

Sr 光格子時計用 813 nm Tm³⁺添加 ZBLAN ファイバ MOPA

武者研究室 梶川 詠司

1. 背景と目的

Sr 光格子時計は原子時計の中でも最も小さいレベルの周波数不確かさを持ち次世代の周波数標準として期待されている。近年、可搬型の Sr 光格子時計が実証され今後は更なる小型・堅牢化が期待されている[1]。将来的には衛星搭載化も見据えられており、使用されるレーザー光源やシステムには長期安定動作できる高い信頼性や低い消費電力、そして軽量かつ小型である事などが求められる[2]。Sr 光格子時計では3種類のレーザーが使用されている。Sr 原子をレーザー冷却する冷却用レーザー、レーザー冷却された Sr 原子を光でトラップするため使用される光格子用レーザー、そして光トラップされた Sr 原子を精密分光するレーザーである。光格子時計の登場までは、原子を光トラップするとシュタルク効果によって原子の遷移周波数がシフトするため周波数基準として高い確度が得られなかった。そうした状況で 2001 年に東京大学の香取教授によって光格子時計のアイデアが提案された[3]。光格子時計の特徴は、それまで問題となっていたシュタルク効果による原子の遷移周波数シフトが相殺され遷移周波数が変わらずに原子を光トラップできる事であり、この波長は魔法波長と呼ばれ Sr 光格子時計では 813 nm である。2001 年に提案された Sr 光格子時計は 2005 年に実証され、近年では 10⁻¹⁸ 台の不確かさが実現されている[4]–[6]。光格子用レーザーは多くの原子をトラップするために高い出力が求められ、同時にシュタルク効果による遷移周波数シフト抑制のために狭線幅である事が求められる。そういった理由から Sr 光格子時計の光格子用レーザーは波長 813 nm、出力 1 W 以上、周波数線幅 1 MHz 以下でなければならない。現在ではチタンサファイアレーザー (TiSa) が使用されているが、システムが比較的大型である事や消費電力が大きい事、そして長期安定動作が難しいといった欠点がある。また、半導体増幅器(tapered amplifier, TA)を用いたシステムも光格子用レーザーとして使用できるが、SNR(signal-to-noise ratio)が小さく ASE(amplified

spontaneous emission)が大きいためシュタルク効果による遷移周波数シフトが生じてしまうといった欠点がある[1]。そこで、本研究では小型・堅牢かつ低ノイズな新しい光格子用レーザー光源の開発を目指した。以下に TiSa と TA の特徴と Sr 光格子時計の要求値について簡単にまとめた。

表 1.1 他の光格子用レーザーの特徴

	TiSa	TA
出力	> 2 W[7]	2 W[8]
SNR	< 89 dB[8]	~ 40 dB[8]
ビーム品質	M ² < 1.1[7]	M ² < 2[9]
電力変換効率	~0.3%*1	~ 5%*2
システム	大型	小型

*1: 励起パワー10 W(Verdi(G10), coherent, 消費電力:700 W)で2W 出力する事から算出[8], [10]、チラーは含まれていない

*2: BoosTA pro の消費電力:40 W から算出[8], [9]

表 1.2 Sr 光格子時計の光格子用レーザーの要求値

波長 (単一波長)	813.4 nm
出力	> 1 W
周波数線幅	< 1 MHz
長期安定動作、高ビーム品質、高 SNR、小型、堅牢	

表 1.2 の要求値を満たすために、本研究室では以前よりファイバを用いた MOPA(master oscillator power amplifier)によって光格子用レーザーの開発を行ってきた。MOPA とはマスターレーザーの安定度を維持したまま光増幅部によって高出力化する手法であり、高い安定度と出力を両立できる。マスターレーザーには ECLD(external cavity laser diode)を、ファイバ増幅器には Tm³⁺添加 ZBLAN ファイバを用いる事でこれまでに 1 W 以上の出力を実証した[11]。しかし、出力の安定性に問題があり実用可能な光源には至らなかった。本研究では、その原因がフォトダークニングであることを明らかにすることができたので、フォトダークニングの抑制

