

# 813 nm ファイバ増幅器励起用 Yb ファイバレーザの開発

武者研究室 遠藤 駿

## 1. はじめに

次世代の時間標準の最有力候補として Sr(ストロンチウム)光格子時計が注目されている。光格子時計はこれまでの時間標準よりもはるかに周波数安定度が良い[1,2]。しかし、大きな欠点として可搬化が難しく、一部の光格子時計を用いた応用を困難にしている。可搬化が難しい理由の1つとしては、Sr トラップ用光源に用いられている Ti:Sapphire(チタンサファイア)レーザは、大型かつアライメントが必要なためである。そのため、我々は Ti:Sapphire laser の代わりとなる新たなトラップ光源の開発を行ってきた。トラップ光源には、波長 813 nm、狭線幅、出力 1W 以上などが求められている。この要求値を満たすため線幅が細い ECLD(External Cavity Laser Diode)の出力を Tm<sup>3+</sup>:ZBLAN( ツ リ ウ ム 添 加 ZrF<sub>4</sub>/BaF<sub>2</sub>/LaF<sub>3</sub>/AlF<sub>3</sub>/NaF)ファイバ増幅器を用いたプリアンプとメインアンプの2段で増幅する光ファイバ MOPA (Master Oscillator Power Amplifier)システムを開発している。波長 813 nm、狭線幅、出力 1W 以上を達成することができたが、さらなる安定動作、高出力化のためにプリアンプをさらに一段増やした系の開発を進めている[3]。そこで本研究では2段目のプリアンプの励起光源である(イッテルビウム)ファイバレーザを開発し、その性能の評価を行う。また、開発した Yb 添加ファイバレーザを用いたプリアンプの評価も行う。

## 2. Tm<sup>3+</sup>:ZBLAN ファイバ

Tm は希土類で唯一 810 nm 帯に蛍光を持ち、Tm を添加したファイバを用いることでファイバベースの小型でアライメント不要の光源を開発することが可能である。図1に Tm のエネルギー準位図を示す。Tm を 810 nm 帯で蛍光させるには、790 nm で励起する方法と、1064 nm で励起する方法の2通りが存在する。Tm は吸収断面積が小さいことから高輝度励起する必要が存在するため、高輝度な光源が存在する 1064 nm の励起方法を採用した。励起光源には多くがファイバで構成されているため小型化が可能で、高輝度な Yb ファイバレーザを選択した。

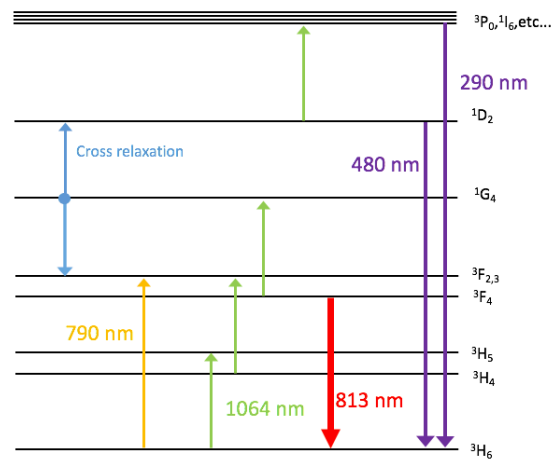


図1 Tm のエネルギー準位図

しかし、一般的なファイバの母材であるシリカガラスであると 810 nm 帯の上準位寿命が約 14 μs と短く十分増幅できない[4]。そこで、母材をシリカから ZBLAN にすることにより約 1300 μs と蛍光に十分な上準位寿命を得ることができる。

ZBLAN ファイバは、ZrF<sub>4</sub>-BaF<sub>2</sub>-LaF<sub>3</sub>-

AlF<sub>3</sub>-NaF で構成されており、フォノンエネルギーが小さいため非発光遷移の影響が小さく、発光準位でシリカファイバよりも長い上準位寿命を得ることが可能である。

### 3. Yb ファイバレーザ

Tm<sup>3+</sup>:ZBLAN ファイバ増幅器の励起光源として Yb ファイバレーザの開発を行なった。Yb ファイバレーザの要求値として、出力 4 W 以上、発振波長 1064 nm、小型であることが挙げられる。

図 2 に作成した Yb ファイバレーザの構成を示す。

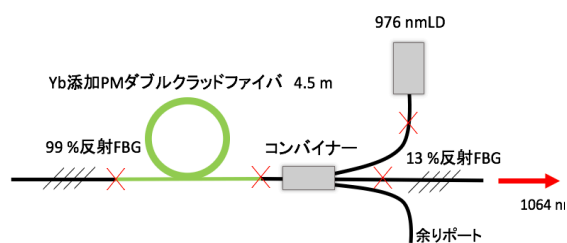


図 2 Yb ファイバレーザの構成

利得ファイバには Yb 添加 PM ダブルクラッドファイバを用いた。しかし、Yb は 1064 nm に吸収を持つので、利得ファイバの長さを過度に長くすると信号光が吸収されてしまい出力が小さくなってしまうため、利得長は適切でなくてはならない。そこで、シミュレーションを用いて利得ファイバ長を 4.5 m に決定した。Yb ファイバレーザの出力と発振スペクトルを図 3、4 に示す。

