

# ファイバラマンレーザーを用いた 2 波長励起システムによる 810 nm 帯 Tm:ZBLAN ファイバ MOPA の高効率化

武者研究室 久保 貴志

## 1. はじめに

現在、周波数安定度  $10^{-18}$  を達成した Sr 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[1]。光格子時計の運用には 3 種のレーザーが必要であり、光格子生成に用いられるトラップ光源を小型かつ長期安定動作可能にすることで、次世代の可搬型光格子時計として、地球物理や衛星搭載等の応用が考えられる。トラップ光源には、波長 813.42 nm、線幅 1 MHz 以下、出力 1 W 以上の性能が求められる。我々は出力 1.5 W 以上を安定に一日以上動作させることを目標として、光ファイバを用いた MOPA(Master Oscillator Power Amplifier)の光源開発を行っている。主レーザーは出力約 30 mW の狭線幅フィルター型外部共振器型半導体レーザー(ECLD)を自作し、その出力を Tm:ZBLAN ファイバ増幅器により周波数安定度を保ったまま増幅を行う。Tm<sup>3+</sup>は 810 nm 帯に蛍光を持つ唯一の希土類イオンであり、母材にシリカではなくフッ化物である ZBLAN を選択することで、増幅に用いる上準位の寿命を十分長くできる。Tm<sup>3+</sup>の 810 nm 帯における強い再吸収に打ち勝つ高輝度励起を行うために、波長 1064 nm の Yb:FL(ファイバレーザー)を使用した 2 段階のコア励起を選択した。これまでに自由空間からの後方励起の構成において光学的要求を全て満たした出力 1.68 W の光源を作製した。しかし、6 時間程度で出力が低下してしまい長期運転を達成することができなかった。原因は、高輝度の励起光による ZBLAN ファイバ端面の

熱変形によるアライメントのズレであり、その対策を行う必要がある。これを踏まえて私は、高効率化による熱負荷低減により長期安定動作達成を目指した。

## 2. 最適 2 波長励起

### 2.1 最適 2 波長励起について

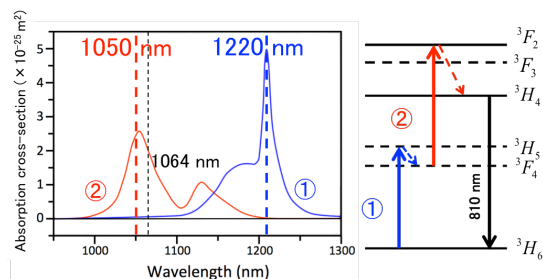


図 1: Tm:ZBLAN の吸収断面積(左)[2]、準位図(右)

図 1 に波長 810 nm 帯の増幅に用いている Tm:ZBLAN のエネルギー準位及びその吸収断面積を示す。2 段階励起の各過程において波長 1064 nm と比べて大きな吸収断面積を持つ波長が存在することが分かる。よって基底準位から中間準位への遷移(①)及び中間準位から上準位への遷移(②)に対してそれぞれ最適な波長 1220 nm 及び 1050 nm の励起光源を作成し、2 波長 2 段階励起を行うことによる高効率化を目指した。特に基底準位から中間準位の遷移(①)では波長 1064 nm の吸収断面積と吸収中心の 1220 nm では差が大きく、簡単なシミュレーションにより 1064 nm を用いた単一波長励起と比較し、50%以上の変換効率向上が見込まれた。

波長 1050 nm のレーザー光源については、波長 1  $\mu$ m 帯に高い利得を持ち、単純な準位

構造から他の希土類イオンと比較し 1 桁以上大きな出力を達成可能な Yb:FL を用いる。

波長 1220 nm のレーザーについては、利得帯域を持つ希土類イオンが存在しないため、誘導ラマン散乱により利得を得ることができるファイバラマンレーザー(FRL)により実現する。好都合であることに、ラマン媒質としてラマン周波数シフト  $1330\text{ cm}^{-1}$  にピークを持つリン添加ファイバを用いることで、波長 1050 nm(Yb:FL)を励起光として波長 1220 nm の 1 次ストークス光を得ることができる。この構成は、一般的な光ファイバであるゲルマニウム添加ファイバを用いた場合に比べ低次ストークス光で達成可能なため、変換効率が良いという利点がある。