によって安定高出力動作の実証を行なった。

2. フォトダークニングとフォトブリーチング

以下の実験系で増幅実験を行なった際に生じるフォトダークニング、そしてフォトダークニングいたファイバに 532 nm の光を入射した時に生じるフォトブリーチング効果を、白色光の透過スペクトル変化によって調べた。Tm³⁺は青色の波長帯に吸収を持つが緑色の波長帯には吸収が無いため、フォトブリーチングには緑色のレーザー光である 532 nm を用いた。白色光には出力を減衰した SC(super continuum)光源(SC-5, YSL photonics)を使用した。使用したファイバは添加濃度 5000 ppm、コア径 4.8 μm、長さ 300 cm の Tm³⁺添加 ZBLAN ファイバ(ファイバーラボ株式会社)である。励起レーザーにはラマンファイバーレーザー (1220 nm) と Yb³⁺ファイバレーザー (1050 nm) を用いて 2 波長励起した。信号光の入射パワーが 20 mW、そして 10 W (4 W: 1220 nm、6 W: 1050 nm) で励起し、増幅実験を 2 分間行なった。図 2.2 に白色光透過スペクトルを示す。青色のスペクトルはフォトダークニング前の SC 光透過スペクトルを示し、水色がフォトダークニング後(増幅実験後)のスペクトルである。このように、増幅実験によってフォトダークニングによる吸収が生じていることがわかる。フォトダークニングしたファイバに 532 nm の光を約 150 mW 入射することでフォトブリーチングした結果は図 2.2 の赤色のスペクトルで示されておりフォトダークニングによって生じた吸収が回復していることがわかる。この結果から、532 nm によるフォトブリーチングがフォトダークニング抑制に有効だとわかった。

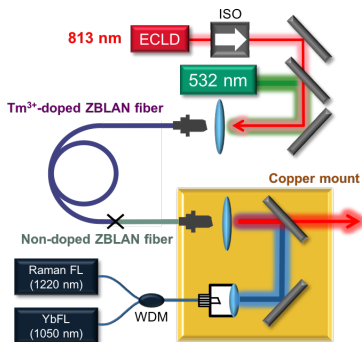


図 2.1 増幅実験系

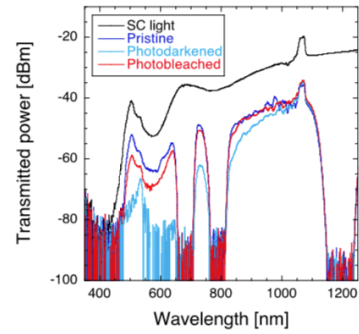


図 2.2 SC 光の透過スペクトル (黒:SC 光、青:ダークニング前、水色:ダークニング後、赤:フォトブリーチング後)

3. 低添加濃度 2 波長励起

次に、フォトブリーチングを行いながら増幅実験を行なった。実験系は図 2.1 と同じである。増幅出力を図 3.1 に示す。図 3.1 の赤色の点はフォトブリーチングしながら増幅実験した結果であり、青色はフォトブリーチングなしの状態での増幅結果である。励起パワー比 (1220 nm/1220 + 1050 nm) は約 44%で増幅実験を行なった。また、励起パワーを 5 秒毎に上げて下げる実験を行なった。フォトブリーチングなしの時はフォトダークニングの影響でヒステリシスがみられる。一方でフォトブリーチングしながら増幅実験した場合はフォトダークニングが十分抑制されたためヒステリシスがみられていない。また、フォトブリーチングしながら実験すると高いスロープ効率と増幅パワーが得られることがわかった。この結果からもフォトダークニングの抑制にフォトブリーチングが効果的である事が明らかになった。

