであると考えられる。寄生発振の抑制とレーザー発振波長の安定化のために、更なる最適化が必要である。

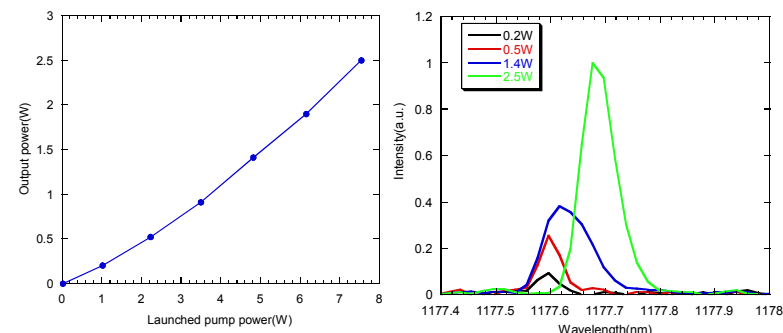


図 9 : 出力パワー特性

図 10 : 1178nm レーザー発振スペクトル(1177.4 nm ~ 1178nm)

5. 単一偏光 1178nm Yb-DCF レーザー (インライン偏光子)

これまでのレーザーはランダム偏光で発振しており、次に単一偏光化を行った。1178nm 単一偏光 Yb-DCF レーザーの実験装置図を図 11 に示す。基本的な構成は図 4 と同様である。使用した全てのファイバーが、コアに応力を付与することで偏波を保持する PANDA (Polarization – maintaining AND Absorption – reducing) ファイバーである。また、共振器内に PANDA ファイバーの付いた耐高出力(単一通過で 5W まで)インライン偏光子を挿入した。前述したランダム偏光時の実験結果より、単一ピークのスペクトルを得ることができた 81%-96%共振器と同程度の Q 値を持った共振器を構成した。FBG1 は感光性のある希土類無添加ダブルクラッドファイバー(PM1060-GDF)に書き込んであり、その特性は、slow 軸反射中心波長 1178.02nm、反射率 78%、反射帯域 FWHM 0.1nm である。FBG2 は 980PANDA ファイバーに書き込んであり、その特性は、slow 軸反射中心波長 1178.00nm、反射率 HR、反射帯域 FWHM 0.26nm である。これらと PM-Yb-DCF を融着接続し共振器を構成した。この共振器条件における出力パワーの限界は、インライン偏光子の耐え得るパワーから計算すると、約 1.25W である。この時の PM-Yb-DCF 長は 6.5m である。また、レーザー出力端における偏波消光比 (PER) の測定を行ったところ 25.2dB であった。融着損失とインライン偏光子の挿入損失による損失は -1.6dB であった。ファイバー端面でのフレネル反射を防ぐために、励起光入射端面を 8°に研磨し、もう一方には 8°の面になっている PM-FCAPC を融着した。また、FBG の反射波長を制御するために、励起光による熱の影響が大きい FBG1 を銅製ホルダーに固定し、ホルダー全体を温度制御した。

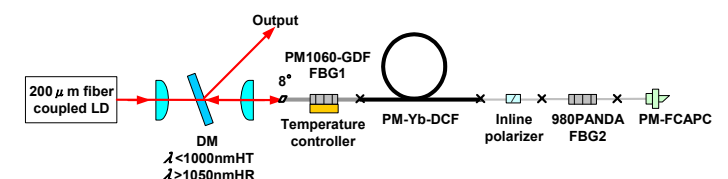


図 11 : 単一偏光 1178nm Yb-DCF レーザー実験装置図

(インライン偏光子)

