

単一周波数 1178 nm ファイバー光源の高出力化

1533091 道端 優

主任指導教官 白川 晃

1. はじめに

地上から天体望遠鏡を用いた観測を行う場合、大気のゆらぎにより分解能が低下する。その分解能の低下を補うために発展したのが補償光学装置である。補償光学装置には、対象となる天体のすぐ近傍に高輝度な点光源が必要となるが、これを満たす領域は全天のおよそ 2%程度しか存在しない。そこで用いられるのがレーザーガイドスターである。波長 589 nm のレーザー光を、地上から 90 km 離れたところに存在するナトリウムの層に照射することで、ナトリウムが励起され橙色に発光する。この発光を高輝度な点光源として用いるのがレーザーガイドスターである。このレーザーガイドスターの光源に用いる 589 nm という波長には固体の有効な利得媒質が無いため、1178 nm の波長変換によってこの波長のレーザー光を得る。1178 nm レーザー光源は、Yb から利得を得る方法や、誘導ラマン散乱を用いたラマンレーザー、及びラマン増幅器などがある。これらの光源の中でも、ファイバーレーザーの高出力化は著しく、精力的な開発が行われている。ファイバーレーザーはその導波路構造から、空間横モードの制御が可能であり、高いビーム品質を有する。それに加えて空間冷却が可能である高い冷却性や、コンパクトかつメンテナンスフリーであるといった数多くの利点を持つ。

これまで、我々の研究室では Yb 添加フォトニックバンドギャップファイバー増幅器による 1178 nm 光の高出力化を行ってきた[1]。この増幅器の高出力化の為に、信号光源として用いる 1178 nm ファイバーラマン増幅器の高出力化が必要であった。本研究では、この 1178 nm ファイバーラマン増幅器の高出力化のために、この励起光源として用いる 1120 nm ファイバーラマン増幅器の高出力化、及び単一偏光化を行い、シード光源である 1178 nm 単一周波数外部共振器型半導体レーザー(External Cavity Laser Diode : ECLD)を作製

した。1120 nm ファイバーラマン増幅器は、1064 nm および 1120 nm のレーザー光を、インラインポラライザを用いて単一偏光で発振させ、それらをシリアルに接続することで 1 つのファイバー内を 2 波長のレーザー光が同時に伝搬するように作製した。その後、ポンプコンバイナを介して Yb 添加ファイバーと接続することで 2 波長同時増幅を行い、そこにシリカファイバーを融着することでラマン増幅器を構成した。この構成により、WDM カプラなどを用いない比較的簡易な構成でのファイバーラマン増幅器を実現し、また全 PM ファイバー構成により偏光を維持したままのレーザー増幅を行った。また、ECLD の光源には量子ドット半導体チップを用いた。回折格子はリトロー配置で設置し、高出力動作のために $\lambda/2$ 板で偏光を 90 度回転させて回折格子に入射させた。この結果、単一周波数での出力を高めた ECLD を実現した。

2. 原理

2.1 Yb 添加ファイバー

Yb³⁺イオンは、1 μ m帯の利得媒質として非常に有用であり、その優れた性質により、Yb 添加ファイバー(Ytterbium Doped Fiber : YDF)によるレーザー光源の出力は、他のファイバーレーザー光源の出力を約 1 桁上回る。イッテルビウム(Yb)は、原子番号 70 の元素で、Yb³⁺イオンの電子配置は[Xe]4f¹³構造をしているため、基底状態²F_{7/2}と励起状態²F_{5/2}しか存在しない。この 2 準位間のエネルギー差は十分大きく、励起状態吸収などの損失が起こらないため、高濃度励起に適している[2]。

図 1 に YDF の吸収断面積と放出断面積を示した。波長 915 nm と 975 nm で吸収スペクトルのピークがあることがわかる。915 nm 付近は吸収帯域幅が広く、励起波長の安定度は問題にならないが、975 nm では吸収帯域幅が狭く、励起波長の安定性が求められる。しかし、975 nm の方が高効率であるという理由から、本研究でも 975 nm の LD

を用いて励起を行っている。前述したように、Yb 添加ファイバーの利得は 1030 nm から 1200 nm 付近まで伸びている。そのため、今回も 1064 nm および 1120 nm ファイバーレーザーの利得媒質として Yb 添加ファイバーを用いた。

