

1178 nm Yb 添加ファイバーレーザーの開発

電子工学専攻 植田研究室 丸山裕輝

1. はじめに

現在、レーザーガイドスター(LGS)や医療への応用として黄～橙色ファイバーレーザー光源の開発が盛んに行われている。これまでに、1140～1200 nmのファイバーレーザー光源(ファイバーラマンレーザー(FRL)、ビスマスファイバーレーザー(BFL))を開発し、その出力を波長変換し第2高調波(570～600 nm)を発生させる方法が報告されている[1,2]。しかし、これらの方法ではファイバー長を長くする必要があり、非線形効果によってレーザー線幅が広がってしまい、波長変換の効率が低下するという問題がある。また、励起方法は輝度の高いYbファイバーレーザーによるコア励起が必要となる。その一方で、Yb添加ファイバーによる長波長域(1150～1200 nm)におけるレーザー動作の研究がされている[3]。Yb添加ファイバーはレーザーダイオード(LD)による直接励起が可能であり、レーザー線幅もFRLやBFLに比べ狭線化できるため効率的な第2高調波発生が可能となる。

Fig.1-1にYb添加ファイバーの小信号利得スペクトルを示した。長波長域の利得に対し、高利得域(1000～1100 nm)の利得はlogスケールで60倍以上も高いため、長波長域でレーザー動作させようとしても簡単に高利得域で増幅自然放出(ASE)が増大し、寄生発振によって出力制限を受けてしまう。実際に例をあげると、Yb添加ダブルクラッドファイバー(Yb-DCF)と反射率99.9%と70%のファイバーブラッググレーティング(FBG)で共振器を構成し前方励起したときFig.1-2のように、ASEが増大し容易に寄生発振が生じてしまった。さらにその寄生発振がセルフQスイッチ発振するとジャイアントパルスに成長しファイバーの端面をFig.1-3のように破壊し、共振器の機能を停止させた。端面の修復には研磨が必要で困難が要された。このようなことからYb添加ファイバーの長波長域でレーザー動作させるためには高利得域で発生するASE・寄生発振を抑制するというのがこの研究の最大の課題となる。

本研究では、LGSの要求値である出力10W以上

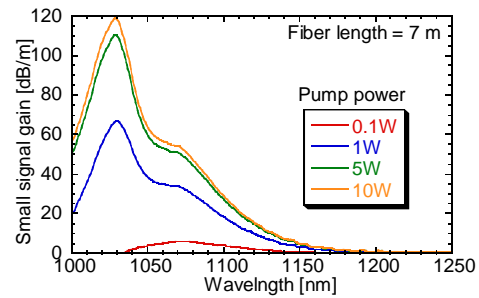


Fig.1-1 Yb添加ファイバーの小信号利得スペクトル

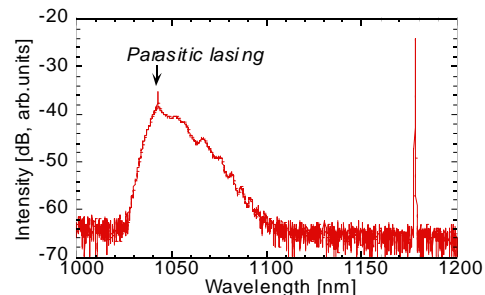


Fig.1-2 ASEと寄生発振

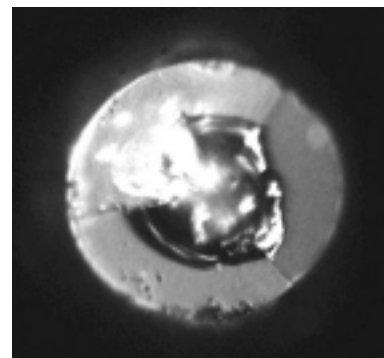


Fig.1-3 寄生発振によるファイバー端面破壊

の589 nmレーザーを得るため、20W以上の1178 nm直線偏光レーザーを出力することを目標とし、1. 高反射率Ybファイバーレーザー共振器、2. Yb添加フォトニックバンドギャップファイバー(Yb-PBGF)光増幅器の2つの方法によるASEを抑制したYb添加ファイバーレーザーの開発を行った。

