

	よしだ まさと	
氏 名	吉 田 真 人	
授 与 学 位	博士 (工学)	
学 位 授 与 年 月 日	平成 13 年 3 月 26 日	
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学位規則第 4 条第 1 項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻	
学 位 論 文 題 目	周波数シフト帰還型ファイバレーザの動作機構とその応用に関する研究	
指 導 教 官	東北大学教授 伊藤 弘昌	
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 伊藤 弘昌	東北大学教授 宮城 光信
	東北大学教授 水野 皓司	東北大学教授 内田 龍男
	東北大学助教授 谷内 哲夫	東北大学客員教授 中沢 正隆

論 文 内 容 要 旨

近年、レーザ光源は情報通信、計測、医療などといったさまざまな領域で応用されているが、レーザ発振器に必要な制御を行うことで新機能を発現させることは新たな応用を切り開く上でも重要である。本論文は、共振器内で周波数シフトした光を帰還するレーザ（周波数シフト帰還型レーザ）の光計測への応用展開を図ることを目的とし、レーザ媒質にエルビウム添加光ファイバ（EDF）を用いた周波数シフト帰還型（FSF）ファイバレーザの研究を行ったのもで、全文 6 章より成る。

第 1 章では、FSF レーザの研究経緯について述べている。FSF レーザは、1980 年代後半にその動作機構の解明が行われるようになった研究の歴史の新しいレーザであり、現在でも動作機構に未解明な点が残されたレーザである。筆者の属する研究グループでは、1994 年にレーザ媒質として Nd:YVO₄ 固体結晶を用いた全固体型 FSF レーザの研究に着手し、FSF レーザの動作機構の大部分を解明するとともに、レーザの光計測用光源としての有効性を初めて実証した。ここで全固体型 FSF レーザの設計の指針は、レーザの動作機構の解明が容易である装置構成とすることにあつたため、その光計測用光源としての実用化を図る際に不利な点があつた。そこで本研究では、FSF レーザの光計測用光源としての有効性を向上することを目的とし、レーザ媒質として新たに EDF を用いた FSF ファイバレーザの研究に着手した。また、FSF レーザの動作機構に関するより詳細な解明を行うことも研究の目的とした。

第 2 章では、本研究で初めて実現した FSF ファイバレーザの設計および構成について述べている。図 1 にレーザの装置構成を示す。レーザ媒質である EDF の励起用光源として $1.48 \mu\text{m}$ 帯半導体レーザ ($1.48 \mu\text{m}$ LD : 最大励起電力 67 mW) を用いており、波長分割用の光結合器 (Wavelength Division Multiplexing Coupler : WDM)、EDF、光アイソレータ (Optical Isolator)、10 %出力光カップラ (Output Coupler)、偏波制御素子 (Polarization Controller) からなるリング型共振器内に、周波数シフト素子として AOM を挿入した装置構成である。AOM で周波数シフトを受けた 1 次回折光をレーザ媒質に帰還することで周波数シフト帰還型動作を実現した。ここで AOM の挿入損失を低減するために、AOM と光ファイバの結合には、本研究で設計・作製したコリメータ (Collimator) を使用した。本レーザの特徴としては、1) 共振器内の光波が周回毎に一定量の周波数シフトを受けるため、レーザ出力光は線形性の高い周波数チャープ光からなる、2) レーザ媒質の利得波長帯が光通信波長 $1.55 \mu\text{m}$ 帯にあるため、光ファイバ中におけるレーザ出力光の長距離伝送が可能であり、光ファイバ伝送路を用いた光計測应用到に有利である、3) レーザ媒質の利得帯域が広いと、レーザ出力光に広い周波数チャープ幅が得られる、4) レーザの装置構成が容易であるなどが挙げられる。さらに第 5 章では、強度変調器 (LN-Intensity modulator) を用いてレーザ出力光の各縦モード間の位相関係を同期させ、FSF ファイバレーザの光計測用光源としての性能の向上を図った。

