

Tm:ZBLAN ファイバー増幅器励起用強度安定化 Yb:FL の開発

武者研究室 久保 貴志

1. 序論

現在の周波数・時間標準である Cs 原子時計の周波数安定度 10^{-15} を遥かに上回る安定度 10^{-18} を達成した光格子時計が次世代の周波数標準の有力な候補として注目されている。光格子時計は Sr, Yb, Hg の原子を用いたものがこれまで開発されてきたが、世界初の魔法波長発見、及び必要なレーザーの波長が比較的容易に実現可能な Sr 光格子時計が特に世界で幅広く研究されている。光格子時計の運用には、3 種類のレーザーが必要であるが、その中で Sr 原子をトラップする魔法波長 813.42 nm の光格子を生成するレーザーは主に Ti:Sappier レーザーが用いられている。しかし、Ti:Sappier レーザーは固体レーザーで水冷が必要であることから、大型であることや、長期安定動作が困難であるといった欠点が存在する。よって今回我々は、次世代の可搬型 Sr 光格子時計を目指すにあたり、小型で長期安定動作可能な新しい光源の開発を行った。波長 813.42 nm、線幅 100 MHz 以下、出力 1 W 以上という光学的要求を満たすために、光源の構成としては MOFPA (Master Oscillator Fiber Power Amplifier) によるシンプルな実験系を目指した。マスターレーザーとしては、小出力であるが線幅の細かいフィルター型の外部共振器型半導体レーザー (ECLD) を用いてその出力を希土類ファイバー増幅器により周波数特性を保ったまま増幅を行うものである。ファイバー増幅器には波長 800 nm 帯に唯一の蛍光を持つ Tm³⁺ をフッ化物ファイバーである ZBLAN ファイバーに添加したのを用い、Tm³⁺ の強い再吸収に打ち勝つ高強度励起

を行うため波長 1064 nm の Yb:FL (ファイバーレーザー) を使用した 2 光子吸収によるアップコンバージョン励起を選択した。

以前使用した市販品の Yb:FL である FITEL ASF15R06 (古河電気社製) には 20% 程度の強度ゆらぎが存在し、温調を用いた安定化を行うことができない構造であった。よって今回私は、温調を用いた強度安定化を行える Yb:FL の作成を行った。目標値は 3~4 W 程度の出力 @ 1064 nm、1% 程度の強度ゆらぎである。

2. 原理

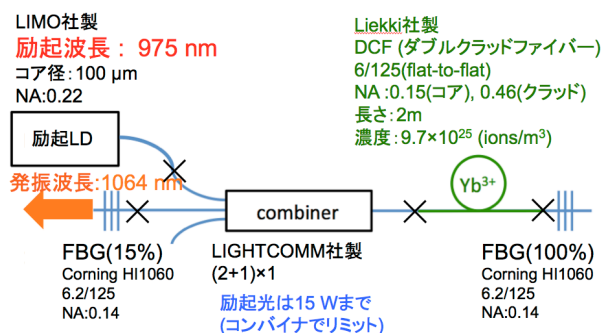


図 1: 実験系の概略図

レーザー (LASER) は光の誘導放出を用いて光を増幅するという言葉の頭文字から作られた造語であり、利得媒質、励起源、フィードバックを行う共振器の 3 つで構成される。今回作成した Yb:FL においては、励起源は高強度ファイバーカップル LD である。高強度 LD の光は多モード発振などにより小さく絞り込むことが難しいためコア径 100 μm と通常のファイバーより大きなコア内を光が閉じ込められ伝搬してゆき、コンバイナにおいてダブルクラッドファイバー (DCF) の第 1 クラッド内に注入された後、利得媒質である Yb³⁺ 添加ファイバーに

到達する。Yb³⁺添加ファイバーはコアにYb³⁺が高濃度添加されており、第1クラッド内に閉じ込められた励起光がコアを通る時に励起が行われる。今回用いたファイバーは励起効率をあげるために第1クラッドが八角形である。ちなみに、Yb³⁺添加ファイバーを通過した励起光は次に融着されているファイバーがシングルクラッドファイバー(SCF)であるため、融着部分において外部に捨てられる。共振器のミラーとしての役割を成すのはFBG(Fiber Bragg Grating)である。FBGはファイバーのコアに屈折率の周期的な構造が回折格子のように存在し、それが誘電体多層膜と同様にある特定の波長の光のみを反射するミラーとして働くものである。Yb³⁺は幅広い発光が存在するが、今回はこのFBGの波長特性によってYb:FLの発振波長を1064 nmとしている。

3. Yb:FLの作成

ファイバー融着機を用いてファイバー同士の融着を行うことで図1に示したYb:FLの完成を目指した。問題となったのは、Yb³⁺添加ファイバーの融着である。今回用いたYb³⁺添加ファイバーは励起効率を高めるため第1クラッドが八角形であり、角度によっては融着機の画像認識においてコアの位置が誤認されてしまうことが起きる。