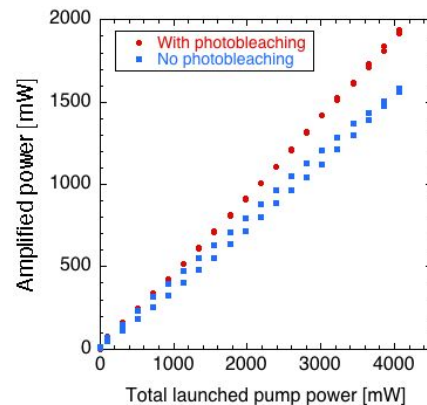


図 3.1 低添加濃度 2 波長励起時の増幅出力

4. 高添加濃度 1 波長励起

次に、励起波長を 1 波長に変えて実験を行った。実験系は図 4.1 に示す。励起レーザーは Yb³⁺ファイバレーザ (1050 nm) を用いた。使用した Tm³⁺添加 ZBLAN ファイバ (ファイバーラボ (株)) は添加濃度 15000 ppm、長さ 96 cm、コア径 4.5 μm、NA が 0.12 であり 813 nm においてシングルモードである。この時の増幅出力を図 4.2 に示す。フォトブリーチングを行いながら増幅実験した結果が赤点であり、フォトブリーチング無しが青点、そして赤線はシミュレーション結果である。この結果からも、フォトブリーチングを同時に行う事で高いスロープ効率が実現できる事がわかった。この結果は 2 波長励起時と同程度のスロープ効率であるため、両者を比較するとよりシンプルな系の 1 波長励起の方が小型化や低消費電力に適する。そのため、この高添加濃度 1 波長励起の手法で実験を進めた。

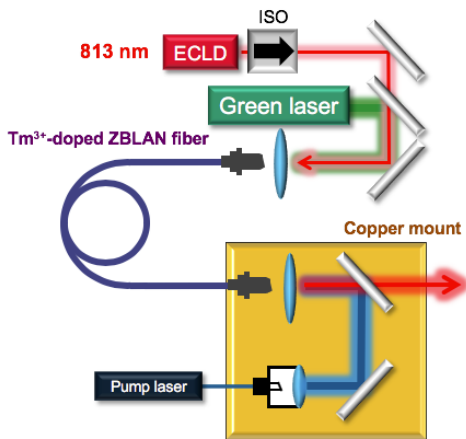


図 4.1 1 波長励起の増幅実験系

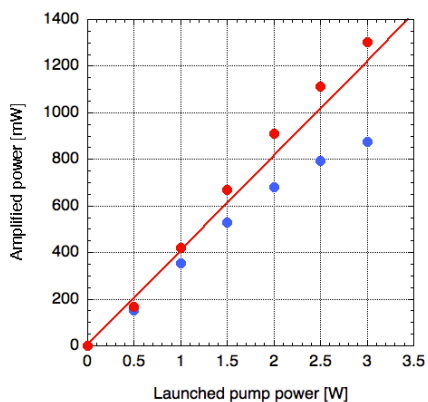


図 4.2 1 波長励起の増幅パワー

5. カスケードアンプ

次に、SNR の向上と長期動作の実現に向けてカスケードアンプを開発した。プリアンプは図 5.1 のようにオールファイバで構築した。使用した Tm³⁺添加 ZBLAN ファイバ (ファイバーラボ (株)) はコア径は 4.5 μm、添加濃度は 15000 ppm、NA は 0.12 のシングルモードファイバ (813 nm において) である。ZBLAN ファイバの両端面はシリカファイバと 1 dB 以下の損失で機械的に結合されている。Yb ファイバレーザの励起パワーは 1 W 程度で使用し、このプリアンプから 200 mW 程度の出力が得られた。

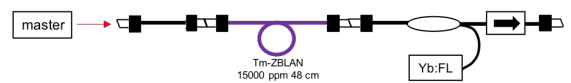


図 5.1 プリアンプ概略図

このプリアンプを用いてカスケードアンプを構築した。最初にフォトブリーチングなしの状態を増幅実験を行なった (図 5.2)。この時の増幅出力を図 5.3 に示す。カスケードアンプにする事で 1 W 以上の出力が得られた (図 5.3, 赤点)。

