

ZBLAN ファイバーを用いた Sr 光格子時計用 813 nm 光源の開発

武者研究室
修士 2 年 竹内 裕一

1. はじめに

本研究では Sr 光格子時計[1]の光格子生成用の光源（トラップ光源）、光格子を用いて原子の移送用の光源開発をしている。光格子時計とは 2001 年に東京大学の香取秀俊准教授(当時)により提案され、2005 年に実現された原子時計である[1]。次世代の時間・周波数標準として盛んに研究が進められており、現在光格子時計は Yb 光格子時計、Sr 光格子時計で周波数安定度が 18 桁を達成している[2-3]。現在の時間・周波数標準であるセシウム原子時計のこれまでの進歩と比較しても非常に早いペースで研究が進んでおり、更なる光格子時計の性能向上にはトラップ光源の改善が急務である(図 1)。

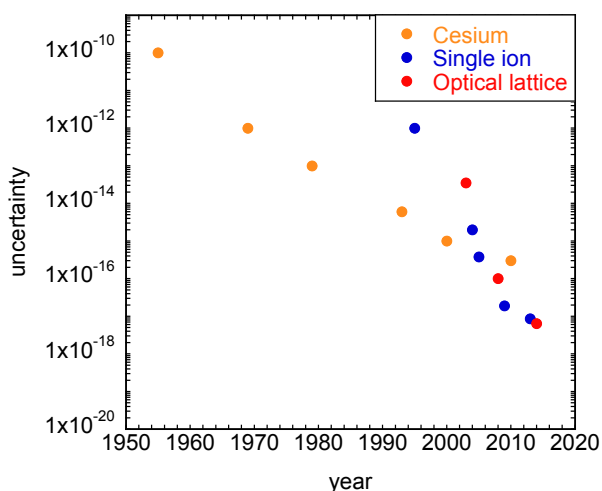


図 1 原子時計の安定度の進歩

また、今後は光格子時計の可搬化や小型化が重要となる。Sr 光格子時計の光源の重要な要求にマジック波長[1]がある。マジック波長とはマジック波長の光格子に原子をトラップすることで時計遷移のシュタルクシフトを相殺する特別な波長である。特に Sr 光格子時計のマジック波長

は近赤外の 813 nm 付近となる。そのため、Sr 光格子時計用のトラップ光源には 800 nm 帯で発振可能な固体の Ti:Sapphire レーザー、半導体 MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) が用いられている。しかし、現在使用されている光源にはいくつかの問題点がある。特に Ti:Sapphire レーザーでは光学系の大型化と特定のマジック波長への長期同調が困難であること。また半導体 MOPA ではビーム品質や出力の制限により実効的な出力が低いこと、ASE の問題が挙げられる。そこで、我々は現状の光源の問題点を克服し、高出力、小型、長期安定動作するため、ファイバーベース光源を提案し開発を行っている。ファイバーは小型化、高利得、空冷での冷却が可能である。またマスターレーザーを高安定、堅牢な半導体レーザーとするファイバーMOPA の構成にする事で問題の解決が可能である。本研究で開発する Sr 光格子時計の具体的な要求値は表 1 に示す。

表 1 トラップ光源への要求値

要求項目	要求値
Wavelength	813.42 nm
Linewidth	< 1 MHz
Power	> 1 W

これらの要求を満たすために ECLD (External cavity laser diode) を主発振器とし、Tm³⁺添加 ZBLAN (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF) ファイバーを増幅器としてファイバーMOPA の開発を行っている。

2. ZBLAN ファイバーMOPA の開発

2.1. ECLD の開発

ファイバーMOPA に使用するマスターレーザーには堅牢性、波長可変、単一発振が可能な外部共振器型半導体レーザー (ECLD: External cavity laser diode) を用いた。これまでの本研究では ECLD には回折格子を用いた Littrow 型を用いてきた。しかし、回折格子の 1 次光を共振させ、回折格子の角度を調整する機構ではファイバー結合の光軸が安定しない問題点があった。そこで共振器構造からフィルターで切り出すフィルター型を用いることにより、光軸の安定や堅牢性、長期動作への信頼性の向上が可能であると考えた。フィルター型 ECLD には Cat's eye 構造を用いており、波長掃引の際フィルターの角度の変化による光路長の変化による共振が崩れることを防いでいる。開発したフィルター型 ECLD は単一縦モード発振、マジック波長へ同調が得られた。