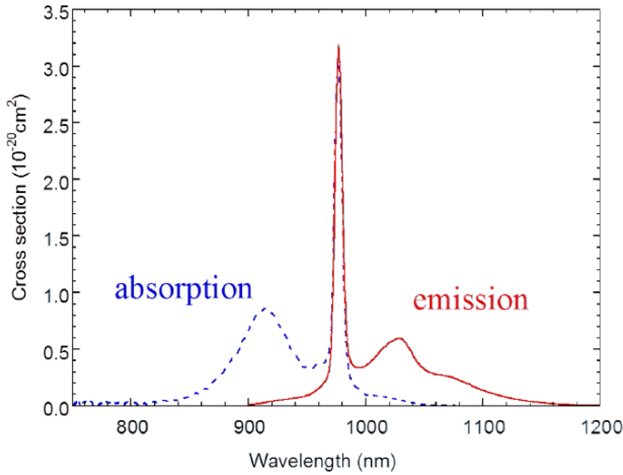


図 1. Yb 添加ファイバーの吸収断面積と放出断面積

2.2 誘導ラマン散乱

多くの非線形媒質では、自発ラマン散乱によって入射光パワーのごく一部が 1 つのビームからそれよりも低周波数な光に移される。このような現象はラマン効果と呼ばれており、入射光子が分子によって低周波数の光子へ散乱され、それと同時にその分子が振動状態の間の遷移をする過程としてあらわされる。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。SRS 臨界パワーは、

$$P_{SRS}^{cr} = 16 \frac{A_{eff}}{f_p g_R L_{eff}} \quad (1)$$

で表される。ここで A_{eff} は有効コア面積、 L_{eff} は有効ファイバー長、 g_R はラマン利得係数、 f_p は偏光因子であり、完全な直線偏光では 1、ランダム偏光では 0 となる。シリカの単一モードファイバー (Single Mode Fiber: SMF) で測定されたラマン利得スペクトルを図 2 に示した[3]。石英系ファイバーのラマン利得は広い領域に連続的に分布している。この特徴により、石英系ファイバーは広帯域増幅器として機能するのである。誘導ラマン散乱を用いて光増幅を行うものとして、ラマン増幅器があり、特に光ファイバーを用いるものをファイバーラマン増幅器(Fiber Raman Amplifier :

FRA)と呼ぶ。FRA は、励起光を SRS によって波長シフトさせて増幅を行うものである。これは即ち、励起光と信号光の波長を変えることによって、任意の波長を増幅することができるということである。この特徴を用いて、1178 nm 等の本来高出力動作が難しい波長のレーザー光の増幅を行うことが出来る。

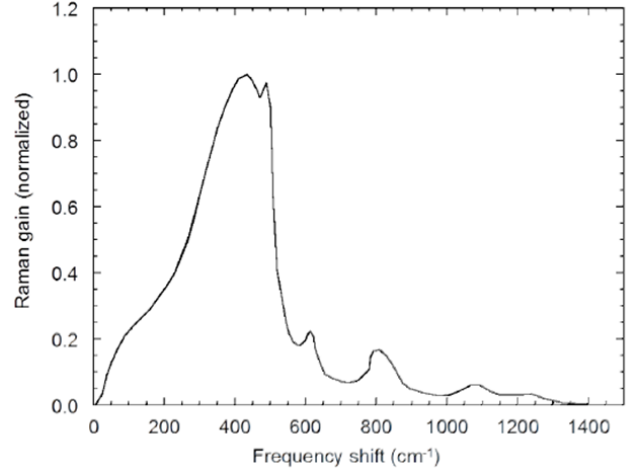


図 2. シリカファイバーのラマン利得スペクトル[3]

