

平成 27 年 5 月 27 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25600115

研究課題名(和文)ハイブリッドファイバを用いたスペクトル圧縮による超狭線幅広帯域波長可変光源の開発

研究課題名(英文)Ultranarrow linewidth widely wavelength tunable source using spectral compression in comb profiled fiber

研究代表者

西澤 典彦(NORHIKO, NISHIZAWA)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30273288

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：研究代表者が見いだした櫛状分布ファイバを用いたスペクトル圧縮技術について、数値解析からより良い圧縮が得られる櫛状分布ファイバの構成を見だし、実際に開発を行い、特性の改善を実証した。従来のものと比較し、1～8dBの台座成分の抑圧に成功した。又、スペクトル圧縮パルスの高強度化のために、カーボンナノチューブを用いた高繰り返し超短パルスファイバレーザーを開発し、実際に波長可変狭線幅パルス光の2倍の高強度化に成功した。また、電気光学変調器を用いて高速な波長掃引に成功した。今後、更なる櫛状分布ファイバの改良や、開発した光源を用いた高速・超高分解能なOCTの開発を進めて行く予定である。

研究成果の概要(英文)：The characteristics of spectral compression using comb profiled fiber were investigated numerically, and improved configuration was obtained, and experimentally demonstrated. The improvement of pedestal suppression ratio from 1 to 8 dB was achieved. Then, a high power, high repetition rate fiber laser using single wall carbon nanotube was developed for power scaling of the narrow linewidth source. The power scaling up to double was achieved using the developed fiber laser. Then, rapid wavelength tuning was demonstrated using an electro-optical modulator. We are planning to develop the fast, and ultrahigh resolution OCT system using the developed light source.

研究分野：工学

キーワード：応用光学・量子光工学 超短パルス 光ファイバ ファイバーレーザー 非線形光学 ソリトン

## 1. 研究開始当初の背景

申請者は、光ファイバの超高速非線形光学効果を用いて、入射光強度に依存して波長を連続にシフトできる波長可変超短パルス光源を開発してきた。この光源では、光強度変調器を用いることで、1ショット毎に波長を大きく変えることのできる、世界最速の超高速な波長制御が可能になる。波長可変光源は分光計測などに有用であるが、分解能の高い分光計測には狭線幅の光源が必要になる。広帯域に高速に波長掃引可能な狭線幅光源を実現することができれば、光計測分野や広帯域光通信分野において、ブレークスルーに繋がる非常に有用な光源になる。

申請者は最近、2種の異種ファイバを交互に融着接続して構成される櫛状分布ファイバを設計・開発し、パルススペクトルの大幅な圧縮に成功した。しかし、高感度な超高分解能 OCT や分光計測のためには、更に高度なスペクトル圧縮が必要になる。また、このスペクトル圧縮技術にはそのメカニズムに未知な点が多く、スペクトル圧縮や広帯域動作の限界など、メカニズムの解明と特性の高度化が強く望まれている。そこで、今回、ハイブリッドファイバを用いたスペクトル圧縮による超狭線幅広帯域波長可変光源の開発を着想するに至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、このスペクトル圧縮技術の高度化を目指し、複数のファイバを組み合わせるハイブリッドファイバを新規に開発し、スペクトル圧縮技術の限界に挑戦する。スペクトル圧縮の諸特性やメカニズムの解析を行い、広帯域化や究極の狭線幅化に挑戦する。そして、1ショット毎に超高速に波長可変な、世界初の超狭線幅広帯域波長可変光源の開発を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1) 断熱ソリトンスペクトル圧縮によるスペクトル圧縮の数値解析

まず、これまでに構築した数値解析モデルを用いて、スペクトル圧縮の数値解析を行い、基本的な諸特性を解析する。ここでは、まず、理想的な分散増加ファイバにおけるスペクトル圧縮のメカニズムを解析し、その狭線幅化の理論限界や台座成分を抑えた高度なスペクトル圧縮のための条件、高度な圧縮への必要条件を明らかにする。また、スペクトル圧縮の限界に挑戦する。

### (2) 2種のファイバを用いた櫛状分布ファイバの開発

次に、2種のファイバを用いた櫛状分布ファイバの構成について、まずは上記で求めた理想的な分散増加ファイバの構成を擬似的に実現する構成で、スペクトル圧縮の特性を解析する。また、中心波長を変化させたときのスペクトル圧縮特性を解析し、広帯域な動作特性を解析する。

### (3) 複数の異種ファイバを用いたハイブリッドファイバの開発

上記(1)のメカニズムの解析の結果を考慮し、上記の2種のファイバの組み合わせに加えて、波長分散や非線形係数の異なる3種、および4種のファイバを用いた場合のハイブリッドファイバの構成を、最適化アルゴリズム等を用いて設計する。また、広帯域な動作特性等も評価し、高度なスペクトル圧縮を実現するハイブリッドファイバを開発する。