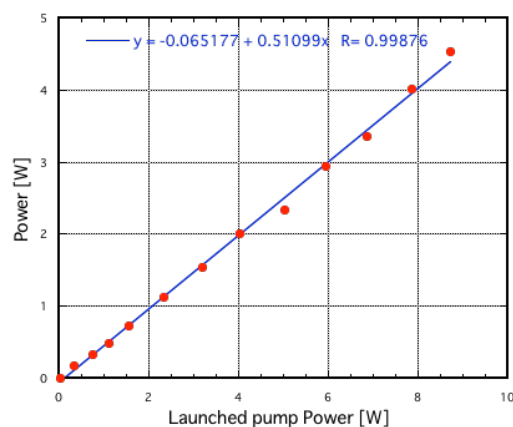


図 3 Yb ファイバレーザの出力特性

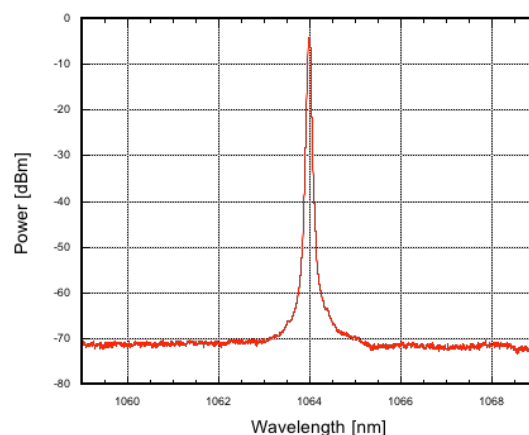


図 4 Yb ファイバレーザの出力特性

開発した Yb ファイバレーザの発振閾値は約 130 mW、スロープ効率は 51.1%、最大出力は 4.53 W となった。また、作成後は 200 mm×300 mm の大きさとなった。スロープ効率は Yb ファイバレーザとして低い値となってしまった。このような結果になってしまった原因として、利得長が短か過ぎてしまったのと、巻き形が小さすぎてしまったことが挙げられる。シミュレーションでは利得ファイバの最適長は 7 m ほどであったが、利得が飽和状態に近づいており、要求値を満たす利得が得られることが予想されたため、4.5 m で用いた。また、巻き形に関してはマルチモードファイバに

において半径 2 cm ほどに巻いており、高次のモードの伝搬条件が解けて大きな損失となっていると考える。これらの他にも微小ながらファイバ内を伝搬する際の損失、融着点での損失も考えられる。しかし、小型が求められており、Yb ファイバレーザの要求値を満たしていたことから巻き径の変更を行わなかった。

#### 4. プリアンプ

作成した Yb ファイバレーザを既存のプリアンプの励起光源と交換し、正常に動作するのかテストを行なった。プリアンプの構成を図 5 に示す。

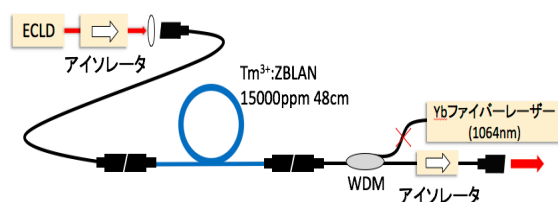


図 5 プリアンプの構成

プリアンプの利得ファイバには Tm<sup>3+</sup>:ZBLAN ファイバを用いている。利得長と添加濃度は我々のグループで行なってきた過去の実験の経験から決定している。また、利得ファイバ端面は APC (Angled Physical Contact) 研磨であり、利得ファイバ端面での反射光が外部に逃げる構造となっている。これにより端面で信号光が反射してしまうことで共振器構造を組み信号光と異なる波長で発振してしまう現象である寄生発振を抑えている。

