

# 高出力 1178nm 単一周波数光源の開発

電子工学科 植田研究室 陳 明晨

## 1. 序論

波長 589nm のレーザーは、高分解能分光、原子冷却に用いられる。さらに、この波長は Na の D2 線からの発光でもあり、大気中の Na 層の温度測定やレーザーガイドスターの生成にも応用されている。589nm で発振させる方法として、現在、実用的に用いられているのは、固体レーザーである Nd:YAG レーザーの 2 つの発振波長 1064nm と 1319nm の和周波発生 (SFG) を用いる方法である。この方法では SFG 結晶にリング共振器を組むことによって 50W 以上の出力パワーが得られている。ただし、単一周波数発振のために注入同期やリング共振器を常に電氣的に制御する必要があり、装置が非常に複雑であった。またファイバーラマン増幅器を用いた波長 1178nm の第 2 高調波発生による方法では 25W の出力が得られている。さらにこのファイバーによる装置は安定であり、コンパクトで利点が多い。我々の研究室では、同じ第 2 高調波発生による方法だが、希土類元素である Yb を添加させたフォトニックバンドギャップファイバー (Yb-PBGF) による光増幅で高出力の 1178nm の光を得る研究を行っている。1178nm に利得を持つ媒質はほとんどなく、Yb でも利得スペクトルのかなりすその方に位置している。小信号利得では 10W 励起時では 1030nm 付近に 80dB 以上高い利得がある。通常であれば高利得域で発生する ASE によって信号光増幅の効率が著しく低くなってしまふ。そこで PDFG は利得スペクトルを制御することができるとして注目されている。増幅の光源には外部共振器型半導体レーザー (ECLD) を用いた。これは波長可変や狭線幅の単一周波数が容易に得られるためである。本研究では、ECLD の開発と Yb-PDFG での高効率増幅を行うため、飽和増幅パワーである 1.8W を目指した高出力化を行った。

## 2. 原理

半導体レーザーでは、ダブルヘテロ (DH) 構造によって、キャリア閉じ込めと光閉じ込めの両方を行うことで CW のレーザー発振を可能としてきた。また不純物半導体の材料の組み合わせによってバンドギャップエネルギーを変えることができ、さまざまな発振波長が得られている。さらに活性層の厚さを数十 nm オーダーまで小さくすることによって、活性層の両端面で 2 次元の量子井戸を形成することができる。この閉じ込め効果から実効バンドギャップエ

ネルギーの拡大や状態密度関数の階段を生じたり、DH 構造とは異なる利得スペクトルや偏波依存性を持たせることができる。これは発振波長域の拡大や閾値電流密度の低下を可能とした。さらに格子定数の不整合を利用した量子ドットの成長技術によって、3 次元的な量子井戸の形成が可能となり、これらの特性をさらに顕著にすることができている。