### (4) ハイブリッドファイバを用いた高度スペクトル圧縮実験

上記(3)の計算結果を元にハイブリッドファイバを実験的に実際に開発し、スペクトル圧縮の実験を行う。開発には、異種ファイバ間の融着接続における接続損失を極力抑えるよう、試行錯誤とフィードバック制御により最適化を図りながら開発を進める。0.1nmを切る狭線幅化と1600~1850nmに渡る広帯域化に挑戦する。光源には主に、100~200fsの超短パルスファイバレーザーを用いる。又、繰り返し10GHzの高調波モード同期ファイバレーザーの出力パルスのスペクトル圧縮も試み、ps台のパルスのスペクトル圧縮特性を評価する。スペクトル圧縮の限界への挑戦と諸特性の解明、そして新しい物理の萌芽を目指す。

### (5) 広帯域波長可変狭線幅光源の高速波長制御

電気光学(EO)強度変調器を用いて、圧縮したスペクトルの高速波長走査を試みる。実際に、細かい透過スペクトルを示す干渉計や溶液等を資料に用い、細かい吸収スペクトルを時間波形として観測する。また、参照用に構築した干渉計の透過光を観測し、等周波数間隔で見られるスペクトルの干渉波形の周波数間隔を変化させ、圧縮したスペクトルの線幅を評価する。

(6) 広帯域高速波長可変狭線幅光源を用いた超高分解能光断層計測

上記までで開発した広帯域高速波長可変狭線幅光源を用いて、超高分解能な波長掃引型光断層計測(OCT)システムを構築する。OCTシステムは既存のシステムを改良して用いる。光源の波長帯が長波長帯にあるため、長波長域まで感度のある光検出器と差動増幅器を用いて検出器を構成する。OCTイメージングによって、開発した光源を用いたときの感度や分解能等を評価し、光源の有用性を評価する。

(7) まとめ

本研究の結果の解析と考察を行う。そして、本研究の総括を行う。

4. 研究成果

(1) 櫛状分布ファイバを用いた断熱ソリトンスペクトル圧縮の数値解析

2種、又は3種のファイバを用いる手法で、さまざまなプロファイルの櫛状分布ファイバについて、スペクトル圧縮の数値解析を行い、波長依存性や圧縮スペクトルの特性を評価した。図1~3に計算結果を示す。櫛状分布ファイバの分布を工夫することで、スペクトルの圧縮率を保ちながら台座成分を最大10dB近く抑圧できることを見いだした。

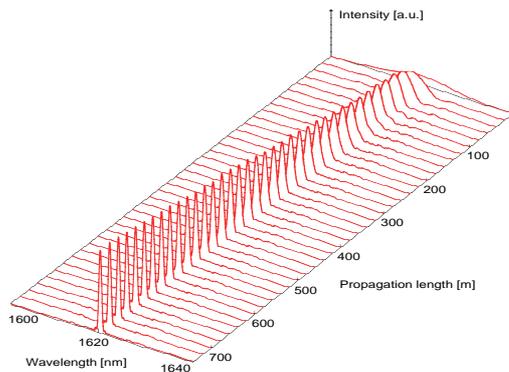


図1 櫛状分布ファイバの伝搬におけるスペクトル圧縮によるスペクトルの変化

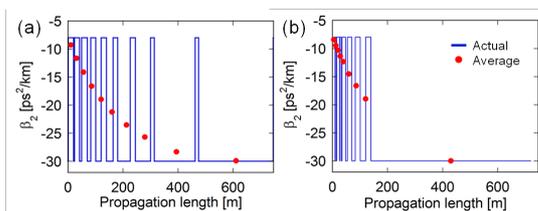


図2 櫛状分布ファイバにおける波長分散の分布と平均値の変化, (a)従来型, (b)改良型

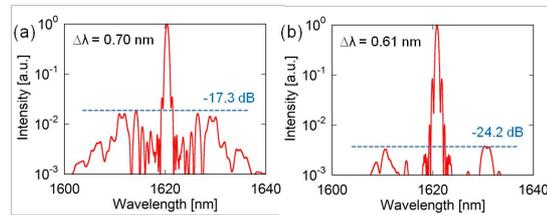


図3 櫛状分布ファイバの出力パルススペクトル, (a)従来型, (b)改良型。

(2) 櫛状分布ファイバの開発

前記(1)の結果を基に、改良型の櫛状分布ファイバを開発した。計算結果に長さを合わせた光ファイバを用意し、損失を抑えるよう融着し、設計値に近いものを開発した。

(3) カーボンナノチューブを用いた高繰り返し超短パルスファイバレーザーの開発

圧縮スペクトルの高出力化を図るため、カーボンナノチューブと短尺・高添加なEr添加ファイバを用いて、高繰り返しな超短パルスファイバレーザーを開発した。受動モード同期によって、繰り返し周波数95MHzで266fsの超短パルスを安定に出力するレーザーを開発することができた。出力の平均強度は24mWが得られた。