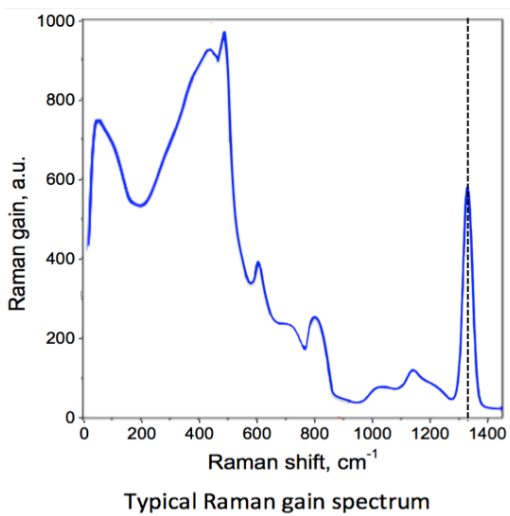


図 2: リン添加ファイバのラマンスペクトル[3]

シミュレーションの変換効率から、波長 1050 nm 及び 1220 nm の目標値をそれぞれ出力 4.5 W 及び 3 W とした。

## 2.2 Yb:FL の作製

まずは、Tm:ZBLAN 増幅器励起用及び FRL 励起用に 2 台の Yb:FL を作製した。学部時代の研究において出力の変動が 0.5% 以

内の安定な波長 1064 nm 発振の Yb:FL を作製していたので、その経験を元に作製を行った。

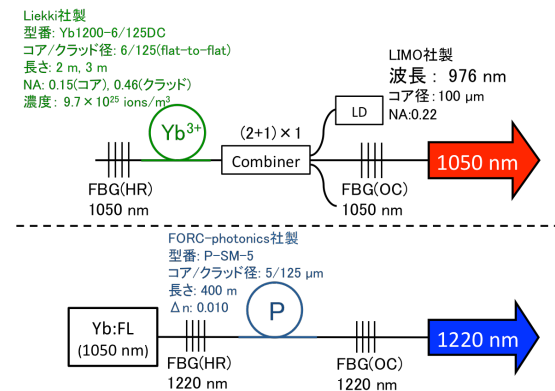


図 3: レーザー構成図(上: Yb:FL、下: FRL)

作成した Yb:FL の構成を図 3 に示す。励起源として波長 976 nm 発振の高輝度 LD(LIMO 社 LIMO035-F100-DL980-EX 1720 及び BWT 社 976AA2RN-18.00W)を用い、ポンプコンバイナ(LIGHTCOMM 社 MPC-(2+1)x1-F-975/15-1064-110/001-465-C4-0.8M)により励起光を Yb<sup>3+</sup>の添加されたダブルクラッドファイバの第 1 クラッドに導入する構成である。高出力レーザーによく見られる OC の線幅を HR より細くする構成を選択し、FBG(OC)に線幅 0.1 nm、FBG(HR)に線幅 1 nm を決定した。利得長、OC の反射率は作成したファイバレーザーシミュレーターのシミュレーション結果を元に選択した。利得ファイバは八角形クラッドを持つ LIEKKI 社 Yb1200-6/125 と PANDA ファイバである LIEKKI 社 Yb1200-6/125PM をそれぞれ 2 m 及び 3 m 用いた。また、コンバイナと利得ファイバは双方ともダブルクラッドファイバであり、その融着点は屈折率の低い物質で覆わなければホコリ等の付着が原因で出力が低下する。チューブで覆い中空にする方法も存在するが、今回はファイバリコータ(フジクラ

社 FSR-2)を用いて低屈折率リコート剤 (Luvantix 社 PC-373)でリコートを行った。また、利得ファイバと FBG(HR)の融着点においては、インデックスマッチングジェル (Cargille Labs 社 0607)を用いて残留励起光を逃している。本構成ではコンバイナによって励起光が制限され、最大出力がそれぞれ 5.47 W(励起パワー13.6 W)と 8.09 W(励起パワー14.0 W)を達成し、それぞれ Tm:ZBLAN ファイバ増幅器と FRLの励起用とした。