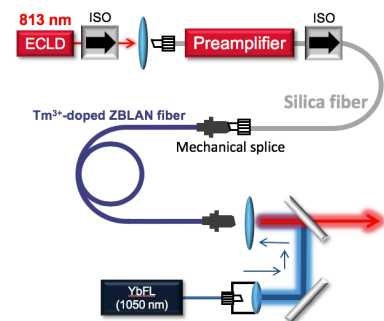


図 5.2 カスケード MOPA 概略図 (フォトブリーチング無し)

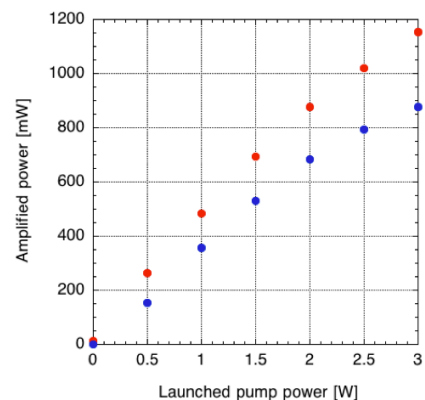


図 5.3 フォトブリーチング無しでの増幅パワー (赤：信号光入射パワー100 mW、青：信号光入射パワー20 mW)

カスケードアンプの増幅出力の時間変化を図 5.4 に示す。このように 1 日以上連続動作を実証できた。しかし、少しずつ出力が減少していることがわかる。これは実験からフォトダークニングによるものだとわかったので、次に、フォトブリーチングを行いながら増幅実験を行なった (図 5.5)。フォトブリーチングを同時に行うことで 50% のスロープ効率を実現した。しかし、増幅出力の時間変化についてはアライメントのズレが原因で長時間連続動作は実現しなかった。この問題を解決するためには、堅牢な系にしていく必要があるだろう。

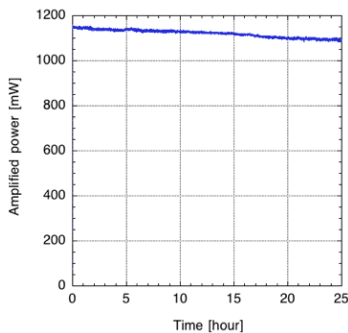


図 5.4 増幅出力の時間変化

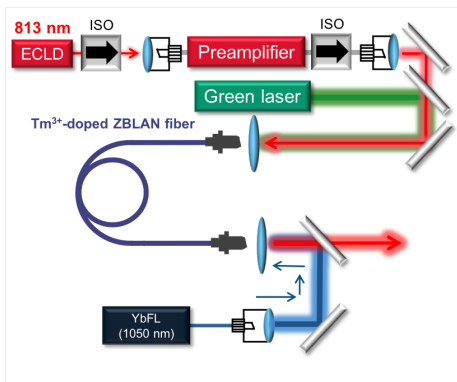


図 5.5 カスケード MOPA 概略図 (フォトブリーチングあり)

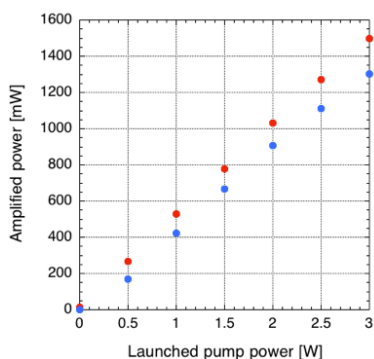


図 5.6 フォトブリーチングありでの増幅パワー (赤：信号光 100 mW、青：信号光 20 mW)

最後に、SNR を比較した。以下にカスケードアンプにした時の増幅スペクトルを示す。プリアンプを導入し利得分布を分けることによって 50 dB 以上の高い SNR を実現した。

