

審査の結果の要旨

氏名 鄒 衛文

本論文は、Characterization of Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fibers – Study on Discrimination of Strain and Temperature in Fiber Optic Nerve Systems (光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱の特性評価—光ファイバ神経網における歪と温度の分離測定の見直し—) と題し、英文で書かれた 10 章より構成されており、光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱 (SBS) を用いた分布型光ファイバセンシングシステムにおける歪と温度の分離測定を目的として、SBS を理論と実験の両面で深く検討し、複数のブリルアンスペクトルピークを利用した歪と温度の分離測定に最適化された光ファイバ構造を提案・検討するとともに、偏波維持光ファイバの SBS 特性を利用した新たな分離測定手法も提案・実証している。

第 1 章は序論である。ここでは、まず光ファイバセンシング技術、特に分布型光ファイバセンシング技術を概観している。次に、SBS を用いた分布型光ファイバセンシング技術の現状を説明した後、歪と温度の分離測定における問題点を提起し、本研究の目的が述べられている。最後に本論文の構成を示して、各章の概略を説明している。

第 2 章では、光波と音響波の波動方程式から、光波と音響波の相互作用が解析され、2次元有限要素法 (2D-FEM) を用いて、任意断面形状と任意断面屈折率分布を有する光ファイバのブリルアン利得スペクトル (BGS) を精密に解析できるモード解析法を提案している。この手法を用いて、シングルモードファイバ (SMF) と偏波維持ファイバ (PMF) の BGS を解析し、その結果と第 3 章で述べられた実験系を用いた測定結果が良く一致することから、この解析法の有効性と正確さを証明している。

第 3 章では、BGS およびブリルアン周波数シフト (BFS) の歪と温度への依存性を精密に測定するシステムを構築し、シングルサイドバンド変調器 (SSBM) の導入やプローブ強度の最適化などの工夫によって、0.05~0.10MHz の BFS 測定精度を達成した結果が述べられている。

第 4 章では、第 2 章と第 3 章に述べた理論解析と測定手法を用いて、光ファイバ線引き工程において異なる張力を受けた光ファイバの BGS を検討し、光ファイバ中の残留弾性応力と歪および非弾性歪から BFS への影響を示したのと同時に、前述のモード解析と実験的測定の有効性をさらに実証している。

第 5 章では、W 型 3 層屈折率分布を有する F 素添加光ファイバ (F-HDF) の BGS および BFS の歪と温度の依存性の実験的測定とモード解析を行い、ファイバコアに添加された Ge の影響を受ける基底音響波モードと F 素添加層にある F 素の影響を受けた高次音響波モードを併用すれば、歪と温度の分離測定が期待できると予想した。この概念に基づいて、一つの高次音響波モードを、それによる SBS の強度を維持しながら、F 素層に大きく入れるようなファイバ最適化構造を設計・提案している。

第 6 章と第 7 章では、Ge 添加と F 素添加それぞれによる BFS の歪と温度への依存性を検討している。BFS の歪と温度の依存性は主に石英材料のヤング率の非線形性によるとい

うメカニズムを解明し、Ge 添加はこの非線形性を減少し、F 素添加はこの非線形性を増大することを理論と実験の両面で示し、第 5 章に提案された歪と温度の分離測定のための最適化光ファイバ構造の合理性を証明している。さらに、線引き張力も BFS の歪と温度の依存性の差に影響し、歪と温度の分離測定のための最適化ファイバ構造にもう 1 つの自由度として利用できることも示している。また、歪と温度の分離測定に直接関連していないものの、F 素添加ファイバ中の SBS について検討した結果から、光通信用ファイバにおいて F 素添加を用いて SBS を抑えるという広く検討されている手法は無効であることを明らかにした。

第 8 章では、PMF においてポンプとプローブ光による誘導ブリルアン散乱発生時に形成されるダイナミック音響波グレーティングの検討と精密測定を行った。PMF の 2 つの偏波主軸のいずれかに沿った偏波を有するポンプとプローブにより発生した音響波は、直交する偏波で作られるそれと同一の分布を有することを、第 2 章の解析で示している。この事実により、x 偏波のポンプとプローブで発生した音響波は、PMF の複屈折率で決められた周波数差を持つ y 偏波の光を回折するグレーティングとして作用することが分る。測定系の精密化によって、約 3×10^{-8} の複屈折率に相当する 4MHz の光周波数差を測定できることが実証されている。

第 9 章では、第 8 章で検討したダイナミック音響波グレーティングに関して、y 偏波回折光周波数と x 偏波ポンプ光周波数差の歪と温度への依存性、ならびに第 3-7 章で検討した BFS の歪と温度への依存性を併用した新たな分離測定手法を提案している。直交偏波間の回折光周波数差を決める PMF の複屈折率が示す歪と温度への依存性は、BFS のそれと大きく異なる挙動を示す。BFS は歪の増大でも温度の増大でも減少するのに対し、複屈折率は歪の増大では増加するものの、温度の増大では減少する。従って、新たに提案した手法により、高精度な分離測定が期待できる。実験では、 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ の歪精度と $0.02 \sim 0.03^\circ\text{C}$ の温度精度を実証している。

第 10 章は結論であり、本研究の成果をまとめるとともに、今後の課題を展望している。

以上要するに、本論文は、光ファイバ中の誘導ブリルアン散乱 (SBS) のモード解析法ならびに精密測定手法を提案・開発し、それらを用いて光ファイバの成分および構造と SBS の歪と温度への依存性の関係を明らかにした上で、複数の音響波モードを利用した歪と温度の分離測定に最適化した光ファイバの構造を提案した。さらに偏波維持ファイバにおけるブリルアン散乱特性を利用した新たな分離測定手法も提案・実証し、この手法によれば従来技術では不可能な高精度な分離測定が実現できることを示したものであって、電子工学、特にフォトニクスの発展に大きな貢献を果たしている。

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。