

論文審査の結果の要旨

氏名 堀 輝人

レーザー干渉計を用いた精密計測は、産業、学術を問わず、さまざまな分野で応用されている。その一つとして、地球計測分野における、地球の地殻変動・潮汐、および地震波由来の水平加速度検出への応用がある。東京大学地震研究所ではこのようなトレードオフを打開すべくドリフトの小さいボアホール傾斜計の開発を目指し、検出器としてレーザー干渉計(マイケルソン干渉計)を採用している。この傾斜計は将来的に海底での地殻変動観測に用いる予定であり、その際校正や保守が極めて不便であることを考えると、光源には小型、低消費電力、長寿命、周波数の長期安定性などの特長を持ったレーザーを使用する必要性が生じてくる。そこで、海底での観測用の光源として、現在地上観測用いられている He-Ne レーザーよりもはるかに低消費電力である半導体レーザー(LD)を使用することが検討されている。ただし、LD は小型、低消費電力、長寿命という長所がある一方、He-Ne レーザーと比べて線幅が非常に広く、安定度が低い(一般的な線幅は、He-Ne が数十 kHz であるのに対し、LD では数 MHz~数十 MHz)。そのため、精度の良い計測を行うためには周波数安定化が必要である。

本研究の目的は、このレーザー傾斜計の光源となる絶対波長(周波数)が安定化された LD 光源の開発である。本研究において最も重要な点は、『実用的で実装に耐えうる種々の特性(小型、低消費電力、長寿命、長期周波数安定性、機械的振動に対する耐久性)を十分に備えた』安定化レーザー光源の開発、という点であり、トータルを考慮した実用的なシステム作りという重要な動機および要求が根底にある。

今回の装置では、LD には線幅の狭い(1MHz 程度) Distributed Bragg Reflector(DBR)タイプのもを用い、低消費電力という要請を満たすため、強誘電性液晶シャッターを安定化に必要な光変調器に選んだ。また、絶対値の安定性が得られる原子の吸収線を基準にする安定化法を用いた。本研究で用いた DBR-LD の波長は 852 nm であるので、原子(参照物質)としてはその波長付近に吸収線が存在する Cs(セシウム)を用いた。これも、本研究の目的の一つである低消費電力という条件から選んだ。

安定化は飽和吸収分光法の一つである Modulation Transfer method(MT 法)を用いて行い、pump 光に強度変調と周波数変調を同時にかけて S/N の良い吸収信号(MT 信号,Cs-D2 線の超微細構造)とその微分信号を得ている。この微分信号を servo 回路へ通して feedback 信号とし、LD の phase control region に負帰還させてやることにより、周波数安定化を行った。また、LD 自体はペルチエ素子で温度制御している。

本研究で開発すべき装置では、消費電力を犠牲にして周波数安定度のみを稼いだり、絶対安定度が得られないような手法で安定化を行ったりという事は避けなければならない。また、その点に関しては光学素子や安定化の手法を慎重に選択することで対応を図った。その結果、最終的に小型・長寿命(数年以上)かつ低消費電力(従来の 10 分の 1 以下の 2W

以下)で、かつ観測に十分な長期周波数安定度を備えたレーザー光源システムを開発することに成功した。

また、新しい試みとして周波数安定化システムでは強度変調の復調を3倍波で行うことにより位相の改善を試み、S/Nの改善が実現した。また、光をセルに通過させることで生じる強度ノイズを取り除くために、復調を行う前に飽和吸収信号から線形ドップラー型吸収信号を差し引くテクニックを利用した。その効能を調べたところ、やはり十分なノイズ抑制効果があったと同時に、我々が特に必要な長期安定度の方でより大きく貢献していることが確認できた。

レーザーの周波数安定度は、光の周波数が高すぎるために直接測定することができないので、同じシステムで独立に安定化された2台のレーザーのビート周波数を測定することにより評価した。これにより、一般的に周波数安定度の比較に用いられているアラン分散と呼ばれる量を求め、定量的な比較・検討を行った。レーザー干渉計型の傾斜計で地殻変動を観測するには、絶対値で 10^{-8} の安定度が必要であるので、これが本研究の一つの目標となる。本研究で我々が開発したシステムも最終的にアラン分散により評価したが、その結果、測定した領域全域(Gate Time 0.01 s ~ 5000 s)において 10^{-8} よりもよい周波数安定度であることが分かった。周波数安定化を行っていないフリーランの状態では、実験により Gate Time 300 s 以上の長期安定度が 10^{-8} より悪い値であることが分かったため、本研究による絶対周波数安定化の重要性を確認できた。

以上のように、本研究で長期の field use に耐えうる実用的な周波数安定化システムを構築することに成功した。実装に必須である性能(小型・低消費電力・長寿命・耐久性)は、慎重な素子・装置選びをしたことによって十分に備わり(消費電力は従来の10分の1)、また、その制限の中で最大限の周波数安定度を得られるようさまざまな工夫を施した結果、実用上の要求値を十分上回る高精度な安定化システムを開発することに成功した(長周期側で周波数安定度は10 kHz 程度までに到達した)。

また、本論文の研究内容は、東京大学地震研究所との共同研究であるが、本人の寄与が極めて大きいことが認められた。したがって、博士(科学)の学位を授与できるものと認める。