

ZBLAN ファイバを用いた Sr 光格子時計トラップ光源の開発

武者研究室

梶川 詠司

1. はじめに

人類は古代より自然界の周期現象から時間を定義してきた。マイクロ波分光学の進歩によりセシウム原子標準器が開発され、はるかに高い正確さで秒を実現できるようになった。1955年から1958年にかけてセシウム標準器の周波数を暦表示を基準にして測定し[1]、この結果を基に1967年の第13回CGPM (*Conférence générale des poids et mesures* 国際度量衡総会)において秒が再定義された[2]。これはセシウム133の遷移周波数を9,192,631,770 Hzとするもので周波数は単位秒あたりの振動数であるので周波数の標準は時間の標準と同一のものとなる。現在はこのセシウム原子で周波数標準が定められている。

近年、これまでのマイクロ波周波数で得られる周波数標準の精度をはるかに上回る標準として、光周波数遷移を標準とする研究が盛んに行なわれている。その理由は2005年のノーベル物理学賞である光周波数コムにより光周波数とマイクロ波周波数の直接リンクが可能になったため光周波数計測が容易になったためである[3]。

この光周波数を基準とする光時計にはこれまでに『単一イオントラップ時計』と『中性原子集団時計』の2種が候補となっていた。単一イオントラップ時計はイオントラップ中で強く束縛されており、1次のドップラーシフトが除去されている。また、単一イオンであることから、多原子との相互作用による周波数シフトが無いという利点がある。しかし、たった1個の原子を観測しなくてはならないため測定のス/N比が小さく短期安定度が低いという欠点がある。中性原子集団時計は約 10^6 個という多数の原子を観測できるのでS/N比が大きいという利点があるが完全には束縛されておらずドップラーシフトが存在してしまう、また原子間衝突といった相互作用から起因する周波数シフトも存在するため長期安定度の限界があるといった欠点がある。

一長一短のあった従来の光周波数標準の候補に対し、2001年、東京大学の香取秀俊准教授(当時)は両者の利点を両立しうる光格子時計の概念を発表した[4]。それから、わずか2年後の2003年にこの原理に基づく原子時計の基礎実験として実現された[5]。理論上では現在の原子時計の安定度をはるかに凌駕する1秒で 10^{-18} の精度を持つとされている。そのため現在は次世代の周波数・時間標準の有力候補とされ研究が行われている。

光格子時計とは、3次元光格子ポテンシャル

にレーザー冷却された中性原子を一つ一つトラップした状態で精密分光する事により目的の光周波数を得るものである。

原子が光格子ポテンシャルにトラップされると、原子の各エネルギー準位はトラップレーザーの強度に応じてシフトする(シュタルクシフト)。一般的には、時計遷移の基底状態と励起状態でこのシフト量が異なるため、原子をトラップすると時計遷移の周波数を周波数標準としては使えない。しかし、ある特別な波長を選ぶと、トラップレーザーによるシュタルクシフトが基底状態と励起状態で全く同じになる。つまり、原子を光格子ポテンシャルにトラップしても、時計遷移の変位が実質0となりシフトしなくなる。この波長は、マジック波長と呼ばれ、Srでは813.428 nmである事が実験的に確かめられている。

今回、我々はSr光格子時計用のSr原子トラップレーザーの開発を行った。トラップレーザーに要求されている特性は、波長813.428 nm(マジック波長)、線幅1 MHz以下、出力1 W以上である。そしてさらに、高ビーム品質、小型化である事、また長期安定動作が行える事も目標に据えて開発を行った。

2. 原理

2.1 ファイバMOPA

ファイバMOPA(Master Oscillator Power Amplifier)により目標達成を目指し新しい光源の開発を行った。ファイバMOPAとは安定で単一縦モードの主レーザー(Master Oscillator)を光ファイバ増幅器により増幅し、主レーザーの安定度を持ったビーム品質の良い高出力光源を得る方法である。また、高い冷却性のために空冷での放熱が可能である事、また小型化である事などが特徴として挙げられる。

外部共振器型半導体レーザー(ECLD)を主レーザーとして、ファイバ増幅器によって増幅を行う。これまでも我々はECLDを主レーザーとして用いたが、今回ではさらに安定なECLDを作成し増幅光源の開発を行った。波長可変であるECLDによってマジック波長に波長選択でき、ECLDが比較的小型に開発できる事からトラップ光源を出力する光学系全体として小型化の開発が可能である。

2.2 外部共振器型半導体レーザー(ECLD)

