

単一周波数 1178 nm 外部共振器半導体レーザーの製作と そのファイバーラマン増幅

電子工学科 植田研究室 小宮山恭平

1. 序論

波長 589 nm のレーザーはレーザーガイドスター、医療応用、Na 原子の高分解能分解などに応用が期待されている。レーザーガイドスターとは、高度 90 km のナトリウム層に 589 nm の光を照射してナトリウム原子を励起し発光させた人工的な星のことで、この人工星を頼りに大気の揺らぎを補償し高解像度の天体観測が行われる。この光源には 589 nm の回折限界光で、出力 10 W 以上、1 GHz の線幅などの特性が求められる[1]。589 nm のレーザー光を得る一つの方法としては 1178 nm の光を非線形光学結晶による第 2 高調波発生によって半分の波長の光に変換させる。1178 nm のレーザー光の高出力化にはさまざまな方法が報告されている。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による増幅の研究が行なわれている[2]。そこで本研究では単一周波数光源実現のために外部共振器半導体レーザー、およびファイバーラマン増幅による単一周波数シード光源の開発を行なった。目標値は出力 2 W で単一偏光である。

2. 外部共振器半導体レーザー(ECLD)

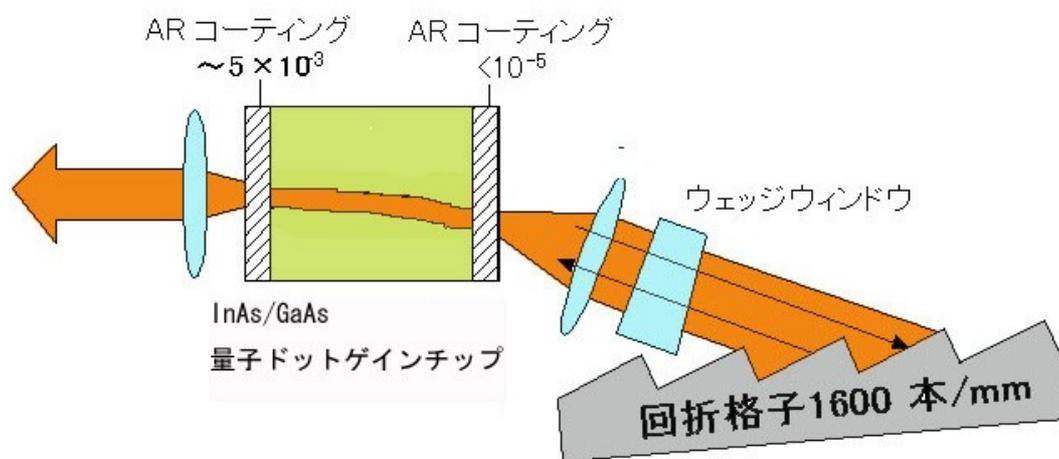


図 1.外部共振器半導体レーザー

本研究に用いる外部共振器半導体レーザーは図 1 のようになっていて、長さ 4 mm の InAs/GaAs 量子ドットゲインチップの両端に AR コートが付いているがわずかに反射し、斜め出射側は反射率 $<10^{-5}$ 、もう片側は反射率 $\sim 5 \times 10^{-3}$ で回折格子と外部共振器を構成している。斜め出射側の光はリトロ配置された回折格子へ進み、 70.46° の角度で 1178 nm の波長が選択できる。また共振器長は 55 mm で縦モード間隔は、

$$\Delta \nu = \frac{c}{2L} = \frac{3.0 \times 10^8}{2 \times 55 \times 10^{-3}} = 2.7 [\text{GHz}]$$

