

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 22 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400423

研究課題名(和文) 超高安定セラミック光共振器の開発

研究課題名(英文) Development of the ultra-stable optical cavity using a ceramic spacer

研究代表者

保坂 一元 (Kazumoto, Hosaka)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・研究グループ長

研究者番号：50462859

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、これまでにない短期周波数安定度を持つレーザーを開発するにあたり、周波数安定度に限界を与える光共振器の熱雑音を低減させる事を目指した。光共振器のスペーサー材料として、超低熱膨張セラミックに注目し研究を進めた。しかしながら、60 cm以上の共振器長を持つ大型の超低熱膨張セラミック製光共振器スペーサーの作製において、仕様を満たす性能を保證することが技術的に難しい事が分かった。このため、高反射ミラーの反射膜の機械的Q値をあげて、熱雑音を低減する手法を採用し、これに向けた準備を進めた。反射膜に半導体薄膜を使用することで、熱雑音による周波数安定度の限界を1/10に低減できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：To reduce the thermal noise on the optical cavity and achieve excellent frequency stabilities of lasers, we designed a very long cavity using an ultra-low expansion ceramic spacer. However, it was difficult for the product company to make the thick ceramic parts with the good thermal properties due to the technical problems. Therefore, we have employed another optical cavity that has crystalline coatings on the mirrors, because the crystalline coating mirror has high mechanical Q factor. Using the cavity, we expect that the thermal noise limit of the frequency stability will be about one tenth of that for the previous optical cavity.

研究分野：量子エレクトロニクス、原子分子物理学

キーワード：光周波数標準 狭線幅レーザー 低熱膨張セラミック 光共振器 熱雑音

1. 研究開始当初の背景

レーザーの発明以来、発振スペクトル線幅の狭窄化は、常に重要テーマの一つである。例えば、秒の再定義を念頭に世界各国で繰り広げられる光時計の開発競争においては、超高安定化レーザーの開発が光時計の成功を左右するといっても過言ではない。また、産業技術総合研究所で開発された光周波数コムによる線幅転送技術を用いると、高安定化レーザーの線幅を全てのコムモードに転送することが可能になり、超高安定化レーザーの開発は、天体観測や超高分解能分光等、様々な分野において重要な貢献をもたらすものと期待される。

これまで各国で開発されてきた高安定化レーザーは、低熱膨張ガラスの一つである Ultra low expansion (ULE) ガラスで作られた 0.1 m 程度の高フィネス光共振器に対して安定化する手法が主流であった。ところが、この光共振器を用いた場合、安定化レーザーの短期安定度 (平均時間 ~10 秒以下) は、高フィネス光共振器に使用される材料の熱雑音によって制限されている事が明らかになった。熱雑音そのものを低減するには、いくつかの手法が考えられる。例えば、

- ① 光共振器の温度を下げる
- ② 機械的 Q 値の高い材料を用いる等である。また、実効的に熱雑音の影響を低減する方法として
- ③ 共振器長を長くするが有効であると考えられる。

光共振器を冷却する場合、冷媒の沸騰や冷凍機の振動による影響を十分に低減する必要があり、防振と冷却機構を併せ持つ装置は複雑かつ高価になることは避けられない。このため、共振器長の長い光共振器 (0.6~1 m 程度) を採用し、鏡の基材として機械的 Q 値の高い熔融石英を用いる方法が、熱雑音の効果を低減するために、有力と考えられる。ところが、長い共振器を用いる場合は、実験室の微小振動により共振器が変形し、共振器長が安定しないことが懸念される。このため、ULE ガラス等のガラス材料に代わる、高い剛性を備え、経年変化の小さな低熱膨張材料が渴望されてきた。本研究では、剛性が高くまた、熱膨張係数が極めて小さなセラミックを用いた光共振器の開発を試みた。

2. 研究の目的

本研究では、光時計の開発に不可欠な時計遷移励起用レーザーを開発するにあたり、光共振器の熱雑音を低減し、短期の周波数安定度を改善する事を目的として研究を進めた。特に、共振器長を長くすること、部材の機械的 Q 値を高くすることによって、熱雑音が短期の周波数安定度に与える影響を減少させることを目指した。

3. 研究の方法

まず、我々の狭線幅レーザーの短期の周波数安定度が光共振器の熱雑音で制限されている事、すなわち、振動や音響ノイズ、あるいは、制御システムや制御回路などの影響は十分に小さい事を確認するために種々の実験を行った。

これと並行して、光共振器の熱雑音の影響を低減するために、新しい光共振器の開発に着手した。まず、光共振器のスペーサー材料として低熱膨張セラミックを用いることを前提に、光共振器の形状、支持点を決定するために有限要素法を用いて、光共振器の変形を計算した。

光共振器が加速度を受けて変形しようとも、共振器長が変わらなければ、共鳴周波数は変化しない。つまり、ミラー中心の軸方向の変位が無ければよいという事になる。光共振器が加速度を受け変形した時、ミラーの位置やミラー面の傾きがどう変化するかは、光共振器の形状と支持点の位置によって異なるので、シミュレーション等によって設計を最適化する必要がある。

