

# 微細構造ファイバーを用いた高効率光パルス圧縮

— サイクル時間域の高繰り返し光パルス発生 —

## 学位論文内容の要旨

1960年代にモード同期による発振が報告されて以来、超短パルスレーザーの短パルス化に関する研究が盛んに行われてきた。特にチタニウムサファイアレーザーの登場以降、その進展は目覚ましく、現在ではアルゴンガス充填の中空ファイバーを用いて 2.8 fs (1.5 光サイクル) の超短光パルスが得られている。極短光パルスを光源とする超高速現象の観測において、このような短パルス化は時間分解能を高くすることを意味する。極短光パルス発生・測定においても、非線形光学現象が深く関わっており、新しい物理現象の解明には、短パルス化・高ピーク出力化は重要な意味を持っている。

また通信分野においては、超短光パルスを光源としたスーパーコンティニウム光 (SC 光) が波長分割多重通信に対して有用であり、大容量通信・超高速伝送技術への応用が検討されている。さらに時間域における極短光パルス発生が可能となれば、位相変調による新しい通信応用が開けてくる。

近年、フォトニッククリスタルファイバー (PCF) やテーパファイバー (TF) のような微細構造ファイバーを用いて容易に SC 光が得られることが報告され、高繰り返しかつ高効率な極短光パルスの発生の可能性が開かれた。

本研究では、微細構造ファイバーを用いて超広帯域コヒレント光波を発生させ、その光波特性を精確に測定した後、複雑な非線形チャープパルスの補償を行うことにより、サイクル時間域の高繰り返し光パルス発生を目的とした。

本論文は、10 章で構成される。以下に各章の概要を述べる。

1 章では、本研究の背景、研究の意義について述べる。

2 章では、極短光パルスの発生の原理 (時間・周波数領域での表現等) について触れ、非線形効果を用いた超広帯域光波発生と、その光波の位相制御法について述べる。特に、重要な位相制御技術である  $4f$  光学系と液晶空間位相変調器を用いた SLM- $4f$  チャープ補償装置について詳述した。

3 章では、極短光パルスの計測方法の現状について述べ、本研究のもう一つの重要技術である変形 SPIDER 法による光波特性測定の原理と方法を説明する。また SLM- $4f$  チャープ補償光学系と変形 SPIDER 装置を組み合わせた準自動フィードバックチャープ補償システムについて説明する。

4 章では、超広帯域光波の発生素子である微細構造ファイバーの構造、特性について述べる。微細構造ファイバーは、広帯域での単一モード動作、大きな構造分散、小さな実効コア断面積、零分散波長の可視域化などの特徴を持つ。導波路構造に起因するこれらのユニークな特性によって、超短光パルスレーザー発振器のような低ピークパワーかつ高繰り返しの光源でも高効率に SC 光が発生する。本章では、構造、分散特性、光波の伝搬原理について詳述する。

5 章では、TF を用いた超広帯域光波の発生実験とそのチャープ補償実験について報告する。TF 中

の超広帯域光波発生における、入射光の強度、偏光方向依存性、および第二高調波発生周波数分解光ゲート (SHG-FROG) 測定による TF 伝搬特性の解析について述べる。またチャープ補償実験から、複雑な分散特性を持つ TF 出力光に対しては、スペクトル位相をフィードバックした SLM-4f チャープ補償光学系を用いることが有用であることを示す。

6 章では、試作した準自動フィードバックチャープ補償システムによる TF 出力光のチャープ補償実験について報告する。変形 SPIDER 装置を改良することで、高感度かつ短時間での信号計測が可能となった。これにより、さらに広帯域な TF 出力光の測定が可能となり、加えて迅速な測定により、複数回のフィードバックが可能となった。実験では、波長帯域 610~945 nm の TF 出力光の初のチャープ補償に成功した (パルス幅 8.4 fs)。またモノサイクルパルス発生へ向けた TF の問題点を指摘し、改良後の光パルス圧縮実験について述べる。

7 章では、PCF を用いた超広帯域光波発生とその光波のチャープ補償実験について報告する。超広帯域光波発生における PCF の零分散波長 (ZDW)、長さ、入射光強度依存性を示した。