2.3 偏波保持ファイバー

光ファイバーの基本モード HE_{11} モードは、もしコア断面が真円でかつ軸がまっすぐであれば、直線偏波の光を入射させるとその偏波状態は長手方向に保存され、出射端でも同一の偏波が得られる。ところが、コア断面が楕円変形し、かつそれがねじれていたり、あるいは一方向から外力または残留応力に加わった場合には、楕円の長軸と短軸方向、または外力の方向とそれに垂直な方向に偏波した HE_{11even} モードと HE_{11odd} モードに分離する。そして、入射波の偏波方向や光ファイバーに加わる外力やねじれなどによって、出射波の偏波方向は複雑に変化する。実際のファイバーは必ずしも真円形をしているわけではないので、さまざまな外力を受けることになるので、上記のような偏波特性の乱れは避けられない。そこで、コアに予め大きな応力を加えることで異方性を持たせたファイバーが開発されている。このファイバーは偏波保持(Polarization Maintaining : PM)ファイバーと呼ばれている。図 3 は、Polarization-maintaining AND Absorption-reducing(PANDA)ファイバーの断面図である。PANDA ファイバーは 2 つの応力付加部によってコアが異方性を持つように設計されており、このコアに与えられた複屈折により、2 つの直交する偏波モードの縮退が

解け、それぞれが独立したモードとなることで偏光を維持したままの伝搬が可能になる。PM ファイバーでは、slow 軸と fast 軸が定義され、応力付与ロッドを貫く方向が slow 軸、それに直交するのが fast 軸である。

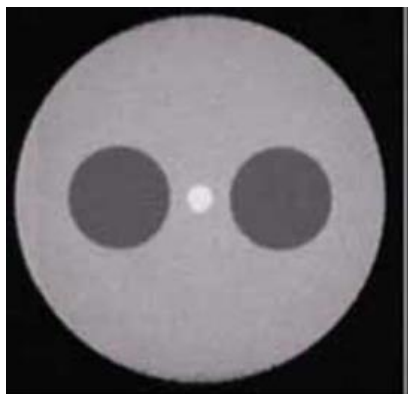


図 3. PANDA ファイバーの断面図

3. 1120 nm ファイバーラマン増幅器の開発

これまで、1178 nmFRA の励起光源には、出力 31 W、PER6.0dB の YDFL を用いていた。1178 nmFRA の高出力化の為に、その励起光源である 1120 nm レーザーの高出力化を行った。また、高効率増幅のために更なる単一偏光化を行った。その方法として、1120 nmFRA の開発を行った。図 4 に 1120 nmFRA の実験配置図を示した。まず、1120 nm 発振器および 1064 nm 発振器を 10 m 長の偏波保持 Yb 添加ファイバー (PM-YDF) を用いて作製した。それぞれの発振器はインラインポラライザにより直線偏光で発振するように構成されている。それらをシリアルに接続し、更にポンプコンバイナを介して 7 m 長の PM-YDF に接続し、1064 nm および 1120 nm 光を増幅した。これにより、1つの PM-YDF で 2 波長の同時増幅を行った。更に、98 m 長の PM シングルクラッドファイバー (SCF) を接続することで、1064 nm 光を励起光、1120 nm 光を信号光とするラマン増幅を行った。これらの構成により、波長合波器(WDM)などを用いることなく、比較的簡易な構成で高出力な FRA を実証した。

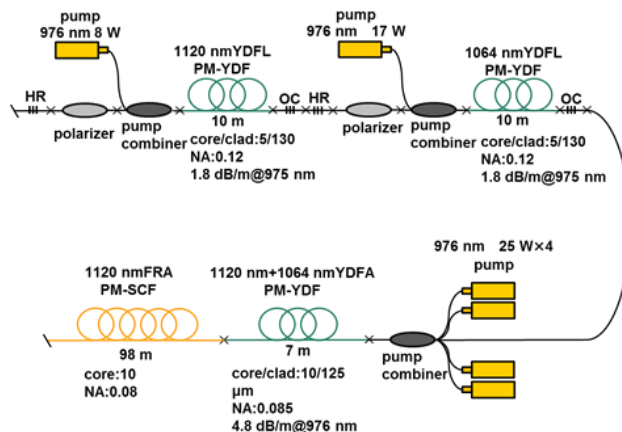


図 4. 1120 nmFRA の実験配置図

図 5 に 1120 nmFRA の出力特性を示した。最大励起パワーでの出力は、1120 nm が 77.4 W、1064 nm が 2.5 W であり、PER は 15.2 dB であった。図 6 に最大励起パワーでの 1120 nmFRA のスペクトルを示した。ファイバー長が最適化されているため、1120 nm よりも長波長側に、ラマン散乱によるストークス光の発生は見られない。