2. 高反射率Ybファイバーレーザー共振器

ここでの狙いは、高反射率のFBGで共振器を構成し、1178 nmレーザーの共振器内パワーを上げ、反転分布量を減少させASEの利得を抑制することである。片側のFBGを反射率R=100%(HR)@1178 nmとし、出力側の反射率Rを変化させたとき、

1178 nm レーザー発振後の飽和利得スペクトルを計算すると Fig.2-1 のようになった。この図からわかるように、反射率 R が高くなるにつれ、反転分布量が減少し ASE の利得が低下していく。ここで、寄生発振閾値を 50dB と仮定すると、寄生発振を抑制するためには少なくとも、 $R > 50\%$ でなければならないことが Fig.2-1 からわかった。また、出力側の反射率 R による出力変化を計算すると、Fig.2-2 のようになり、 $R=80\%$ 付近で最大となることもわかった。以上の計算結果より、HR-80% @ 1178 nm の反射率の組み合わせを最適条件と考え共振器を構成することとした。また、直線偏光化のために共振器内に偏光子が必要であった。研究を始めた当初植田研究室では耐高出力インライン偏光子を共振器内に組み込み直線偏光化した。ここで、HR-80% 共振器において共振器内損失に対する出力を計算すると Fig.2-3 のようになる。このように高反射率共振器では、出力が共振器内損失に大きく影響するため、損失が 1.6dB もあるこのインライン偏光子では 1W 程度の出力が理論的にも限界であり高出力が見込めなかった。そこで植田研究室で考案された方法が直交融着法である[4]。この方法は偏波保持ファイバーに書き込まれた FBG2 本と Yb 添加ファイバーをこの方法で融着することにより、偏光子なしに偏光子機能を有した全ファイバー共振器が構成された。そのため、共振器内損失は 2 点の融着損失のみで決まり、共振器を構成した結果 0.33dB にまで低減され、高出力が期待できた。

その結果、インライン偏光子を用いた場合には最大出力 0.8W スロープ効率 26.1%であったものが、共振器内損失の低減により、最大出力 3.03W、スロープ効率 49.5%となり大幅に改善された (Fig.2-4)。

