

# ファイバーラマン増幅器励起用高出力 1120 nm ファイバー光源の開発

白川(晃)研究室 道端 優

## 1. 序論

レーザーガイドスターは、波長 589 nm のレーザー光を上空のナトリウム層に当てることで発光させた人口の星で、これをガイドスターとすることで天体望遠鏡の波面補償光学装置をほぼ全天体に適用させることができる。我々の研究室ではこれまでに、波長 1178 nm の第二高調波発生によりこの波長 589 nm のレーザー光源を出力する研究が行なってきた。波長 589 nm レーザー光源の更なる高出力化のために、波長 1178 nm レーザー光源の高出力化が必要であり、我々の研究室ではこれまでフォトリックバンドギャップファイバー(PBGF)を用いて、波長 1178 nm の単一波長増幅の研究を行ってきた。この PBGF を用いた波長 1178 nm 増幅器のシード光源の高出力化のために、波長 1178 nm 直線偏光ファイバーラマン増幅器(FRA)の開発が必要であり、本研究ではこの FRA の励起光源として用いる波長 1120 nm レーザー光源の高出力化および更なる単一偏光化を行った。

## 2. 原理

### 2.1 Yb 添加ファイバー増幅器

希土類添加ファイバーに励起光として光を入射させると、イオンが基底準位から励起準位に励起される。ここに信号光を入射させることで誘導放出によって光増幅を行う増幅器を希土類添加ファイバー増幅器と呼び、特に Yb 添加ファイバーを用いて増幅を行うものを、Yb 添加ファイバー増幅器(Ytterbium Doped Fiber Amplifier :

YDFA)と呼ぶ。Yb 添加シリカガラスファイバーの吸収断面積と誘導断面積を図 2.1 に示す。波長 975 nm で吸収スペクトルのピークがあることから、本研究でも波長 975 nm の LD を用いて励起を行った。

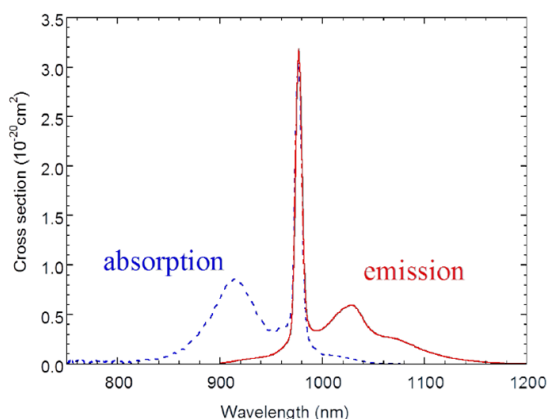


図 2.1 Yb 添加ファイバーの吸収・放出断面積

### 2.2 ファイバーラマン増幅器

非線形媒質中に光を入射させると、入射光がポンプとして働き、ストークス波と呼ばれる周波数の異なる光が発生する。ポンプ光を非常に強くすると、ストークス波は媒質中で急激に成長し、ポンプエネルギーのほとんどがストークス波に使われるようになるという現象が観測される。この現象が、誘導ラマン散乱(Stimulated Raman Scattering : SRS)である。この誘導ラマン散乱を利用して信号光の増幅を行う増幅器をファイバーラマン増幅器(FRA)と呼ぶ。図 2.2 にシリカファイバーの周波数シフト量に対するラマン利得のスペクトルを示す[1]。本研究では、1064 nm を 1120 nm に波長変換するため、その周波数シフトは、

$$\frac{1}{1064 \text{ nm}} - \frac{1}{1120 \text{ nm}} = 470 \text{ cm}^{-1}$$

となり、図 2. 2 のスペクトルからも高いラマン利得が得られると考えられる。

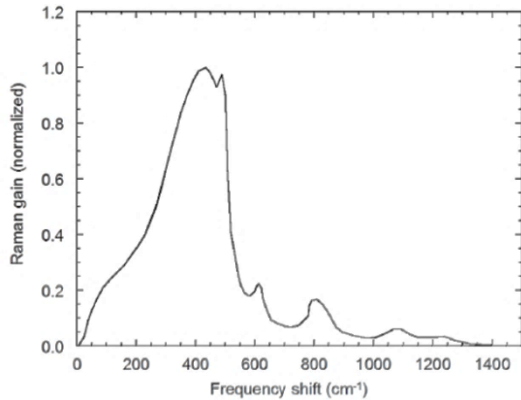


図 2.2 シリカファイバーのラマン利得スペクトル

### 3. 実験

これまで、波長 1178 nmFRA の励起光源として出力 31 W、偏光消光比(PER)6 dB の 1120 nm 単一波長レーザー光源を用いていた。図 3.1 に今回の実験配置図を示す。今回の研究ではこの 1120 nm 単一波長レーザー光源の更なる高出力化、単一偏光化のために、インラインポラライザおよび直交融着法を用いて 1064 nm および 1120 nm のレーザー光を単一偏光で発振させ、それらを YDFA および FRA にそれぞれ直列に融着することで、波長多重分割(WDM)カプラを使わずに 1 つのファイバー中で 2 つの波長の増幅を同時に行った。そして最後にシングルクラッドファイバー(SCF)を融着することで、FRA のクラッドモードを取り除いた。