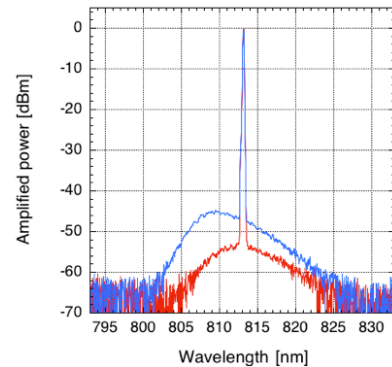


図 5.7 増幅パワースペクトル (赤：信号光 100 mW、青：信号光 10 mW)

6. 信号光によるフォトダークニング抑制

信号光によるフォトダークニングの抑制効果について調べた。Tm³⁺添加ファイバのフォトダークニングは ESA(excited state absorption)が原因だとわかっているため、信号光を大きくすることで誘導放出遷移率を大きくしその結果 ESA が抑制されフォトダークニングが抑制されると考えられる。実験系を図 6.1 に示す。520 nm の光をプローブ光として増幅動作時の 520 nm の透過パワーの時間変化を調べた。520 nm のパワーが小さいためロックインアンプで信号を取得した。増幅実験は 6 通りの信号光の入射パワーで行い、励起光の入射パワー 500 mW で行なった。使用した Tm³⁺添加 ZBLAN ファイバ (ファイバーラボ (株)) は添加濃度 15000 ppm、コア径 4.6 μm、長さ 100 cm、NA=0.12 のフォトダークニングしていないファイバである。それぞれの信号光で実験を行なった時の 520 nm の透過パワーの時間変化の結果を図 6.2 に示す。

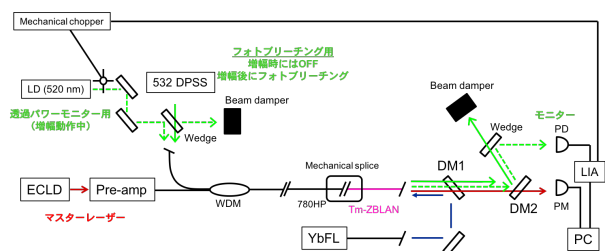


図 6.1 ロックインアンプを用いたフォトダークニング測定系概略図

わかった。この事からも、プリアンプを導入し信号光の出力を大きくする事でフォトダークニングが効果的に抑制されることが明らかになった。

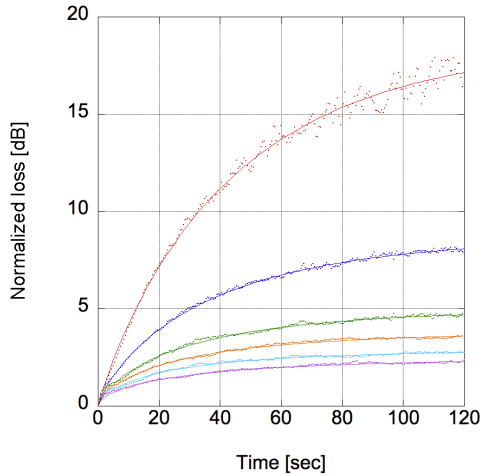


図 6.2 様々な信号光パワーにおけるフォトダークニングによる損失時間変化(520 nm)

(赤：14 mW、青：27 mW、緑：49 mW、橙：69 mW、水色：92 mW、紫：105 mW)

縦軸は 520 nm の損失を示している。このように、信号光の出力が大きくなると 520 nm の損失が小さくなっていることがわかる。この結果から、信号光の入射パワーを大きくすることでフォトダークニングが抑制されることが実証できた。フィッティングには以下のようなストレッチドエクスポネンシャル (stretched exponential) と呼ばれる非指数関数をも用いた。この式はフォトダークニングによって生じる透過パワーの時間変化を良い近侍でフィッティングできる式として知られており、フォトダークニングの評価にしばしば用いられる。

$$-10 \frac{1}{L} \log \left(\frac{P(t)}{P_0} \right) = \alpha \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{t}{\tau} \right)^\beta \right) \right] \quad (6.1)$$

