

エルビウム添加光ファイバレーザの周波数安定化と マイクロ波周波数へのリンクに関する研究

学位論文内容の要旨

周波数（時間）はもっとも正確に決めることのできる物理量である。時刻の決定はもちろんのこと、多くの電子機器では周波数を利用した制御が随所で行われており、今後ますます安定で正確な周波数が必要になると予想される。一方、長さ標準や光通信で必要とされる光の周波数は極めて高く、その周波数の決定や制御には、電気信号として扱えるマイクロ波領域の周波数とのリンク技術が必要である。その困難さから、現状ではいくつかの安定化レーザが光周波数領域における二次標準として認められている。

本研究の対象は、高品質な安定化レーザとして光周波数を実現するためのエルビウム添加光ファイバレーザを安定化する技術および、フェムト秒モードロックレーザを用いてそれら安定化レーザの光周波数を計測、またはマイクロ波周波数に変換する技術に関するものである。

具体的な安定化レーザとして代表的なものに、波長 633 nm よう素安定化 He-Ne レーザ、波長 532 nm よう素安定化 Nd:YAG レーザ、および波長 1.5 μm アセチレン安定化半導体レーザがある。その中で、波長 1.5 μm は線幅が太く、短期安定度の面で不利な半導体レーザが光源として用いられている。本研究の対象であるエルビウム添加光ファイバレーザは波長 1.5 μm 帯の光源であり、出力や発振スペクトル線幅から極めて有望なレーザである。しかしその反面、単一周波数発振やモードホップフリーと言った安定化レーザに必要な要件を満たしていないという難点がある。本研究では、このレーザの長所に着目し、短所を克服して、半導体レーザに代わる短期安定度の優れた安定化レーザのための光源を開発した。

また、安定化レーザを、定義に基づいた長さ標準または光周波数標準として利用するためには、光とマイクロ波周波数をコヒーレントにつなぎ、光周波数を計測、あるいはマイクロ波周波数に変換する技術が必要である。光周波数は 200 - 700 THz という極めて高い周波数であり、現在、直接電氣的に周波数カウンタで計測できる数 10 GHz とは大きな隔りがある。20 世紀末に、フェムト秒モードロックレーザとフォトニック結晶ファイバを用いて発生させることのできる「光周波数コム」が出現し、光とマイクロ波周波数のリンク技術が現実的なものとなった。光周波数コムとは周波数軸上で櫛のようにモードが並んだもので、その間隔がきわめて一様であるため、光周波数のものさしとして利用することができる。この技術により、定義に基づいた長さの実現がこれまでより容易になり、光周波数領域で周波数標準を実現する「光周波数標準」も現実味を帯びてきた。本研究では、光周波数コムを用いた光とマイクロ波周波数の

リンク技術を利用して、光周波数計測を行うとともに、光周波数標準時代の到来に備えた光周波数分周のための位相雑音の評価を行い、さらに光周波数合成技術について研究を行った。

本論文は3つの章で構成されている。以下にその概要を述べる。

第1章では、本研究の背景や歴史的経緯について、時間標準と長さ標準について述べた後、安定化レーザについて述べる。そして、時間標準と長さ標準をつなぐ、光とマイクロ波周波数のリンク技術について述べる。

第2章では、発振スペクトル線幅の極めて細いエルビウム添加光ファイバレーザを、安定化レーザとして利用するための研究について述べる。まず、エルビウム添加光ファイバレーザの動作原理と、他のレーザと比べてどのような性質を持っているか説明し、本章で最も大きなブレイクスルーである、超狭帯域ファイバブラッググレーティングによる単一周波数発振について説明する。そして、単一周波数発振と同時に観察された二偏波モード発振についての意味を理解し、それをセンシングに応用できることを示す。さらに、当該レーザをアセチレン分子の吸収線に安定化すべく、レーザ周波数の微調及び粗調を可能にする方法を開発した。それを用いたアセチレン分子の線形吸収の観察について述べる。最後に今後の課題と方針について述べる。