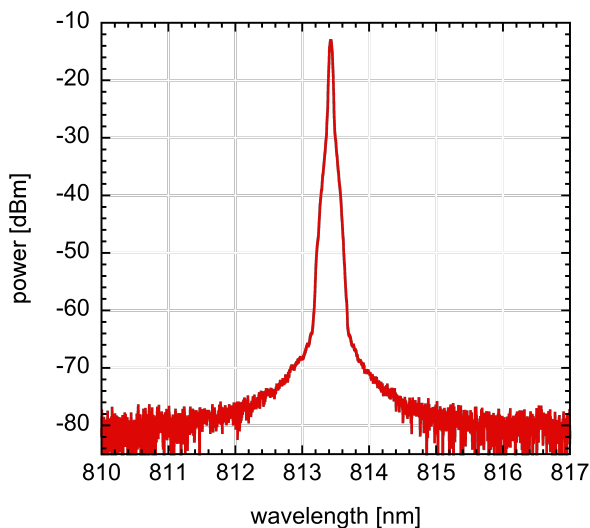


図 2 ECLD の発振時のスペクトル

得られたスペクトル(図 2)から 60 dB 程度の SNR(Signal noise to ratio)はがあり、今後の増幅実験により理論上 60 dB 程度の SNR が得られることが期待出来る。フィルター型 ECLD の線幅は自己遅延ヘテロダイン法により 1 km の遅延ファイバーによる分解能の 200 kHz 以下であることが分かった。そのため、2 台のフィルター型 ECLD を作成し、2 台のビート周波数により線幅の測定を行った。その結果、従来型(回折格子型)よりも狭い 133 kHz であることが確認された(図 3)。

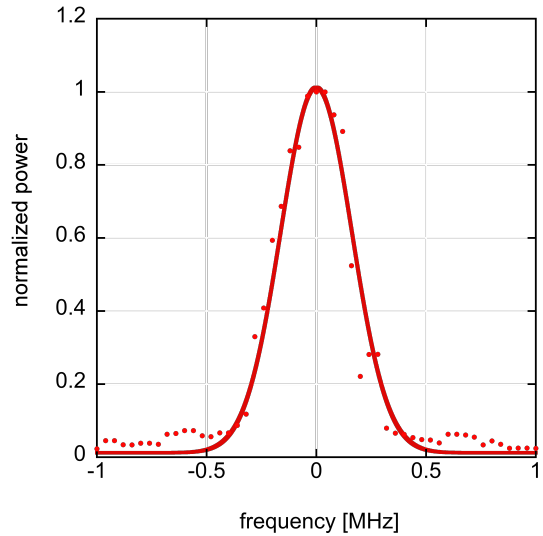


図 3 2 台のビート周波数により得られた線幅

2.2. Tm³⁺添加 ZBLAN ファイバー

光格子時計用のファイバーMOPA のためのファイバー増幅器の開発を行った。マジック波長のファイバー増幅器を開発するため、810 nm に蛍光を唯一持つ Tm³⁺添加の希土類ファイバーを用いた。しかし、通常の SiO₂ ファイバーでは上準位寿命が 13 μs 程度と非常に短いため増幅は困難とされており、研究報告も無い。そのため母材に ZBLAN ファイバーを用いた。ZBLAN ファイバーは SiO₂ と比較してフォノンエネルギーが低いことが知られているため 810 nm 帯の上準位の長寿命化が期待出来る。実際に ZBLAN を母材に用いることで SiO₂ での上準位寿命が約 100 倍伸びることからファイバーで困難とされてきた 810 nm 帯の増幅が見込める。しかし、ZBLAN ファイバーの持つ脆弱性から通常のシリカファイバーと同様の光学部品や取り扱い方法を用いることが困難であるため、端面を劈開する方法の条件出しを行った。ZBLAN ファイバーに用いられている特殊なコーティングには湯煎したアセトンを用いることが最適であることがわかった。ファイバーの端面を出す劈開方法については、Photon kinetics 社製の超音波クレーパーを 70 gf 程度のテンションの条件で行うことにより非常に綺麗な端面が得られることがわかった。これらにより、ZBLAN ファイバーを研究室で取り扱いが可能になった。