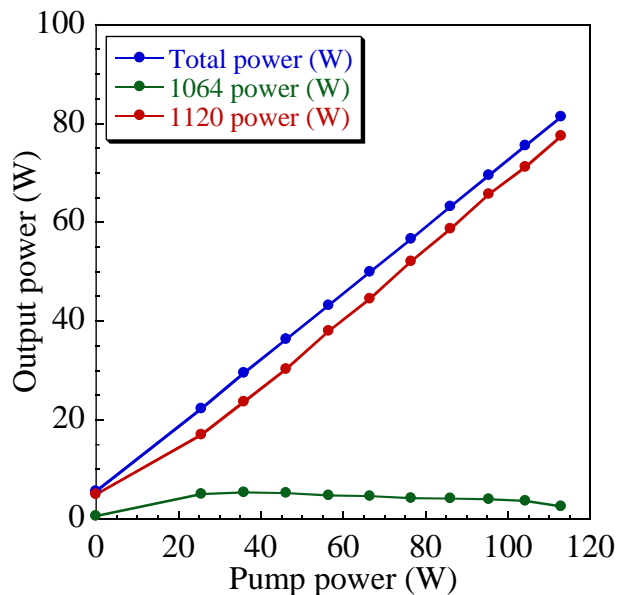


図 5. 1120 nmFRA の出力特性

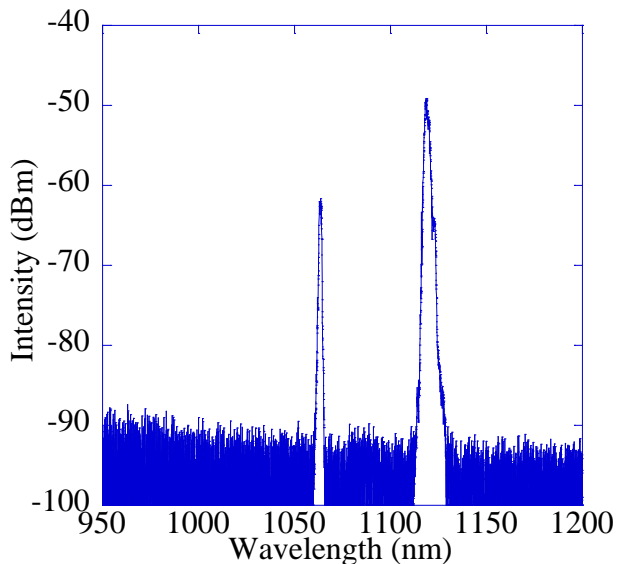


図 6. 1120 nmFRA スペクトル

1120 nmFRA によって、1120 nm 光の増幅を行うことが出来たが、実験中に増幅器の例起用 LD が 4 つ壊れてしまったため、新しい LD で同様の実験を行った。しかし、PM ポンプコンバイナと YDF の融着部でファイバーヒューズが発生し、PM ポンプコンバイナが破壊されてしまった。そのため、non-PM ポンプコンバイナとインライン型のポラライゼーションコントローラによって単一偏光化を行った。図 7 にその実験配置図を示した。ポラライゼーションコントローラはポンプコンバイナの直前に設置した。ポラライゼーションコントローラと non-PM ポンプコンバイナ以外は、これまでと同じものを使用した。