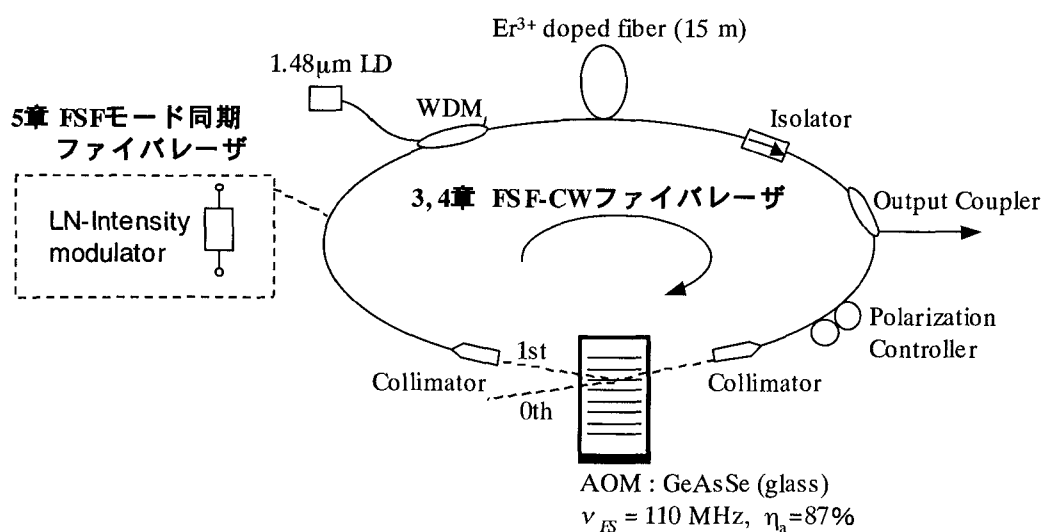


図 1 FSF ファイバレーザの装置構成

第3章では、FSF ファイバレーザの動作特性を解明した結果を述べている。マイケルソン干渉計を用いた自己遅延ヘテロダイン検波実験などにより、1)レーザ出力が周波数チャープする複数の周波数成分からなり、2)その周波数チャープ幅は約 100 GHz と広く、3)発振の中心波長は AOM の駆動周波数により電子的に同調が可能であることを明らかにした。このレーザの発振スペクトル特性を図2に模式的に示す。また、周波数シフト帰還型ファイバレーザが光計測用光源として有効であることを示すために、長尺の遅延ファイバを用いて光周波数領域リフレクトメトリ法による距離計測実験を行った。数 10 km の長距離を 1 cm 以下の高分解能で計測が可能であることを示すとともに、光ファイバのもつ群速度分散がレーザ出力光の光ファイバ中における光伝搬特性に与える影響について新たな知見を得た。

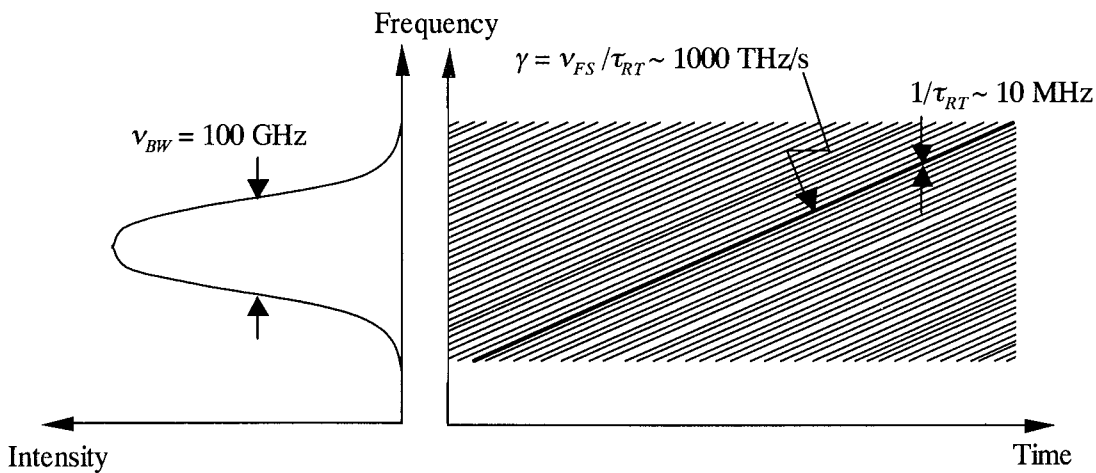


図2 FSF ファイバレーザの発振スペクトル特性

第4章では、第3章で得られた光伝搬特性に基づいて展開した、光ファイバの群速度分散（GVD）および偏波モード分散測定（PMD）への応用について述べている。今日の IT 時代において、光通信システムの超高速化・大容量化に関する研究が盛んに行われているが、伝送容量を制限する要因として光伝送路である光ファイバのもつ GVD および PMD があり、その分散の制御・管理が重要となっている。ここで GVD は光伝搬速度の波長依存性であり、光ファイバの材質や構造によって決まる固有の分散である。PMD は光ファイバ内の複屈折率による光伝搬速度の偏波状態依存性であり、光ファイバのコア形状が完全な円形でないことや外部からの応力により生ずる、時間に対しランダムな分散である。この問題の解決のために、GVD および PMD を高精度に測定する技術が要求されている。図3に本研究で提案

