

Sr 光格子時計用 ZBLAN ファイバ増幅器の特性評価

武者研究室 村上弘国

1. 序論

現在の 1 秒はセシウム原子の振動数を用いて定義されている。2001 年、東大の香取教授によってこれをはるかに上回る精度をもつ Sr 光格子時計が提唱された。Sr 光格子時計は将来的にはさらに高精度に時間・周波数を定義できると考えられている。この Sr 光格子時計が実現することによって、時間・長さを用いた計測が高精度に行えるようになる。Sr 光格子時計の実現にはレーザーの定在波の電磁ポテンシャルで Sr を捕獲する必要がある。

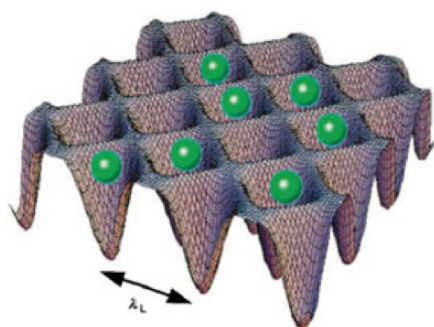


図 1 Sr トラップに用いる光格子

Sr 光格子時計で用いる光源（トラップ光源）は波長 813 nm、線幅 1 MHz 以下、出力 1 W 以上であることが要求されている。固体レーザーや、半導体レーザーで 810 nm 帯のレーザー光源を作る事が可能だが、1 W 以上でビーム品質が良く長期安定動作を行うレーザー光源を作る事は難しい。我々は MOFPA (Master Oscillator Fiber Power Amplifier) という手法によってこの問題を解決

し、より小型な Sr 光格子時計用トラップ光源の開発を目指した。

2. 原理

2.1 MOFPA システム

MOFPA とは安定で単一縦モードの主レーザー (Master Oscillator) をファイバ増幅器により増幅し、主レーザーの安定度を保ったビーム品質の良い高出力光源を得る方法である。

MOFPA の特徴としては増幅器にファイバを用いることで添加希土類による幅広い波長での増幅が可能であることが挙げられる。またファイバはシングルモード条件を満たしたコア径を選択すればシングルモードの光増幅を行うことができ、高いビーム品質を達成することが可能である。他にも高い冷却性のため空冷での放熱、小型化等が可能である。

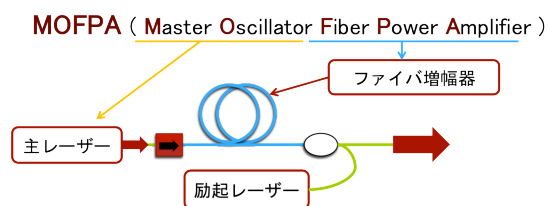


図 2.1 MOFPA システム概要

2.2 ファイバ増幅器

光増幅器には、増幅器の材料と励起方法により様々な方法がある。その中でも添加されたイオンを光で励起することにより増幅するファイバ増幅器、電流により増幅する半導体

増幅器の大きく2種に分けることが出来る。どちらも励起により反転分布を形成し、その中に光を入れて誘導放出が起こることにより増幅が行われる。ファイバ増幅器は主に光通信技術に使用されている。原理は光ファイバのコア内に希土類のイオンを添加することによって蛍光が発生し、信号光の増幅が行われるというものである。

一般的な伝送用の透明なファイバでは、信号光がそのまま伝搬する。しかし我々が使用した増幅用の Tm を添加したファイバでは Tm の蛍光によって増幅が行われる。 Tm の励起には、1064 nm Yb ファイバレーザーによる二光子吸収アップコンバージョン励起を使用した。

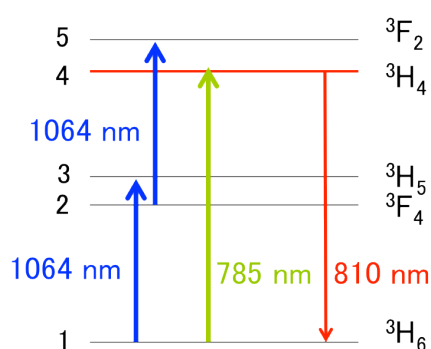


図 2.2 Tm のエネルギー準位図

Tm は 810 nm 帯で蛍光を持つが、通常の石英ガラスファイバに 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。そこで 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。

現在、我々の研究では出力 1.6 W という結果が出ており、1 W 以上という当面の目標は達成した。

そこで私の研究ではファイバ端面

の処理を行った。また、より高い出力を達成するため、ZBLAN の光学的特性をより詳細に検証する必要がある。そのため、蛍光寿命の測定を行った。

3. 実験結果

3.1 ファイバ端面の処理

ZBLAN ファイバは一般的なシリカファイバとは違い機械的特性が低く、壊れやすい。そのためファイバをクリーブするときに超音波クリーバー (FK12) という特別な機器を使用してクリーブする必要がある。

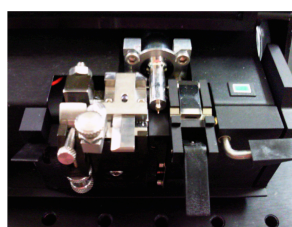


図 3.1 超音波クリーバー (FK12)

ここでファイバをクリーブするときに必要な条件が二つある。それはテンションと捻り角である。テンションとはクリーブをする際のファイバを引っ張る力のことであり、捻り角とはファイバに捻りを加えてクリーブすることにより角度付けを行うことである。ファイバの端面に角度付け (8°) を行うのは、レーザー発振を防ぐためである。