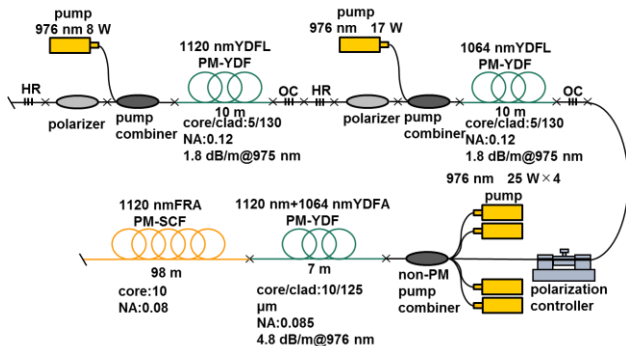


図 7. ポラライゼーションコントローラを用いた 1120 nmFRA 実験配置図

この 1120 nmFRA で実際にスペクトルと出力特性を測定したが、測定中に YDFA と FRA の融

着部付近でファイバーヒューズが発生し、測定が不可能となってしまった。そのときの出力特性を図 8 に示した。図 8 から見て取れるように、出力特性に減衰などは見て取れない。測定できた最大出力は励起パワー 96 W の時 63.3 W であり、PM ポンプコンバイナを使ったときと比較して 5 W 程度低下していた。しかし、この 5 W の出力低下が直接ファイバーヒューズの発生に関係しているとは断定できない。それは、この程度の出力の差は、融着による損失や、融着時のカットによるファイバー長の変化によって、1064 nm と 1120 nm 光の出力の低下などにより変化し得るからである。

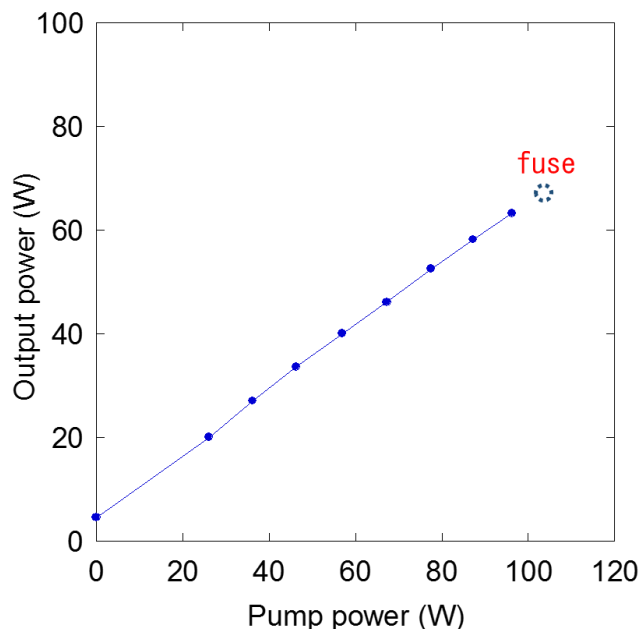


図 8. ポラライゼーションコントローラを用いた 1120 nmFRA 出力特性

ファイバーヒューズは光ファイバー内で起きる自己破壊現象の 1 つであり、発生点から光源に向かってファイバーを破壊しながら進む。この速度はファイバー内のパワー密度によって変化すると考えられる。ファイバーヒューズは、ファイバー端面の汚れや曲げなどにより局所的に加熱されることにより発生すると考えられており、その温度は 2000 K とも言われている[4]。ファイバーヒューズが起きた際の YDF の顕微鏡写真を図 9 に示した。YDF の中央部に不規則に並ぶのは、ファイバーヒューズによって破壊された後に残る典型的な痕跡である。