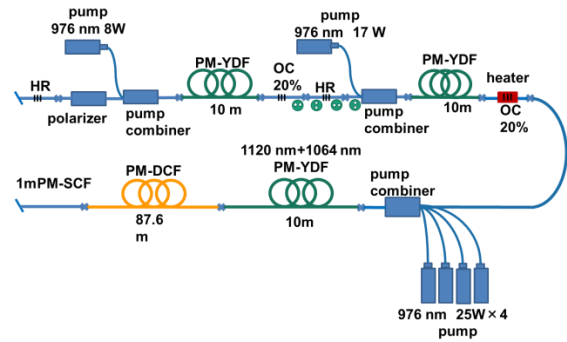


図 3.1 1120 nmFRA の実験配置図

#### 3.1 1120 nm、1064 nmYDFL の開発

YDF を用いて、1120 nm および 1064 nm の Yb 添加ファイバーレーザー(YDFL)の開発を行った。この Yb 添加ファイバーは、長さ 10 m、コア径 5  $\mu$  m、NA0.12 である。ここでは、FBG(Fiber Bragg Grating)を用いてそれぞれを単一波長で発振させ、さらに 1120 nm ではインラインポラライザ、1064 nm では直交融着法により単一偏光化を行った。まず、別々に発振させたところ 1120 nm では出力 2.9 W、PER21.5 dB で、1064 nm では出力 8.4 W、PER14.5 dB であった。

次に、これらを直列に融着してその特性を測った。この出力特性を図 3.2 に示す。最大励起パワーの時、融着後の出力は 10.4 W、PER は 14.6 dB であった。この時の同じ励起パワーでの 1120nm YDFL の出力は 2.9 W、1064 nm YDFL では 8.4 W であるから、直接的な出力の合計にはなっていない。これは、1064 nm YDF の内部で、1120 nm のレーザー光が増幅されていることが原因であると考えられる。スペクトル解析を行ったところ、1120 nm は 5 W、1064 nm は 5.4 W であった。

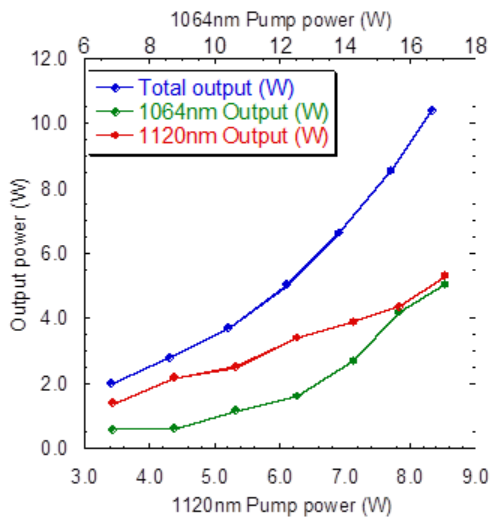


図 3.2 1120 nm YDFL + 1064 nm YDFL 出力特性

### 3.2 1064 nm + 1120 nm YDFA の開発

1064 nm と 1120 nm でそれぞれ発振させたレーザー光を、ファイバー長 10 m、コア径 10  $\mu$  m、NA0.075 の YDF により増幅した。ここでは 4 つの LD を用いて励起を行っており、最大励起パワーは 12 A のとき 114.8 W であった。波長は 976 nm である。YDFA の出力特性を図 3.3 に示す。尚、ダイクロミックミラーで残留励起光と 1064 nm および 1120 nm のレーザーを分けて測定した。最大励起パワーの時 1064 nm + 1120 nm の出力は 95.3 W であった。また、スペクトルから 1064 nm および 1120 nm の割合を算出したものをグラフに載せた。予想では、1064 nm の方が Yb の高利得域に位置するため、1064 nm が優先的に増幅されるものだと考えられたが、実際には 1064 nm と 1120 nm が競合しあいながら増幅されていることがわかる。これは、YDF 内で SRS が起こり、1064 nm が 1120 nm に移されていることが原因ではないかと考えられる。残留励起光は 7.1 W で

あった。この残留励起光のレーザー光は、IR カードに当ててみるとホールバーニングが起きていることが見て取れたため、コアに吸収されなかった励起光が抜けてきたものだということがわかった。最大励起パワーの時のスペクトルを図 3.4 に示す。スペクトル解析から、この時の 1064 nm の出力は 45.9 W、1120 nm の出力は 49.4 W で、PER は 13.0 dB であった。