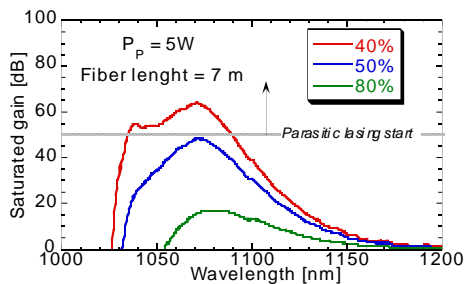


Fig.2-1 FBG 反射率 R による利得スペクトルの変化

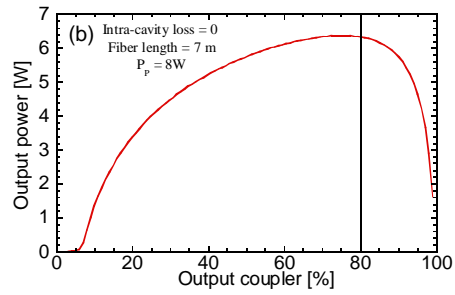


Fig.2-2 FBG反射率 R による出力変化

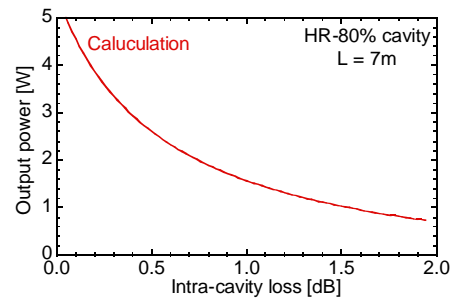


Fig.2-3 共振器内損失に対する出力の変化

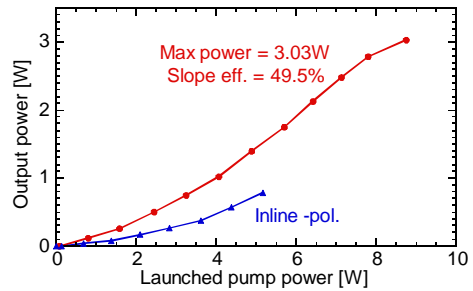


Fig.2-4 高反射率 Yb ファイバーレーザーの出力特性

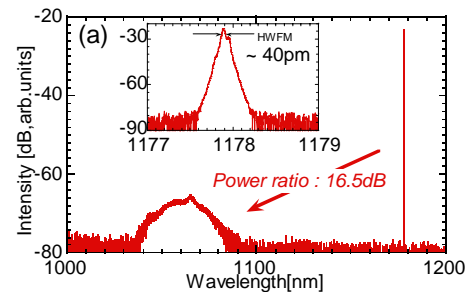


Fig.2-5 最大出力時での出力スペクトル

この出力と共振器内損失 0.33dB を計算値 (Fig.2-3) と比較すると、ほぼ理論どおりの出力が得られたと考えられた。この出力結果より、今までレーザー動作できないと考えられていた利得ピークの利得に比べデシベル換算で 60 分の 1 程度しかない非常に小さい利得を持つ長波長域の波長でも、50% 程度の高いスロープ効率でレーザー発振できることを実証した。また、最大出力時の出力スペクトルは Fig.2-5 のようになり ASE のパワーは 1178 nm レーザーに対して -16.5dB 抑制された。レーザー線幅は ~40pm と狭く、また偏波消光比も 14.5dB と十

分直線偏光化されているため効率よく第 2 高調波が発生されると期待された。目標の 20W 以上の 1178 nm レーザーを得るためには更なる高出力化が必要であるが、励起パワーを 9W 以上にした時点で寄生発振し、出力が制限されてしまった。したがって、この目標を達成するためには、高反射率 Yb ファイバーレーザー共振器に加え新たな ASE・寄生発振を抑制した高出力システムが必要となった。そこで考え出されたのが Yb-PBGF 光増幅器である。

3. Yb-PBGF 光増幅器

ここでは PBGF によって、従来のファイバーでは実現できなかった損失スペクトルを人工的に制御し、長波長域の光は低損失の伝播を可能にし、高利得域には非常に大きな損失を与えることで、ASE を抑制した高効率光増幅を行った。本研究で設計し作製された 2 本の Yb-PBGF(それぞれ Yb-PBGF-1, Yb-PBGF-2 と呼ぶ)の断面構造を Fig.3-1 に示す。Yb-PBGF は中心にある Yb が添加されたコアの周りに Ge 添加ロッド(白点、直径 $\sim 8.3\mu\text{m}$, 屈折率比+0.035)を周期的に配列したクラッドを施し、PBG を形成した。コアの両脇には B 添加ロッド(黒点、直径 $\sim 10\mu\text{m}$, 屈折率比-0.006)を配列し、コアに付加応力を加え偏波保持特性をもたせている。クラッドの周りには黒い円は空孔クラッドであり、この内側を大きな NA($\text{NA}=0.57@976\text{ nm}$)で励起光が伝搬できるように施されている。励起光のコアへの吸収量は 1.1 dB/m@976 nm である。これらのパラメータに関しては 2 本の Yb-PBGF とともに同じである。異なる点は Ge 添加ロッドの周期間隔 Λ であり、Yb-PBGF-1 は $\Lambda=9.5\mu\text{m}$ で Yb-PBGF-2 は $\Lambda=10.1\mu\text{m}$ となっている。その Λ の差によって Yb-PBGF の透過スペクトルは Fig.3-2 のように異なりをみせる。この図から PBGF は波長のバンドパスフィルター特性を有していることが確認できる。ここで Yb-PBGF-1 に着目すると、透過バンドが斜線部の高利得域に及んでしまっており、このままでは高利得で発生する ASE を抑制することは不可能であった。高利得域の ASE を抑制するには光を伝搬しないストップバンドに高利得域を収める必要があった。