ECLDには回折格子型とフィルター型があり、従来用いている回折格子型ECLDより高いビーム品質で長期安定動作に優れているフィルター

型 ECLD を新たに開発し、ECLD からの光を増幅させた。

フィルター型 ECLD の利点は、キャッツアイ反射構造をとることで光軸のずれに強くなるため機械的安定度が高い事である。

キャッツアイ反射構造とは入射した光を同じ方に反射する構造である。

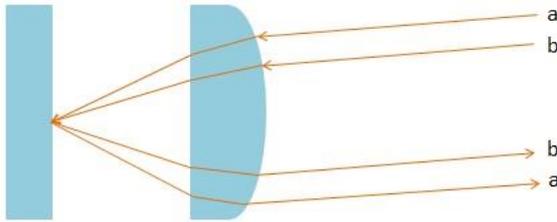


Fig. 2-1 キャッツアイ反射構造

Fig.2-1 のようにレンズの焦点にミラーを置くことで光軸が少しずれたり、ミラーが少し傾いたりしても入射した光線は元来た方向反射して戻される。この構造によって共振が起こるので共振器を組むとレーザー発振が可能になる。

縦モードは Free Spectral Range(FSR) と呼ばれる一定の周波数間隔でできる。また、レーザーの線幅は FSR で決まることがわかっている。

$$FSR = \frac{c}{2nL} \quad (2.1)$$

ここで、 n は屈折率である。FSR が小さいほど線幅 (Δf) が細くなるため共振器長 L を伸ばすことにより細い線幅のレーザーを作ることが出来る。そのため外部共振器にすることで線幅をより狭くすることが出来る。

$$Finesse = \frac{\pi(R_1 R_2)^{\frac{1}{4}}}{1 - (R_1 R_2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{FSR}{\Delta f} \quad (2.2)$$

ここで、 R_1 、 R_2 はミラーの反射率である。

波長選択の方法は、レーザー共振器の中に干渉フィルターを配置することで可能になる。これはレーザー共振器によって発生する複数の縦モードの中から目的の波長のモードを取り出せる事に起因する。

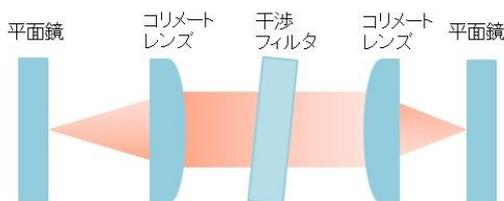


Fig. 2-2 干渉フィルターによるモード選択

干渉フィルターは異なる屈折率の物質の誘電体多層膜から成り、フィルターの中心透過波長

$\lambda(\theta)$ は入射角 θ 、実効屈折率 n_{eff} 、垂直入射での最大中心透過波長 λ_0 を用いて次式で書ける。

光軸に対する干渉フィルターの角度を変えることで透過波長帯を変えることが出来る。

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2(\theta)}{n_{\text{eff}}^2}} \quad (2.3)$$

したがって、干渉フィルターを用いることで目的の波長を選択できる。

2.3 Tm 添加フッ化物 ZBLAN ファイバ

813 nm の光を増幅させるので 800 nm 帯に蛍光を持つ Tm をファイバに添加させた。

通常の石英ガラスファイバーに Tm を添加させても増幅に十分な上準位寿命が得られないので ZBLAN と呼ばれる特殊なフッ化物ファイバに Tm を添加しファイバ増幅器に用いた。

ZBLAN ファイバは石英ファイバに比べて製造することが大変難しい。したがって製造会社によって品質が異なる。また、石英ファイバに比べて機械的強度や耐久温度が小さく、取り扱いが非常に難しい。

目的の 810 nm 帯の発光には様々な方法がある。再吸収がある事と、1064 nm で高輝度な光源が得られる事より、我々は今回 1064 nm で光子吸収を用いる励起方法を用いた。

高出力の 1064 nm の Yb ファイバレーザーによるコア励起を行うことで 810 nm 帯の増幅を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 外部共振器型半導体レーザー (ECLD) の開発

回折格子型 ECLD を用いていた。しかし、回折格子型の ECLD では振動に弱いという欠点があった。そのため安定度の向上を求めてフィルター型 ECLD の開発を行った。