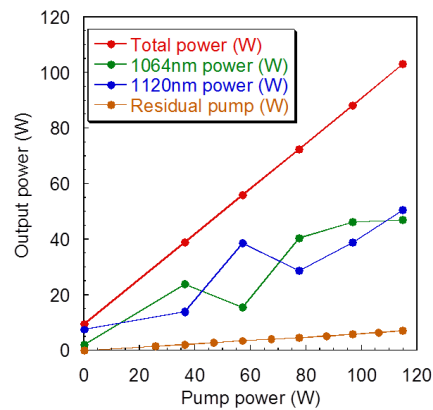


図 3.3 1064 nm + 1120 nm YDFA の出力特性

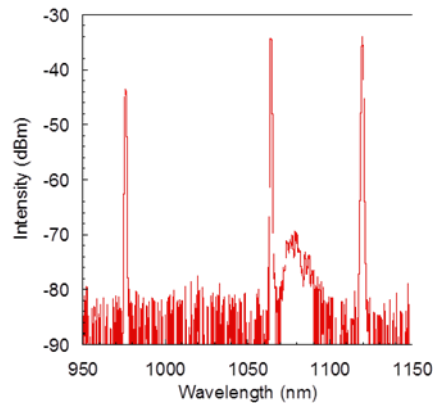


図 3.4 1064 nm + 1120 nm YDFA スペクトル

### 3.3 1120 nm FRA の開発

1064 nm + 1120 nm YDFA にファイバー長 86.4 m、コア径 10  $\mu$  m、NA0.083 のシリカファイバーを融着することにより、1064 nm を励起光、1120 nm を信号光としてラマン増幅を行った。また、融着部のコ

ーティングを剥き、そこを高屈折率ジェルで覆うことにより、それまでクラッド部を伝搬してきた残留励起光を取り除いている。ここまでに1つのファイバー内で2波長を同時増幅してきたことにより、WDMなどの光学素子を用いずにラマン増幅器を作製することができるのが、今回の実験系の大きな特徴である。図 3.5 にこの時の出力特性を、図 3.6 に最大励起パワー時のスペクトルを示す。図 3.5 の出力特性から、

1064 nm+1120 nm YDFA では競合しながら増幅されていたそれぞれの波長のレーザー光は、1120 nm FRA では安定して増幅されていることがわかる。この時の合計の出力は 83.7 W であり、スペクトル解析から 1064 nm は 9.0 W、1120 nm は 73.6 W であった。このスペクトルから、1178 nm 付近での増幅自然放出(ASE)が発生していることがわかるが、これは 1120 nm のレーザー光の SRS によるものであると考えられる。この 1178 nm の出力は 0.7 W 程度とわずかであったため、問題はないとした。

最後に 1 m の SCF を融着してコアモードの測定を行った。その結果、1064 nm の出力は 0.97 W、1120 nm の出力は 72.7 W であった。また、この時の PER は 13.0 dB であった。この結果は、以前の出力 31 W、PER 6.0 dB のもの比べ 3 倍のラマン利得の向上が見込まれるものである。

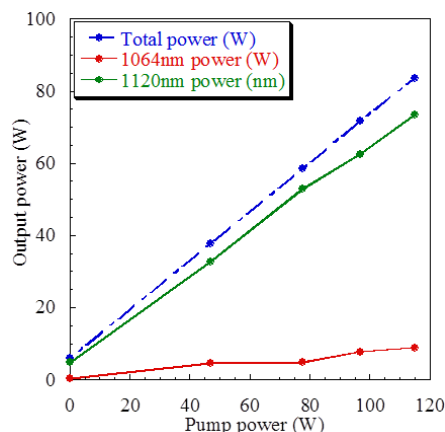


図 3.5 1120 nm FRA の出力特性

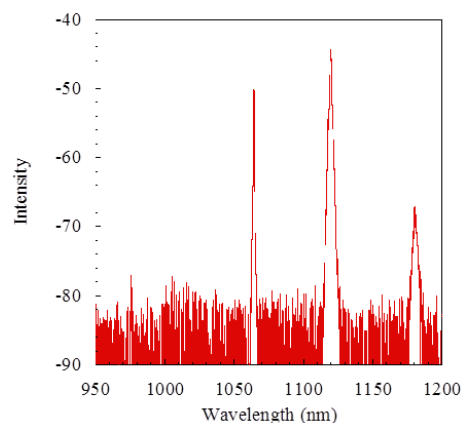


図 3.6 1120 nm FRA のスペクトル

#### 4. 今後の展望

波長 1178 nm の単一周波数ラマン増幅、フォトニックバンドギャップファイバーを用いての ASE 抑制 1178 nm 単一周波数増幅、第二高調波発生による波長 589 nm レーザーの開発。

#### 参考文献

- [1] R. H. Stolen and C. Lee, R. K. Jain, "Development of the stimulated Raman spectrum in single-mode silica fibers," J. Opt. Soc. Am. B 1, 4 (1984)