2.3. 1064 nm 励起 ZBLAN ファイバー増幅器

Tm^{3+} のエネルギー準位は以下ようになっており、には様々な励起方法が考えられる(図 4)。

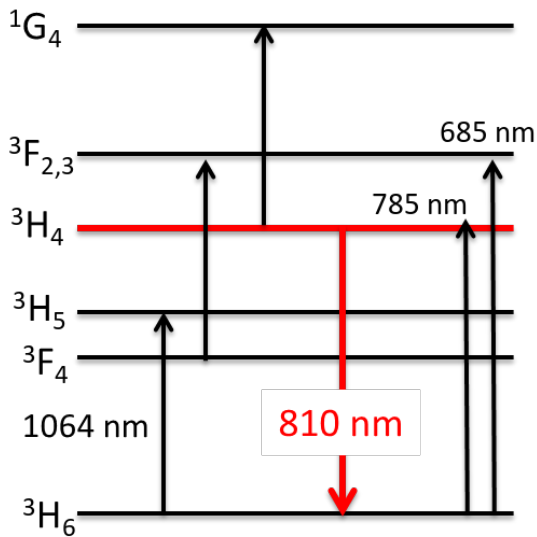


図 2 810 nm 帯付近の Tm のエネルギー準位と励起方法

通常では 685 nm や 785 nm の励起方法が用いられるが、685 nm では高い出力をもつ LD が無いこと、また 785 nm では高い出力の LD は入手出来るものの輝度が低いために再吸収の影響が顕著に現れる。785 nm 励起に関しては LD を 6 台結合した励起光を用いてクラッド励起を行った。しかし、ZBLAN ファイバーが製造で長いファイバー長が得られないため、励起光の吸収されないことと再吸収により増幅が困難であった。そのため高輝度の励起光源として 775 nm、1064 nm の励起方法を提案し、実践してきた。775 nm は 1.5 μm の Er ファイバーレーザーの第二高調波を用いる方法により数 W を越える励起光源の発生を行った。しかし、775 nm 励起では 813 nm の増幅は確認出来たものの要求値を越えることは困難であること、光源の規模、安定性の面で Sr 光格子時計の光源として使用するには問題点があった。そこで、効率は落ちるものの Yb^{3+} 添加ファイバーレーザーの 1064 nm アップコンバージョン励起が最適であることが実験的にわか

った。

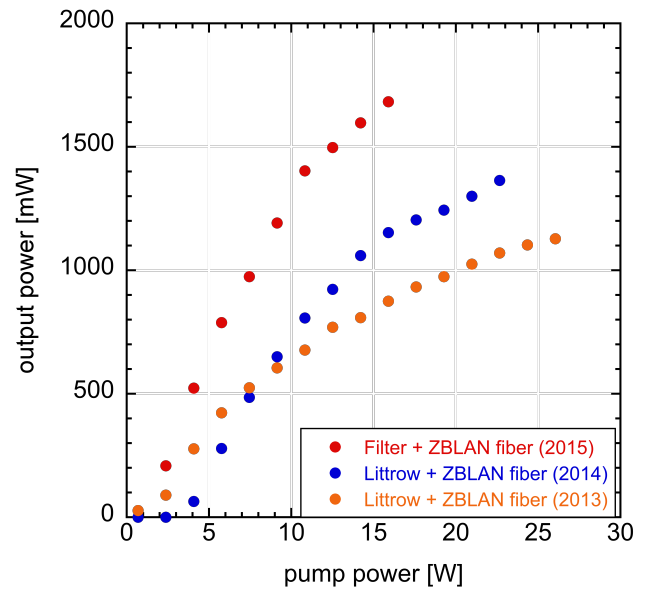


図 3 Tm 添加 ZBLAN ファイバー増幅器による増幅結果のこれまで 2013~2015 年の最適化の結果

これまで 1064 nm のアップコンバージョン励起による方法で 1.1 W の最大出力が得られていた。しかし、更なるファイバーの最適化により最大で 1.3 W の出力が得られた。マスターレーザーを Littrow 型からフィルター型に変更した結果、1.68 W を越える出力、20%程度のスロープ効率での増幅に成功した(図 5)。これは ECLD の結合効率が向上したことが高出力化に繋がったと考えている。この出力を達成したことにより、線幅(< 200 kHz)、波長(マジック波長)、出力(>1.68 W)を達成し、要求値を全て満たす光源の開発に成功した。通常では寄生発振により増幅後のスペクトルはマルチモード化していたが、端面角度を 5 度程度にクリーブを行うことで寄生発振の抑制に成功した。SNR は 40 dB 程度であり、高い SNR を達成することができた(図 6)。