した各分散測定装置を模式的に示す。GVD 測定では、被測定ファイバ伝搬後における計測用光源（周波数チャープ光）の周波数チャープ率が、光ファイバのもつ GVD の総分散量に比例して変化する関係を用いた。PMD 測定では、計測用光源として偏光方向が直交する 2 つの周波数チャープ光を使用し、各光波（偏光モード）間のヘテロダイン検波信号のビート周波数が PMD に比例する関係を用いた。本分散測定装置の特徴としては、1)従来方式のような複数の波長光による計測を必要としないため、短時間測定が可能であり、2)測定に光リフレクトメトリ法の適用が可能であるため、光伝送路の入力端側に全測定装置を配置できることなどが挙げられる。FSF ファイバレーザを光源とした分散測定装置を構成し、提案した測定法の原理を実証することに成功した。表 1 に各分散測定装置の特徴をまとめている。

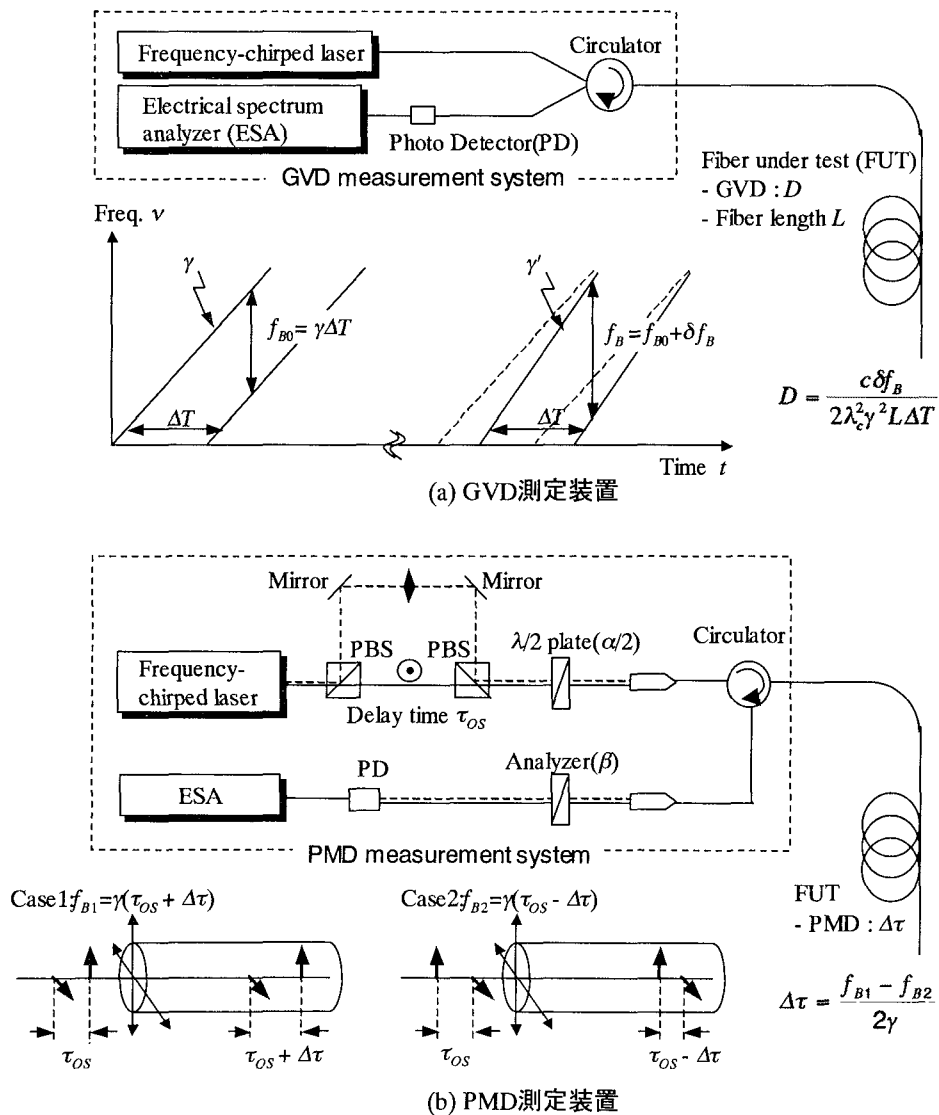


図3 周波数チャープ光を用いた光ファイバの分散測定装置の構成

表1 FSF ファイバレーザを光源とした光ファイバの分散測定装置の特徴

	GVD 測定装置	PMD 測定装置
測定対象	光検波信号のビート周波数	
光検出系の配置	光リフレクトメトリ法の適用により、光ファイバ入射端側に配置可	
測定時間	リアルタイム計測が可能	数分 (測定アルゴリズムにより改善可)
計測可能な距離	~ 30 km	~ 20 km
測定精度	~ 0.1 ps/nm/km 程度	モード結合なし：~ 0.02 ps モード結合あり：検討中