となる。ウェッジウインドウを回転させることによって回折格子への煽りを調節することができる。

この外部共振器半導体レーザーの出力特性とスペクトルは図2、3のようであった。

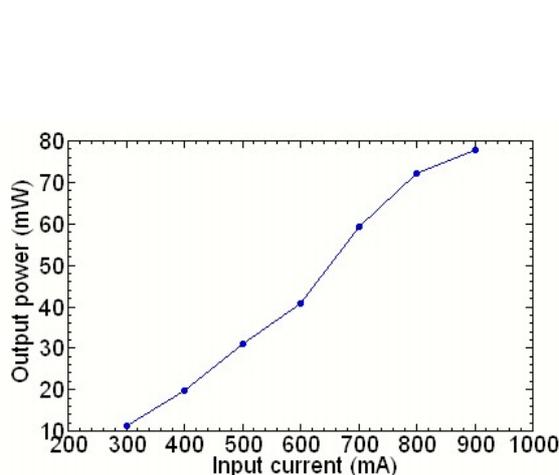


図2.外部共振器半導体レーザーの出力特性

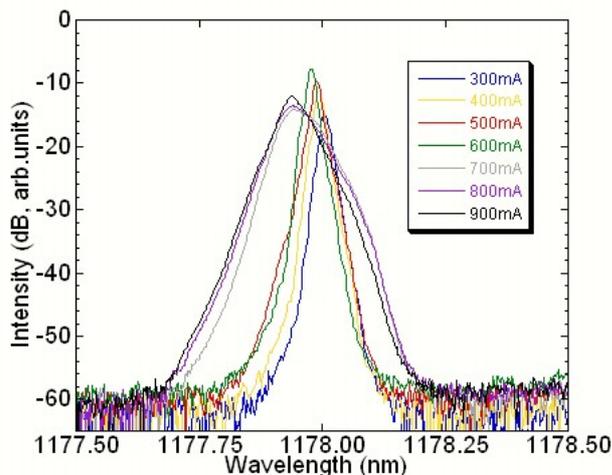


図3.スペクトル

スペクトルを見るとゲインチップへの注入電流が 600 mA までは 3 dB 落ちでのスペクトル幅は 0.02 nm で、これはスペクトラムアナライザの測定限界なので実際はそれよりも狭いと考えられる。外部共振器の縦モード間隔は 2.7 GHz(0.013 nm)であるのこれはシングルモードと考えられる。700 mA 以上ではスペクトル幅が広がっているのでマルチモードである。

3. 自己遅延ヘテロダイン法

外部共振器半導体レーザーの線幅を自己遅延ヘテロダイン法を用いて測定した。実験図は図4のようになっている、ビームスプリッターで光を二つに分け、片方は 1 km のファイバーで遅延させもう片方は音響光学素子(AOM)で周波数シフトさせている。その二つの光の干渉でビート信号を得てその幅の半分が線幅となる。

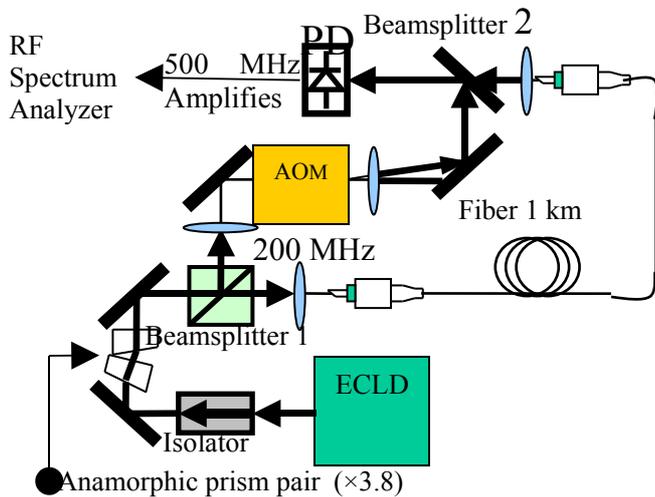


図4.自己遅延ヘテロダイン法

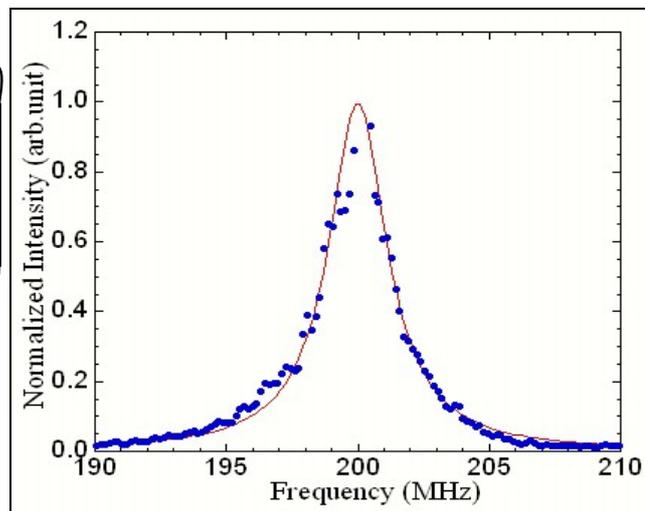


図5.フィッティング

またアナモルフィックプリズムは縦長のビーム系を横方向に広げほぼ正方形にしている。自己遅延ヘテロダイン法で得られたビート信号は Lorentzian にフィットすることができる。