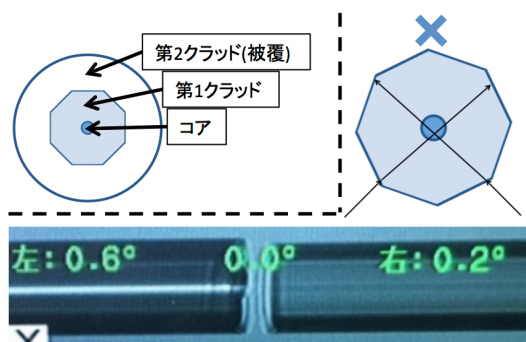
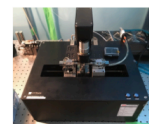


図2:八角形クラッドファイバーと影響
実際に融着を行った結果、手で回すよう

な大雑把な角度調整では精密な融着を行うことはできず、融着箇所ではファイバーが燃焼することもあった。よって、ファイバー回転機能を持つ、PMファイバー用のアーケ放電型融着機及び、大口径ファイバー用のフィラメント加熱型融着機の2つの融着機において融着を行った。融着機の画像を見ながらファイバーの回転を行い、クラッドの抜け光をパワーメータで測定することにより角度の定量的評価を行った。2つの融着機で再現性、角度調整特性の違いはあったが、八角形クラッドファイバーと円形ファイバーの融着、八角形クラッドファイバー同士の融着において精密な融着を行うことが確認できた。

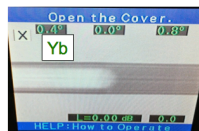
FSM-45PM-LDF (フジクラ社製)

GPX-3400 (Vytran社製)



アーケ放電型

- ・角度の変化は大雑把(自動*)
- ・高い再現性



Ωフィラメント加熱型

- ・0.1°単位でファイバーを回転
- ・低い再現性(50%未満)

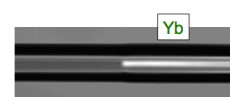


図3:融着機及び融着結果

4. 時間経過によるパワーの低下の対策

作成したYb:FLはある程度の時間経過によってパワーが減少、融着点において燃焼することが繰り返し起こった。融着点を再び融着し直すことでパワーが若干向上することから、融着点を調べたところホコリ等の付着が原因であることが判明した。

利得ファイバーおよびコンバイナの一部はダブルクラッドでクラッド伝搬を行う。第1クラッド内を伝搬していくのだが、第2クラッドは被覆(被膜)であり、融着箇所では2~6 cm程度取り除かれている。むき出

しになった第1クラッドに対し、空気(屈折率 $n=1$)が第2クラッドの役割をすれば問題ないとしていたのだが、実際はホコリ等が付着することで全反射条件が崩れ励起光が外に逃げていた。

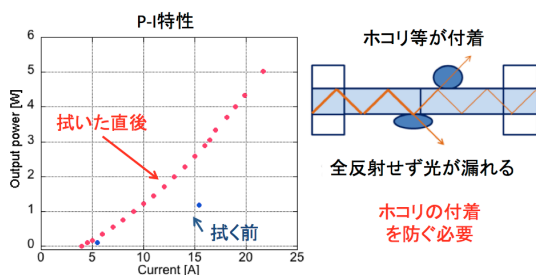


図 4:ホコリの影響

よって、ホコリの付着を防ぐ保護を作成することによる対策を行った。一般的に用いられる熱収縮型の補強スリーブFPS01-900-34(フジクラ社製)は屈折率($n=1.5$)の内部スリーブが接すること及び熱耐性より使用を断念した。次に第一クラッドに触れずに空気を閉じ込めるものとして、メンディングテープで作成した筒、収縮時においても第一クラッドに接触しない熱収縮チューブを用いた方法などを試したが、あまり芳しい結果が得られなかった。他に有力な方法として、実際にハイパワーファイバーレーザーにおいて用いられている、ステンレスチューブ及びエポキシ樹脂を用いた方法が存在したが、今回はリコートを用いたリコートによってこの問題を解決した。リコートとは、ファイバーの被覆が存在しない箇所にはUV硬化のポリマー樹脂を流し込み、UVを上下から照射することにより新しく被覆を作る技術である。今回は、PC-373という $n=1.3746@852\text{ nm}$ 及び $100\text{ }^\circ\text{C}$ 以上の熱耐性という特性を持つ樹脂を用いて樹脂の硬化を行った。使用した光ファイバリコートFSR-2(フジクラ社製)は古い型のもので、PC-373は対応樹脂ではないと説明書に記されていたが、フジクラに

確認したところ使用可能ということが判明した。そこで、指定された硬化時間による硬化を試したが、樹脂を流し込まれる中心部分の硬化がうまく行われなかったため硬化時間の最適化を行った。結果、上下の照射時間それぞれ480sを行い、中心部分がある程度固まったところで中心部分をずらし再び200sずつ行うことで硬化を行うことができた。結果、パワーの低下も見られず、これをホコリ付着によるパワー低下の対策とした。