ZDW が長波長側にある場合、入射光は PCF の正常分散領域で伝搬するため、非線形光学効果は強く生じず、広帯域化は抑えられる。しかし、スペクトル強度・位相の面から見ると強い変調を受けないため、位相測定、位相補償は容易になる。本章では、ZDW:900 nm の PCF を用いて広帯域化を抑えた光波 (波長帯域 600-945 nm) を発生させ、TF と同様のシステムによってチャープ補償を行い、PCF 出力パルスとしては最短となる 6.6 fs パルスの発生について述べる。また得られた光波は、ほぼフーリエ変換限界光パルス (TL パルス) と一致しており、この結果からも高精度にスペクトル位相制御を行えることが確認された。これは理想的 PCF 光パルス圧縮の初の実験実証である。

8 章では、PCF 出力光のさらなる短パルス化に向けた問題点とその改良、その後のチャープ補償実験について述べる。モノサイクル光パルス発生は、いかに精確にスペクトル位相を測定するかが大きな課題であり、それには出力光スペクトルの構造が非常に大きく関与している。出力光スペクトル構造の制御には、PCF の最適化、入射光のチャープ量制御が挙げられる。これらの改良によって ZDW 583 nm の PCF を用いて出力光のスペクトル構造を制御し、5.8 fs パルスの発生に成功した。

9 章では、モノサイクル化に向けた問題点と改良後の光パルス圧縮実験について述べる。モノサイクルパルス発生を目指した場合、約 1 オクターブの広帯域な光波 (500-1000 nm) が必要となる。本研究では、PCF 長を長くするのではなく、さらに短波長側に ZDW を持つ PCF (ZDW 744 nm) を用いて広帯域な光波を得た。しかし、これに伴い PCF 出力光は、スペクトル強度の低下とより複雑な分散特性を持つことになった。それに対応すべく、SLM-4f 光学系の高感度・高精度位相制御化を行い、微細構造ファイバーを用いた光パルスとして最短の 4.9 fs の高繰り返し光パルス発生が可能であることを確認した。

この結果から、SLM の位相折り返し域におけるスペクトル構造への影響 (クラマース・クローニヒの関係) と、高非線形性を持つ PCF を用いたことにより、異常分散領域におけるパルス間の強度揺らぎの非線形効果への影響が顕著になることから、パルス間のコヒレンスの低下が引き起こされるという新たな問題が浮上した。モノサイクルパルス発生に向けて、これらの点についても議論した。

10 章では、本研究の全体の結論を述べる。また本研究の結果から、サイクル時間域の光パルス圧縮素子として両ファイバーを比較した。PCF・TF の利点と欠点を指摘し、どちらが光パルス圧縮素子として有望かを議論した。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 下 幹 雄

副 査 教 授 馬 場 直 志

副 査 教 授 森 田 隆 二

副 査 助 教 授 関 川 太 郎

## 学 位 論 文 題 名

### 微細構造ファイバーを用いた高効率光パルス圧縮

#### ーサイクル時間域の高繰り返し光パルス発生ー

最近、微細構造ファイバー（フォトリソグラフィック結晶ファイバー(PCF)・テーパファイバー(TF)) 中の非線形光学効果を用いた超広帯域光波の発生がいくつかのグループから報告された。本研究では、これらファイバーを用いて超広帯域コヒーレント光波を発生させ、その光波を利用してサイクル時間域の高効率・高繰り返し光パルスの発生を実現することを目的としている。

本論文は、10 章で構成される。1 章では、本研究の背景、研究の意義について述べている。2 章では、極短光パルスの発生の原理(時間・周波数領域での表現等)について触れ、非線形効果を用いた超広帯域光波発生と、その光波の位相制御法について述べている。特に、重要な位相制御技術である  $4f$  光学系と液晶空間位相変調器 (SLM) を用いた SLM- $4f$  チャープ補償装置について詳述している。3 章では、極短光パルス波形の計測方法の現状について述べ、本研究のもう一つの重要技術である変形 SPIDER 法による光波特性測定の原理と方法を説明している。また SLM- $4f$  チャープ補償光学系と変形 SPIDER 装置を組み合わせた準自動フィードバックチャープ補償システムについて説明している。4 章では、超広帯域光波の発生素子である微細構造ファイバーの構造、特性について述べている。微細構造ファイバーは、広帯域での単一モード動作、大きな構造分散、小さな実効コア断面積、零分散波長 (ZDW) の可視域化などの特徴を持つ。導波路構造に起因するこれらのユニークな特性によって、超短光パルスレーザ発振器のような低ピークパワーかつ高繰り返しの光源でも高効率にスーパーコンティニウム光が発生する。本章では、構造、分散特性、光波の伝搬原理について詳述している。