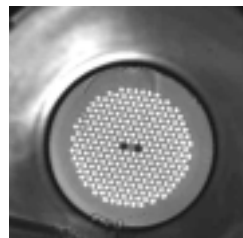


Fig.3-1 作製された Yb-PBGF の断面写真

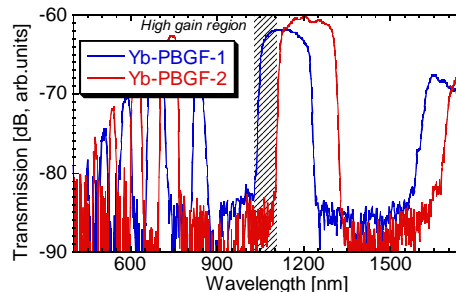


Fig. 3-2 Yb-PBGF 透過スペクトル

そこで、Yb-PBGF-1 に曲率を加えて透過バンドを狭帯域化させた。従来のファイバーは曲げ損失は長波長から生じるのに対し、PBGF は短波長からも曲げ損失が生じるためこの方法が有効となる。Yb-PBGF-1(長さ 1m)を直径 10cm の円筒に 1 周だけ巻きつけた状態で透過スペクトルを測定すると、Fig.3-3(青色)のように曲率によって透過バンドは青点線から青線のように狭帯域化された。この透過スペクトルから直径 10 cm 曲率を加えたときの小信号利得スペクトルを計算すると同図の赤線のように、高利得域の利得は抑制され長波長のみにも利得がある状態が形成された。このように、PBGF を用いることにより従来のファイバーでは実現できなかった、高コントラストの損失分布が形成できるため、利得スペクトルをも人工的に制御することが可能となった。

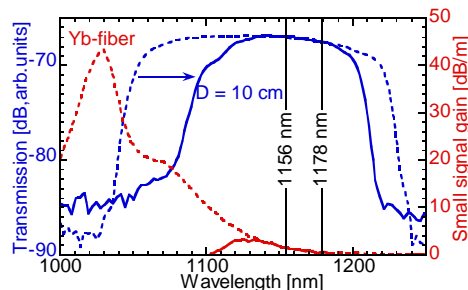


Fig.3-3 Yb-PBGF-1 の透過スペクトルと利得スペクトル
 青点線→Straight, 青線→曲率 D=10cm
 赤点線→Yb ファイバー, 赤線→曲率 D=10cm

3.1 Yb-PBGF-1 による光増幅

この曲率を Yb-PBGF-1 (長さ 24m) に加えて増

幅実験を行った。増幅器の構成図を Fig.3-4 に示した。まず PBGF による長波長での高効率光増幅を実証するために、1178 nm より 2 倍大きな利得をもつ波長 1156 nm 光増幅を行った。シード光には 1156 nm-FRL を用いた。また、ファイバー結合型 LD(波長 976nm)により後方クラッド励起した。PBGF 端面にエンドシールとアングル面を施してフレネル反射による寄生発振を防いだ。

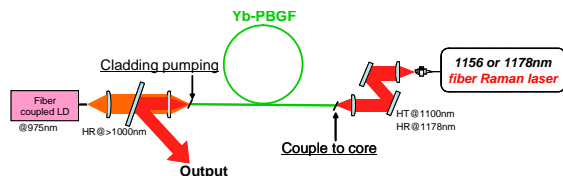


Fig. 3-4 増幅器の構成図

増幅出力結果を Fig.3-5(赤線)に示した。入射パワー5W のときスロープ効率 66% で最大 32W を出力した。この出力は私が知る限り PBGF では世界最大出力である。この結果から、PBGF を用いた高利得域で発生する ASE・寄生発振を抑制した高出力・高効率光増幅が可能であることを実証した。最大出力時での出力スペクトルは Fig.3-6 のようになり、ASE のパワーは 1156 nm レーザーに対して -33dB 抑制された。寄生発振による出力制限は無く、レーザーの最大出力は励起 LD の最大出力で決まった。したがって、励起光源を高出力の LD に変えることで更なる強励起が可能で、計算によると 100W 励起しても寄生発振閾値は越えず 60W 以上の 1156 nm レーザー出力が可能と考えられた。

同様に Yb-PBGF-1 に直径 10cm の曲率を加え、波長 1178 nm の光増幅を行った。その出力特性を Fig.3-5(青線)に示した。強励起に伴って ASE は増大し励起パワー 27W のとき寄生発振し、9.1W で出力制限された。Fig.3-7 は最大出力時での出力スペクトルであるが、1120 nm 付近を中心