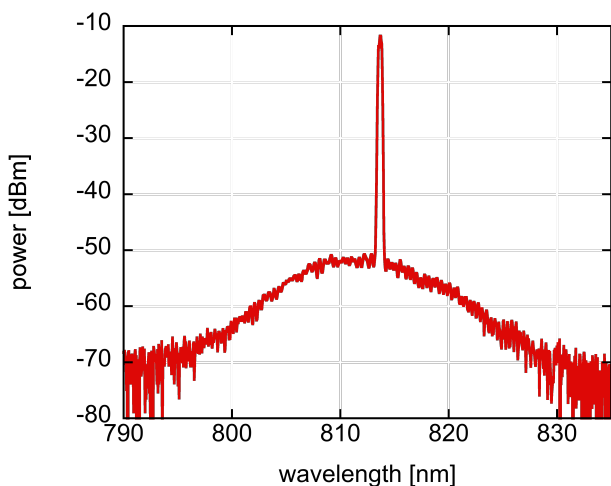


図 4 増幅時のスペクトル

得られたスペクトルは ASE (Amplified spontaneous emission) が多く発生している。この ASE は Sr 光格子時計には、影響があるが VBG (Volume Bragg grating) 等を用いることにより得られた ASE 程度であれば、抑制が可能であることが分かっている。

2.4. 自由空間系での長期動作評価

これまでの実験により、光学的な要求を満たす光源の開発に成功した。しかし、原子時計への応用には、要求値の他にも様々な要求がある。特に長期安定動作が重要であり、現状の自由空間系での長期動作の評価と改善を行った。実際にエポキシで ZBLAN ファイバーを固定した際の動作時間を測定すると 15 分程度の動作しか確認出来なかった。そこで、長期動作化を行うため固定方法の検討とファイバー端面の熱膨張によるミスアライメントの改善を行った。特に高い励起時のファイバーコア付近の熱膨張による影響が大きいことが分かった。そこで、ペルチェ素子によりファイバーを冷却することで励起光のコアへの結合効率低下を防いだ。固定方法については通常の SiO₂ ファイバーと同様の光学機器が使用出来ないこともあり、ヒートシンクの自重により物理的な固定を試みた。

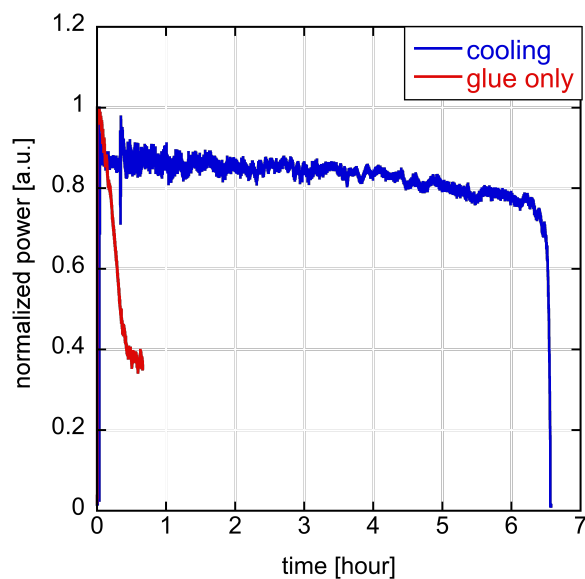


図 5 冷却の有無による長期動作評価結果

結果、自由空間光学系でのファイバーの冷却制御により、15 分程度から 6 時間を越える連続動作が確認された(図 7)。縦軸は最大値で規格化されたパワーを示しており、接着剤のみの場合から改善されたことがわかる。得られた結果から短期的なパワーゆらぎが存在していることが分かるが、これは励起光源である Yb³⁺ファイバーレーザーのパワーゆらぎと相関があることが確認されている。励起光源の出力の安定化により完全すると考えている。また、6 時間後に急に出力が低下している原因は励起光源の結合効率によるものだとわかった。再度アラインメントを行うことにより出力は回復した。この結果により、当初懸念されていた Tm³⁺のフォトダークニングによる出力低下も問題無く、810 nm 帯のファイバー増幅として使用出来ることがわかった。