1178nm 単一偏光ファイバーレーザー（インライン偏光子）発振測定結果を示す。図 12 に出力パワー特性を示す。全出力パワー（ASE+1178nm レーザーパワー）と 1178nm レーザーパワーの出力特性である。ここで 1178nm レーザーパワーは、出力スペクトルにおける ASE と 1178nm の比から求めた。最大励起パワー5.17W の時に、全出力パワー1.039W、1178nm レーザーの最大出力パワー780mW を得た。ここで、全出力パワーが前述した出力パワーの限界値に近い値になったので、これ以上励起パワーを増加させなかった。各出力パワーにおけるレーザー発振スペクトルは、いずれの出力パワーにおいても、ASE に対し 20dB の強度比の 1178nm レーザー出力であった。また、図 13 に各出力パワーにおけるレーザー発振スペクトル（1177nm~1178nm）特性を示す。1177.5nm ~1177.6nm でレーザー発振していることが分かる。レーザー発振波長が安定しているのは FBG1 を温度制御しているからである。出力パワーが大きい時にレーザー発振波長が短波長側にシフトしているのは、FBG1 の温度が最適な温度よりも低くなってしまったためであると考えられる。

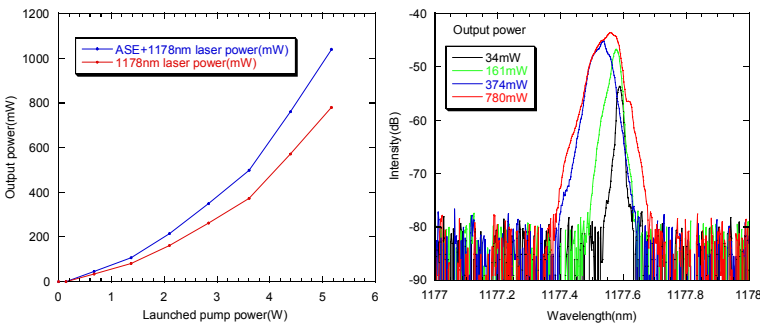


図 12：出力パワー特性

図 13：レーザー発振スペクトル(1177nm~1178nm)特性

出力パワーの増加に伴いスペクトル線幅は広がっていたが、最大出力パワーの時に FWHM で 0.09nm であり十分狭線幅であった。また、PER は最大出力パワーの時に約 15dB であった。次に、励起パワー1.38W の時に、FBG1 の温度を変化させ、両端の FBG の反射波長整合時と不整合時のスペクトルを測定した。そのスペクトルを図 14 に示す。FBG の反射波長整合時は、ASE に対し約 20dB の強度比のレーザー出力であったが、FBG1 の温度の変化に伴い ASE の強度が増加していき、レーザーの出力強度は低下していった。またさらに、温度変化量を大きくしていくと、最終的には 1178nm に

おけるレーザー発振が止まってしまった。このことから、1178nm において直接レーザー発振させるためには、高い Q 値を持った共振器が必要であり、FBG の反射波長の整合が取れていることが重要であることが分かる。図 15 に、FBG1 温度制御用銅製ホルダーとインライン偏光子の温度特性を示す。励起光の増加に伴い、FBG の Bragg 波長シフト量が大きくなるので、安定したスペクトルを得るために、銅製ホルダーの温度を低下させたことが分かる。出力パワーが 300mW 以上の時から、スペクトルが安定していたので、銅製ホルダーの温度を一定に保った。インライン偏光子の温度が上昇しているのは、出力パワーの増加によりパワー負荷が大きくなったためであると考えられる。全出力パワーが最大 1.039W の時にインライン偏光子のパワー負荷は、約 8.34W (単一通過で 4.17W) であると予想される。高 Q 共振器であるために、共振器内パワーは高くなってしまふ。また PER の値が低い時にも温度上昇する。それは、ウォークオフする偏光によるパワー負荷が大きくなるためである。また、今回 1064nm 用インライン偏光子を使用したので、コーティング等の問題から 1178nm で使用した場合熱負荷が増大することが考えられる。以上のことから、インライン偏光子の温度が約 37℃まで上昇したと考えられる。

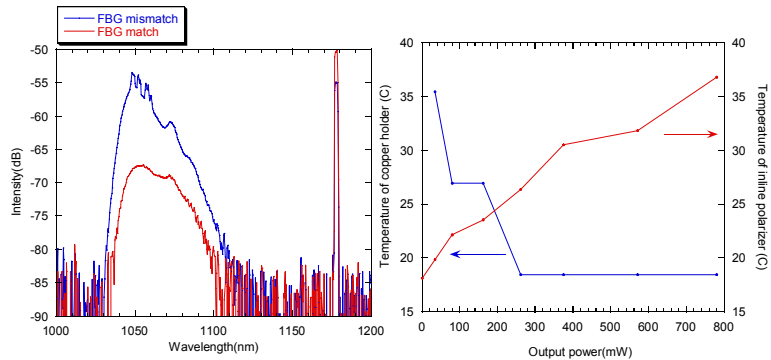


図 14：FBG 反射波長整合時と不整合時のスペクトル (励起パワー1.38W)

