

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26246038

研究課題名(和文)全冷却方式超高安定マイクロ波発振器の開発

研究課題名(英文)Development of an all cryogenic ultra-stable microwave oscillator

研究代表者

池上 健 (Ikegami, Takeshi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・上級主任研究員

研究者番号：60356417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,080,000円

研究成果の概要(和文)：パルス管冷凍機と振動抑制型クライオスタットを用いた電氣的冷却方式の低温サファイア発振器を開発した。3つの低温サファイア発振器を相互に比較することで、3コーナートット法により、個々の発振器の周波数安定度を分離して評価することに成功した。アラン偏差で評価された周波数安定度は1秒から1日の平均時間にわたって 2×10^{-15} 乗より優れていた。開発された電氣的冷却方式サファイア発振器は原子泉方式一次周波数標準器に適用され、量子射影雑音で制限される周波数安定度を実現した。電氣的冷却方式サファイア発振器は位相や周波数のロックが外れることなく、連続的に年の単位で動作することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：Three sets of cryogenic sapphire-resonator oscillators (CSOs), have been developed to operate using cryo-refrigerators and low-vibration cryostats. The Allan deviation was evaluated through the three-cornered hat method, and was better than 2×10^{-15} for averaging times of 1 s to 1 day. Autonomous and continuous operation over a year without any frequency unlocking became possible. The first CSO is now used with our cesium atomic fountain frequency standard, which has achieved a nearly quantum-projection-noise-limited frequency stability of 8×10^{-14} at 1 second.

研究分野：一次周波数標準器とその周辺技術の開発

キーワード：低温サファイア発振器 マイクロ波発振器 セシウム一次周波数標準器 原子時計

1. 研究開始当初の背景

(1)時間の単位である「秒」を実現する、セシウム一次周波数標準器の不確かさは10年1桁で向上し現在は 10^{-15} より小さくなっている。一方、近年の光時計の精度向上も著しく、このため、秒の再定義も視野に入るようになってきた。

(2)世界の時刻の基準となる国際原子時の精度向上を図るためには、一次周波数標準器自体の精度向上に加え、時刻比較精度の向上や、一次周波数標準器の周波数安定度に見合う安定な局部発振器が必要であるが、後者において現在主に使われてい水素メーザーでは性能が不足しつつある。

(3)低温サファイア発振器 (Cryogenic Sapphire Oscillator, 以下、CSO) は短期周波数安定度に優れたマイクロ波発振器であるが、結晶を冷却する液体ヘリウム(He)の蒸発を補うため、数週間に1回の定期的な液体ヘリウムの補充が必要であり、補充の際に周波数や位相の飛びが発生する。

(4)この位相の飛びは、時刻を維持するためには大きな問題となる。

2. 研究の目的

本研究においては、現在の秒の定義を実現する原子泉方式一次周波数標準器や次世代の光時計に対応できる優れた短期安定度を有し、また、国際原子時のための局所時系を維持できるように、位相や周波数の飛びを発生することなく年のオーダーで連続運転が可能な安定なマイクロ波局部発振器を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

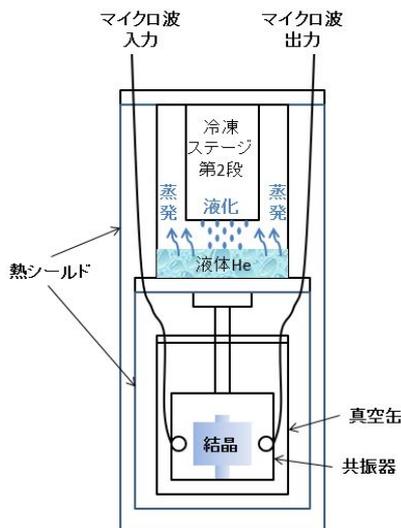


図1. 冷凍機と振動抑制クライオスタット

定期的な補充が必要となる液体 He による冷却の代わりに、図1に示す、低振動パルス管冷凍機と振動抑制型クライオスタットを採用し、電気的な冷却により結晶を7Kの温度に冷却する。冷凍機のステージは動作気体である He ガスの圧力変化により振動が発生

するため、ガスから生成された液体 He により液体 He を溜める部分を設け、溜めの下部に接続された結晶を冷却することにより、ステージの振動を抑制する。He ガスから液体 He が生成された後は、He ガスの供給を停止しても蒸発した He ガスが冷凍機で再液化されるため、He ガスはそれ以上消費されない。

冷却されたサファイア結晶の共振モードである Whispering Gallery Mode を利用して 11GHz のバンドパスフィルターとし、周波数弁別器として用い、この出力を増幅して自身に帰還することにより発振器を構成する。サファイア結晶は低温になるほど電気的な損失が減少し、7K 付近においては Q 値は 10^9 に達するため、極めて安定な発振器を実現できる。以下ではこの発振器を「冷凍機で冷却された低温サファイア発振器」の意味で「Cryocooler-cooled Cryogenic Sapphire Oscillator」と呼び、cryoCSO と略記する。