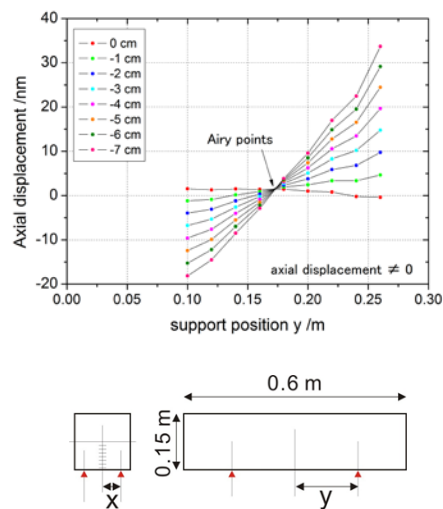


図1 直方体型のセラミックスペーサーを用いた時の支持位置と端面の変位の関係

例えば、図1は直方体のセラミックスペーサーを用いた時の支持位置 (図中赤色の▲で表示) と端面の軸方向の変位の関係を示している。端面上で中央から下に向かって8つの点の軸方向 (y 方向) の変位を有限要素法を用いて計算した。グラフ上で8つの線が交わる点は、Airy point と呼ばれ、8つの点の軸方向変位が同じ、すなわち両端面の平行が保たれることを意味する。ただし、図1の形状の光共振器スペーサーを用いた場合では、この Airy point において、共振器長の軸方向の変位は0ではない。高反射ミラーが傾くことは無いが、共振器長は変化するという事を示している。

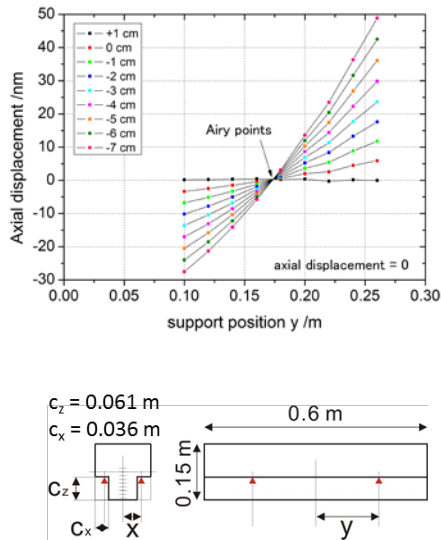


図 2 カットアウト型セラミックスペーサーを用いた時の支持位置と端面の変位の関係

図 2 は図 1 で計算した直方体のスペーサーの一部を切り取ったものである。この形状のスペーサーに対して、同様の計算をしてみると、Airy point において、軸方向の変位も 0 になる事が分かる。つまり、この形状であれば、ミラー面が傾かず、ミラー面の軸方向の変位も変わらないという条件を満たす支持点が存在する。

実際に、種々の形の光共振器に対する計算を行い、剛性に優れたセラミックを使用することで、共振器長が 60 cm 程度になろうとも、微小振動による影響は共振器長 10 cm のガラス製光共振器のそれと同程度に抑え込むことが可能となる事が分かった。

しかしながら、60 cm 以上の共振器長を持つ大型の超低熱膨張セラミック製光共振器スペーサーの作製において、仕様を満たす性能を担保することが技術的に難しい事が明らかになった。具体的には、厚みのある超低熱膨張セラミックを作製する際に、材料温度を均一に保ったまま焼結する事が極めて難しいために、超低熱膨張材料としての特性が著しく劣化するという問題がある。厚みを薄くしたセラミックを用いる設計においては、大型の光共振器を考えると剛性を保証することは大変難しく、ハニカムの様な複雑な構造とその作製に伴う経費を考慮した結果、ガラス製光共振器スペーサーに対する優位性を期待することは現時点では困難であるとの結論に達した。予算を考えるうえでも今後の課題である。

上述の結論を踏まえ、もう一つの選択肢として考えていた、光共振器の部材の機械的 Q 値を大きくする手法によって熱雑音の低減を目指した。

4. 研究成果

従来の ULE ガラス製光共振器を用いた既存のシステムにおける光周波数標準の短期周波数安定度が何によって制限されているかを、複数の狭線幅レーザーと比較することで見積もった。平均時間に対するアラン偏差を図 3 に示す。この図の中で、点線は、理論計算で得られた熱雑音による周波数安定度の限界を示している。