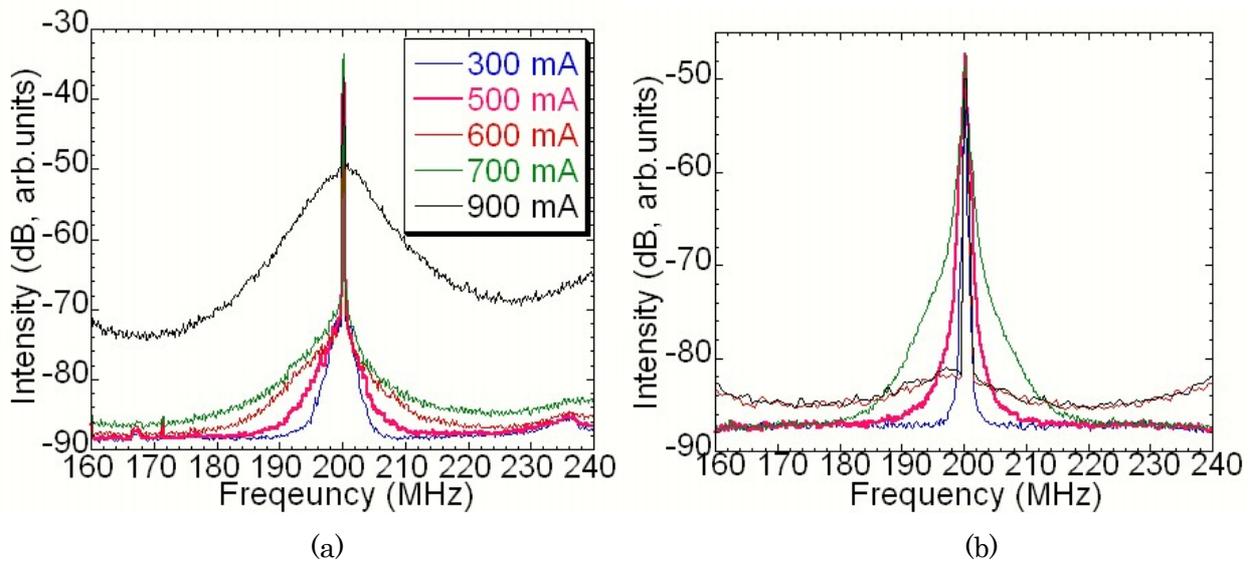


図 6. ビート信号(a)isolator 無し, (b)isolator あり

電流ごとに測定したビート信号は図 6 のようになった。なお、200 MHz のところに 1 本立っているのは AOM の駆動回路のノイズをそのまま拾ってしまったものであり、フィッティングの際にはノイズを除いて行なった。(a) はアイソレーター無しで測定したもので、900 mA では 50 MHz 周期の波のような信号になってしまった。戻り光の影響と考えアイソレーターを加えて測定したものが (b) である。結局アイソレーターを入れても 600 mA, 900 mA のときに同じような現象が起こった。よって安定なシングルモードとして使えるのは 500 mA と考えた。線幅の測定結果は表 1 のとおりであった。

表 1. 線幅測定結果(a)アイソレーター無し, (b)アイソレーターあり

| (a) | | (b) | |
|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Input current (mA) | Linewidth (MHz) | Input current (mA) | Linewidth (MHz) |
| 300 | 0.9 | 300 | 0.3 |
| 500 | 0.9 | 500 | 0.4 |
| 600 | 1.5 | 600 | — |
| 700 | 1.4 | 700 | 0.8 |
| 900 | 2.7 | 900 | — |

4. ファイバーラマン増幅

外部共振器半導体レーザーがシングルモードであるとき最大 31.2 mW であった。目標の 2 W を達成させるため図 7 のようにリン添加ファイバーを用いてファイバーラマン増幅を行なった。

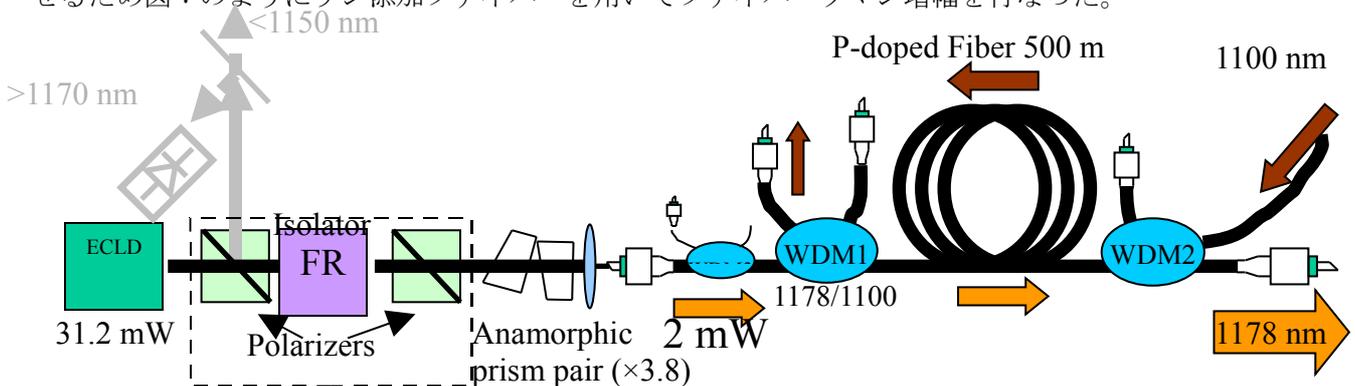


図 7. ファイバーラマン増幅の実験図

増幅結果は図8のようになり、最大励起パワー 21.9W で最大出力 231 mW まで増幅することができた。励起光には 1100 nm Yb ファイバーレーザーを用いた。

