

論文の内容の要旨

論文題目

光ファイバ増幅器を用いた 光スペクトル広帯域化技術に関する研究

氏名 小関 泰之

本研究では、光ファイバ増幅器中の非線形光学効果を用いたスペクトル広帯域化技術の理論解析及び実験実証を行った。従来、光ファイバの非線形光学効果を用いたスペクトル広帯域化技術は広く研究されてきた。それらは光通信技術にも応用され、多波長信号発生、波長変換、信号再生等の様々な機能が実現されている。しかしながら、従来の光ファイバを用いる場合にはスペクトルの平坦性や信号対雑音比等に改善の余地があると考えられている。

近年、光利得を有するファイバ（光ファイバ増幅器）中の非線形光学効果により、放物線形状を有する線形チャープパルスが形成されるという新しい現象が注目を集めている。この現象は光ファイバ中の光パルスの伝搬方程式である非線形シュレディンガー方程式(nonlinear Schrödinger equation, NLSE)における放物線形状自己相似(parabolic-shape self-similar, PSS)解を用いて表されることが報告されている。この放物線形状パルス（PSS パルス）はチャープ補償が容易であり、また、ファイバ中の非線形効果によるパルス品質劣化に対して高い耐性を有する。これらの特長から、PSS パルスはパルスエネルギーの高い超短パルス発生の分野において活発に研究がなされている。

これに対し、本論文では光ファイバ増幅器による PSS パルス発生をスペクトル広帯域化の手段として用いるとともに、それを光通信技術へ応用することを目指した。PSS パルスは線形チャープを有するから、PSS パルスのスペクトルは高い平坦性を有する。従って、従来の光利得を用いないファイバを用いた場合と比較してスペクトルが高品質化されることが期待される。但し、光通信で用いられるパルスは繰り返し周波数が高いためにパルスエネルギーが低く、十分な非線形光学効果を生じさせることが難しい。従って、従来の PSS パルス発生に用いられてきたファイバ増幅器のパラメータ等をそのまま適用することはできない。また、PSS パルスを発生させるための設計指針等も未だ明らかでない。これらの点を鑑み、本研究では光ファイバ増幅器による PSS パルスの発生を通じたスペクトル広帯域化技術を確立し、光通信へ適用するための指針を明らかにすることを目的とした。

本論文は全9章で構成される。以下に各章の概要を示す。

第2章では光ファイバ中のスペクトル広帯域化の基礎理論を述べた。2.3 節では、光カー効果に基づく自己位相変調効果(self-phase modulation, SPM)によって光パルスのスペクトルが広帯域化する現象において、スペクトルがパルス波形にどのように依存するかを説明した。特に、周波数チャープの折り返しによってスペクトルのリップルがよく説明できることと、線形チャープがリップルのないスペクトルを実現するために有効であることを示した。また、2.4 節において従来のスペクトル広帯域化方式について説明した。群速度分散(group velocity dispersion, GVD)と SPM の相互作用によりパルスが波形を変化させながらスペクトルを広帯域化していくことを示し、スペクトルの平坦性に改善の余地があることを指摘した。

第3章では、光ファイバ増幅器中で放物線パルスが形成される理論背景である放物線形状自己相似(parabolic-shape self-similar)解について論じた。3.2節では、光利得項を有する非線形シュレディンガー方程式(nonlinear Schrödinger equation, NLSE)における PSS 解を説明した。PSS 解は強度波形が放物線形状であり、チャープが線形である。また、伝搬に伴って振幅及び時間幅が指数的に増大する。さらに、PSS 解はファイバパラメータ及びパルスの初期エネルギーにのみ依存する漸近解である。このように PSS 解は様々な性質を有するが、その物理的な背景は未だ明らかでない。また、PSS 解は分散、非線形定数、利得、パルスエネルギーの4つのパラメータに依存するため、その性質を把握することが難しい。そこで3.3節では NLSE の規格化を通じて規格化 PSS 解を導出し、規格化 PSS 解が ξ という無次元パラメータのみに依存することを示した。3.4節では、PSS 解が ξ を増加させるにつれて線形チャープを蓄積する様子を、時間周波数分布を用いて示した。また、PSS 解が NLSE を満たすためには $\xi \gg 0$ である必要があることを示した。3.5節では PSS 解への漸近の様子を明らかにするため、線形チャープの放物線パルスの発展を解析的に調べ、SPM と GVD の相互作用によって時間幅及び周波数チャープが振動的に収束していくことを示した。これらを通じて、光ファイバ増幅器中のパルス伝搬の理解を深めた。