我々の開発したフィルター型 ECLD の構造は Fig. 3-1 に示した。

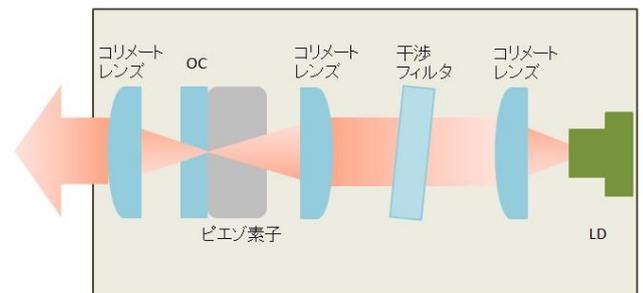


Fig. 3-1 フィルター型 ECLD の構造

半導体レーザーから出射された光は広がってしまうのでコリメートレンズを用いて平行光にする。また、このコリメートレンズを用いることでキャッツアイ反射構造になっている。

コリメートレンズは Thorlab 社製の物を使用した。Fig. 2-4 において右から $f=4.51 \text{ mm}$ 、 $f=18.4 \text{ mm}$ 、 $f=11 \text{ mm}$ の物を使用した。

円筒型ピエゾ素子付きの部分反射ミラー (Output Coupler : OC) はシグマ光機社製の誘電体多層膜ミラーを用いた。これは、垂直入射に対して 800 nm 帯で約 20% の反射率を持つミラーである。

次に、干渉フィルターは Radiant Dyes 社製の 6° で 817 nm を中心透過波長とする干渉フィルターを用いた。この干渉フィルターは 0.4 nm の FWHM を持ち、透過波長域は $802 - 820 \text{ nm}$ で可変できる。

実際に作成したフィルター型 ECLD は Fig.3-2 に示した。

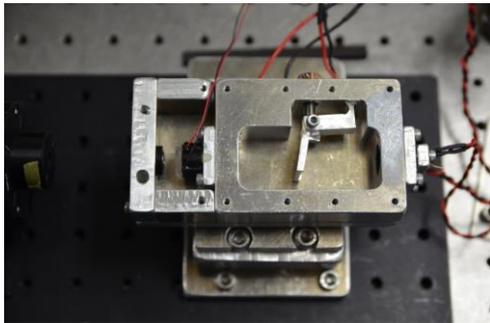


Fig. 3-2 作成したフィルター型 ECLD

作成したフィルター型 ECLD の I-P 特性を測定した。測定結果を Fig. 3-3 に示した。

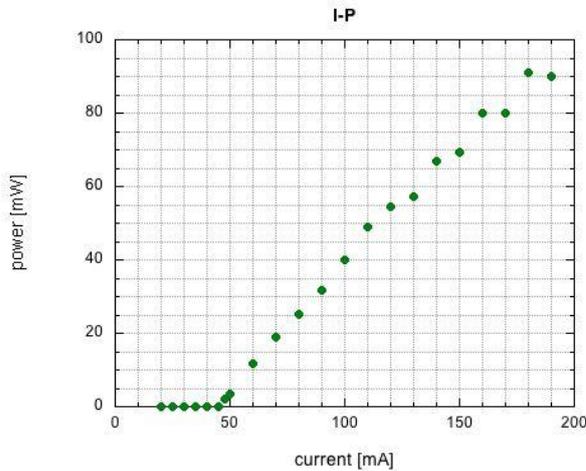


Fig. 3-3 フィルター型 ECLD の I-P 特性

この結果より、しきい値は 45 mA ほどであった。また、スロープ効率は 65% であり出力は最大で 92 mW であった。これまで使っていた回折格子型 ECLD は最大出力 $95 \text{ mW} @ 200 \text{ mA}$ でしきい値 43 mA ほどで、パワーについて大きな違いは見られなかった。

出力が高いところでは、不安定なためにパワーが一部伸びていなかったりするところがある。これは温度をかえる事で改善できると考えている。

3.2 増幅実験

今回は、ZBLAN ファイバの条件を変更して増幅実験を行った。これまでは、Fiber Lab 社製のコア径 $9 \mu\text{m}$ の ZBLAN ファイバを用いていた。しかし、コア径が大きいためファイバから出射されるビーム品質が悪いという欠点があった。そこで、今回は Le Verre Fluoré 社製のコア径 $5.1 \mu\text{m}$ の ZBLAN ファイバを増幅器として用いた。