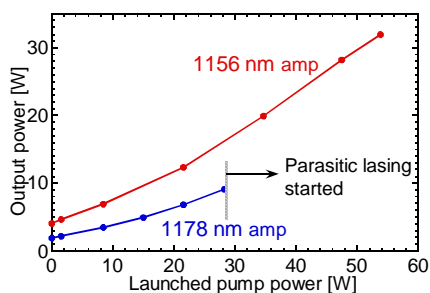


Fig.3-5 Yb-PBGF-1 による光増幅出力特性

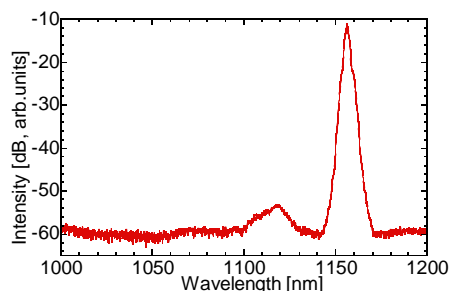


Fig.3-6 最大出力時での出力スペクトル

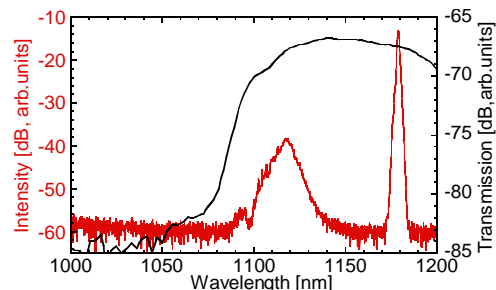


Fig.3-7 寄生発振直前での出力スペクトル

に ASE が増大していることがわかる。ここに Yb-PBGF-1 に直径 10cm の曲率を加えたときの透過スペクトルを重ねると同図の黒線のように透過バンドの内側で ASE が増大していることがわかる。したがって、この ASE を抑制し 1178nm レーザーの高出力を得るためには、更に透過バンドを長波長側に形成する必要があると考えられた。

3.2 Yb-PBGF-2 による光増幅

Yb-PBGF-1 の結果を踏まえて再度設計・作製されたのが Yb-PBGF-2 である。Fig.3-2 を見てわかるように Yb-PBGF-2 の透過バンドは Yb-PBGF-1 に比べ 70nm 程度長波長に形成された。更に利得スペクトルを制御するために、Yb-PBGF-2 に直径 26cm の曲率を加えると透過スペクトルは Fig.3-8(青線)のように透過バンドは狭帯域化され、その透過スペクトルから計算される利得スペクトルは同図の赤線のようになり、1178 nm 以下の利得を十分抑制することができた。更に驚くべきことに、Yb-PBGF-1 の伝送損失が 0.1dB/m であったのに対し、Yb-PBGF-2 の伝送損失は 0.02dB/m 以下と非常に低損失の Yb-PBGF が完成された。これまでに PBGF の低損失のものでは、1.5 μ m で 4dB/km や 1040 nm で 10.5dB/km の PBGF がなど報告されている[5,6]。しかし、これらは希土類イオンが添加されていない。希土類イオンを添加すると 1 桁伝送損失が大きくなると言われている中で伝送損失

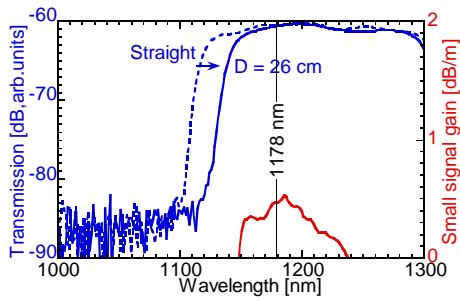


Fig. 3-8 曲率による透過バンドの狭帯化と小信号利得スペクトル

が 1178 nm で 0.02dB/m 以下に抑えられたことは驚くべきことである。

Yb-PBGF-2(長さ 37m)に直径 26cm の曲率を波長 1178 nm のランダム偏光光増幅実験を行った。増幅器の構成に関しては Yb-PBGF-1 による増幅器と同じである。その出力結果は Fig.3-9(青線)のようになり、シード光入射パワー 4W のときスロープ効率 58%、最大 30W の出力に成功した。この出力は Yb 添加ファイバーを用いた 1178 nm レーザーとしては世界最大出力であった。また、最大出力時での出力スペクトルは Fig.3-10 のようになり、寄生発振はおろか ASE すら見られなかったことから ASE フリーで高出力・高効率光増幅できたといえる。