私は以上二つの条件の最適化を行い、結果は以下ようになった。

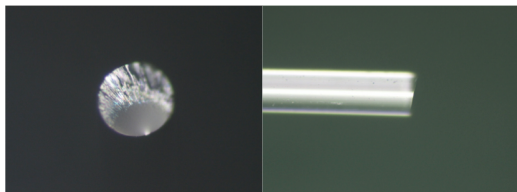


図 3.2 テンション 100 g 重 捻り角 12°

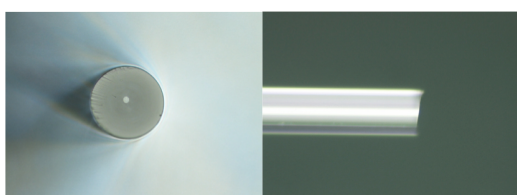


図 3.3 テンション 50 g 重 捻り角 12°

テンション、捻り角をそれぞれ変えながら様々な条件で実験を行った。一つの条件（例えばテンション 80 g 重、捻り角 10°）につき 10 回のクリーブを行い、最も端面が綺麗で角度付けが出来ている条件を探した。結果としては、テンション 50 g 重、捻り角 12° のときに最もよい結果が得られた。再現性は 10 回に 6 回ほどであるが、十分最適化に成功しているといえるだろう。

3.2 蛍光寿命の測定

蛍光寿命とは励起光を遮断した後、蛍光強度が $1/e$ まで低下するのに要する時間である。蛍光寿命は T_m の添加濃度にも依存してくる。これは蛍光強度のパラメータに蛍光寿命が依存しているためである。従って、 T_m の添加濃度が上がると蛍光寿命も伸びる。そこで T_m の添加濃度やファイバ長を変え、実験を行った。

実験に用いた光学系を以下に示す。

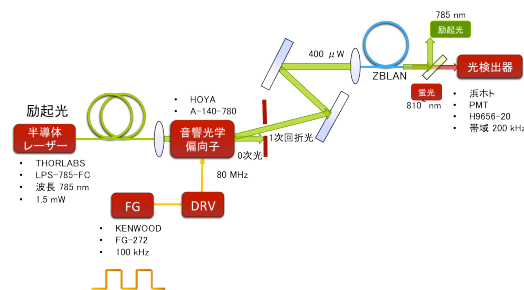


図 3.4 蛍光寿命測定の光学系

実験の手順としては、励起用の半導体レーザー（波長 785 nm）から出た光を AOM(Acousto-Optical Modulator)に入れ一次回折光を取り出し、その光を ZBLAN ファイバに入れ、出てきた蛍光を PMT(Photomultiplier Tube)で検出した。その際に、ファイバから出て来た励起光はダイクロイックミラーを置くことで飛ばしている。測定結果は以下ようになった。

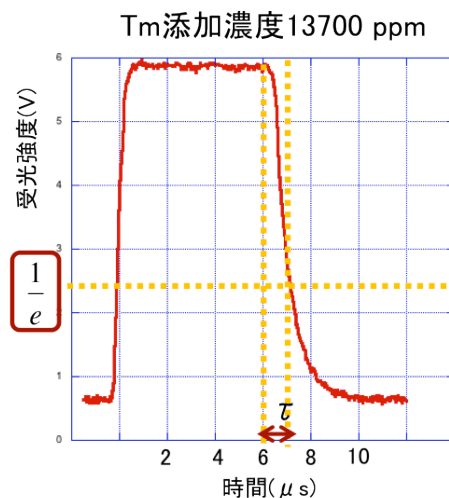


図 3.5 蛍光強度測定結果

図 3.5 は Tm 添加濃度 13700 ppm のファイバを用いて測定したものである。他に Tm 添加濃度を 4400 ppm、40000 ppm 等にし、ファイバの製造会社などを変えて実験を行い、蛍光寿命をそれぞれ求めてみるとどれも数 μs ほどになった。これは文献値である 1 ms からはかけ離れており、明らかに本当の寿命は見えておらず、励起光が見えているだけだと考えた。それは、本来であれば励起光の減衰時間は蛍光寿命に比べてとても短いため蛍光は見えるはずだが、励起光のパワーが高過ぎるために蛍光が埋もれてしまっているということの意味している。そのため励起光と蛍光の分離が今後の課題になってくる。

具体的には、現在のダイクロイックミラーよりも光線分離特性が良いものを使用したり、波長が 810 nm 周辺の光を透過させるバンドパスフィルタを用いることも考えられる。

また、PMT の受光感度が高く迷光や散乱光に影響を受けやすいことから、その対策として実験系をドーム状に囲う箱を作成しようと考えている。そうすることで背景雑音が低減され、より微小な信号でも測定することが可能になるだろう。

以上のことをすることで本来の蛍光寿命が測定できるのではないかと私は考えている。

4. まとめと展望

我々は Sr 光格子時計用トラップ光源の開発を行っており、すでに目標である出力 1 W 以上である 1.6 W を達成した。私の研究ではレーザー発振を抑えるためのファイバ端面の処理を行い最適化に成功した。また更なる高出力化のための蛍光寿命の測定を行った。しかし本来の蛍光寿命は測定することが出来なかった。従って、今後測定方法を見直すことで本来の蛍光寿命を測定しようと考えている。具体的には、光線分離特性の改善であったり、出力パワー比の最適化、背景雑音の低減などである。