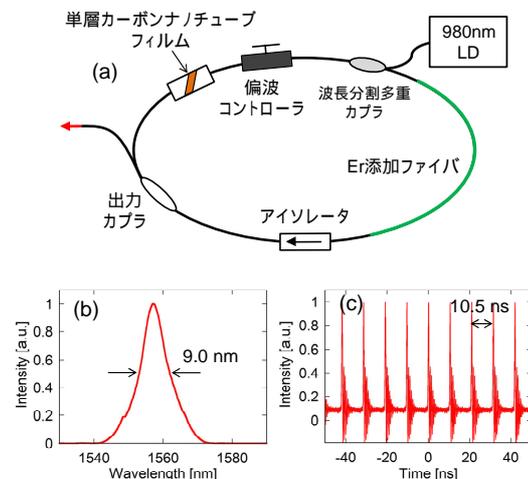


図4 (a)カーボンナノチューブを用いた超短パルスファイバレーザーの構成, (b)パルススペクトル, (c)パルス列の時間波形

(4) 改良型櫛状分布ファイバを用いたスペクトル圧縮実験

開発した高繰り返しファイバレーザーと櫛状分布ファイバを用いて櫛状分布ファイバにおけるスペクトル圧縮の実験を行った。その結果、ほぼ計算通りのスペクトル圧縮の特性が得られた。波長1620~1900nmの広い帯域において、1~8dBのサイドローブ抑圧比の向上が得られた。また、高繰り返し化によって、平均強度を約2倍、向上することができた。

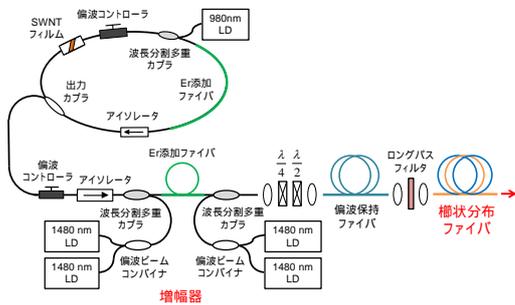


図5 ナノチューブファイバレーザーを用いた高強度広帯域波長可変線幅スペクトルの生成系

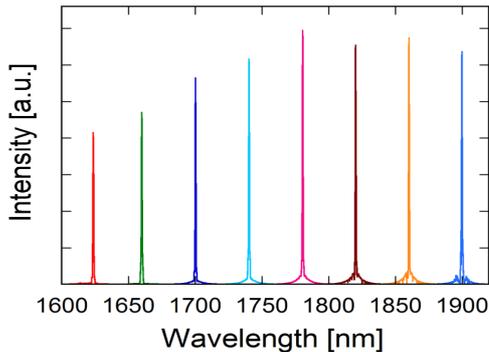


図6 生成した広帯域波長可変狭線幅スペクトルの生成系

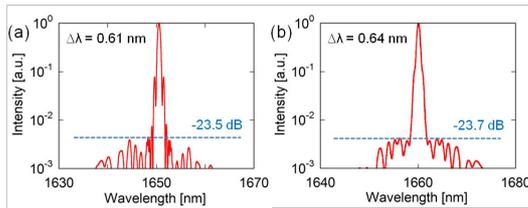


図7 櫛状分布ファイバを用いてスペクトル圧縮をしたパルス光の光スペクトルの実験結果,(a)従来型,(b)改良型.

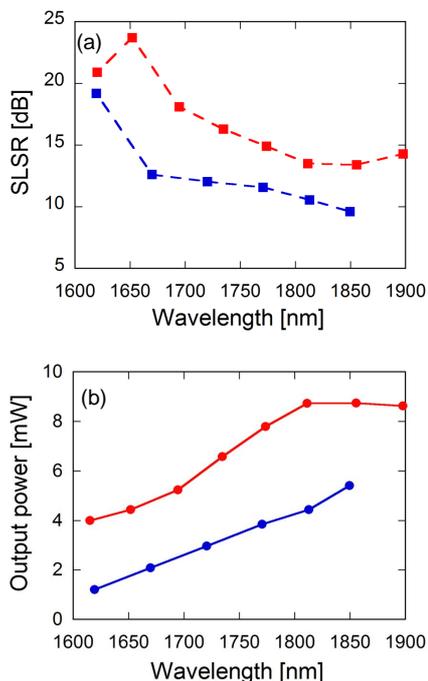


図8 櫛状分布ファイバにおける広帯域スペクトル圧縮の実験結果,(a)サイドローブ抑圧比,(b)出力光強度. 青線はこれまでの CPF における結果,赤線は本研究で開発した CPF における結果を表している.