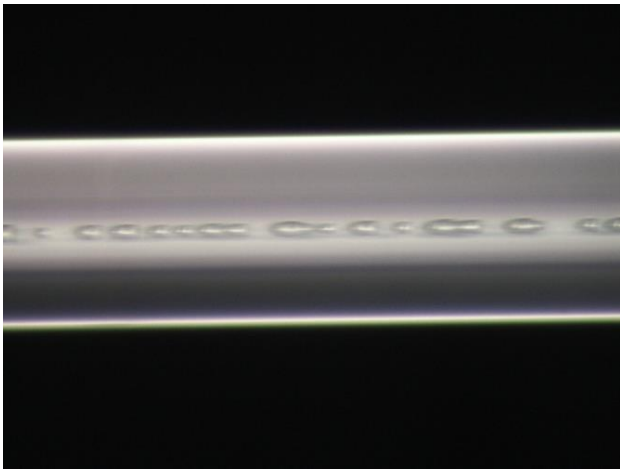


図 9. ファイバーヒューズが起きた YDF の顕微鏡写真

4. 1178 nmECLD の開発

1178 nmFRA のシード光源である 1178 nmECLD の開発を行った。ECLD を用いることで、光源の狭線幅化と波長可変性を実現することが出来る。この ECLD には、量子ドット半導体レーザー(Quantum Dot Laser Diode : QDL)を用いており、外部共振器によって単一周波数発振させている。本研究で用いた QDL の組成は、InAs/GaAs であり、チップのサイズは 4×3 mm である。QDL チップの両端は AR コートが施されており、ECLD の出力端となる側面では反射率が 3%、外部共振器を構成する端面では完全な無反射コーティングである。この端面方向の光は、斜めに出射される。これは、この方向の導波路がわずかに曲がっていることによるものである。このことにより、LD と空気の境界面で生じる反射光の NA が大きくなり、共振器から逸脱するため、この端面での反射率を低くすることが出来る。また、slow 軸と fast 軸では出射されたビームの広がり角が大きく異なる。

図 10 に今回用いた ECLD の概念図を示した。共振器は、利得チップの Output 側の端面と回折格子の間で構成されている。この回折格子の単位長さあたりの溝本数は、 $N=1600$ 本/mm である。回折格子はリトロー配置で設置されている。今回用いた ECLD では、回折格子が紙面に対して寝かせたような設置をしている。これは、このように配置することで、ビームスポット内に収まる回折格子の溝本数が増えることにより分解能が向上し、単一周波数での出力を高めることが出来るためである。一般的に ECLD の回折格子は、紙面に対して立てて置かれるが、これはこの方がアライメン

トで要求される稼働点が減り、アライメントが容易になるためである。また、リトロー配置で設置することにより発振波長を連続的に変化させることが出来る。しかし、LGS 光源に求められる波長可変領域が 3 pm と非常に小さいため、高い分解能を得られることで単一周波数に多くのエネルギーを集中させることの出来る今回の配置を採用した。

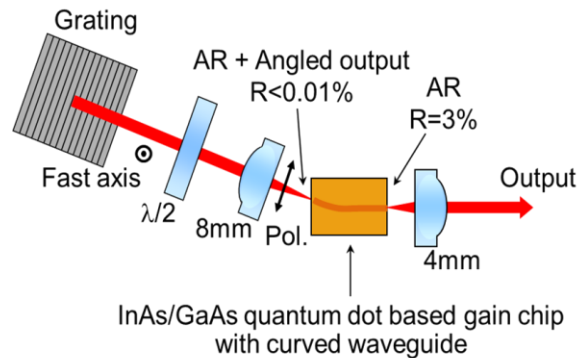


図 10. ECLD の概念図

回折格子の分解力 R_g は以下の式で表される。

$$R_g = mN' \quad (2)$$

この時、 m は回折次数、 N' はビームスポット内に収まる溝本数である。したがって 1 次回折光の分解能は、 W をビームスポットの直径として $N' = N \times W$ の関係から

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{N \times W} \quad (2)$$

で表される。この式は、溝を横切るビームスポットの直径が大きいほど、同軸に戻される光のスペクトルが狭くなることを意味する。QDL の slow 軸のビーム広がり角は 8° 、fast 軸の広がり角は 40° と大きな差がある。そのため、今回のように回折格子を設置することで得られる出力パワーは大きくなる。また、レンズと回折格子の間に $\lambda/2$ 板を入れているのは、S 偏光のほうが P 偏光よりも一般的に 2 倍程度回折効率が高いためである[5]。 $\lambda/2$ 板を用いて偏光を回転させて回折格子に入射させることで、出力は大きく上昇する。

図 11 に今回実験で使用した ECLD の写真を示した。外部共振器を構成する領域では、光は $f=8$ mm のレンズでコリメートされ、 $\lambda/2$ 板で偏光を 90° 回転させて回折格子に入射させている。回折格子上部のつまみで紙面垂直方向の、右側のつまみで紙面並行方向のあおりを調節することが出来る。図 12 に発振した際の出力特性を示した。最大出力は 117.9 mW であったが、高出力動作時に