第3章では、光周波数コムを用いた光とマイクロ波周波数のリンクに関して述べる。まず、光周波数計測の歴史的経緯について述べた後、光周波数コムを用いた光周波数計測について概観する。次に、当所で保有する波長 532 nm よう素安定化 Nd:YAG レーザと波長 780 nm ルビジウム安定化半導体レーザの光周波数計測について述べる。次に、光周波数コムを用いた光周波数計測システムにおいて、どの部分が安定度の制限要因になっているか調べる。光周波数領域ではキャリア周波数が高く、周波数雑音の評価で十分だが、マイクロ波領域ではキャリア周波数が低く、周波数雑音の評価では感度が十分ではない。そこで位相雑音による評価を行った。その概要と実際の測定法について説明するとともに、実際に光周波数計測システムの各要素を評価する。一方、光周波数コムはそれ自体光周波数シンセサイザと呼べるものであるが、光周波数コムから実際に単一周波数を抜き出して使うことは難しい。そこで、単一周波数かつ、極めて広い発振可能領域を持つ光パラメトリック発振器を局部発振光源として導入し、その発振周波数を光コムに位相同期させた。その方法と結果について説明する。また、今後の課題と方針についても述べる。

第4章では本研究の結論を述べる。

最後に、本研究で新たに明らかになった、もしくは新たに実現した結果のうち主なものは以下の通りである。(1)エルビウム添加光ファイバレーザを帯域 6 GHz 程度のファイバブラッググレーティングを用いて単一周波数発振させた。また、そのモード競合はエルビウムの不均一広がり均一広がりとの組み合わせにより起こるというモデルで現象を矛盾無く説明した。(2)エルビウム添加光ファイバレーザを用い、アセチレン分子の吸収線を観察した。(3)光パラメトリック発振器をフェムト秒モードロックレーザとフォトニック結晶ファイバにより発生する光周波数コムの1周波数に位相同期させ、光周波数シンセサイザを実現した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 馬 場 直 志

副 査 教 授 大 場 良 次

副 査 教 授 山 下 幹 雄

学 位 論 文 題 名

エルビウム添加光ファイバレーザの周波数安定化と マイクロ波周波数へのリンクに関する研究

物理量の中で、周波数（時間）は最も正確に決めることができる。時刻の決定はもちろんのこと、多くの電子機器では周波数を利用した制御が随所で行われており、今後ますます安定で正確な周波数が必要となる。一方、長さ標準や光通信で必要とされる光の周波数は極めて高く、その周波数の決定や制御には、電気信号として扱えるマイクロ波領域の周波数とのリンク技術が必須である。しかし、その困難さから、現状ではいくつかの安定化レーザが光周波数領域における二次標準として認められているにすぎない。

本論文では、高品質な安定化レーザとして光周波数を実現するためのエルビウム添加光ファイバレーザを安定化する技術、および、フェムト秒モードロックレーザを用いてそれら安定化レーザの光周波数を計測またはマイクロ波周波数に変換する技術に関し研究し、これらの研究成果について述べている。

代表的な安定化レーザとして、波長 633 nm 沃素安定化 He-Ne レーザ、波長 532 nm 沃素安定化 Nd:YAG レーザ、および波長 1.5 μm アセチレン安定化半導体レーザがある。これらの中で、波長 1.5 μm は線幅が太く、短期安定度の面で不利な半導体レーザが光源として用いられている。本研究の対象であるエルビウム添加光ファイバレーザは波長 1.5 μm 帯の光源であり、出力や発振スペクトル線幅から極めて有望なレーザである。しかし、その反面、単一周波数発振やモードホップフリーというような安定化レーザの要件を満たしていないという短所がある。本研究では、このレーザの長所に着目し、短所を克服して、半導体レーザに代わる短期安定度の優れた安定化レーザのための光源を開発している。

