

Sr 光格子時計トラップ用光源の開発

植田研究室 河野健太

・概要

Sr 光格子時計用のトラップ光源として、fiber MOPA システムを実現するために、外部共振器型半導体レーザーを作製し評価を行った上、アンプに用いる Tm:ZBLAN ファイバーの評価を行った。

1. イントロダクション

Sr 光格子時計は 2001 年に東京大学工学系研究科の香取秀俊准教授(当時)によって提案され、2005 年に実現された新しい原理の原子時計である。Sr 光格子時計はクーリング用のレーザーを用いて、原子の運動を止めた上で、共振器内にレーザー光で周期的なポテンシャルを作り、多数の原子をポテンシャルに個々に閉じ込め、独立に配置することによって、互いの原子による干渉とドップラーシフトを減らし、遷移周波数の安定を高める機構となっている[1]。

通常、電界のポテンシャルに原子を閉じ込めると、電界によるシュタルクシフトによって原子の遷移周波数がシフトしてしまい時計として使うことができなくなってしまう。しかし、“魔法波長”に設定することによって、遷移周波数のシフトを見かけ上、無くすることが出来る。

Sr 原子の場合の魔法波長は波長

813.42 nm である。原子をトラップするための電界が高いほど、原子の取りこぼしが減るので、高出力のトラップ用光源が要求され、なおかつ“魔法波長”に一致するように、狭線幅のレーザーが求められている。しかし、800 nm 帯においては、高出力、狭線幅の光源は数多くはなく、チタンサファイアレーザーや、DFB 半導体レーザーと半導体テーパアンプを組み合わせたものなどがトラップ光源として使用されてきたが、要求を満足に満たすものではなかった。

そこで、狭線幅で比較的高出力なリトロー型半導体外部共振器レーザーを製作し、さらに増幅器として Tm 添加ファイバー増幅器を作製し、組み合わせて MOPA 構造とすることによりハイパワーでかつ狭線幅のシステムを製作することにした。

2. 実験と結果

2.1 ECLD の製作

一般に半導体レーザーは劈開した端面のフレネル反射を共振器として、発振している。

しかし、端面に無反射コーティングを施すことによって、共振器を外部に設けた外部共振器型半導体レーザーが多く開発されている。

外部共振器型半導体レーザーにはい

ろいろな構成があり、それぞれ長所、短所を持っているが、本実験では比較的狭線幅でかつ出力を大きく取れるリトロ型と呼ばれる構成の外部共振器型半導体レーザーを製作することにした。

リトロ型の外部共振器型半導体レーザーの構成は下の図1のようになっている。

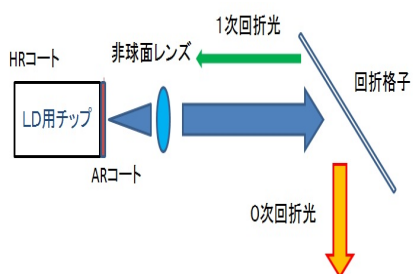


図 1.ECLD 構成

半導体 LD チップの片方の端面に HR コートを、もう片方の端面に AR コートを施し、AR コートをした端面側にコリメートレンズをつけ、出射先に回折格子を設置する。このことによって、共振器長を長くすることが出来る。そして、戻り光は回折格子によって選択された 1 次回折光を用い、0 次回折光をレーザー光として取り出して利用できる。そのため、狭線幅かつ高出力効率の外部共振器型半導体レーザーとなる。

・出力特性

製作した ECLD の出力特性は以下の

図 2 のようになった。

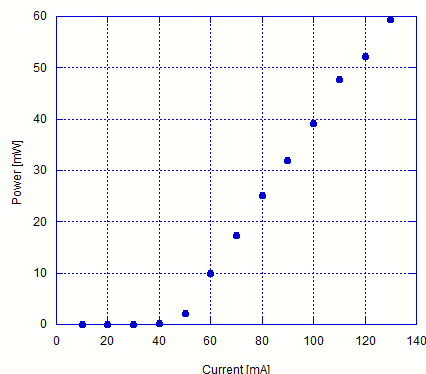


図 2.ECLD 出力特性

発振の閾値は 47 mA で、最大出力は 59 mW であった。

・スペクトル

制作した ECLD の回折格子の角度を変化させていき、波長 813.42 nm で同調させた(図 3)。

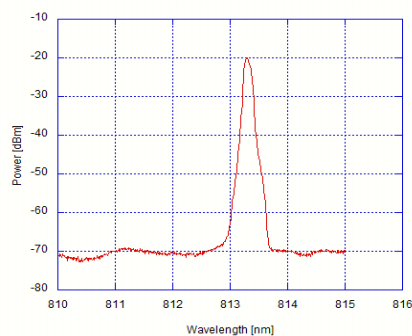


図 3 ECLD スペクトル

2.2 Tm:ZBLAN ファイバーアンプ

ファイバー増幅器では、増幅したい光の波長に適した希土類をコアに添加し利得媒質とする。添加される希土類で有名なものには、1.5 μm 帯のエルビウム (Er)、1 μm 付近のネオジ