マルチ縦モードで発振していたため、シングル縦モードで発振させられるようにアライメントを改善する必要がある。

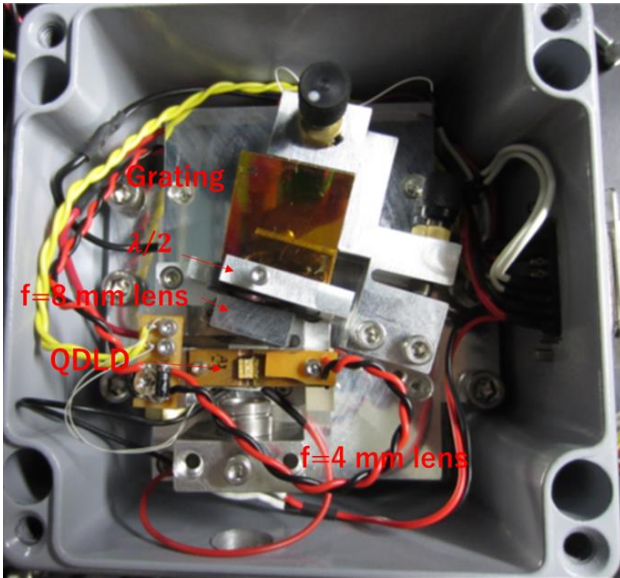


図 11. 今回使用した ECLD

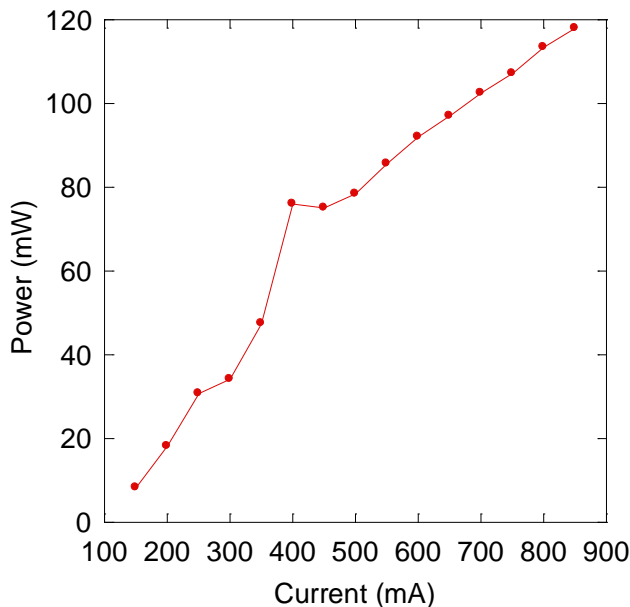


図 12. ECLD の出力特性

5. まとめと今後の展望

1064 nm と 1120 nm のファイバー発振器を作製し、Yb ファイバー増幅器およびファイバーラマン増幅器により増幅を行い、高出力 1120 nm 励起光源を開発した。1064 nm の出力は 2.5W、1120 nm の出力は 77.4 W であり、この時の PER は 15.2 dB であった。これにより以前の出力 31 W、PER 6.0 dB のものに比べ、ラマン利得の偏光依存性を考慮すると、3 倍以上の励起パワーを得ることに成功した。しかし、ファイバーヒューズや LD

の破壊が起きた為、新たな 1120 nmFRA を作成する必要がある。ファイバーヒューズの発生要因は定かではないが、発生前に何らかの予兆が見られる可能性があり、これを予め検知することでファイバーヒューズを発生させない工夫をする必要がある。今後の課題としては、1120 nmFRA の信頼性の向上及び 1178 nmECLD の単一周波数発信が挙げられる。また、ECLD を信号光源、1120 nmFRA を励起光源として、1178 nmFRA における 1178 nm 光の増幅を行う。その後、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、さらには第二高調波発生による波長 589 nm レーザーの開発を行う。

参考文献

- [1] M. Chen, et al., “ 87 W,narrow-linewidth, linearly-polarized 1178 nm photonic bandgap fiber amplifier,” *Opt. Express* **23**, 3134 (2015)
- [2] 平等拓範、常包正樹、ダスカルトライアン、“エッジ励起マイクロチップコンポジット Yb:YAG レーザー、”*レーザー研究* **33**, 228 (2005)
- [3] E. J. Woodbury, et al., *Proc. IRE* **50** , 2347 (1962)
- [4] Y. Shuto, et al., "Fiber fuse phenomenon in step-index single-mode optical fibers", *IEEE J. of Quantum Electronics*, **40**, 8, 1113 (2004).
- [5] “Diffraction Grating Handbook,” 6th Edition, Newport.Inc.