安定化レーザを、定義に基づいた長さ標準または光周波数標準として利用するためには、光とマイクロ波周波数をコヒーレントにつなぎ、光周波数を計測、あるいはマイクロ波周波数に変換する技術が必要である。光周波数は 200 - 700 THz という極めて高い周波数であり、現在、直接電氣的に周波数カウンタで計測できる数 10 GHz とは大きな隔たりがある。20 世紀末に、フェムト秒モードロックレーザとフォトニック結晶ファイバを用いて発生させることのできる「光周波数コム」が出現し、光とマイクロ波周波数のリンク技術が現実的となった。光周波数コムとは周波数軸上で櫛のようにモードが並んだことで、その間隔がきわめて一様であるため、光周波数の物差しとして利用することができる。この技術により、定義に基づいた長さ測定がこれまでより容易になり、光周波数領域で周波数標準を実現する「光周波数標準」も現実味を帯びてきた。本研究では、光周波数コムを用いた光

とマイクロ波周波数のリンク技術を利用して光周波数計測を行うとともに、光周波数標準時代の到来に備えた光周波数分周のための位相雑音の評価を行い、さらに光周波数合成技術の開発を行っている。

本論文は3つの章で構成されている。

第1章では、本研究の背景や歴史的経緯について、時間標準と長さ標準に関し概述した後、安定化レーザについて述べている。そして、時間標準と長さ標準をつなぐ、光とマイクロ波周波数のリンク技術について述べている。

第2章では、発振スペクトル線幅の極めて狭いエルビウム添加光ファイバレーザを、安定化レーザとして利用するための研究について述べている。まず、エルビウム添加光ファイバレーザの動作原理と、他のレーザと比べてどのような性質を持っているかを説明した後、大きなブレイクスルーとなった、超狭帯域ファイバブラッググレーティングによる単一周波数発振について説明している。そして、単一周波数発振と同時に観察された二偏波モード発振について考察し、それをセンシングに応用できることが示されている。さらに、当該レーザをアセチレン分子の吸収線に安定化すべく、レーザ周波数の微調及び粗調を可能にする方法を開発している。これを用いたアセチレン分子の線形吸収の観察について述べ、今後の課題と方針についても触れている。

第3章では、光周波数コムを用いた光とマイクロ波周波数のリンクに関して述べている。まず、光周波数計測の歴史的経緯について概観した後、光周波数コムを用いた光周波数計測について述べている。次に、産総研で保有する波長 532 nm 沃素安定化 Nd:YAG レーザと波長 780 nm ルビジウム安定化半導体レーザの光周波数計測について述べている。そして、光周波数コムを用いた光周波数計測システムにおいて、どの部分が安定度の制限要因になっているか調べている。光周波数領域ではキャリア周波数が高いため、周波数雑音の評価で十分であるが、マイクロ波領域ではキャリア周波数が低く、周波数雑音の評価では感度が十分ではない。このために、位相雑音による評価を行っている。その要点と実際の測定法について説明するとともに、実際に光周波数計測システムの各要素を評価している。一方、光周波数コムはそれ自体光周波数シンセサイザと呼べるものであるが、光周波数コムから実際に単一周波数を抜き出して使うことは難しい。このため、単一周波数かつ、極めて広い発振可能領域を持つ光パラメトリック発振器を局部発振光源として導入し、その発振周波数を光コムに位相同期させている。その方法と結果について説明している。また、今後の課題と方針についても述べてある。

第4章は本研究の結論となっている。

これを要するに、著者はエルビウム添加光ファイバレーザを帯域 6 GHz 程度のファイバブラッググレーティングを用いて単一周波数発振させ、当該レーザを用いてアセチレン分子の吸収線を観察し、さらに光パラメトリック発振器をフェムト秒モードロックレーザとフォトニック結晶ファイバにより発生する光周波数コムの1周波数に位相同期させて光周波数シンセサイザを実現した。本研究によって得た知見は量子エレクトロニクス、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。