

学位論文題名

チャンネルスペクトルの高分解能レーザ分光に基づく
長さ測定法の研究

学位論文内容の要旨

光波長を基準尺度とするレーザ干渉測長法は、各種の先端科学計測・工学生産技術分野における重要な基盤的技術の一つである。現在行われている干渉測長法の基本的原理は固定された光波長もしくは合成波長との直接的な比較に基づいているが、その精度、分解能は第一に光波長もしくは合成波長の精度、第二に干渉次数の端数部測定の精度で制限される。

一方、干渉現象をスペクトル領域で扱うと、干渉計は入力光のスペクトルを光路差で一意に定まる周期を持つスペクトル、すなわちチャンネルスペクトルに変換する作用を持つため、動的、静的のいずれの場合でも長さの測定はチャンネル隣接次数間の周波数間隔の測定へと単純化される。ただしチャンネルスペクトルの測定に多色光を用いても、分光器の持つ低い波長測定精度、波長分解能のために次数間隔を精密に知ることはできず、さらには明瞭に分離して測定できる最小チャンネル間隔もまた分光器の分解能で決まるため、測定可能な長さの範囲についても大きな制約を受けることは明らかである。

そこでレーザの単色光をプローブ光として干渉計に入力し、その周波数を走査すると、原子・分子の吸収スペクトルの高分解能分光測定と同様に、分光器では分解できないチャンネルスペクトルの微細な構造を精密に決定することが可能となり、長さ測定のダイナミックレンジと精度は大きく改善される。このときチャンネル次数間の周波数間隔を正確に求めるには、入力されたレーザ光の周波数変化量や周波数絶対値の精密な測定が不可欠であるが、ラジオ波領域では容易な周波数の測定も、光領域では非常に困難なものとなる。

本論文は長さ、周波数の標準に対してトレーサブルな基準スペクトルを生成し、これらとの比較を行ってチャンネル次数間隔を正確に測定する研究について述べたもので、以下のような8章から構成されている。

第1章は序論で、本論文に関係する技術分野の背景、および本論文の目的と意義について総括的に記述している。

第2章では、本研究の全ての実験を通じて光源に使用されている半導体レーザの基本的構造・発振特性、およびその駆動システムについて記述している。

第3章では、半導体レーザの周波数走査により得られるチャンネルスペクトルのパワースペクトル中心周波数と周波数走査速度値の関係から長さを決定する方法について検討を行い、このうち従来から困難とされている周波数走査速度の高精度測定を実現する方法として、物体長さ標準から転写された基準チャンネルスペクトルを参照する手法を提案している。

これに加え、本方法の測定分解能に影響を及ぼすもう一つの技術的障害である、半導体レーザの直接変調入力に対する周波数変調応答の非線形性の問題を、自動制御系による変調電流波形の実時間補正を行って解決できることを明らかにしている。

第4章では、周波数軸上から切り出されるチャンネルスペクトルの周波数幅を精密に決定するための新しい方法として、周波数絶対値が既に判明している原子吸収線プロファイルの利用を提案している。また、吸収線中心位置の精密な特定に必要なとされる吸収線微分波形を数値計算で再生する新たな方法を考案し、これにより高速でしかも高精度な長さ測定を実現できることを明らかにしている。

第5章では、第3章で述べた方法の精度改善を図ることを目的として、従来型の端面発光型半導体レーザに比べ周波数可変性の点で格段に優れている面発光型半導体レーザを干渉測長用光源として初めて利用し、1THzにおよぶ周波数幅で取得されたチャンネルスペクトル波形から光波長レベルの精度で長さ絶対値を測定できることを示している。

第6章では半導体レーザで特に顕著に現れる多様な光帰還誘起効果に着目し、そのうち面発光型半導体レーザに特有な自己偏光変調効果を利用して、その光パルス発生の周波数値から長さを測定する方法について述べている。パルス周波数はチャンネル次数間の周波数間隔の1/2に一致しており、これを直接計数法で測定することは長さを光が伝搬する時間をレシプロカルに測定することに等しく、次章で述べる方法の布石となる。

第7章で提案する方法は、周波数標準レーザとの直接周波数比較によりチャンネルの中心周波数絶対値の測定を行うとともに、遠隔した2つのチャンネル間の次数間隔をも決定して、測定長さを光が伝搬する時間を精密に決定するというものである。したがって本方法において長さは特定の光波長との比較ではなく、光速度と時間の積として、つまり現在の長さの定義に従って決定されることになる。このときレーザ光は光クロックとして利用されており、チャンネル中心周波数にレーザ周波数が自動同調されていれば、長さの絶対値のみならず長さの時間的变化についても光周波数変化として正確に知ることが可能であることを明らかにしている。