2.5. SiO₂ と ZBLAN ファイバー融着実験

これまでの実験結果により 6 時間を越える動作が可能となった。しかし、Sr 光格子時計への導入では月単位での連続動作が求められる。そのため、自由空間系では時間単位での動作であり、日、週単位の動作の達成は困難であることが分かった。そのため、光学系をオールファイバー

系での構成が必要であることがわかり、 SiO_2 ファイバーと ZBLAN ファイバーの融着に取り組んだ。 SiO_2 ファイバーの融点は 1500°C 程度であり、ZBLAN ファイバーでは 300°C 程度となっている。従来材料が異なり、融点の異なる材料同士の融着は困難とされ、ほとんど報告例がない。しかし、今回フィラメントにより方法とアーク放電による方法を提案し、融着するための条件の最適化を行ってきた。フィラメントの方法には Vytran 社製の GPX-3400 を用いて、フィラメントにより温度分布を作り融着を行った。アーク放電には Fujikura 社製の FSM-40F を用いた。アーク放電を ZBLAN ファイバーに行うとその高音により ZBLAN ファイバーは燃えてしまう。そこでアーク放電する位置(アークポイント)をシフトすることにより、 SiO_2 ファイバー側のみをアーク放電し、 SiO_2 ファイバー端面を ZBLAN ファイバーの融点付近の温度として融着を行った。この融着には片方のみを溶かし接続することから準融着としている。実際には両者ともに6パラメータを越えるパラメータに対して条件出しを行った。特に重要なパラメータとしてクリーブ時の ZBLAN ファイバーと SiO_2 ファイバーの角度が重要であることが分かった。両ファイバー共に 1° を下回る角度が必要である。そのため実際に ZBLAN ファイバーのクリーブ方法も最適化を行い、160 回程度の試行の結果角度の統計を取ることが出来た。

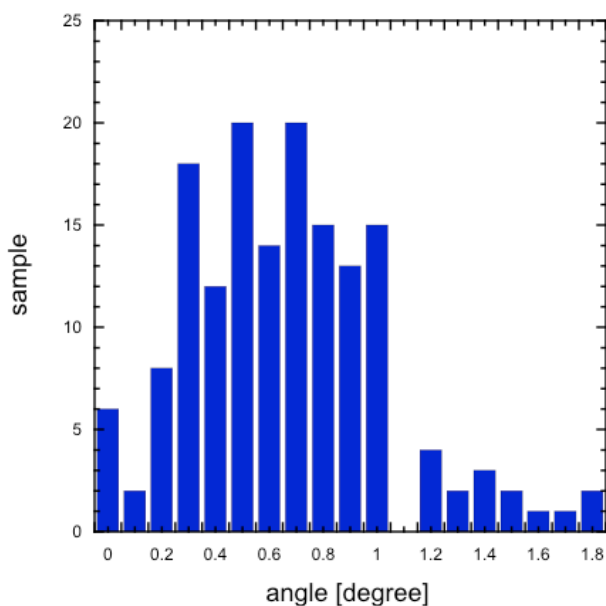


図 6 ZBLAN ファイバーのクリーブで得られる端面角度結果

結果として平均 0.7° の角度が得られた。結果、フィラメントによる方法では融着が可能であることが分かった。

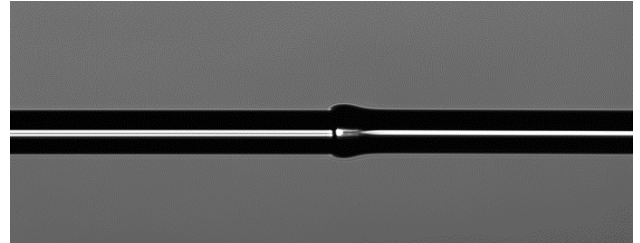


図 7 フィラメントによる ZBLAN ファイバーと SiO_2 ファイバーの融着結果画像

得られた実験結果では右側が ZBLAN ファイバーで左が SiO_2 ファイバーである。ZBLAN ファイバーが盛り上がり、 SiO_2 ファイバーに接着されていることがわかる。しかし、現在では光学的透過性については評価出来ておらず、材料同士の融着のみ確認している。ZBLAN ファイバー同士も実験を行い、以下のように得られた。



