

## 論文審査の結果の要旨

氏名 牛場 崇文

本論文は、光格子時計の性能向上を目的として、極低温のシリコン光共振器を用いてレーザーの周波数の安定化をはかり、1秒程度の時間スケールにおいて、極低温光共振器を用いた周波数安定化レーザーとしては最も高い周波数安定度を実現するとともに、周波数安定度を定める種々の雑音を定量的に評価することにより、得られた周波数安定度が共振器に及ぼす加速度の影響によって制限されることを明らかにした。

本論文は英文で全6章から構成されている。第1章は研究の背景および目的、第2章は周波数安定化の原理および周波数安定化において問題となる雑音源に関して記している。第3章では第2章に記した雑音を低減するための本実験での装置設計および設計した装置のデザイン感度に関して述べている。第4章では構築した装置の性能評価および設計値との比較を行っている。第5章では第4章の結果から得られる周波数安定度の見積もりと周波数安定度の直接測定の結果の比較を行い、本研究の周波数安定化システムにおいて問題となる雑音に関する議論をしている。第6章には本研究の結果および今後の展望についてまとめている。

重力波検出器や光格子時計に代表される精密測定分野においては、レーザーの周波数安定度がそれらの性能を決める。特に世界最高水準の光格子時計では原子の遷移周波数を読み取るプローブレーザーの周波数安定度が時計の性能を制限していることが知られており、より高性能な時計を開発するためにはレーザーの周波数安定度の向上が必要である。

本研究ではより高性能な光格子時計を開発するために、レーザー周波数の安定化を行っている。光格子時計では原子の遷移周波数測定にかかる時間が1秒程度であるため、1秒付近のレーザー周波数の安定度がディック効果を介して時計の性能を制限する。1秒付近の周波数基準として現在最も安定なものは光共振器である。しかしながら、世界最高水準の光共振器に安定化されたレーザーの安定度は原理的な雑音の一つである光共振器の熱雑音レベルに到達している。したがって、レーザーの周波数安定度をより向上させるには光共振器の熱雑音を低減することが必要不可欠であり、長い光共振器や機械的 $Q$ 値の高いコーティングを用いた共振器とともに、極低温化した共振器による周波数の安定化が試みられている。

しかしながら、光共振器を極低温まで冷却するためには冷凍機を用いる必要があり、これが振動や温度揺らぎなどの新たな雑音をもたらすため、現在のところ、極低温の光共振器を用いた周波数安定化レーザーの安定度は、常温のレーザーのそれよりも劣る結果が報告されている。また、極低温の光共振器の周波数安定化において、これまで熱雑音や温度揺らぎなどの熱的な性質についての議論のみが行われており、周波数安定度を制限する理由については十分には明らかにされてこなかった。

そこで、本論文では、まず、極低温で動作する光共振器を用いた周波数安定化レーザーの開発を進めた。高い温度安定性と静寂な環境を実現するため、ヘリウムガスの凝縮を利用したパルスチューブ冷凍機、および高い温度安定性を確保するためにガラス球を用いた多段のスタック構造を採用した。さらに、地面振動や冷凍機の振動が光共振器に伝わらないように受動防振と能動防振を組み合わせた防振装置を用いるとともに、ドップラー雑音除去やレーザーの強度安定化などの雑音低減措置も講じている。

また、実現した周波数安定化レーザーの周波数安定度について、光格子時計の性能向上のために重要な1秒程度の時間スケールでの周波数安定度に着目して評価を行い、 $\sigma_y = 7.03^{+0.38}_{-0.34} \times 10^{-15}$ のアラン標準偏差を得た。この標準偏差の値は、構築されたレーザーが、極低温の光共振器を用いた周波数安定化レーザーとして、1秒程度の時間スケールでは、最も安定であることを示している。さらに、地面振動や温度揺らぎなどの雑音の寄与を定量的に調べることにより、得られた周波数安定度が共振器に加わる加速度の影響によって制限されていることを明らかにした。

以上、本論文では、1秒程度の時間スケールにおいて、極低温の光共振器を用いた周波数安定化レーザーとしては最も高い安定度を実現した。さらに、極低温環境での光共振器の雑音を定量的に評価するとともに、従来明確に示されていなかった、周波数安定度を制限する要因を明らかにすることにより、今後の周波数安定化に対して具体的な指針も与えており、物理学特にレーザー物理学に貢献するところ大である。

なお、本論文の第3章から第5章の内容は、麻生洋一氏、大前宣昭氏、正田亜八香氏、香取秀俊氏との共同研究であるが、実験装置の構築、装置の評価、周波数安定度の見積もり、実験結果の解析に関しては論文提出者が主体となっており、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。