α 、 β 、 τ はフィッティングパラメータであり、 α は定常状態に落ち着く損失の値、 β 、 τ は時間変化に関するパラメータである。信号光の出力に対する増幅出力とフィッティングパラメータ α の結果を図 6.3 と図 6.4 に示す。これらの結果から、増幅パワーが飽和するに従って α の値の変化も小さくなっていることがわかる。これらの結果からも、信号光によって ESA が抑制されフォトダークニングの損失が小さくなったと言える。また、813 nm における損失の時間変化と α の変化を図 6.5、図 6.6 に示す。80 mW 以上の信号光を入射することで 813 nm における損失が 0.3 dB 以下に抑えられることが

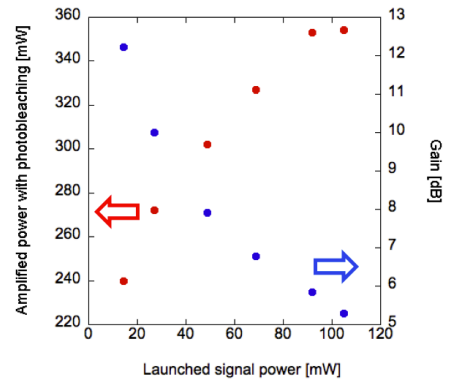


図 6.3 フォトブリーチングしながら増幅動作させた時の入射信号光パワーに対する増幅パワー (赤) と利得 (青)

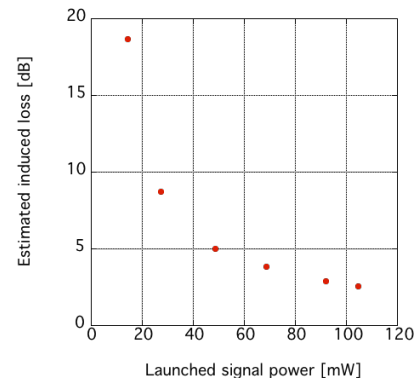


図 6.4 信号光の出力に対する α (520 nm)

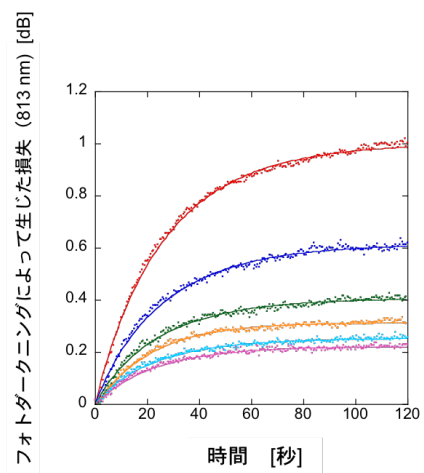


図 6.5 フォトダークニングによる損失時間変化 (813 nm)

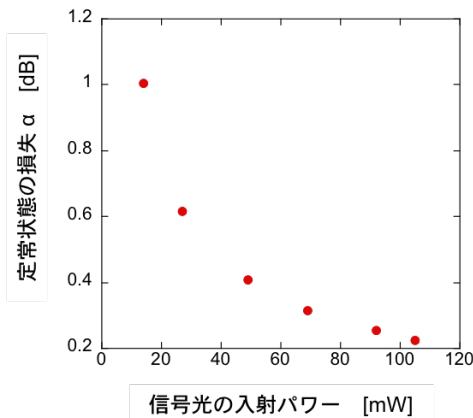


図 6.6 信号光の出力に対する α (813 nm)

