

審査の結果の要旨

氏名 姚 雨 果

本論文は、”Performance Improvement and Dynamic Grating Detection in Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry with Introducing Lock-in Detection Scheme”（ロックイン検出法の導入によるブリルアン光相関領域リフレクトメトリでの性能向上とダイナミックグレーティングの測定）と題し、英文で書かれていて、5章よりなる。

第1章は Introduction であり、本研究の背景と構成が述べられる。光ファイバならびに半導体レーザ等のフォトニクスデバイス技術の展開により、光ファイバセンシング技術が提案・開発されてきた。本論文は、光ファイバ中で生じるブリルアン散乱の周波数シフト量がこれに加わる歪や温度に対して線形に変化する現象を活用し、光ファイバに沿う物理量の分布を測定する分布型光ファイバセンシングに関する研究成果を述べている。種々の分布量センシング技術から、分布型センシング技術でありながら光ファイバに沿う任意の多点で動的センシングが可能な「ランダムアクセス性」や、「高空間分解能」等に特徴を有する光相関領域法に関する研究が展開される。光相関領域法では、1.6mmの空間分解能や5,000点/秒の高速ランダムアクセスも実現されてきた。本論文では、自然ブリルアン散乱を利用し光ファイバの片端から光を入射させるだけで分布量センシングを可能にする「ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ法」(BOCDR法)の感度向上を図るとともに、ブリルアンダイナミックグレーティング(BDG)からの反射測定も可能にするために、ロックイン検出法を導入したBOCDRシステムを提案して、研究を展開している。

第2章は Proposal of Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry with Lock-in Detection Scheme と題し、BOCDR法の測定感度の向上を目的に、本システムにロックイン検出法を導入するシステム構成を提案した。従来のBOCDR法では、光ファイバへの入射光に対して逆方向に戻る自然ブリルアン散乱と参照光を干渉させ、ブリルアン周波数シフト量を受光器出力が示すビート周波数として捉える。光源の周波数を周期関数で変調することにより、光ファイバに沿うある位置(相関ピーク位置)でのブリルアン散乱スペクトラム(BGS)が位置選択的に測定でき、そのピーク周波数としてブリルアン周波数シフト(BFS)が得られ、温度ないし歪の分布測定が実現される。これまでは、このスペクトラムは電気スペクトラムアナライザ(ESA)によって測定されてきた。この手法は比較的簡便ではあるが、測定感度や測定速度の向上を図る為には最適ではない。そこで、本研究では、種々のESA機能の中から周波数掃引機能は活用するものの、スペクトラム平均機能等の感度向上手法は利用せず、代わってESA出力をロックイン検出器に導入して、感度向上を図りつつ測定速度の低下を抑え得る手法を提案した。なお、上記の周波数掃引機能はESAを使わなくても構成でき、本提案は、基本的にシステム構成を簡素化する技術でもある。

本研究では、まず提案システムの実験系を構築した。ロックイン検出の為に必要な信号光への変調手法としては、参照光への強度変調のみではなく、参照光に位相変調を施してこれをロックイン周波数でオン・オフするという変調手法も導入した。まず、光強度変調によるロックイン検出実験で安定したBGSを得ることに成功して、本提案手法の有効性を示した。光相関領域法では、相関ピーク位置の前後で幅の広い山形の背景光雑音スペクトラムが生じる。BOCDR法では、参照光に位相変調を加えて相関ピーク位置でのスペクトラムを除去した測定結果と通常の測定結果との差から、上記の背景光雑音スペクトラムを除去する手法が提案されていた。この手法では、2回の測定が必須であり、両測定間でシステム特性に変化が生じると誤差になる、という問題を有していた。本論文では、ロックイン検出の為に参照光への変調に上記の位相変調法を導入することで、1回の測定で位相変調法の機能を実現しつつその問題点を解決するBOCDRも実現できた。この変調法についても、実験によりその有効性を示すことに成功している。さらに、周波数掃引を電氣的に行うのではなく、光領域で行うシステムも構築した。そして、本掃引を参照光で行うよりブリルアン信号を発生させるポンプ光で行う方が、取得されるスペクトラムに重畳する雑音が低減できることを見出した。これは、光増幅器が発生する雑音や光分岐器等の光デバイスの特性のためであると考えられる。提案した光周波数掃引法により、雑音の少ないブリルアンスペク