プリアンプの出力特性と発振スペクトル

を図 6、7 に示す。

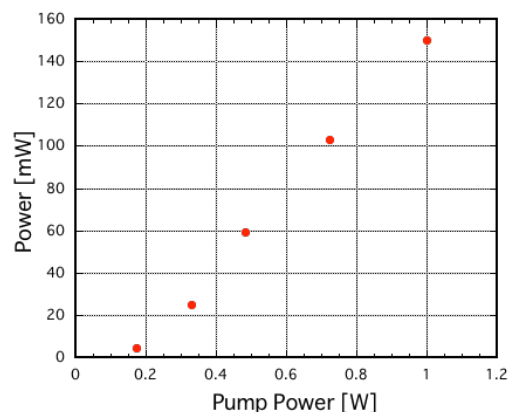


図 6 プリアンプの出力特性

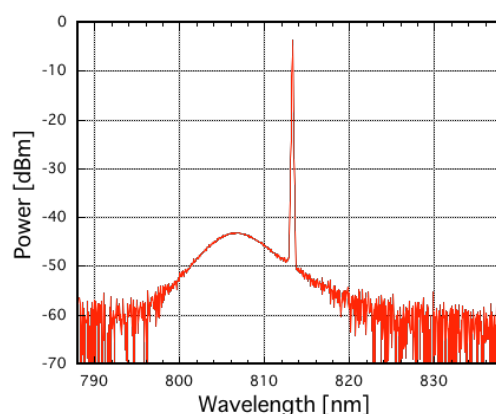


図 7 プリアンプのスペクトル

励起 1 W で出力が 150 mW となり、発振波長は 813.30 nm で信号雑音比 40 dB となった。発振波長のずれは ECLD の温度を調整することで対応である。しかし、出力と信号雑音比は以前のプリアンプが 200 mW、50dB 以上であったことから悪い結果となってしまった。また、光増幅器は発振閾値を持たないはずであるが、出力特性から発振閾値を持ってしまっている。これらは、信号入力側の Tm<sup>3+</sup>:ZBLAN ファイバ端面の損傷とみられる。使用した Tm<sup>3+</sup>:ZBLAN ファイバは、湿度が適切な状態で保存されていなかったため端面が湿気

によって劣化してしまったと考えられる。

次にプリアンプの相対強度雑音を図 8 に示す。なお、雑音源特定のため励起光源と ECLD の相対強度雑音も図 8 に示した。

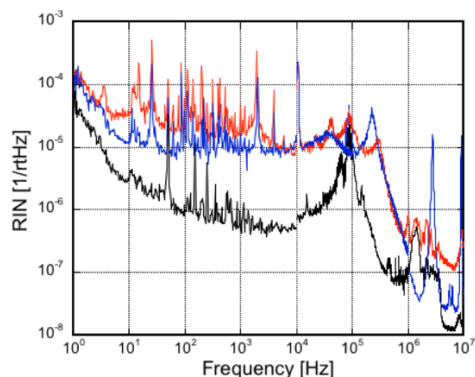


図 8 プリアンプ(赤)、励起光源(青)、ECLD(黒)の相対強度雑音

低周波において Yb ファイバレーザと同様の雑音特性となっているのがわかる。これは低周波において Yb ファイバレーザへの励起光源である LD の励起に用いた電流源の雑音がかなり支配的なためである。また、200 kHz 付近に Yb ファイバレーザの緩和発振由来と思われる雑音特性が見られる。一方、1 MHz 付近においては種光源の ECLD の雑音特性が見られる。また、10 MHz 付近の雑音は励起光源、種光源由来のものではなくプリアンプ由来のことがわかる。これは自然放出光による雑音と考えられる。

## 5. まとめと今後の予定

Sr 光格子時計のトラップ光源用の  $\text{Tm}^{3+}$ :ZBLAN ファイバを用いた光増幅器を励起する波長 1064 nm の Yb ファイバレーザの開発を行った。Yb ファイバレーザ

のスロープ効率 は 51% で最大出力 4.5 W となり、1064 nm で発振することを確認できた。この結果はプリアンプ用の励起光源の要求値である出力 4 W で発振波長 1064 nm の条件を達成している。

作成した Yb ファイバレーザを用いてプリアンプを励起し、出力と相対強度雑音を測定した。出力、信号雑音比共に以前のプリアンプよりも性能が悪い結果となった。これはファイバ端面の損傷によるものであり、ファイバを交換することで対応が可能である。相対強度雑音は、低周波領域で励起光源の雑音が大きく、高周波領域において種光源やプリアンプの雑音が見られた。

## 6. 参考文献

- [1] M. Takamoto, F. Hong, R. Higashi and H. Katori “An optical lattice clock” *Nature* **435** 321 (2005)
- [2] B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams, S. L. Campbell, M. Bishof, X. Zhang, W. Zhang, S. L. Bromley and J. Ye “An optical lattice clock with accuracy and stability at the  $10^{-18}$  level” *Nature* **506** 71 (2014)
- [3] K. Kohno, Y. Takeuchi, T. Kitamura, K. Nakagawa, K. Ueda and M. Musha “1 W single-frequency Tm-doped ZBLAN fiber MOPA around 810 nm” *Opt. Letters* **39** 2191 (2014)
- [4] P. Peterka, I. Kasik, A. Dhar, B. Dussardier, W. Blanc “Theoretical modeling of fiber laser at 810 nm based on thulium-doped silica fibers with enhanced  $^3\text{H}_4$  level lifetime” *Opt. Express* **19** 2773 (2011)