5. 出力特性

完成したYb:FLの特性を以下に示した。

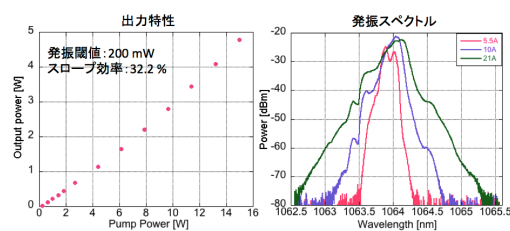


図 5:Yb:FLの出力特性

15 W 励起時に出力 4.8 W 程度を達成、スペクトルも 1064 nm 中心で発振されており出力に関する目標値は達成された。スロープ効率が 32.2%と、一般的な Yb:FL と比べかなり低いものとなっているが、これは利得ファイバー長及び OC(アウトプットカップラー)反射率の最適化を行っていなかったためであると考えられる。

6. 強度安定化

完成した Yb:FL は LD の伝導冷却のみの状態であり、出力が時間とともに上昇して行くことが確認された。よって安定化を行い目標値達成を目指した。

6.1 LD 温調

はじめに LD の温調を行った。LD は温度上昇に伴い、屈折率及び熱膨張によって光

路長が変化することにより発振波長の長波長化が起こる。今回用いた LD においても温度変化による発振波長の変化を確認し、Yb³⁺の吸収中心とされている 975 nm 中心の発振である 26.5°Cにおいて温調による 0.005°C程度の制御を行った。上昇率を抑えることはできたが、依然時間経過による出力の上昇が観測された。また、この際に使用していた LD の時間経過による 30 分で 1%程度のパワー減少が確認された。

6.2 利得ファイバーの冷却

次に利得ファイバーの冷却を行った。Yb³⁺は 975 nm 励起においては準 3 準位であり、温度上昇に依る下準位の熱励起によって効率が変化することが考えられる。よって、利得ファイバー部分を金属板上に設置し、上からファンを用いて排熱を行った。結果としては、熱平衡状態と考えられる 6~7分後以降は 0.5%以内の強度ゆらぎに抑えることができた。

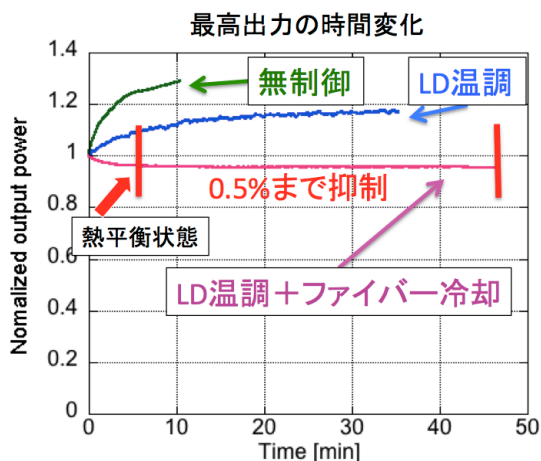


図 6:強度安定化の結果

また、ファンを用いない冷却を目指し、直径 15.5 cm 程度の円筒型アルミ合金に利得ファイバーをしっかりと巻きつけたところ、出力が 10%上昇し、更に時間経過により出力が減少する傾向が見られた。減少に関しては、励起 LD が時間経過で出力減少を起

こすことに依るものと考えられる。

7. まとめと展望

Tm:ZBLAN ファイバー増幅器の励起に用いる発振波長 1064 nm の Yb:FL を作成した。特性を以下に記す。

- 15 W 励起時に最高出力 4.88 W(@1064 nm 中心)
- 熱平衡状態より 0.5%以下の強度ゆらぎによって、出力、安定化の目標値を達成することができた。

今後の展望としては、32.2%という低いスロープ効率を最適な利得ファイバー長及び OC に変更することで、今後使用する可能性がある 3 W ずつの双方向励起用に 6 W 以上の高出力化を目指すことが考えられる。

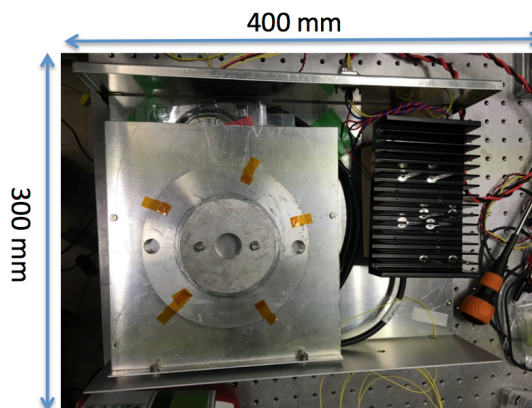


図 7:完成形