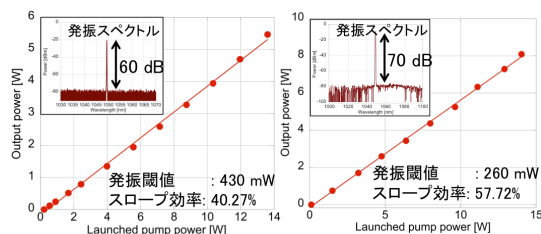


図 4: Yb:FL の P-I 特性

長さの異なる同ファイバを用いた実験結果より、15 W 動作時に複数の縦モードが FSR 間隔で発振している LIMO 社製の LD と比較して BWT 社製 LD は温度変化に対しても周波数が安定であり、より高効率な励起が行われていると考えられる。

### 2.3 FRL の開発

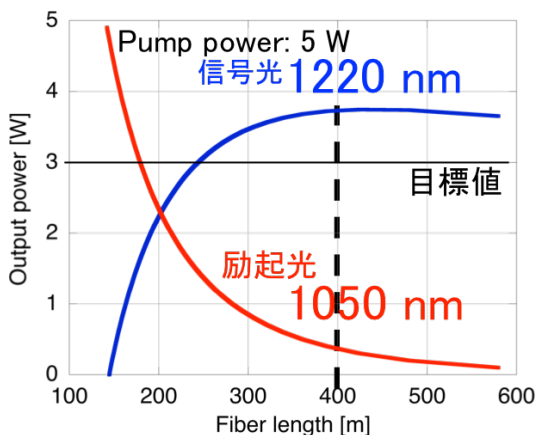


図 5: ラマンファイバ長の決定(シミュレーション)

作製した FRL の構成を図 3 に示す。励起源として波長 1050 nm 発振の自作の Yb:FL を融着でつなぎ合わせてコア伝搬する励起光を導入する構成である。1 次ストークス光のみを線幅 1 nm の FBG(HR)と線幅 0.1 nm の FBG(OC)で共振させる構成で、残留励起光も同様に射出される。ラマンファイバ長、OC の反射率は先行研究[4]を参考に作成した FRL の出力特性シミュレーションを行い、その結果を元にリン添加ファイバ (FORC-Photonics 社 P-SM-5)を 400 m と決定した。本構成において、出力 4.03 W(励起パワー8.09 W)を達成した。

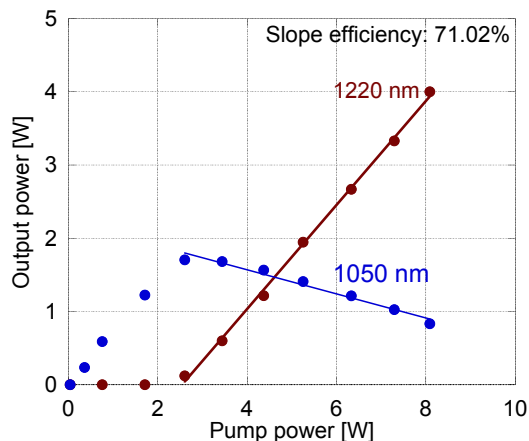


図 6: FRL の出力特性

シミュレーション結果と実験結果の乖離が存在しており、これにはいくつかの要因が考えられる。シミュレーションが励起光、信号光の線形吸収を近似していることも要因ではあるが、大きな要因としてリン添加ファイバとシリカファイバの融着損失を考慮していないこと、HR 側の透過スペクトルの短波長側に非線形効果によるサイドバンドが存在することからも推測される、非線形効果による励起光及び信号光の影響を考慮できていないことが挙げられる。

実際に高出力化する方法として、融着損失に対してはリン添加ファイバに直接 FBG

を書き込む手法を用いることによって共振器内損失が低減され高効率化することが可能である。非線形効果に対しては、ラマンファイバ長を短く最適化することで高効率化が行えると考えられる。