開発された cryoCSO の 11GHz から、セシウムの遷移周波数 9.2GHz を合成し、これを局部発振器として一次周波数標準器に適用して量子射影雑音で決まる信号対雑音比を達成する。また、一次周波数標準器として必要な年にわたる長期運転が可能であることを確認する。

4. 研究成果

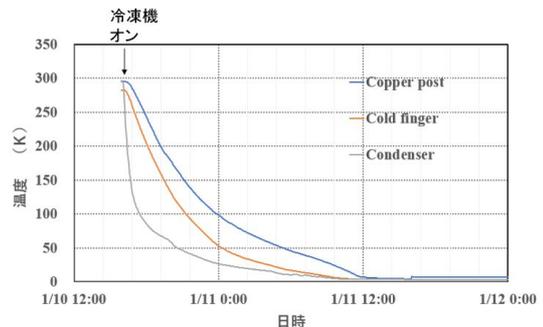


図2 結晶の冷却曲線

図2に冷凍機による結晶の冷却曲線を示す。常温からの冷却で、約1日で目的の7Kに到達した。

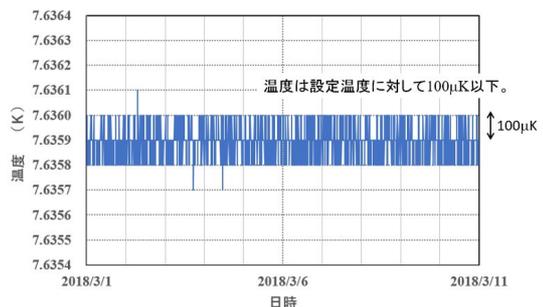


図3 温度安定度

図3に液体 He 溜めと真空管を結ぶ、電熱の銅パイプ (Copper Post) の温度制御点の

温度の時間変化を示す。温度は5分おきに測定されたもので、温度制御装置の測定の分解能である100 μ K以下に収まっている。

cryoCSOの発振周波数は、結晶の屈折率を n 、行路長を L としたときに、結晶中のマイクロ波の実効的な行路長 nL により決まるが、結晶に含まれる不純物のために nL が温度に関して極値を持つ点(ターニングポイント)が10K以下の温度に存在する。この温度に結晶温度を制御して発振器を動作させることで、温度依存性が極めて小さく、従って、周波数安定度が優れた発振器を構成することが出来る。図4に2台のcryoCSOのビート周波数を比較することにより決定したターニングポイントを示す。

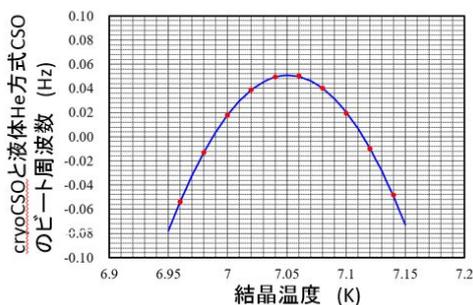


図4 決定されたターニングポイント温度

このようにして、既存の1台の含め、本プロジェクトで合計3台のcryoCSOを開発した。2台の発振器のみではそれらの相対的な周波数安定度しか測定できないが、3台の発振器を利用すると「3コーナーハット法」と呼ばれる手法により、3台のそれぞれの周波数安定度を分離して測定することが可能となる。図5はそのようにして測定された3台のcryoCSOのそれぞれのアラン偏差で表された周波数安定度を示す。周波数のドリフトはあらかじめ計算で除いてある。

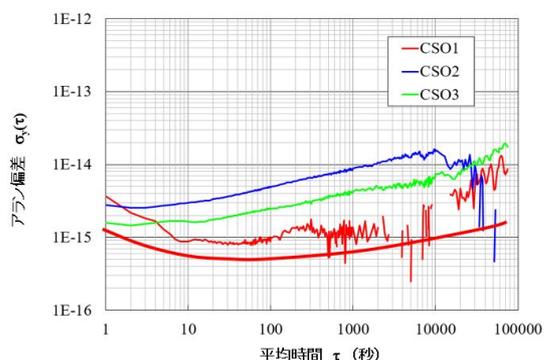


図5 3コーナーハット法で評価された3台のCSOの周波数と最適化されたcryoCSO1の周波数安定度

特に最も安定度の良かったcryoCSO1の制御パラメーターを最適化した周波数安定度の推定値を赤の実線で示した。この値のみは

周波数ドリフト込みの値である。

1秒から10000秒にわたる平均時間において、アラン偏差で表された周波数安定度として、 1×10^{-15} より優れた値を得ること出来た。また、開発されたcryoCSOを連続運転することで、年にわたって位相の飛びがなく安定な動作を達成した。

開発されたcryoCSOはインフラとして整備され、原子泉方式一次周波数標準器のための局部発振器として組み込まれ、量子射影雑音で制限される信号対雑音比を実現することが出来た。

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5件)すべて査読有り

[1] T. Ikegami, K. Watabe, S. Yanagimachi, A. Takamizawa, and J.G. Hartnett, "Autonomous cryogenic sapphire oscillators employing low vibration pulse-tube cryocoolers at NMIJ," J. Phys. Conference Series, vol. 723, no. conference 1, p. 012032, 2016, DOI: 10.1088/1742-6596/723/1/012032