今回の実験でこれまでと変更した点は主レーザーとファイバ増幅器である。増幅実験系を Fig.3-4 に示す。

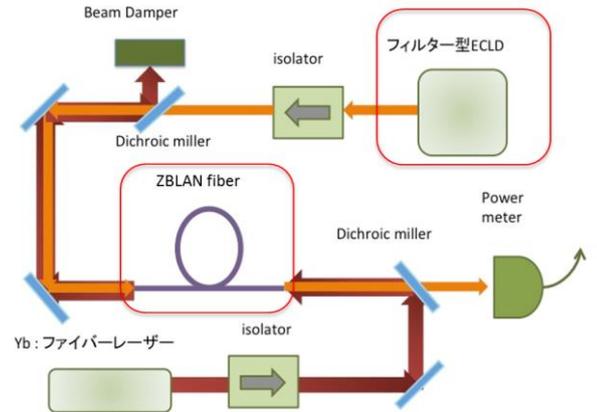


Fig. 3-4 増幅実験系

赤で囲んだ部分が今回変更した箇所である。 Tm^{3+} は 813 nm に吸収があるため、後方励起で増幅実験を行った。

増幅実験を行うと Fig. 3-5 のような結果となった。

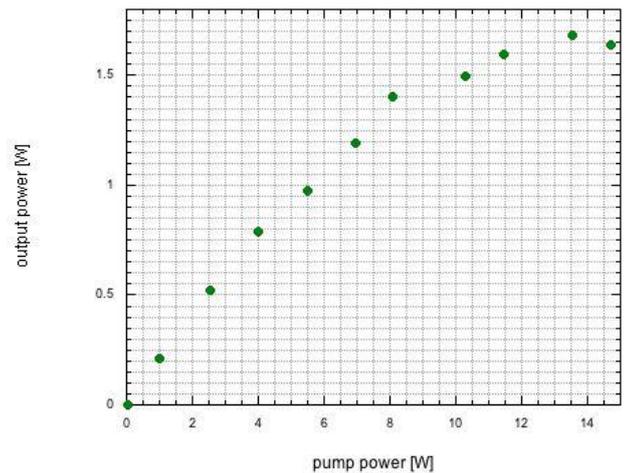


Fig. 3-5 813 nm 増幅結果

入射励起光 13.5 W で最大 1.68 W の 813 nm 増幅が確認された。我々のこれまでの最高出力は約 1.2 W であったため、それを上回る結果となった。

これは、主レーザーをフィルター型 ECLD にかえた事で主レーザーのビーム品質が向上したため、ファイバへのカップリングが良くなった

からだと考えている。

励起パワーが 0 W – 8 W では変換効率が 17.0 % であり、8 W – 13.5 W では 5.3 % であった。

8 W の励起パワーまでは概ね線形に増幅しているが、励起パワーをそれ以上大きくすると飽和する事が確認できる。これは誘導放出される光子がそれ以上増えない事と、吸収が大きくなる事に原因がある。

高出力のパワーを出力するには、濃度と ZBLAN ファイバの長さを最適にする必要がある。また、信号光のファイバへのカップリング効率を上げる事によりさらに高出力のパワーが出せると考えている。

今後は、シミュレーションから最適なパラメータを求めることでより高いパワーの光源をつくる事をしなければならない。

4. まとめと今後の展望

主レーザーと光増幅器を取り替えた結果、最大出力がこれまでの約 1.2 W から、それを上回る約 1.68 W まで増幅することが出来た。また、まだ測定してないが、ビーム品質も向上していることが期待できる。

今後は、ビーム品質や線幅なども測定しなければならない。また、Sr 光格子時計トラップ光源では長期安定動作が重要である。そのため、どのくらい連続運転できるかを評価しなければならない。そして、さらに長期安定動作を実現するために、今後はオールファイバ化を検討している。それを実現するためには融点の違う ZBLAN ファイバと石英ファイバを如何にして融着するかを模索しなければならない。

また、さらなるハイパワーを目指してシミュレーションを行う事や、シミュレーションのために Tm^{3+} の寿命の測定を行う事も必要となってくるだろう。

マジック波長で狭線幅な高出力光源であり小型かつ長期安定動作の実現を目指す事が根幹にある。その根幹部分に到達するためには、現状のさらなるブラッシュアップや様々な工夫を凝らす事、そして新しいアイデアを取り入れる事が重要になるだろう。

5. 参考文献

- [1] W. Markowitz, et al., “Frequency of cesium in terms of ephemeris time”, Phys, Rev. Lett., 1, 3, p.105, Aug. 1958
- [2] 計量研究所訳・監修.”国際単位系(SI) 国際文書第 6 版 (1991年)”, 日本規格協会, 1992.
- [3] Th. Udem, J. Reichert, R. Holzwarth, and T. Hänsch, Phys. Rev. Lett. 82, 3568-3571 (1999)

- [4] H. Katori in Proc. 6th Symp. on Frequency Standards and Metrology (ed.P.Gill) 323-330 (World Scientific, Singapore, 2002) .
- [5] M. Takamoto and H. Katori, Phys. Rev. Lett. 91, 053001 (2003) .