本実験でも、1178nm に高い利得を持つ、量子ドット型の半導体レーザーを用いた。

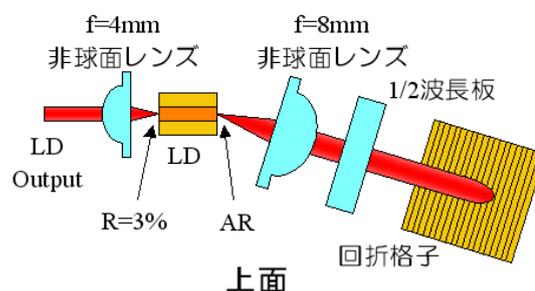


Fig. 1 ECLD

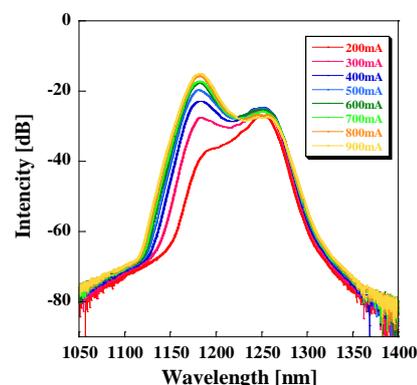


Fig. 2 アンクルファセットの出力光スペクトル

波長可変を可能とするため、一般的な LD ではファブリー・ペロー (FP) 共振器としてレーザー発振に利用している 30%程度ある LD チップ端面でのフレネル反射を、無反射 (AR) 処理を施して 3%程度に抑えている。しかし、半導体レーザーでは非常に高い利得を持つため 3%の反射でも自身でのレーザー発振を抑えることが難しい。そのため LD チップの片側はブリュスター角での出射となるよう端面に対してビームは 73° の斜出射となっている。LD チップの出射光パワーは反射率 3% のノーマルファセットでは弱く数 mW 程度である。一方斜出射のディープ AR であるアンクルファセットでは、注入電流を上げることで 200mW 以上の出力パワーが得られる。この出力光

は Fig.2 にあるように広いスペクトルを持つ。

回折格子をリトロー配置で用いることによって、1 次回折光を入射光と同軸に回折させることができる。波長と入射角の関係は次式である。

$$\lambda = \frac{2}{N} \sin \theta \quad (1)$$

アングルファセットの出力光を、波長選択性を持つ回折格子で LD チップにフィードバックすることで、3%ある端面反射と回折格子とで FP 共振器を構成している。このような外部共振器では、共振器長を短くできるため、縦モード間隔が広く単一周波数発振に適している。

$$\Delta \nu = \frac{c}{L_O} \quad (2)$$

$$L_O = n_S L_S + n_{air} L_{air}$$

さらに、回折格子の波長分解能によって回折効率のスペクトル幅が決まる。

$$\Delta \lambda_g = \frac{\lambda}{mW \times N} \quad (3)$$

m は回折次数、W は回折格子上でのビームの幅、N は回折格子の溝本数である。アングルファイセットの出力光スペクトルが回折効率のスペクトルの重なる部分で引き抜かれ LD にフィードバックされるため縦モード間隔が回折効率のスペクトル半値幅と同程度であれば発振を単一周波数化できる。実際に作製した ECLD の縦モード間隔は波長で表すと、 $\Delta \lambda = 0.015 \text{ nm}$ 、回折格子の波長分解能  $\Delta \lambda_g = 0.041 \text{ nm}$  である。

### 3. 実験と結果

Fig.1 は ECLD の構成図である。共振器内に 1/2 波長板を挿入しているのは、LD チップが TE 偏光の偏波依存性を持つため、回折格子では回折効率が低くなってしまいうからである（回折格子は TM 偏光の回折効率が高い）。回折格子をこのような偏光特性を無視した配置したのは、波長分解能を高めるためである。LD チップの出力は広がり角が Fast axis と Slow axis とで異なり、それぞれ全角  $40^\circ$  と  $8^\circ$  の角度を持つ。したがって、ビームは縦長となる。Fast axis のビーム幅で回折格子を使った方が波長分解能は高くなる。

ECLD からの出力パワーはカレント 600mA で 200mW 程度の単一周波数が得られた。最大カレントは 1A 以上だが、発振波長以外でも利得が高くなるため、わずかな回折格子でのフィードバックでも発振がマルチモード化してしまう。