5 章では、TF を用いた超広帯域光波の発生実験とそのチャープ補償実験について報告している。TF 中の超広帯域光波発生における、入射光の強度、偏光方向依存性、および第二高調波発生周波数分解光ゲート(SHG-FROG)測定による TF 伝搬特性の解析について述べている。またチャープ補償実験から、複雑な分散特性を持つ TF 出力光に対しては、スペクトル位相をフィードバックした SLM- $4f$  チャープ補償光学系を用いることが有用であること

を示している。6章では、試作した準自動フィードバックチャープ補償システムによるTF出力光のチャープ補償実験について報告している。変形SPIDER装置を改良することで、高感度かつ短時間での信号計測が可能となった。これにより、さらに広帯域なTF出力光の測定が可能となり、加えて迅速な測定により、複数回のフィードバックが可能となった。実験では、波長帯域 610~945nm のTF出力光の初のチャープ補償に成功した(パルス幅 8.4fs)。またモノサイクルパルス発生へ向けたTFの問題点を指摘し、改良後の光パルス圧縮実験について述べている。

7章では、PCFを用いた超広帯域光波発生とその光波のチャープ補償実験について報告している。超広帯域光波発生におけるPCFのZDW, 長さ, 入射光強度依存性を示した。ZDWが長波長側にある場合、入射光はPCFの正常分散領域で伝搬するため、非線形光学効果は強く生じず、広帯域化は抑えられる。しかし、スペクトル強度・位相の面から見ると強い変調を受けないため、位相測定、位相補償は容易になる。本章では、ZDW:900nmのPCFを用いて広帯域化を抑えた光波(波長帯域 600-945nm)を発生させ、TFと同様のシステムによってチャープ補償を行い、PCF出力パルスとしては最短となる 6.6fs パルスの発生について述べている。また得られた光波は、ほぼフーリエ変換限界光パルス(TLパルス)と一致しており、この結果からも高精度にスペクトル位相制御を行えることが確認され、初の完全なPCF光パルス圧縮であることが示された。

8章では、PCF出力光のさらなる短パルス化に向けた問題点とその改良、その後のチャープ補償実験について述べている。モノサイクル光パルス発生は、いかに精確にスペクトル位相を測定するかが大きな課題であり、それには出力光スペクトルの構造が非常に大きく関与している。出力光スペクトル構造の制御には、PCFの最適化、入射光のチャープ量制御が挙げられる。これらの改良によってZDW 853nmのPCFを用いて出力光のスペクトル構造を制御し、5.8fsパルスの発生に成功した。

9章では、モノサイクル化に向けた問題点と改良後の光パルス圧縮実験について述べている。モノサイクルパルス発生を目指した場合、約1オクターブの広帯域な光波(500-1000nm)が必要となる。本研究では、PCF長を長くするのではなく、さらに短波長側にZDWを持つPCF(ZDW 744nm)を用いて広帯域な光波を得た。しかし、これに伴いPCF出力光は、スペクトル強度の低下とより複雑な分散特性を持つことになった。それに対応すべく、SLM-4f光学系の高感度・高精度位相制御化を行い、微細構造ファイバーを用いた光パルスとして最短の 4.9fs の高繰り返し光パルス発生が可能であることを確認した。

10章では、本研究の全体の結論を述べている。また本研究の結果から、サイクル時間域の光パルス圧縮素子として両ファイバーを比較した。PCF・TFの利点と欠点を指摘し、どちらが光パルス圧縮素子として有望かを議論している。

以上、これを要するに、著者は準自動フィードバックチャープ補償装置を開発し、これを用いてフォトニッククリスタルファイバーなどの微細構造ファイバーによる高効率極短光パルス圧縮が可能であることを初めて実証した。本研究によって得た成果は、量子エレクトロニクスおよび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があるものと認める。