### 3. 最適 2 波長励起による高効率化

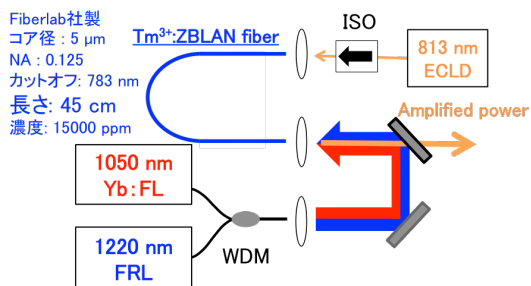


図 7: 2 波長励起実験系

まず、長さ 45 cm、添加濃度 15000 ppm のやや短い長さの Tm:ZBLAN ファイバ (Fiberlab 社製) 増幅器を用いて最適 2 波長による増幅特性の高効率化の実証を行った。WDM を用いて波長 1050 nm と 1220 nm を合波して、以前とほぼ同様の自由空間からの後方励起の構成をとった。比較の為に単一波長励起を行い、結果として波長 1050 nm では波長 1064 nm の増幅特性とほぼ同等、波長 1220 nm のでは波長 1064 nm と比較し大幅に低い変換効率が確認された。2 波長励起実験においては波長 1050 nm 及び 1220 nm のパワー比率を変化させ、最適条件を探しながら測定を行った。結果として、波長 1050 nm を 4 W、波長 1220 nm を 1 W の合計 5 W 励起時において出力 252 mW を達成した。これは、1064 nm の同励起パワーにおける変換効率と比較し 50% の向上が見られたと言える。また、1064 nm では見られた飽和の様な効果の抑制が確認された。

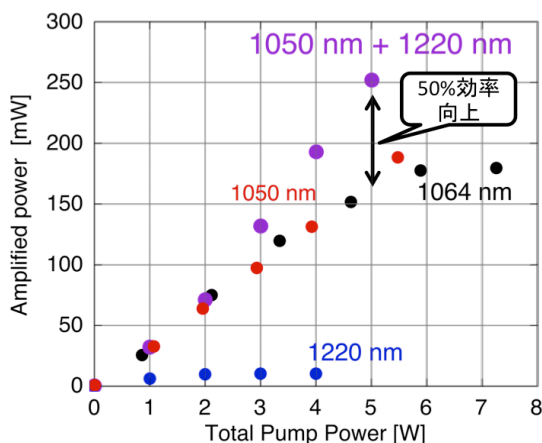


図 8: Tm:ZBLAN ファイバ増幅器の増幅特性

### 4. 低添加濃度 Tm:ZBLAN 増幅器

Tm:ZBLAN ファイバにおいて我々が用いている様な 2 段階の励起方法を用いた青色発光等の先行研究において盛んに議論されているのがフォトダークニングという現象である [5]。これは、紫外光によって ZBLAN ファイバがイオン化されてしまい、それに伴い主に可視光に損失を与えるカラーセンターが生成される現象である。

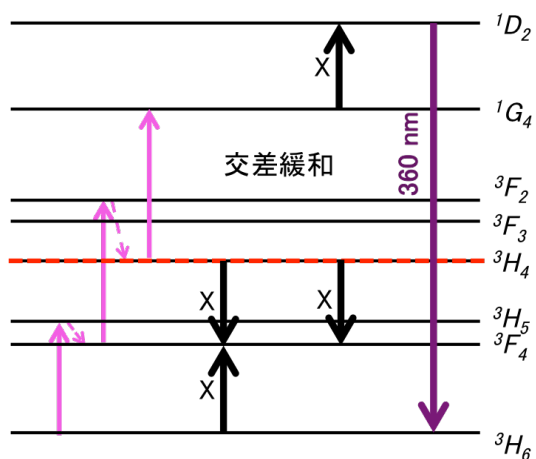


図 9: Tm:ZBLAN の公差緩和と紫外発光

Tm:ZBLAN においては、用いたい  $^3H_4$  の準位から、波長 1  $\mu\text{m}$  帯の光でもう 1 段階励起した後に、イオン間相互作用の一種である公差緩和(クロスリラクゼーション)によって  $^1D_2$  まで励起されたイオンが基底状