図 15：FBG1 温度制御用銅製ホルダー、インライン偏光子温度特性

6. 単一偏光 1178nm Yb-DCF レーザー (直交法)

通常、PANDA ファイバーを使用した共振器を構築する際には、PANDA ファイバーの応力付与部が一致するように融着する。しかし、両端の PM-FBG の応力付与部が直交配置となるように融着することにより、偏光

子を使用することなく単一偏光化が可能となる。この方法を、本文では直交法と記す。

共振器両端のFBGをFBG1、FBG2とすると、通常の融着時と直交法時それぞれのFBGの透過スペクトルは図16のようになる。通常の融着時には図のように、X軸、Y軸それぞれの偏光に関してFBGのBragg波長が一致しているので、両方の偏光で発振する。それに対して直交法では、まずFBG1のY軸のBragg波長とFBG2のX軸のBragg波長を一致させる。この方法としては、Bragg波長の温度特性を利用する方法とあらかじめそれらの波長が一致したFBGを利用する方法がある。しかしこのままでは、それぞれの軸に対して、FBGのBragg波長が一致していないために共振器が構成されず、どちらの偏光も発振しない。そこで、図のように応力付与部を直交配置で融着すると、Y軸の偏光に関してはBragg波長が一致していないので発振しないが、X軸の偏光に関してはBragg波長が一致しているので発振する。これにより、偏光子を使用することなく単一偏光発振が可能になる。

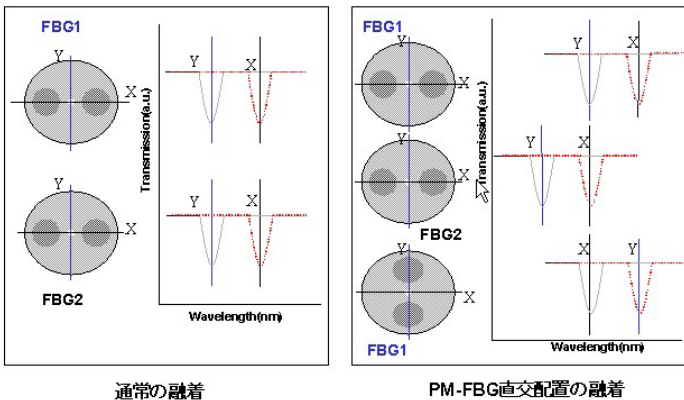


図16：通常の融着時とPM-FBG直交配置の融着時のFBG透過スペクトル

1178nmファイバーレーザー共振器は、共振器Q値が高く共振器内パワーが大きくなるために、インライン偏光子を使用した単一偏光ファイバーレーザーの実験では、出力パワーに限界があった。そこで、高出力化のためにインライン偏光子を使用しないこの直交法により、1178nm単一偏光ファイバーレーザーを構築した。

図17に実験装置図を示す。基本的な構成はインライン偏光子を使用した時と同様である。PM-Yb-DCF長は6.5mである。直交法により単一偏光化を行うので、インライン偏光子は使用せずに、PM-Yb-DCFと980PANDA-FBG2の応力付与部は一致するように融着し、PM-Yb-DCFとPM-GDF-FBG1の応力付与部が直交配置となるように融着した。共振器ミラーに、FBG1