[2] T. Tanabe, D. Akamatsu, T. Kobayashi, A. Takamizawa, S. Yanagimachi, T. Ikegami, T. Suzuyama, H. Inaba, S. Okubo, M. Yasuda, F. Hong, A. Onae, and K. Hosaka, "Improved Frequency Measurement of the 1S0-3P0 Clock Transition in 87Sr Using a Cs Fountain Clock as a Transfer Oscillator," J. Phys. Soc. Jpn., vol. 84, no. 9, p. 115002, Oct. 2015, DOI: 10.7566/JPSJ.84.115002

[3] 池上 健, 低温サファイア結晶を用いた超高安定マイクロ波発振器 - 地上で最も安定な発振器を目指して -, 低温工学, 50巻6号 322 ページ, 2015年6月, DOI: 10.2221/jcsj.50.322

[4] A. Takamizawa, S. Yanagimachi, T. Tanabe, K. Hagimoto, I. Hirano, K. Watabe, T. Ikegami, and J.G. Hartnett, "Preliminary Evaluation of the Cesium Fountain Primary Frequency Standard NMIJ-F2," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 64, no. 9, p. 2504, Apr. 2015, DOI: 10.1109/TIM.2015.2415015

[5] A. Takamizawa, S. Yanagimachi, T. Tanabe, K. Hagimoto, I. Hirano, K. Watabe, T. Ikegami, and J.G. Hartnett, "Atomic fountain clock with very high frequency stability employing a pulse-tube-cryocooled sapphire oscillator," IEEE Trans. Ultrasonics Ferroelectr. Freq. Meas., vol. 61, no. 9, p. 1463, Sep. 2014, DOI: 10.1109/TUFFC.2014.3060

[学会発表](計8件)

[1] 池上 健, 渡部 謙一, 柳町 真也, 高見澤 昭文, 萩本 憲, ハートネット ジョン, 電氣的冷却方式による低温サファイア発振器の特性, 2018年3月17日, 第65回応用物理学会 春季学術講演会, 早稲田大

[2] 池上 健, 渡部 謙一, 柳町 真也, 高見澤 昭文, 平野 育, 萩本 憲, ハートネット ジョン, 2台の電氣的冷却方式低温サファイア発振器間の周波数安定度測定, 2016年3月19日, 第63回応用物理学会 春季学術講演会, 東工大

[3] A. Takamizawa, S. Yanagimachi, K. Hagimoto, I. Hirano, K. Watabe, T. Ikegami, and J.G. Hartnett, Toward the full evaluation of the cesium fountain NMIJ-F2, 8th Symposium on Frequency Standards and Metrology, Potsdam, Germany, Oct 12, 2015

[4] T. Ikegami, K. Watabe, S. Yanagimachi, A. Takamizawa, and J.G. Hartnett, Development of cryogenic sapphire oscillators using cryocoolers at NMIJ, 8th Symposium on Frequency Standards and Metrology, Potsdam, Germany, Oct 12, 2015

[5] 池上 健, 渡部 謙一, 柳町 真也, 平野 育, 萩本 憲, 高見澤 昭文, ハートネット ジョン, 振動抑制冷凍機を用いた低温サファイア発振器の周波数安定度の評価, 2015年3月14日, 第62回応用物理学会 春季学術講演会, 東海大

[6] 高見澤 昭文, 柳町 真也, 萩本 憲, 平野 育, 渡部 謙一, 池上 健, ハートネット ジョン, セシウム原子泉一次周波数標準器 NMIJ-F2 の開発, 2015年3月24日, 日本物理学会年次大会, 早稲田大

[7] 高見澤 昭文, 柳町 真也, 田邊健彦, 萩本 憲, 平野 育, 渡部 謙一, 池上 健, ハートネット ジョン, 冷凍機方式低温サファイア発振器を用いた高い周波数安定度を有する原子泉時計, 2014年9月17日, 第75回応用物理学会 秋季学術講演会, 北海道大

[8] A. Takamizawa, S. Yanagimachi, T. Tanabe, K. Hagimoto, I. Hirano, K. Watabe, T. Ikegami, and J.G. Hartnett, Development of the Cesium Fountain Frequency Standard, NMIJ-F2, European Frequency and Time Forum, Neuchatel, Switzerland, Jun 25, 2014

〔図書〕(計1件)

[1] 池上 健, 渡部 謙一, 正確な時間と周波数を生成するセシウム原子時計の基礎と実際、そして次世代の光時計へ 「わかる! 原子時計のしくみ」, RFワールド(トランジスタ技術 2016年5月号増刊), 34号 65ページ, 2016年4月

〔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

池上 健 (IKEGAMI, Takeshi)

産業技術総合研究所・物理計測標準研究部門・上級主任研究員

研究者番号: 60356417

(2) 研究分担者

渡部 謙一 (WATABE, Ken-ichi)

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: 50358389

柳町 真也 (TANAGIMACHI, Shinya)

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: 70358216

高見澤 昭文 (TAKAMIZAWA, Akifumi)

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: 50462833

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

ハートネット ジョン (HARTNETT, John)

豪州アデレード大学