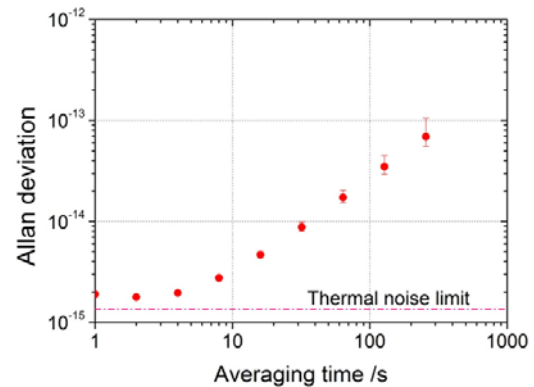


図 3 短期周波数安定度の見積もり。短期の周波数安定度は光共振器の熱雑音で制限されている。一方、長期の周波数安定度は、光共振器の経年変化によるものである。

評価の結果、既存のシステムにおいては、短期の周波数安定度は、積算時間 4 秒以下の領域において、 1×10^{-15} 程度である事が明らかになった。これは、理論計算から導かれる光共振器の熱雑音によって制限される周波数安定度と一致する。したがって、我々のシステムにおいて、熱雑音の影響を低減することさえ出来れば、周波数安定度の大幅な改善が期待できることが確認できた。

セラミックスペーサーを用いた大型の光共振器の作製は技術的な困難があり、予算の面からも現実的ではないことが明らかになったため、半導体薄膜を用いた光共振器の作製を推進した。これは、光共振器の熱雑音の最も大きな原因となっている反射膜の機械的 Q 値を上げるために、従来、高反射膜として用いられてきた誘電体多層膜ではなく、半導体薄膜を用いるものである。(1. 研究開始当初の背景 ②の中で示した②の手法) ULE ガラスのスペーサー (長さ 12 cm 太さ 6 cm) の両端に半導体薄膜を溶融石英にオプティカルコンタクトしたミラーを装着した光共振器を用いる事で、この光共振器の熱雑音によって制限される周波数安定度は、 1.2×10^{-16} 程度となり、既存の光共振器による周波数安定度の 1/10 以下であることが明らかになった。(図 4)。

この光共振器および温度調整のための恒真真空槽を開発した。この光共振器のスペーサーはULEガラスであるが、鏡の基材が熔融石英であるために、光共振器全体として熱膨張係数が0になる温度は室温よりかなり低くなることが予想される。室温より低い温度においても光共振器の温度調整が可能になるようにペルチェ素子を用いて真空槽を冷却する温度調整システムを製作した。

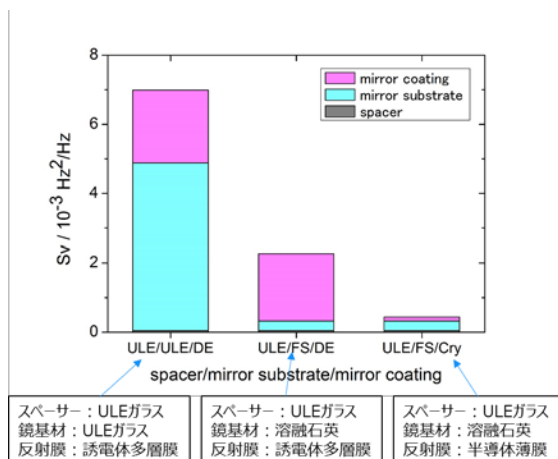


図4 様々な光共振器における熱雑音のパワースペクトル密度

今後、この半導体薄膜を用いた新しい光共振器にレーザーを安定化することで、 1.2×10^{-16} 程度の短期周波数安定度が実現できると期待される。

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 0 件)

[学会発表] (計 3 件)

- ① Daisuke Akamatsu, Takumi Kobayashi, Masami Yasuda, Hajime Inaba, Takehiko Tanabe, Sho Okubo, Atsushi Onae, Feng-Lei Hong, and Kazumoto Hosaka, “A dual optical lattice clock driven by clock lasers stabilized to a narrow linewidth comb”, IFCS-EFTF 2015 (Colorado Convention Center, Denver, USA).
- ② Takehiko Tanabe, Daisuke Akamatsu, Takumi Kobayashi, Akifumi Takamizawa, Shinya Yanagimachi, Takeshi Ikegami, Tomonari Suzuyama, Hajime Inaba, Sho Okubo, Masami Yasuda, Feng-Lei Hong, Atsushi Onae, and Kazumoto Hosaka, “Accurate frequency comparison of clocks

considering the effect of the distributed dead-time”, ATF 2015 (Changping Campus of National Institute of Metrology, Beijing, China).

- ③ Takehiko Tanabe, Daisuke Akamatsu, Takumi Kobayashi, Akifumi Takamizawa, Shinya Yanagimachi, Takeshi Ikegami, Tomonari Suzuyama, Hajime Inaba, Sho Okubo, Masami Yasuda, Feng-Lei Hong, Atsushi Onae, and Kazumoto Hosaka, “Precise frequency comparison of clocks considering the dead time uncertainty of frequency link”, EFTF2016 (Univ. York, York, UK).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

保坂一元 (Hosaka, Kazumoto)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・研究グループ長
研究者番号： 50462859

(2) 研究分担者

稲場 肇 (Inaba, Hajime)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・研究グループ長
研究者番号： 70356492

(3) 研究分担者

大久保 章 (Okubo, Sho)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・主任研究員
研究者番号： 30635800