7. まとめ

Sr 光格子時計の新しい光格子用レーザーの開発を行った。Tm³⁺添加 ZBLAN ファイバを用いたファイバ MOPA システムのフォトダークニングに対してフォトブリーチングによる抑制を行い、増幅動作すると 1 W 以上の出力が容易に得られることがわかった。また、カスケードアンプにする事で 50 dB 以上の SNR や 1 日以上連続動作などを実証した。以下に、他のレーザー光源との比較を示す。この結果より、TA よりも光学的に優れ TiSa よりも小型な光源の開発ができたと言える。今後は、さらなる SNR の向上や消費電力の低減、そしてハイパワー化などの性能向上が期待される。フォトダークニング信号光依存性について行った実験では、信号光の入射パワーを大きくする事で、フォトダークニングが抑制できることがわかった。これまでフォトダークニングについて、こういった実験結果は私の知る限りでは報告例が無く初めて実験的に検証された。この結果より、カスケードアンプによって信号光の入射パワーを最適化する事でフォトダークニングの抑制につながるため、高出力なファイバーアンプで問題となるフォトダークニングの新しい抑制手法として有効であり様々なファイバーアンプへの応用が期待される。今後は、さらに最適化することでフォトダークニングの抑制や高 SNR 化、ハイパワー化などを進め、長期安定動作を実証し光格子時計への導入を目指す。

表 7.1 本研究で開発した光源と他の光格子用レーザーとの比較

	TiSa	TA	カスケードアンプ
出力	> 2 W[7]	2 W[8]	1.5 W
SNR	>89 dB[8]	~ 40 dB[8]	>50 dB
ビーム品質	$M^2 < 1.1$ [7]	$M^2 < 2$ [9]	$M^2 \sim 1.1$
電力変換効率	~0.3%*1	~ 5%*2	0.60%
システム	大型	小型	小型

*1: 励起パワー 10 W(Verdi(G10), coherent, 消費電力:700 W)で 2W 出力する事から算出[8], [10]、チラーは含まれていない

*2: BoosTA pro の諸費電力:40 W から算出[8], [9]

8. 参考文献

- [1] S. B. Koller *et al.*, “Transportable Optical Lattice Clock with 7×10^{-17} Uncertainty,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 118, no. 7, Feb. 2017.
- [2] R. Schwarz, S. Dörscher, A. Al-Masoudi, S. Vogt, Y. Li, and C. Lisdat, “A compact and robust cooling laser system for an optical strontium lattice clock,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 90, no. 2, 2019.
- [3] H. KATORI, “SPECTROSCOPY OF STRONTIUM ATOMS IN THE LAMB-DICKE CONFINEMENT,” in *Proceedings of the 6th Frequency Standards and Metrology*, WORLD SCIENTIFIC, 2002, pp. 323–330.
- [4] M. Takamoto, F. L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, “An optical lattice clock,” *Nature*, vol. 435, no. 7040, pp. 321–324, May 2005.
- [5] T. L. Nicholson *et al.*, “Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty,” *Nat. Commun.*, vol. 6, 2015.
- [6] I. Ushijima, M. Takamoto, M. Das, T. Ohkubo, and H. Katori, “Cryogenic optical lattice clocks,” *Nat. Photonics*, vol. 9, no. 3, pp. 185–189, 2015.
- [7] “SolsTiS-datasheet.” [Online]. Available: <http://www.m2lasers.com/solstis-details.html?file=SolsTiS-datasheet.pdf>.
- [8] S. Bilicki, “Strontium optical lattice clocks :

clock comparisons for timescales and fundamental physics applications,”
Université Pierre et Marie Curie - Paris,
2017.

- [9] “Tunable Diode Lasers.” [Online]. Available:
<http://quantum.phys.uni-sofia.bg/saltiel/AgateNATOSpringer06.pdf>
<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=W7b2JXKxq0sC&oi=fnd&pg=PA189&dq=EFFICIENT+FREQUENCY-DOUBLING+OF+FEMTOSECOND+PULSE+S+IN+WAVEGUIDE+AND+BULK+NONLINEAR+CRYSTALS&a>.
- [10] “Verdi G-Series.” [Online]. Available:
chrome-extension://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.coherent.com/assets/pdf/C_OHR_Verdi_G-Series_DS_0118_7.pdf#page=4.
- [11] 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. Lett.*, vol. 39, no. 7, p. 2191, Apr. 2014.