態に落ちることで 360 nm の紫外発光を得る。よって、今回は  $Tm^{3+}$  を低濃度に添加した  $Tm:ZBLAN$  ファイバ増幅器を用いることで、公差緩和の発生を抑制、それに伴う紫外発光及びフォトダークニングの抑制を試みた。今回は、これまでの研究で用いてきた 15000 ppm の 1/3 の添加濃度である 5000 ppm のファイバを用いて増幅実験を行った。

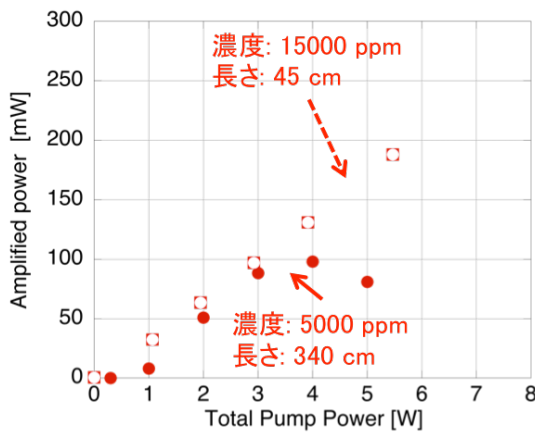


図 10: 増幅特性の添加濃度による差

図 7 と同様の構成で長さ 340 cm、添加濃度 5000 ppm を用いて行った増幅実験において、波長 1050 nm のみを用いた励起の結果を図 10 に示す。添加濃度 15000 ppm が励起光に対して線形に増幅されているのに対して、添加濃度 5000 ppm においては比較的早い段階で飽和のような頭打ちが見えてくる。これは、添加濃度 15000 ppm においては、公差緩和が多く発生しており、 ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$  と  ${}^3H_5 \rightarrow {}^3F_4$  における公差緩和が、波長 1050 nm の吸収断面積が比較的小さい基底準位から中間準位への遷移(①)において、アシスト的な効果を受けるからであると考えられる。添加濃度 5000 ppm においては、公差緩和が抑制されアシストが減ったことで、図 1 に示した吸収断面積のように基底準位から中間準位への遷移(①)が行

い辛く、またフォトダークニングの損失によって、出力が減少していると考えられる。

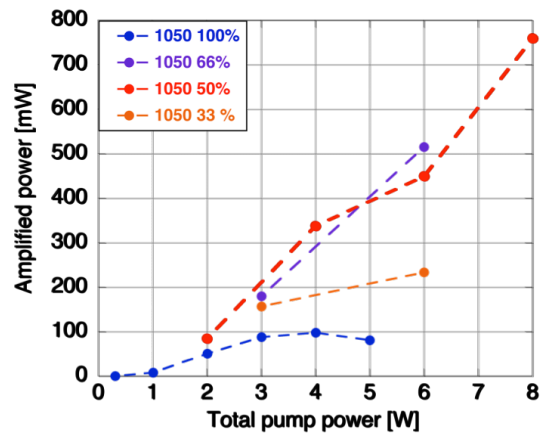


図 11: 増幅特性の励起波長比率に対する変化

励起波長である、波長 1050 nm 及び 1220 nm の比率ごとの増幅特性を図 11 に示した。最適比率が波長 1050 nm が全体の 50–66% であると分かり。添加濃度 15000 ppm の際には波長 1050 nm が 80%程度で最適であったため大きく比率が異なっていることが分かる。

ファイバ増幅器においては、固体レーザーの利得媒質の様に光線方向に利得等を一樣に近似することができず、その長い相互作用長から分布を考慮する必要がある。 $Tm:ZBLAN$  における波長 1050 nm 及び 1220 nm の吸収が異なることに加えて、励起光と信号光はお互いに関数であり、長手方向における励起光強度や信号及び利得の分布が存在する。よって、励起強度及び信号光強度、利得長などで最適比率が多少変化すると考えられるが、公差緩和を抑制できている低添加濃度  $Tm:ZBLAN$  の最適比率が比較的 50%に近いことは今回の公差緩和による考察に矛盾しない。