(slow軸反射中心波長1178.27nm、反射率78%、反射帯域FWHM0.1nm)とFBG2(slow軸反射中心波長1178.00nm、反射率HR、反射帯域FWHM0.26nm)を使用した。ここで、直交法を行うためにFBG1には、slow軸反射中心波長がFBG2のslow軸反射中心波長に比べて0.27nm長波長側にあるFBGを使用した。さらに、FBG1の温度を制御することにより、FBG1のfast軸反射中心波長とFBG2のslow軸反射中心波長を一致させた。またこの時、レーザー出力端におけるPERの測定を行ったところ29.4dBであった。融着損失は-0.75dBであった。直交法はインライン偏光子を使用するときと比べて、インライン偏光子の挿入損失がなく、また融着部が1ヵ所少なくなるので、挿入損失や融着損失による損失が小さくなるというメリットもある。

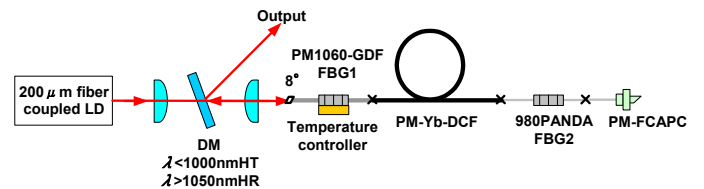


図17：単一偏光1178nm Yb-DCFレーザー実験装置図(直交法)

直交法による1178nm単一偏光ファイバーレーザー発振測定結果を示す。図18に出力パワー特性を示す。本実験においては、波長1120nm以下遮断、波長1150nm以上透過のロングパスフィルターを使用することで、1178nmレーザーパワーを測定した。最大励起パワー5.17Wの時に、1178nmレーザーの最大出力パワー1.85Wを得た。直交法により、インライン偏光子使用時では不可能であった、1W以上の1178nm出力パワーを得ることに成功した。図19に各出力パワーにおけるレーザー発振スペクトル(1000nm~1200nm)特性を示す。いずれの出力パワーにおいても、ASEに対し約30dBの強度比の1178nmレーザー出力であった。ただし、出力パワーが1.85Wの時のスペクトルを見ると、波長1070nm付近で寄生発振が生じている。この時、寄生発振は生じたり生じなかったりしていたので、寄生発振が生じる閾値であることが分かった。よって、これ以上励起パワーを増加すると、ジャイアントパルスが生じファイバーが破壊される可能性があるため、これ以上励起パワーを増加させなかった。

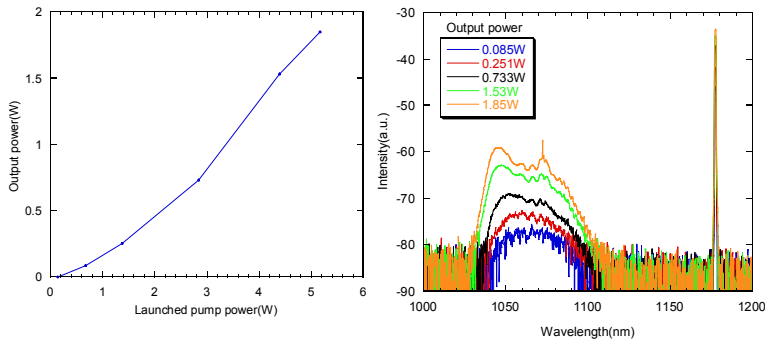


図 18 : 出力パワー特性

図 19 : レーザー発振スペクトル(1000nm~1200nm)特性

図 20 に各出力パワーにおけるレーザー発振スペクトル (1177nm~1178nm) 特性を示す。1177.5nm~1177.6nm でレーザー発振していることが分かる。レーザー発振波長が安定しているのは FBG1 を温度制御しているからである。出力パワーの増加に伴いスペクトル線幅が広がったが、最大出力パワーの時に FWHM で 0.06nm であり十分狭線幅であった。PER は最大出力パワーの時に約 10dB であり、インライン偏光子を使用した時に比べて、PER が低下してしまった。FBG1 温度制御用銅製ホルダーの温度特性を図 21 に示す。室温時の FBG1 温度制御用銅製ホルダーの温度は約 19℃であり、低励起パワーの時に FBG1 の fast 軸反射中心波長と FBG2 の slow 軸反射中心波長の整合が取れた時の FBG1 温度制御用銅製ホルダーの温度は約 28℃であった。励起光の増加に伴い、FBG の Bragg 波長シフト量が大きくなるので、安定したスペクトルを得るために、銅製ホルダーの温度を低下させた。