次にシード光を直線偏光化し光増幅を行った。増幅器の構成を Fig.3-11 に示した。1178 nm-FRL から出射したレーザーをポラライザーに通し直線偏光化した。そのあと $\lambda/2$ 板を通過させ偏光方向を

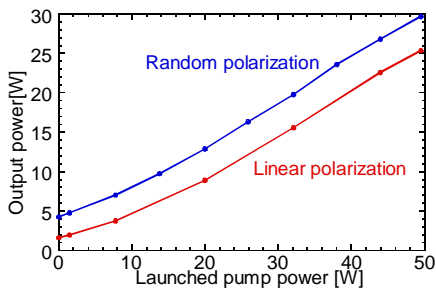


Fig.3-9 Yb-PBGF-2 による光増幅出力特性

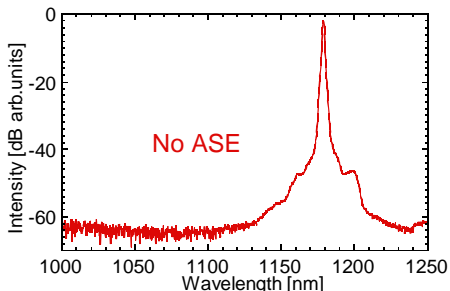


Fig.3-10 最大出力時での出力スペクトル

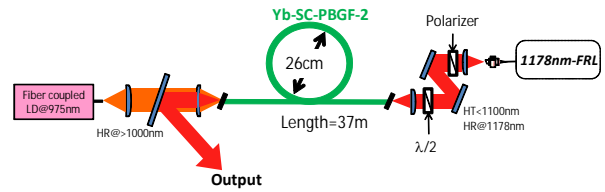


Fig.3-11 1178 nm 直線偏光増幅器の構成図

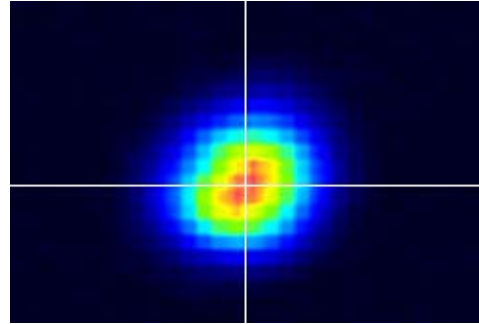


Fig.3-12 最大出力時での近視野像

Yb-PBGF-2 の B 添加ロッドの配列方向と平行にしてコアに結合させた。

光増幅の結果、出力特性は Fig.3-9 の赤線のようになり、シード光入射パワー 2W のときスロープ効率 56% 最大 28W の出力が得られた。このとき出力スペクトルはランダム偏光の増幅と同じ出力スペクトル(Fig.3-10)が得られ、直線偏光光増幅に関しても ASE フリーの高出力・高効率光増幅に成功した。この結果より本研究で目標としていた 1178nm 直線偏光レーザーを 20W 以上出力するという目標は達成された。Fig.3-12 に最大出力時での近視野像を示した。M² は測定の結果 1.1 以下であったことから、シングルモードが出力されていると考えられた。

3.3 考察

これまでの光増幅の結果を、伝送損失と以下の式で定義される引き出し効率の関係でまとめた。

$$\eta_{ext} = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{pump}}$$

それが Fig.3-13 である。ここに計算したものと比較すると 1156 nm 光増幅、1178 nm ランダム偏光増幅、1178 nm 直線偏光増幅の 3 つともに計算結果と見事に一致した。このことから、今回の結果は理論どおりの増幅が行えたと言える。また、この図から PBGF の低損失化というのが非常に重要であることもわかった。利得の小さな長波長域で