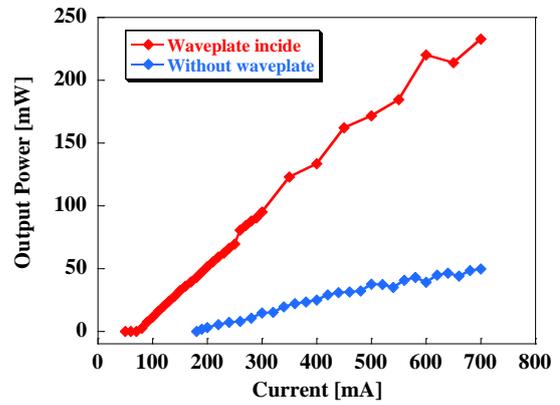


Fig. 3 ECLD の出力パワー

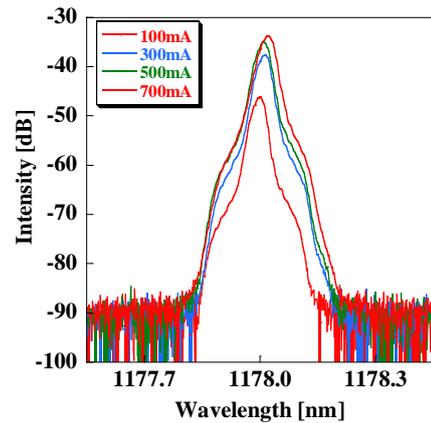


Fig. 4 ECLD の出力光スペクトル

OSA での -3dB の全幅は 0.02 程度となった。OSA の分解能の限界付近であるため、正しく測定できていないと考えられる。そこで正しく線幅を評価するため、遅延自己ヘテロダインを用いて線幅の測定を行った。

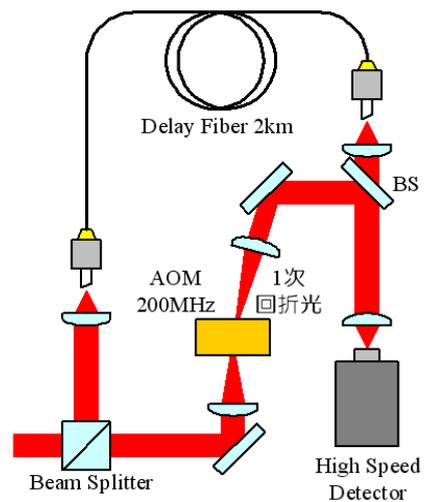


Fig. 5 遅延自己ヘテロダイン

レーザーの線幅は位相雑音によるものである。遅延自己ヘテロダイン検波では、ディテクターの電気信号はローレンツ波形として現れ、そのスペクトル

の半値全幅はレーザーの半値全幅の2倍となる。

$$\Delta\Omega_{FWHM} = \frac{\mu}{\bar{n}t_c} = 2(\Delta\omega_{laser}) \quad (4)$$

$$\Delta\omega_{laser} = \frac{\mu}{2\bar{n}t_c} \quad (5)$$

ただし、これは遅延時間がコヒーレンス時間  $t_c$  よりも十分に大きいときである。このときの、遅延自己ヘテロダインの分解能は以下の式で表される。

$$\Delta\nu = \frac{c}{nL_f} \quad (6)$$

実験では遅延ファイバーに 2km のものを用いたため、分解能は約 104kHz となった。

計測結果、カレントを上げるにしたがって線幅は広がり、700mA では約 190kHz 程度となった。

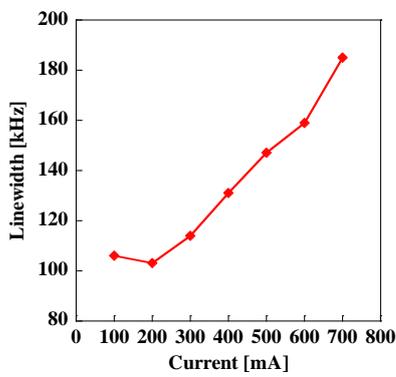


Fig. 6 ECLD の出力光スペクトルの FWHM

外部共振器内の回折格子は、ピエゾ素子の印加電圧によって角度を変えることができる。つまりリトロー配置の波長と角度の関係式 (1) より、フィードバックする波長を変えることで、発振波長を調整することができる。これは LD チップの利得領域内で連続に可変ではなく、回折格子の角度を変えることによって共振器長が同時に変わってしまうため、モードホップが起り、発振可能な波長が不連続になってしまう。例えば、入射角を小さくすると式 (1) から発振波長は短波長にシフトし、このとき同時に共振器長は短くなってしまったため式 (2) から縦モード間隔は大きくなる。発振周波数は高周波数側に移動し、発振波長は短波長になる。両方の変化とも短波長へのシフトであるが、その変化量が同じではないためにモードホップが起きてしまう。

ピエゾ素子の電圧を変えたときの波長の推移を波長計で測定を行った。結果、Fig.7 よりモードホップは 10pm の波長間隔では起こらないことがわかった。ただし、これは要求される中心波長付近で 10pm の波長範囲で可変となるように共振器の調整が必要である。