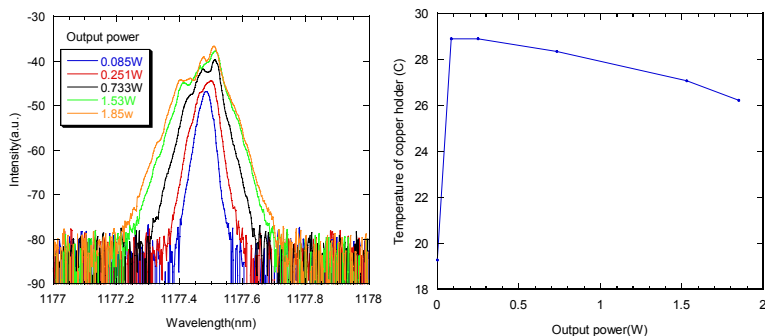


図 20 : レーザー発振スペクトル(1177nm~1178nm)特性

図 21 : FBG1 温度制御用銅製ホルダー温度特性

7. まとめ

シリカファイバーに添加された Yb の 1178nm における利得は 1000~1100nm 領域の利得に比べて極めて小

さく、1178nm で直接レーザー発振させることは困難である。そこで、本研究では Yb-DCF の小信号利得と最適長のモデリングにより、1178nm Yb-DCF レーザー共振器の最適化を行った。モデリング結果を考慮し、1178nm において Q 値の高い共振器を構築し、レーザー発振実験を行い、その出力特性を評価した。増幅自然放出光 (ASE) に対し 50dB の強度比で、出力パワー 6.5W の 1178nm Yb-DCF レーザーの開発に成功した。このとき、反射率が 96% と HR の FBG を使用しており、共振器 Q 値が高すぎたことにより、レーザー出力スペクトルが二つのピークを持った形状になった。そこで、その問題を解決するために FBG の反射率を 81% と 96% に変えたところ、単一ピーク、狭スペクトル幅 (FWHM 0.08nm) で出力パワー 2.5W を得た。

また、第二高調波発生のために単一偏光化させることを目的として、インライン偏光子と PANDA ファイバーを使用して、1178nm の単一偏光ファイバーレーザー共振器を構築した。この時、最大出力パワー 780mW の時、スペクトル幅 FWHM で 0.09nm、PER 15dB の 1178nm 単一偏光ファイバーレーザーの開発に成功した。また、高出力化のために、出力パワーが制限されるインライン偏光子を使用する代わりに、直交法により 1178nm 単一偏光ファイバーレーザー共振器を構築した。最大出力パワー 1.85W の時、スペクトル線幅が FWHM で 0.06nm、PER 10dB の 1178nm 単一偏光ファイバーレーザーの開発に成功した。これらの結果は、今後高効率波長変換を行う際に十分な特性である。

今後の課題として、ASE、寄生発振の抑制のためにコアを伝搬する ASE をクラッドモードに結合させることで透過損失を与え、さらに 1178nm には透過損失を与えない LPG の作製が望まれる。さらに、共振器条件の最適化を行うことにより、高出力化、狭線幅化が望まれる。

参考文献

- [1] N. Saito, S. Wada, K. Akagawa, Y. Hayano, H. Takami, Y. Saito, and M. Iye: The papers of Technical Meeting on Optical and Quantum Devices, IEE Japan, (2004), OQD-04-14.
- [2] J. W. Dawson, A. Drobshoff, Z. Liao, R. J. Beach, D. M. Pennington, S. A. Payne, L. Taylor, W. Hackenberg, and D. Bonaccini: Proc. SPIE, 4974, (2003), 75.
- [3] D. Georgiev, V.P. Gapontsev, A.G. Dronov, M. Y. Vyatkin, A.B. Rulkov, S.V. Popov, and J. R. Taylor: Opt. Express, 13, (2005), 6772.
- [4] H. M. Pask, R. J. Carman, D. C. Hanna, A. C. Tropper, C. J. Mackechnie, P. R. Barber, and J. M. Dawes: IEEE J. Select. Topics. Quantum Electron., 1, (1995), 2.