

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22244049

研究課題名(和文) 光格子時計のための低温光共振器を用いた超高安定レーザーの開発

研究課題名(英文) Development of an ultra-stable laser system using a cryogenic optical cavity for optical lattice clocks

研究代表者

麻生 洋一 (ASO, Yoichi)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10568174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,800,000円、(間接経費) 10,440,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次世代周波数標準として期待される光格子時計において安定度を制限する要因となっているプローブレザーの安定度を従来より大幅に(2桁程度)改善することを目指し、超高安定レーザーシステムの開発を行った。具体的には、レーザー安定度を決めている参照光共振器の熱雑音を低減するため、単結晶シリコン製光共振器を3.5Kまで冷却することで、高い安定度の達成を目指した。本研究の結果、予定通り3.5Kの低温における、単結晶シリコン製光共振器の動作に成功した。その結果、インループ評価では1秒のタイムスケジュールで10のマイナス18乗の相対安定度が測定された。

研究成果の概要(英文)：The main objective of this research was to realize an ultra-stable laser system to be used as a local oscillator for optical lattice clock, which is one of the most promising candidates for the next generation time-frequency standard. Thermal noise of a reference cavity is the main culprit for limiting the stability of a laser locked to the cavity. Therefore, we planned to build a cryogenic cavity made of mono-crystalline silicon cooled down to 3.5K. As a result of our research, we were able to successfully operate the silicon cavity at 3.5K. An in-loop measurement of the fractional frequency fluctuation is about 10 to the -18th at 1 second.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：量子エレクトロニクス 周波数標準

1. 研究開始当初の背景

(1) 周波数標準には高い正確性と安定度が求められる。単一イオンを用いた原子時計の場合、様々な摂動による遷移周波数のシフトを低く抑えることができる一方、観測対象の原子が一つなので、信号対雑音比が低く、長時間の積分観測が必要となる。

(2) 2001年に本研究の研究分担者である香取によって提案された光格子時計は、多数の中性原子を格子状のレーザートラップに捕獲しつつも、トラップレーザーの周波数を工夫することでトラップ電場による周波数シフトを打ち消すという画期的なものである。光格子時計では多数の原子を使えるため、正確さを保ちつつ短時間の測定で非常に高い安定度に到達することができる。2006年には国際度量衡委員会によってSr光格子時計が秒の二次表現として採択された。

(3) このように高いポテンシャルを持つ光格子時計であるが、現在その安定度は、原子の遷移周波数を読み取るためのレーザーの安定度によって制限されている。従って、より高安定なレーザーの開発が求められていた。

2. 研究の目的

(1) 本研究では新世代の光周波数標準として期待される光格子時計の限界性能へ挑むために、その鍵となるプローブレーザーの周波数安定度を従来より二桁向上させることを目指す。

(2) このようなレーザーが実現できれば、100秒程度の短い積分時間で、光格子時計の原理的安定度である 10^{-18} まで到達可能な究極の原子時計が実現できる。

3. 研究の方法

(1) レーザー周波数の安定化に用いられる標準的な手法は、長さの安定な光共振器にレーザーの周波数をロックする方法である。しかし、これまでの研究で、光共振器の熱的振動(熱雑音)が安定度の向上を制限していることがわかってきた。

(2) 熱雑音の低減には、共振器を構成する素材として、高い機械的Q値を持つものを採用する必要がある。また、共振器そのものを低温に冷却することで、熱雑音を低減することが可能になる。

(3) 本研究では、低温において非常に高い機械的Q値を持つことが知られている、単結晶シリコンを用いた光共振器を3.5Kまで冷却し、これまでになく安定度を持つレーザーの実現を目指した。

(4) 熱雑音の他、光共振器本体に振動が加わると弾性変形によって長さが変化してしま

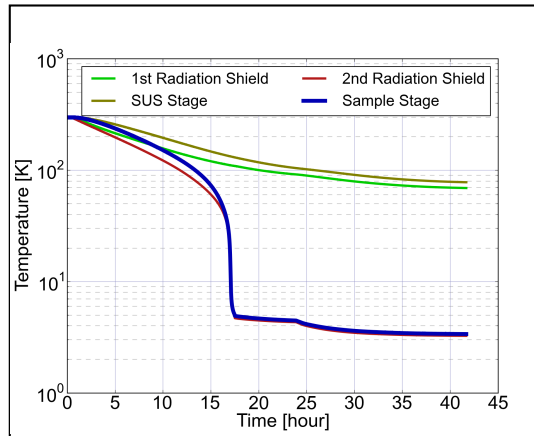


図 1: 冷却曲線。Sample Stage が共振器を載せる部分の温度。

う。このような雑音を排除するため、光共振器は振動に対して弾性変形が最小化されるような支持点で保持される。さらに、地面振動を低減するための真空対応能動防振ステージを開発し、この上に共振器を設置する。また、共振器を冷却する冷凍機からの振動混入を最小化するため、ヘリウム再凝縮型パルス管冷凍機を採用した。