第5章では、レーザに強制モード同期技術を導入したFSFモード同期ファイバレーザの研究成果について述べている。本モード同期レーザは筆者が初めて取り組んだ新規のレーザであることより、特にレーザの動作特性の解明に研究の重点を置いた。レーザ出力光の検波信号の時間波形とRFスペクトル波形の観測、回折格子型分光器による発振スペクトルの観測およびSHG強度相関法を用いた自己相関波形の観測より、レーザ出力はフーリエ変換限界パルスであることを明らかにし、通常モード同期ファイバレーザと同様な方法により、FSFレーザ出力光の各縦モード間の位相関係を同期できることを確認した。また、マイケルソン干渉計を用いた自己遅延ヘテロダイン検波実験により、1)レーザ出力光の各縦モードは同一の割合で周波数チャープすること、2)検波信号のS/N比が約30 dB向上すること、3)ビート信号のスペクトル線幅が大幅に狭まることを確認した。モード同期法の導入により光計測可能な距離および測定分解能を大幅に改善できることを示し、モード同期の有効性を実証することに成功した。さらに、自己遅延ヘテロダイン検波特性の観測結果を基に、レーザの動作機構に関する考察を行った。FSFレーザの動作機構を解明する上で自己遅延ヘテロダイン検波信号の時間波形の情報は有力な手掛かりとなるが、モード同期によりその時間波形の雑音を除去することで、時間波形の特徴を観測することに初めて成功した。ここで得られた知見をもとに、レーザ出力光の瞬時周波数が時間に対し離散的に変化することを明らかにした。

第6章では、第2章から第5章にわたる本論文の成果を総括するとともに、FSFファイバレーザの研究課題や将来展望についてまとめている。

論文審査結果の要旨

レーザー光源は情報通信、計測、医療などさまざまな領域での応用が成されているが、レーザー発振器自体に新機能を発現させるような制御を行うことは、さらなる展開をはかる上で重要である。本論文は、共振器内で周波数シフトした光を帰還するレーザー（周波数シフト帰還型レーザー）の光計測への新しい応用展開を図ることを目的とし、レーザー媒質にエルビウム添加光ファイバを用いた周波数シフト帰還型ファイバレーザーの研究を行った成果をまとめたもので、全文6章より成る。

第1章は総論である。

第2章では、本研究で初めて実現した周波数シフト帰還型ファイバレーザーの設計および構成について述べている。

第3章では、周波数シフト帰還型ファイバレーザーの発振特性の実験的解明を行っている。マイケルソン干渉計を用いた自己遅延ヘテロダイン検波実験などにより、(1)レーザー出力が周波数チャープする複数の周波数成分からなり、(2)その周波数チャープ幅は約100 GHzと広く、(3)発振の中心波長はAOMの駆動周波数により電子的に同調が可能であることを明らかにしている。また、周波数シフト帰還型ファイバレーザーが光計測用光源として有効であることを示すために、長尺の遅延ファイバを用いて光周波数領域リフレクトメトリ法による距離計測実験を行っている。数10 kmの長距離を数mmオーダーの高分解能で計測が可能であることを示すとともに、周波数チャープ光の光ファイバ中における光伝搬特性について有用な知見を得ている。

第4章では、第3章で得られた光伝搬特性に基づき、周波数チャープ光を光源とした光ファイバの群速度分散および偏波モード分散測定法を提案し、その実証実験を行っている。本分散測定法は、(1)従来方式のような複数の波長光による計測を必要としないため、短時間測定が可能であり、(2)測定に光リフレクトメトリ法の適用が可能であるため、光伝送路の入力端側に全測定装置を配置することができるといった特徴を有している。また光ファイバの自動分散測定装置を周波数シフト帰還型ファイバレーザーを用いて試作し、提案した測定法の原理を実証している。これは重要な知見である。

第5章では、周波数シフト帰還型ファイバレーザーの光計測用光源としての性能をさらに向上するために、レーザーに強制モード同期技術を導入した周波数シフト帰還型モード同期ファイバレーザーを提案している。出力は、スペクトル時間波形がフーリエ関係にある理想的なもので、縦モード間の位相の同期が図られ、かつレーザー出力光の各縦モードが同一の割合で周波数チャープしていることを明らかにしている。このモード同期出力を用いると、自己遅延ヘテロダイン検波信号のS/N比は約30 dB向上し、またビート信号のスペクトル線幅が大幅に狭帯域化することを明らかにした。さらに、このヘテロダイン検波信号の時間波形の情報より、レーザー出力光の電界の位相項が時間に対し離散的に変化することを明らかにしている。モード同期の効果により時間波形の雑音を除去することにより、周波数シフト帰還型レーザーの動作機構の解明に有効な知見を得ることに成功している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、周波数シフト帰還型ファイバレーザーの動作機構の解明に取り組み、出力が周波数チャープコムであることを明らかにし、その特性を利用した光通信分野での光計測応用についての研究を行ったもので、量子電子工学および光通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。