図 8 フィラメントによる ZBLAN ファイバー同士の融着結果

SiO_2 ファイバー同士の融着と同様の画像が得られており、ZBLAN ファイバー同士の融着技術の確立にも成功した。次にアーク放電による融着方法では、以下の融着結果が得られた。

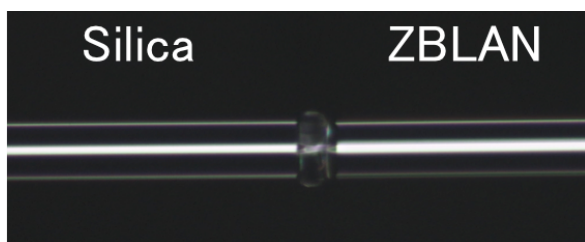


図 9 アーク放電による ZBLAN ファイバーと SiO₂ ファイバーの融着結果

右が ZBLAN ファイバー、左が SiO₂ ファイバーである。フィラメントによる方法と同様に ZBLAN ファイバーが盛り上がりて接続されている。ファイバー同士の接続の強度は、融着器自身が持つ融着強度を確認する機能であるスweep機能を用いても破壊されなかったことから、十分な強度が得られたことが分かっている。また、光学特性に関してアーク放電による方法でコア同士の結合効率が 70% を越えた結果が得られている。結果、両方法において融着が可能であることがわかった(7)。しかし、オールファイバー MOPA として使用するためには、1064 nm のコア励起に耐える程度の低損失が求められる。現在では増幅の励起光源の出力が 10 W 程度と効率が改善されたが、融着には 1 dB を下回る損失が必要である。そのためには、現状のアーク放電による方法で条件を最適化することにより、1 dB 以下を目指している。

3. 結論と展望

Tm³⁺添加 ZBLAN ファイバー MOPA の構成により、Sr 光格子時計用のトラップ光源の開発を行った。マスターレーザーとしてフィルター型 ECLD を開発し評価を行った。また ZBLAN ファイバーの取り扱い方法を確立し、ZBLAN ファイバー増幅器を開発した。励起方法について 775 nm の励起方法と 1064 nm のアップコンバージョンによる励起方法を提案し、増幅実験を行った。1064 nm のアップコンバージョン励起により、最高で 1.68 W の出力、狭線幅マジック波長への同調を確認した。また自由空間系でペルチエ素子によるファイバーの冷却により 15 分程度の動作から 6 時間を越える安定動作を確認した。

1.68 W はファイバー増幅器による 810 nm 帯での最高出力の値を達成した。自由空間系では Sr 光格子時計への導入は困難であることから融着によるオールファイバーの構成の光源を提案し、SiO₂ ファイバーと ZBLAN ファイバーでの融着を行った。アーク放電によるアーク放電ポイントシフトの方法とフィラメント融着器による方法を試行した。アーク放電による方法により 70% の結合効率を達成することが出来た。また、フィラメントの方法でも融着は成功しており、ZBLAN ファイバー同士の融着が可能であることも確認している。

展望としては 90% を越える融着パラメータの最適化を行い。オールファイバー MOPA の開発を行い、相対強度雑音の評価等の性能を確認し、Sr 光格子時計の導入、検証、現状の光源からの置き換えを目標としている。

また、Tm³⁺のエネルギー準位は非常に複雑であり、本研究のようなアップコンバージョン励起、低フォノンエネルギーの ZBLAN ファイバーでは、現在までに未知の遷移が考えられる。実際に増幅のシミュレーションを行った際には、他の準位での ASE 発生などが考えられる結果が得られている。そこで更なる高出力化を目指すためには Tm³⁺添加 ZBLAN ファイバーの特性を測定、評価することが必要である。

参考文献

- [1] Takamoto, M., *et. al.*, “An optical lattice clock”, *Nature*, **435**, pp. 321-324 (2005).
- [2] Bloom, B. J., *et al.*, “An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10⁻¹⁸ level”. *Nature*, **506**, pp. 71-75. (2014).
- [3] I. Ushijima, *et. al.*, “Cryogenic optical lattice clocks”, *Nature Photonics*, (2015)
- [4] H. Okamoto, *et. al.*, “Efficient 521 nm all-fiber laser splicing Pr³⁺-doped ZBLAN fiber to end-coated silica fiber” *Opt. lett.*, **36**, pp. 1470-1472, (2011).