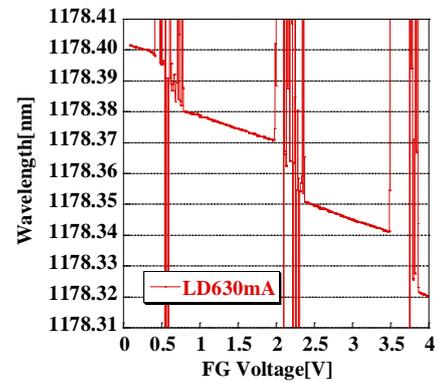


Fig. 7 モードホップ

以上が ECLD の特性評価である。

ECLD からの出力をファイバーへ結合させることができるパワーは最大でも 50%程度である。実際、実験的に求めた結果、モードフィールド径 (MFD) が 11.8 $\mu\text{m}$  のファイバーへは 35%程度、4.8  $\mu\text{m}$  のファイバーでは 20%程度となった。さらに実験系ではアイソレータやミラー、縦長のビームを対称に整形するためのプリズムペアをファイバー端面までの間に挿入するため、ファイバー端面でのパワーは ECLD 出力の約 80%となる。したがって、4.8  $\mu\text{m}$  のファイバーでは、実際に 32mW しかファイバーに結合しない。これでは Yb-PDFG 増幅で効率よくパワーを引き出すことができない。そこで高出力化のため Yb-PDFG の前置増幅器として、シングルモードファイバーへ結合したのちファイバーラマン増幅を行った。

シリカ系ファイバーでは、シリカガラスが非晶質であるため、分子振動の周波数分布がバンドとなっており互いに重なり合って連続したものとなっている。そのため、非常に広い領域に連続なラマン利得を持っている。またラマン利得はコアの添加物によっても著しく変化する。したがって、今回実験で用いた Phosphosilicate Fiber はリンが添加されているため、シリカファイバーとは異なるラマン利得スペクトルを持つ。今回の増幅の実験系は Fig.8 に示す。励起光には 20W クラスの Yb-Fiber Laser を用いた。波長は 1100nm である。この場合信号光である 1178nm との波数シフトは以下の式 (7) から 602 $\text{cm}^{-1}$ となる。

$$\Delta\lambda = \frac{1}{1100\text{nm}} - \frac{1}{1178\text{nm}} = 602\text{cm}^{-1} \quad (7)$$

602 $\text{cm}^{-1}$  のシフトでのラマン利得はシリカファイバーではがかなり少なくなってしまう。それに対し Phosphosilicate Fiber ではさらにラマン利得が広帯域にあるため実験ではこのファイバーを用いた、このときのラマン利得は 7.7 $\times 10^{-4}\text{mW}^{-1}$ である。

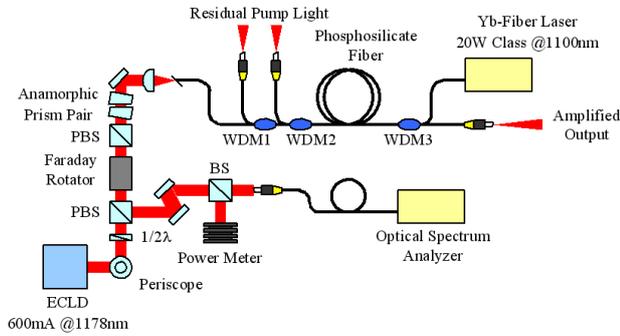


Fig. 8 ファイバーラマン増幅の実験系

実験では残留励起光を 2 つの WDM カップラーで取り除いた、これは戻り光による LD の破壊を防ぐためである。さらにアイソレータを 2 つの偏光子とファラデー回転子で構成することによって残りの戻り光を取り出し、パワーとスペクトルから誘導ブリルアン散乱 (SBS) を観測した。実験では 300m、450m の 2 つの異なるファイバー長の Phosphosilicate Fiber について増幅後の信号光パワーと後方散乱光パワーを測定した。