ウム (Nd) ,イッテルビウム (Yb) などがある。

800nm 前半に利得を持つ希土類には **Thulium** があるが、あまり多くは研究されていない。また、希土類を添加する母材によって、上準位寿命が大きく異なる。

本実験ではフッ化物ファイバーである **ZBLAN** を用いることにした。**ZBLAN** ファイバーは格子のフォノンエネルギーが小さいため、シリカなどの材料に比べ、比較的長い上準位寿命が得られる。また、**Thulium** のエネルギー準位は以下の図4のようになっている。

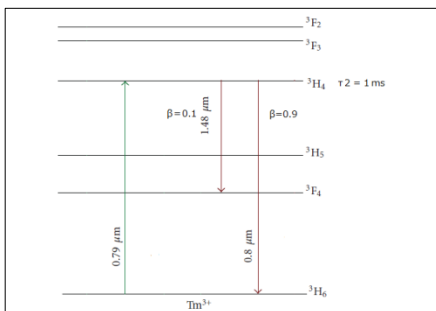


図 4.Tm 準位

Thulium を添加したファイバーアンプは波長 813.42 nm においては準 3 準位系となっている。

・ ZBLAN コーティング剥き

通常、シリカファイバーのコーティングは火で炙るだけで取れるが、**ZBLAN** ファイバーは融点が $300^{\circ}C$ と低いため、そのような方法でコーティングを剥くのは出来ない。

そこでアセトンをぬるま湯で温め、コ

ーティングを溶かしながら、アセトン を付けたキムワイプでコーティング をふき取っていく方法を考えた。

・ ファイバークリーブ

通常のシリカファイバーはダイヤモンドカッターで端面に傷を付けて劈開するだけで綺麗な端面が得られるが、**ZBLAN** は非常に脆いため、そのようなことは出来ない。

そこで、超音波カッターである **FK-11** を用いて、綺麗な端面を得た(図 4)。

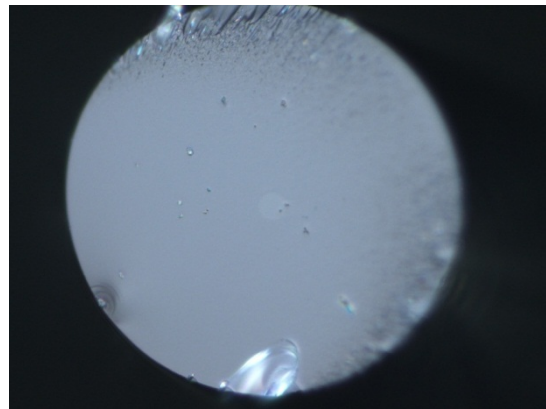


図 4.ファイバーの端面

・ 吸収断面積、蛍光断面積の測定

初めに白色光源へ **Thulium fiber** を接続し、ファイバーからの出射光の出力をスペクトルアナライザーで測定した。

次に、ファイバーを長さ $L[cm]$ だけ切り取り、再び出射光の出力を測定した。

そして、吸収断面積 $\sigma_a(\lambda)$ を以下の式 (1) から求めた。

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{\ln \frac{P_o}{P_i}}{NL} \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{式 (1)}$$

N: 添加されたイオン数/cm

L: 切り取ったファイバーの長さ[cm]

P_i: ファイバーを切りとる前の出力[W]

P_o: ファイバーを切り取った後の出力[W]

次に、誘導放出断面積 σ_e を以下の式 (2) から求めた。

$$\sigma_e = \sigma_a \exp\left[\frac{\varepsilon - h\nu}{k_B T}\right] \text{ [cm}^2\text{]} \quad \text{式 (2)}$$

σ_e : 誘導放出断面積 [cm²]

σ_a : 吸収断面積 [cm²]

ε : ゼロフォノンエネルギー[J]

k_B: ボルツマン定数[J/K]

T: 絶対温度[K]

h: プランク定数[Js]

ν : 周波数[1/s]

結果、本実験で増幅したい波長 813.42 nm の吸収断面積、蛍光断面積はそれぞれ、 $2.1 \cdot 10^{-21}$ [cm²]、 $8.4 \cdot 10^{-21}$ [cm²]と求められた。

Thulium 添加 ZBLAN ファイバーは波長 813.42 nm では準 3 準位でアンブ動作をするが、増幅したい波長 813.42 nm に比較的大きな吸収があるので、増幅をするためにはファイバー全体に渡って強い反転分布を作る必要があることがわかった。

3 まとめと今後の展望

Sr 光格子時計用トラップ光源に fiber MOPA を考案し、主レーザー用に Littrow 型 ECLD を制作し、出力 59 mW, 発振波長 813.42 nm を得た。次に、アンブ用の Tm:ZBLAN ファイバーの吸収断面積、誘導放出断面積を測定した結果、増幅したい波長に吸収があるため、ファイバー全体に渡って強い反転分布を形成する必要があることがわかった。

今後はファイバー全体に渡って強い反転分布を作ることができる高出力な励起光源を作製し、増幅実験を行いたいと考えている。

・謝辞

本研究では植田研の方々に加え、中川研究室の中川賢一先生からも多大なご協力を頂きましたことお礼申し上げます。

・参考文献

[1]An optical lattice clock
Nature **435**, 321-324