4. 研究成果

(1) 長さ 20cm、直径 20cm の単結晶シリコン製光共振器を製作し、これを新規開発したクライオスタットによって 3.5K まで冷却することに成功した(図 1)。このシステムでは、常温の能動防振台の上に、強固に光共振器をマウントする必要があるが、一方で常温部からの熱流入を抑える必要もある。このような相反する要求を満たすために、複数枚のステンレス板の間にガラス球を挟み込む構造の全く新しい断熱スタックを開発した。これによって、常温部から機械的には強固に支持されているにもかかわらず、接触による熱流入を 100mW 程度に抑えることに成功した。この断熱手法は、同様の実験に広く適用可能なものである。

(2) 光共振器に伝わる振動を低減するために、真空対応の能動防振装置を開発した。こ

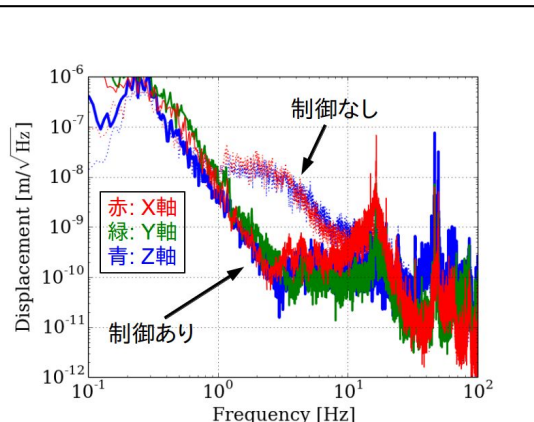


図 2: ヘキサポッドステージの防振性能

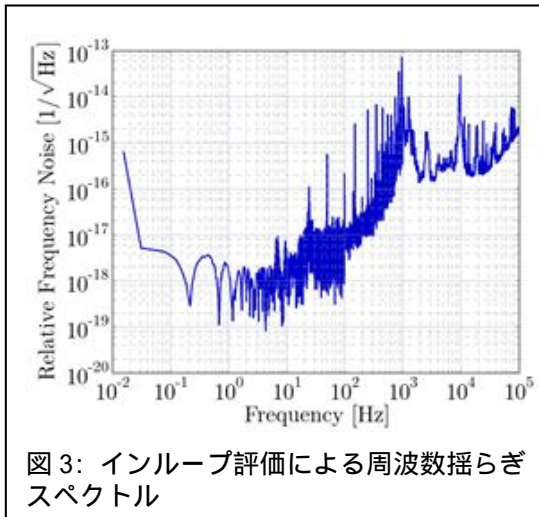


図 3: インループ評価による周波数揺らぎスペクトル

れは、ピエゾを内蔵して伸縮可能な 6 本の脚で支えられた天板(ヘキサポッドステージ)と、天板に取り付けられた振動センサー(Geophone)からなる。振動センサーで読み取られた地面の振動は、ヘキサポッドの脚にフィードバックされることで能動的に打ち消される。この装置には、複雑な信号対角化が必要とされるため、リアルタイム OS を用いたデジタル制御システムが用いられる。我々の装置は、図 2 に示されるように、並進三自由度において最大 10 倍以上の防振性能を達成した。

(3) シリコン光共振器を 3.5K まで冷却した状態で、1397nm の ECDL をこの共振器にロックすることに成功した。制御の帯域幅は 800kHz 程度であり、我々が問題とする低周波(10Hz 以下)において十分高いゲインを持っている。インループ評価による周波数揺らぎスペクトルとそのアラン分散への変換結果を図 3,4 に示す。今後は、実際に光格子時計と接続して、アウトオブループの周波数安定度を評価していく予定である。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3 件) 全て査読あり

[1] Y. Aso, Y. Michimura, K. Somiya, M. Ando, O. Miyakawa, T. Sekiguchi, D. Tatsumi, and H. Yamamoto, “Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector,” Phys. Rev. D, vol. 88, no. 4, p. 043007, Aug. 2013, DOI: 10.1103/PhysRevD.88.043007

[2] H. Katori, M. Takamoto, T. Takano, I. Ushijima, T. Ohkubo, K. Yamanaka, N. Ohmae, Y. Aso, A. Shoda, T. Ushiba, P. Thoumany, M. Das, B. T. R. Christensen, and T. Akatsuka, “Prospects for frequency comparison of Sr and Hg optical lattice