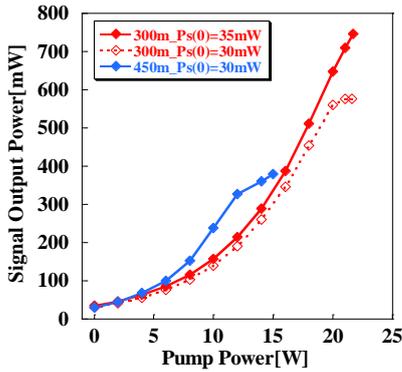


Fig. 9 増幅後の信号光パワー

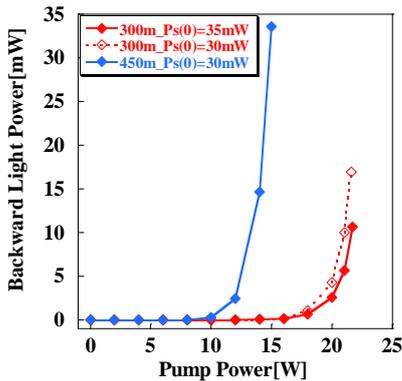


Fig. 10 後方散乱光パワー

後方散乱光の増大にしたがって、出力される信号光パワーは制限された。単一周波数増幅の場合 SBS の発生が増幅の限界を決定してしまう。それぞれのファイバー長での SBS しきい値を以下の式 (8) より求めた。

$$P_{th} \cong \frac{21A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (8)$$

$A_{eff}$  は有効コア面積、 $L_{eff}$  は有効相互作用長、 $g_B$  はブリルアン利得係数でシリカファイバーの  $5 \times 10^{-11} \text{mW}^{-1}$  を用いた。結果 300m では 510mW、450m では 340mW が SBS しきい値となった。これは実験結果と良く一致している。SBS が発生すると大部分のエネルギーが後方散乱光へと移ってしまうため、前方では信号光が弱くなってしまふ。Fig.11 (a) の前方出力光のスペクトルでは SNR が 35dB 以上あり、1178nm を増幅できていることがわかった。(b) の後方散乱光のスペクトルでは高次の SBS がカスケード状に発生している様子が見て取れる。このとき、後方への SBS 光がさらに SBS を発生させ前方出力光のスペクトルが広がった。

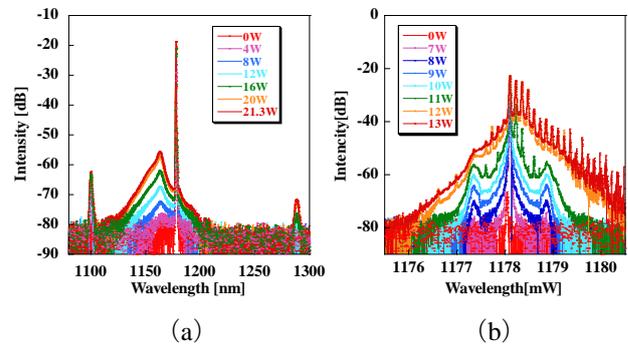


Fig.11 前方出力光(a)と後方散乱光(b)のスペクトル

Fig.9 では同じ 300m ファイバーでも、実線で示したように SBS が起こらず最大出力パワー 747mW が得られた。これはファイバー内の偏光状態によって  $g_B$  が 0.5~1 倍の間の値となるため SBS しきい値が変化するためである。増幅器の出力光を遅延自己ヘテロダインで線幅測定を行った結果、このとき線幅は増幅前と増幅後とで変化することなく 190kHz (FWHM) となった。

#### 4. まとめと展望

今回の実験では単一周波数の 1178nm 光源の開発およびファイバー増幅器による高出力化を行った。ECLD の出力特性としては出力パワー約 200mW、線幅 190kHz (FWHM) 以下の単一周波数で、波長可変領域は 10pm となった。さらにファイバーラマン増幅による高出力化の結果、最大出力パワーは 747mW が得られた。単一周波数増幅では SBS の発生が出力限界を決めてしまう。そのため SBS の抑制が今後の課題となる。これには励起光をさらに高出力パワーにし、ファイバー長を短くすることが、現在最も有効的であると考えられる。