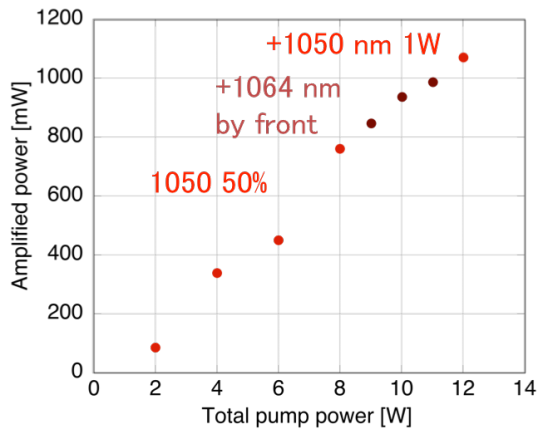


図 12: 出力 1 W 達成時の増幅特性

また、前方励起で波長 1064 nm の励起光によるアシストを行い、1050 nm: 5W, 1064 nm: 3 W, 1220 nm: 4 W の計 12 W 励起時において、1.07 W の出力を達成した。

## 5. まとめ

Tm:ZBLAN ファイバ MOPA の長期安定動作達成のため、従来の波長 1064 nm の 2 段階励起に比べて吸収断面積の大きい波長 1050 nm 及び 1220 nm の 2 波長を用いた 2 段階励起を行い、効率向上を目指した。

波長 1050 nm の Yb:FL を 2 台作成し、出力 5.467 W (励起パワー 13.6 W) を Tm:ZBLAN ファイバ増幅器励起用、8.09 W (励起パワー 14.0 W) を波長 1220 nm の FRL 励起用とした。その後、FRL を作成し最高出力は 4.03 W (励起パワー 8.09 W) を達成し、波長 1050 nm 及び 1220 nm それぞれの目標出力 4.5 W 及び 3 W を達成した。

Tm:ZBLAN 増幅器の高効率化実証を行い長さ 45 cm、濃度 15000 ppm で、波長 1064 nm の 1 波長励起と比較し 50% の変換効率向上が得られた。また、添加濃度の異なる Tm:ZBLAN 増幅特性を用いた比較を行い、公差緩和やフォトダークニングの考察、励起 2 波長の出力比率による 813 nm の出力効率依存性を元に最適出力の考察を行った。

展望として、Tm:ZBLAN における青色の発光や波長 514 nm の光を用いたフォトブリーチングの検証、最適比率による増幅において 813 nm の出力 1.5 W の長時間動作達成、実験結果とシミュレーション結果を元に MOPA と FRL 励起に共通の Yb:FL を用いることで構成の小型堅牢化を行うことが挙げられる。

## 参考文献

- [1] Ushijima, Ichiro, *et al.* "Cryogenic optical lattice clocks." *Nature Photonics* **9** (2015): 185-189.
- [2] Androz, Guillaume. "Etude d'un laser à fibre de ZBLAN dopée au thulium émettant dans le proche infrarouge." Diss. Université Laval, (2010).
- [3] [http://forc-photonics.ru/data/files/P-SM-5\(1\).pdf](http://forc-photonics.ru/data/files/P-SM-5(1).pdf)
- [4] AuYeung, John, and Amnon Yariv. "Theory of cw Raman oscillation in optical fibers." *JOSA* **69.6** (1979): 803-807.
- [5] Faucher, Dominic, and Ral Vallee. "Real-time photobleaching and stable operation at 204 mW of a Tm: ZBLAN blue fiber laser." *IEEE Photonics Technology Letters* **19.2** (2007): 112-114.

## 発表実績

- [1] 久保貴志、梶川詠司、竹内裕一、河野健太、武者満、"誘導ラマン散乱を用いた 2 波長励起システムによる 810 nm 帯 Tm:ZBLAN ファイバ MOPA の高効率化"、レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会、2018 年 1 月 25 日
- [2] T.Kubo, E.Kajikawa, Y.Takeuchi, M.Musha, "New trapping light source for Sr OLC", ERATO International Workshop, Tokyo, January 25-26, 2016