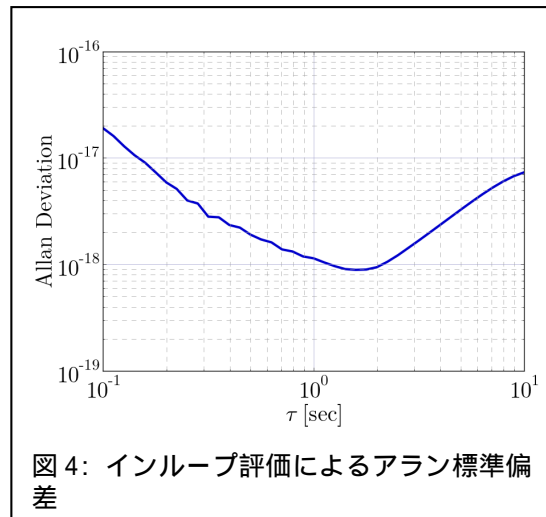


図 4: インループ評価によるアラン標準偏差

clocks toward 10^{-18} uncertainties,” in Frequency Control Symposium (FCS), 2012 IEEE International, 2012, pp. 1–6, DOI: 10.1109/FCS.2012.6243688

[3] Y. Aso, K. Somiya, and O. Miyakawa, “Length sensing and control strategies for the LCGT interferometer,” Class. Quantum Gravity, vol. 29, no. 12, p. 124008, Jun 2012, DOI: 10.1088/0264-9381/29/12/124008

〔学会発表〕(計 9 件)

[1] 牛場崇文, 麻生洋一, 大前宣昭, 正田亜八香, 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発 II, 2014 年 3 月 28 日, 日本物理学会 第 69 回年次大会, 東海大

[2] 牛場崇文, 麻生洋一, 大前宣昭, 正田亜八香, 坪野公夫, 低温シリコン光共振器を用いた狭線幅光源の開発, 2013 年 9 月 23 日, 日本物理学会 2013 年秋季大会, 高知大

[3] 正田亜八香, 麻生洋一, 大塚茂巳, 大前宣昭, 牛場崇文, 平松成範, 坪野公夫, 超高安定光源のための Hexapod 型能動防振装置の開発 II, 2013 年 3 月 27 日, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 広島大

[4] 牛場崇文, 渡辺篤史, 麻生洋一, 平松成範, 大塚茂巳, 大前宣昭, 正田亜八香, 坪野公夫, 低温光共振器に向けた低温システムの開発 II, 2013 年 3 月 27 日, 日本物理学会 第 68 回年次大会, 広島大

[5] 正田亜八香, 麻生洋一, 大塚茂巳, 大前宣昭, 牛場崇文, 平松成範, 坪野公夫, 超高安定光源のための Hexapod 型能動防振装置の開発, 2012 年 9 月 11 日, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大

[6] 牛場崇文, 正田亜八香, 大前宣昭, 平松成範, 大塚茂巳, 麻生洋一, 鈴木敏一, 坪野公夫, 低温光共振器に向けた低温シス

テムの開発, 2012年9月11日, 日本物理学会
2012年 秋季大会, 京都産業大

[7] 大前宣昭, 麻生洋一, 坪野公夫, 平松成
範, 正田亜八香, 波多野智, 三橋秀人, 香取
秀俊, 低温光共振器を用いた時計用周波数安
定化レーザーの開発, 2011年9月23日, 日本
物理学会 2011年 秋季大会, 富山大学

[8] 麻生洋一, 穀山渉, 坪野公夫, 高本将男,
香取秀俊, 低温サファイア共振器を用いた超
高安定レーザーの開発 II, 2010年9月14日,
日本物理学会 2010年 秋季大会, 九州工業大
学

[9] Yoichi Aso, Measuring Coating Thermal
Noise with Cryogenic Sapphire Cavities,
2010 Gravitational Wave Advanced
Detector Workshop, Kyoto, May 18 2010

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称:
発明者:

権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

麻生洋一 (ASO, Yoichi)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号: 10568174

(2) 研究分担者

香取秀俊 (KATORI, Hidetoshi)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 30233836

洪 鋒雷 (HONG, Feng-Lei)

産業技術総合研究所・計測標準研究部門・
研究科長

研究者番号: 10260217

李 瑛 (Li Ying)

情報通信研究機構・電磁波計測研究所・主
任研究員

研究者番号: 30415848

坪野 公夫 (TSUBONO, Kimio)

東京大学・大学院理学系研究科・名誉教授
研究者番号: 10125271

(3) 連携研究者

高本 将男 (TAKAMOTO, Masao)

理化学研究所・香取量子計測研究室・研究
員

研究者番号: 30401144

鈴木 敏一 (SUZUKI, Toshikazu)

高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温
工学センター・教授

研究者番号: 20162977

三代木 伸二 (MIYOKI, Shinji)

東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号: 20302680