トラムの取得実験にも成功している。

第3章は、Improvement of Spatial Resolution with Widening Frequency Modulation Amplitude in Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry with Lock-in Detection Scheme と題する。BOCDR法の空間分解能は、光源に与える周波数変調の振幅に反比例する。一方で、光ファイバからは自然ブリルアン散乱光よりも強度の大きいレーリー散乱光も後方に発生する。したがって、変調振幅がBFSの半分より大きくなると、ブリルアン散乱光がレーリー散乱光に覆われて見えなくなる。この値は5.4GHzであり、これがBOCDR法の空間分解能限界を与えてきた。本研究では、変調振幅をさらに大きくしてもブリルアン散乱スペクトラムが測定できて、位置選択的測定つまりBOCDR機能も維持できる手法を提案・実現した。本提案では、周波数変調振幅を5.4GHzより大きくするとともに、遮断特性が急峻な光フィルタを導入してレーリー散乱光は遮断する。ブリルアン散乱光にも大振幅の周波数変調が与えられているが、光フィルタによってその一部は遮断され、残りが受光器に到達する。一方で、参照光は全てが受光器に到達する。相関ピーク位置では両光は常に一定の周波数差(BFS)を示し、その他の位置では周波数差は大きく変化する。つまり、本研究では提案システムに於いても位置選択的測定が可能であると考えた。実験系を構築してスペクトラム測定を実施し、レーリー散乱の影響を排除しつつ5.4GHzより大きな周波数変調振幅に相当する高い空間分解能を得ることに成功した。また、本研究では上記の位相変調によるロックイン検出用変調を施しており、位相変調法の効果として周波数変調振幅から計算される空間分解能の理論値よりも高い空間分解能の実現にも成功した。

第4章は Distributed Measurement of Brillouin Dynamic Grating Reflection in Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometry と題する。偏波維持光ファイバ中ではふたつの直交直線偏波が、それぞれ独立して伝搬できる。x偏波軸に平行な直線偏波光により、BFSだけ異なる光周波数のふたつの光波を光ファイバ中で対向伝搬させると誘導ブリルアン散乱が発生する。このとき、音響フォノンによる超音波が誘起されて、その波長を周期とする屈折率回折格子が生じる。超音波は縦波であるので、上記の屈折率回折格子はy直線偏波光も反射させ得る条件が存在する。所謂ブラッグ反射条件であるが、偏波維持光ファイバが有する複屈折性により、この条件を満たす光周波数はx偏波光とy偏波光とで約40GHz異なる。この現象を Brillouin Dynamic Grating Reflection (BDG) と呼び、BOCDR系ではまだその反射光は観察されていなかった。BOCDR法のような自然ブリルアン散乱光を測定するシステムでBDGによる反射を観察するには、入射ポンプ光を少し強くして自己誘導を起こす必要がある。これが大きすぎるとポンプ光が光ファイバに沿って急峻に減少し、小さすぎると反射光が微少となる。そこで、本研究では前章までに提案・開発してきたロックイン検出法を導入したBOCDRシステムを基盤にしてBDGの分布測定に挑んだ。BOCDRシステムにより位置選択的にBDGスペクトラムを測定できるシステム構成法を提案してその実験系を構築した。まず、光ファイバ全長にわたるBDG反射測定に成功した。つづいて、BOCDR原理により位置選択測定も行った。信号のSN比は大きく減少したが、ロックイン検出法によりBDGスペクトラムの測定を実現できた。さらに、光源のFM変調周波数を変化させてBDG反射スペクトラムの分布測定を試み、データの取得を行った。しかし、現状では、ポンプ光の急峻な減少やBOCDR原理による相関ピーク位置前後での背景光雑音の影響により、本分布測定にはなお検討課題が残っている。

第5章は Conclusions であり、本論文を纏めている。

以上、本論文ではブリルアン光相関領域リフレクトメトリ法の測定感度向上のためにロックイン検出機能を実装したシステムを提案し、その原理検証実験に成功したのに続き、ロックイン検出用の参照光への変調を位相変調で行うことで背景光雑音スペクトラムを効率的に除去する手法も実現した。レーリー散乱とブリルアン散乱がスペクトラム上で重なることを避けるために制限されていた光源への周波数変調の振幅を拡大できる手法も提案し、分解能の向上を実現した。上記ロックイン検出技術を含むシステムを基盤に、微弱なブリルアンダイナミックグレーティングの反射光を測定するシステムも提案して、BOCDR機能による位置選択測定条件下で本グレーティングからの反射光観測にも成功した。このように、本研究は電気電子工学、特にフォトニクスへの貢献が少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。