第4章では、規格化した PSS 解を用い、PSS パルス発生システムの設計を行った。4.2節ではアドホックな数値計算を通じてファイバ増幅器の設計を行った。その結果、長尺・低分散・高非線形ファイバ増幅器を用いることにより、パルスエネルギーの低い通信用パルスから帯域幅 2 THz (16 nm)程度の PSS パルスの発生が可能であることを示した。4.3節では、更なる広帯域化に向けた指針を示し、ファイバに対しては分散値低減、高非線形化、短尺化が、入力パルスに対してはパルス幅縮小及び高エネルギー化が有効であることを示した。4.4節では、理想的な PSS パルスを得るための入力パルスを逆伝搬法により求め、スペクトルの歪がなく非常に高いリニアチャープ性を有する PSS パルスがチャープフリーガウシアンパルスから発生可能であることを示した。これらの結果を通じて、PSS パルスを用いてスペクトルを広帯域化するための指針を明確にした。

第5章では、前章で得られた設計指針に基づき、長尺エルビウム添加ファイバを試作し、スペクトル広帯域化実験を行った。5.2節では 1 km 長のエルビウム添加ファイバに低繰り返し周波数のパルスを入力し、10 dB 帯域幅として 34 nm を有する平坦性の高い広帯域スペクトルの発生に成功した。5.3節では高繰り返し周波数を有するパルスからのスペクトル広帯域化を目指し、分散値を低減したファイバ増幅器を使用してスペクトル広帯域化実験を行った。その結果、繰り返し周波数 10 GHz のパルスから 18 nm の 10 dB 帯域を有する広帯域スペクトルの発生に成功した。また、スペクトルの非対称性がエルビウム添加ファイバの利得分散に起因すること、中心波長におけるリップルがサテライトパルスとの干渉によるものであることを見出し、これらを解決した。このようにして、長尺エルビウム添加ファイバ増幅器を用いて平坦性の高い広帯域スペクトルを得る手法を確立した。

第6章では、より広帯域な利得スペクトルを有すると期待されるラマン増幅技術を用いたスペクトル広帯域化について実験検討を行った。長さ 895 m の高非線形ファイバに対して後方励起を行い、スペクトル拡大実験を行った。EDF と比較してファイバの分散値が高かったため、広帯域化後のスペクトルの 10 dB 帯域は 15.3 nm にとどまった。しかしながら、ラマン利得帯域としては 45 nm に亘る 20 dB の利得が得られており、ファイバの最適化による広帯域化が期待されることを示した。

第7章では、長尺 EDF により得られた広帯域スペクトルを多波長光源に応用することを目的とし、Q 値測定を通じて強度雑音特性を評価した。7.2節では多波長光源の構成を説明し、評価項目列挙した。次に7.3節において Q 値測定実験を行い、スペクトルのほぼ全帯域(16 nm)に亘って 25.3 dB 以上の高い Q 値を観測した。一方、比較対象として平坦性の低いスペクトルを測定したところ、波長によって Q 値は変動した。7.4節では、この Q 値変動がスペクトルのリップルを介した変調利得の増大によって説明できることを示すとともに、スペクトルの平坦性が低雑音性の実現に有効であることを示した。また、他の Q 値劣化要因についても考察し、これらを考慮することによって実験結果を定性的に説明しうることを示した。これらの結果を通じて、EDF を用いて発生した平坦性の高い広帯域スペクトルの優位性を示した。

第8章では、スペクトル広帯域化システム的设计へのフィードバック手段として、スペクトル位相直接検出法(direct spectral phase detection, DSPD)を開発した。DSPDはパルスの振幅及び位相の測定方式である。8.2節では光パルスの各種測定技術について説明した。従来の光パルス測定においては非線形光学効果が多く用いられてきたこと、また、近年、非線形光学効果を用いない線形測定方式が提案されており、感度面で有利であることを示した。8.3節では DSPD を提案し、基本原理及び本方式の特長を説明した。DSPDでは被測定パルスのスペクトルを光フィルタで切り出し、その群遅延を電氣的に測定することによりスペクトル位相を求める。他の線形測定方式と比較して構成がシンプルであり、光変調器や特殊な光フィルタ等を必要としないため、偏波無依存な測定が可能である。8.4節では DSPD によるパルス測定実験について記述した。スペクトル広帯域化システムにおけるファイバ入力パルス及び広帯域化されたパルスの強度及び周波数チャープを測定することに成功した。8.5節では DSPD で用いる光フィルタの特性が測定結果に及ぼす影響を明らかにし、その補償法を提案した。このようにして、独自のパルス評価手法を確立した。

以上を総括すると、光ファイバ増幅器を用いたスペクトル広帯域化技術を光通信へ適用するための指針を理論及び実験により示し、また、ファイバ及びパルスの設計へフィードバックするための評価法を開発した。これらを通じて、高品質な広帯域スペクトルを生成するための基礎技術を確立した。