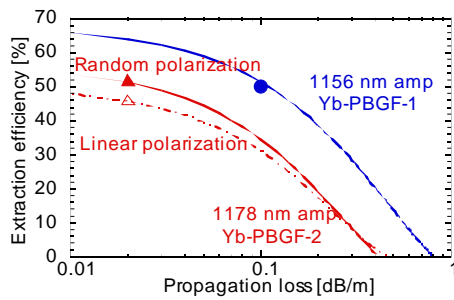


Fig.3-13 伝送損失に対する引き出し効率

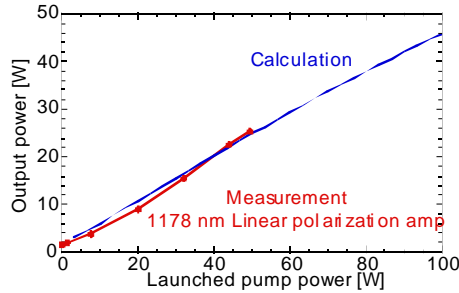


Fig.3-14 1178 nm 直線偏光増幅出力の計算結果との比較

高効率なレーザー動作させるためには少なくとも 0.1dB/m 以下の伝送損失が必要であると考えられる。ASE を抑制するためには高利得域に 100dB/m 以上もの損失を与える必要がある一方で、レーザー動作させる長波長域では 0.1dB/m 以下の伝送損失が求められた。それに対し本研究ではその条件を満たす、損失分布が非常に高コントラストの Yb-PBGF の作製に成功したことが ASE フリーで高出力・高効率光増幅できた大きな要因であると考えられた。1178nm 直線偏光増幅の出力特性について実験値と計算値を比較すると Fig.3-14 のように一致しているため、ASE フリーで光増幅できたことから、更なる高出力化が可能であり、100W 励起することで 45W 以上の出力が得られると考えられる。

4. 結論

本研究では、LGS の要求値である出力 10W 以上の 589 nm レーザーを得るため、20W 以上の 1178 nm 直線偏光レーザーを出力することを目標とし、Yb 添加ファイバーレーザーの開発を行った。第 1 の方法として高反射率共振器による ASE を抑制した 1178 nm 直線偏光 Yb ファイバーレーザーを開発した。直交融着法により偏光子なしの全ファイバー直線偏光レーザー共振器の構成が可能となった結果、共振器内損失が 0.33dB に低減され、スロ

ープ効率 49.5% 最大出力 3W を得ることに成功した。更なる高出力化のため、第 2 の方法として Yb-PBGF による ASE を抑制した光増幅器を開発した。Yb-PBGF-1 においては 1156 nm 光増幅した結果スロープ効率 66% 最大 32W を出力し PBGF からの世界最大出力を記録した。Yb-PBGF-2 は伝送損失が 0.02dB/m 以下と非常に低損失の PBGF 作製に成功した結果、1178nm 光増幅したところランダム偏光ではスロープ効率 58% 最大 30W を出力し、直線偏光においてはスロープ効率 56% 最大出力 25W を ASE フリーで得ることができた。この結果より目標値を達成することができたと言える。これらの結果は、出力の大きさだけでなく、Yb 添加ファイバーの 1030nm 付近の利得に対し log スケールで 60 分の 1 以下の利得をもつ波長で、高利得域で発生する ASE を抑制して、なおかつ高効率で光増幅したということに大きな意味を持つ。従来のファイバーでは実現できなかった、波長による高コントラストの損失分布を与えることができるこの PBGF の技術によって、レーザー発振できる波長が大きく広がったと言える。

5. 今後の展望

3. で述べた Yb-PBGF による光増幅器のシード光源を 1178 nm-FRL から 2. で述べた高反射率 Yb ファイバーレーザーに改良し狭線幅化された高出力レーザー光増幅を行う。その研究は進行中であり、現在その光増幅によって 9W の出力が得られている。また、その光を非線形光学結晶の Periodically-Poled MgO-doped LiNbO₃(PPMgOLN) を用いて第 2 高調波の 589nm 光を発生させたところ、1.4W の出力が得られた。今後は 589nm 光の高出力化を進めるために Yb-PBGF へのシード光入射結合効率の改善や PPMgOLN と Periodically-Poled stoichiometric lithium tantalite の 2 つの結晶を用いた第 2 高調波発生を行う予定である。

参考文献

1. I. A. B. Rulkov *et al*, Optics Express, **15**, 9, 5473 (2007)
2. D. Georgiev *et al*, Opt. Express **13**, 6772-6776 (2005)
3. A.S. Kurkov, Laser Phys. Lett. **4**, No. 2, 93-102 (2007)
4. 丸山裕輝, 平成 20 年度修士論文
5. R. Goto *et al*, Conference OFC 2006, OML7
6. J. K. Lyngsø *et al*, conference CLEO2008, CThV1