第8章は本研究の総括であり、各章においてそれぞれ得られた工学的に有用な結論、問題点および今後の課題等について記述している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 大 場 良 次

副 査 教 授 馬 場 直 志

副 査 教 授 山 下 幹 雄

学 位 論 文 題 名

チャンネルスペクトルの高分解能レーザ分光に基づく 長さ測定法の研究

干渉測長は高精度測定法の代表的なもので、各種の先端科学計測および工業生産技術分野における重要な基盤的技術の一つである。従来の干渉測長の基本原理は、固定された光波長もしくは合成波長と被測定長との干渉計による直接的な比較に基づいており、その精度と分解能はこの固定された光波長もしくは合成波長の精度と干渉次数の端数部測定の精度で制限されている。一方干渉計では、その光路長を一定とするとき干渉光のスペクトルが光波長により一意に定まるから、干渉計は、入射光のスペクトルを、光路差により決まる共振波長間隔 (FSR) を周期とする周期的なスペクトル、すなわちチャンネルスペクトルに変換する作用を有する。従って、隣接チャンネル間の周波数間隔を測定してFSRを正確に決定することによっても干渉測長が実現できる。しかし、多色光と分光器を用いる通常のチャンネルスペクトル測定法では、分光器の精度、分解能の限界により、隣接チャンネル次数間隔の周波数を十分な精度で知ることができない。そこで著者は、チャンネルスペクトル測定による干渉測長法におけるダイナミックレンジと精度を飛躍的に向上させることを目的に研究を行っている。

本論文は、長さおよび周波数の標準に対してトレーサブルな基準スペクトルを生成し、それとの比較によりチャンネル次数間隔を高精度で測定して共振波長間隔を正確に決定することにより、干渉測長の精度を飛躍的に向上させることを目的に著者が行った研究について述べたもので、8章から構成されている。

第1章は序論で、本論文に関係する技術分野の背景、および本論文の目的と意義について述べている。

第2章では、本研究を通して使用される半導体レーザの基本的構造、発振特性、およびその駆動システムについて述べている。

第3章では、干渉測長用光源の半導体レーザの周波数を一定速度で走査するとき得られる

干渉光強度変化をスペクトル解析し、そのピークの中心周波数と周波数走査速度の関係から長さを決定する方法の検討を行い、走査速度の測定精度と半導体レーザの周波数変調の非直線性特性が重要であることを明らかにしている。そして、従来困難とされた走査速度の高精度測定を実現するために、基準チャンネルスペクトルを参照する新しい手法を提案している。また、半導体レーザ周波数変調の非直線性特性の影響を軽減するために、変調電流波形を、自動制御系により実時間で補正することにより解決する、新しい方法を提案している。

第4章では、原子吸収線プロファイルを利用してチャンネルスペクトルの周波数幅を精密に決定する新しい方法を提案している。さらに、吸収線中心位置の精密な特定に必要とされる吸収線微分波形を数値計算で再生する新たな方法を考案し、これにより高速でしかも高精度な長さ測定が実現できることを明らかにしている。

第5章では、第3章で述べた方法の精度をより一層向上させるために、周波数走査幅の広い面発光型半導体レーザを初めて干渉測長用光源として利用し、周波数走査幅 1THz で取得されたチャンネルスペクトルを用いる事により、さらに高精度な測長ができることを実証している。

第6章では、面発光型半導体レーザに特有な自己偏光変調効果を利用して、その光パルス発生の周波数値から長さを測定する新しい方法について述べている。

第7章では、干渉測長用光源レーザの周波数を周波数標準レーザ周波数と直接比較して、チャンネルの中心周波数絶対値の測定を行うと共に遠隔した2つのチャンネル間の次数間隔を決定することにより、被測定長さ間の光伝搬時間を精密に決定する新しい方法を提案している。本方法では、被測定長が長さの定義、すなわち、光速度と時間の積に則して決定される。この方法によれば、静的長さのみならず、その時間的变化についても光周波数変化として知られることを明らかにしている。

第8章は本論文の総括であり、各章においてそれぞれ得られた工学的に有用な結論、問題点および今後の課題等について記述している。

これを要するに本論文は、長さおよび周波数の標準に対してトレーサブルな基準スペクトルを生成し、それとの比較によりチャンネル次数間隔を正確に測定することにより、干渉測長の精度を飛躍的に向上させることを目的に著者が行った研究によって得られた新知見について述べたもので、光応用計測、応用物理学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。