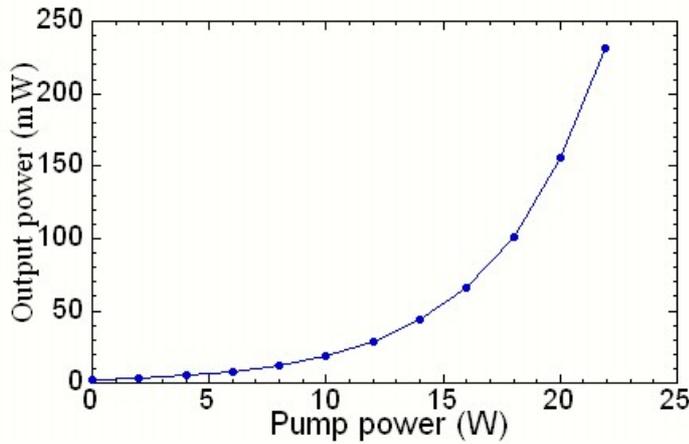


図8.ファイバーラマン増幅の結果

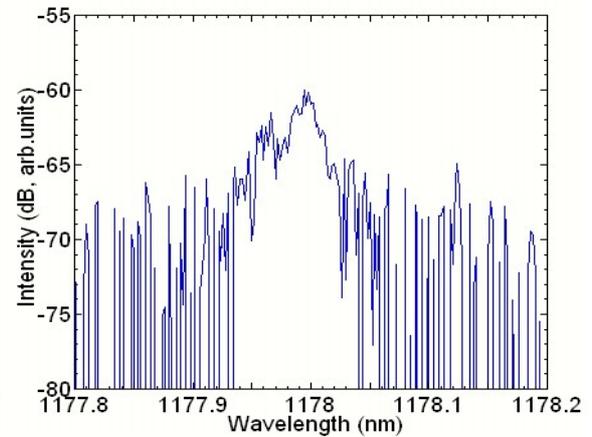


図9.後方への光

単一周波数ファイバー増幅では、ファイバー中に励起された音響フォノンによって光が後方に散乱される誘導ブリリユアン散乱(SBS)が問題となる。SBSの有無を検討するために後方への光を光スペクトラムアナライザーで観測したところブリリユアンシフトした波長(1178.07 nm)に光が見られなかったのでSBSは起きなかったと判断できる。また、増幅後の線幅は 1.5 MHz であった。

5. まとめと展望

外部共振器半導体レーザーによって単一周波数 1178 nm の光源を作り、ファイバーラマン増幅することによって最大励起パワー 21.9 W で最大出力 231.3 mW、線幅 1.5MHz のレーザーを実現した。よって本研究の目的である 1178 nm の波長で単一周波数は達成された。更なる高出力には Yb 添加フォトニックバンドファイバーによって増幅することで可能になる。ただし、今回のようなシード光の出力では高出力は望めない。シード光の出力を高くするためには、ファイバーラマン増幅時のラウンチ効率を上げることが必要である。それには、アナモルフィックプリズムの最適化や外部共振器半導体レーザーの射出口のコレメートレンズの最適化などが考えられる。さらに、単一偏光であることも重要である。外部共振器半導体レーザーは単一直線偏光だがファイバーラマン増幅で単一偏光でなくなってしまった。改善させるには偏波保持ファイバー(PM ファイバー)を用いた増幅などが考えられる。線幅に関してもレーザーガイドスターの光源に求められるのは 1 GHz である。共振器内に白色雑音のような雑音を与えることで線幅を広げることが可能である。また、今回は手動で回折格子を調節したが、ピエゾ素子を機能するようにし、より細かな調整を可能とする。

参考文献

- [1]Norihito Saito,Kazuyuki Akagawa,Mayumi Ito,Akira Takazawa,Yutaka Hayano,Yoshihiko Saito,Meguru Ito,Hideki Takami,Masanori Iye,and Satoshi Wada," Sodium D2 resonance radiation in single-pass sum-frequency generation with actively mode-locked Nd:YAG lasers," OPTICS LETTERS,32,No.14,1965-1967(2007)
- [2] A. Shirakawa, H. Maruyama, K. Ueda, C. B. Olausson, J. K. Lyngso, and J. Broeng, " High-power Yb-doped photonic bandgap fiber amplifier at 1150-1200 nm," OPTICS EXPRESS, 17, No. 2, 447-454 (2009)