(5) 電気光学変調器(EOM)を用いた圧縮スペクトルの高速波長制御

ファイバレーザーの出力に電気光学変調器(EOM)を用いて強度を変調し,パルススペクトルの波長を高速に制御し,圧縮スペクトルの高速波長制御を行った.高速な波長走査を実証することができた.

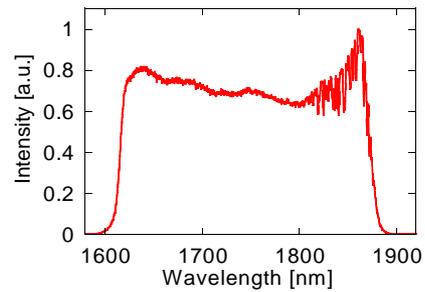


図9 EOM を用いた高速波長掃引により生成した擬似 SC 光のスペクトル

(6) 広帯域狭線幅波長可変光源を用いた光断層計測システムの構築

開発した光源を用いて,光断層計測(OCT)システムの開発に取り組んだ.開発した光源を用いることで,高速性,超高分解能性,高感度性を全て兼ね備える高機能な OCT が実現出来る.現在も,研究を続けている.

(7) まとめ  
本研究のまとめを行った.

5. 主な発表論文等

(研究代表者,研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計7件)

西澤典彦,ファイバレーザーの進展と応用,光学,査読有,Vol.42,2013,pp.438-445.  
H.Kawagoe, S.Ishida, M.Aramaki, Y.Sakakibara, E.Omoda, H.Kataura, and N.Nishizawa, 110 MHz soliton mode-locked high power Er-doped fiber laser using carbon nanotube polyimide film, CLEO2013, 査読有, SI, 2013, pp.CM2I.5-1-2.  
DOI:10.1364/CLEO\_SI.2013.CM2I.5  
A.Okamura, Y.Sakakibara, E.Omoda, H.Kataura, and N.Nishizawa, Generation of high quality supercontinuum using ultrashort pulse fiber laser system with carbon nanotube, CLEO-PR&O/ECC/PS2013, 査読

有, 2013, WB4-2-1-2.  
DOI:10.1109/CLEOPR.2013.6600180  
西澤典彦, スーパーコンティニウム光を用いた超高分解能 OCT, 日本レーザー医学会誌, 査読有, vol.35, 2015, pp.432-437.  
Norihiko Nishizawa, Advance of wideband ultrashort pulse fiber lasers and sensing applications, Advanced Photonics Congress 2014, 査読有, Optical Sensors, 2014, SeThD.2-1-2.  
DOI:10.1364/SENSORS.2014.SeThD.2  
N.Nishizawa, Y.Sakakibara, and H.Kataura, Carbon-nanotube mode-locked fiber lasers and their applications to OCT, Advanced Solid State Lasers (ASSL)2014, 査読有, NWS, 2014, ATu3A.1-1-3  
DOI:10.1364/ASSL.2014.ATu3A.1  
H.Kawagoe and N.Nishizawa, Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using supercontinuum source in 1.9um wavelength region, CLEO2014, 査読有, SI, 2014, SM4P.4-1-2  
DOI:10.1364/CLEO\_SI.2014.SM4P.4

〔学会発表〕(計10件)

西澤典彦, 広帯域波長可変超短パルスファイバーレーザー光源の開発, レーザー顕微鏡研究会第39回講演会(招待講演), 2013年7月31日, 理化学研究所  
Norihiko Nishizawa, Highly functional ultrashort pulse fiber laser sources and application for ultrahigh resolution optical coherence tomography, 第74回応用物理学会秋季学術講演会・JSAP-OSA Joint Symposia (招待講演), 2013年9月16日~2013年9月20日, 同志社大学  
岡村惇志, 荒巻光利, 榊原陽一, 面田恵美子, 片浦弘道, 西澤典彦, 相互相関FROGを用いた近赤外広帯域高精度スーパーコンティニウム光の特性評価, Optics & Photonics Japan(OPJ)2013, 2013年11月12~14日, 奈良県新公会堂  
川越寛之, 服部雄治, 石田周太郎, 荒巻光利, 榊原陽一, 面田恵美子, 片浦弘道, 西澤典彦, 波長1.7um帯スーパーコンティニウム光の高出力化による超高分解能OCTの高侵達化, Optics & Photonics Japan(OPJ)2013, 2013年11月12~14日, 奈良県新公会堂  
Norihiko Nishizawa, Ultrashort pulse fiber lasers with single wall carbon nanotube and their applications, Nano Science & Technology 2014(招待講演), 2014年10月29~31日, Qingdao, China  
西澤典彦, 高機能超短パルスファイバー

レーザーの開発と光断層計測への応用, 量子エレクトロニクス研究会(招待講演), 2014年12月19~21日, 軽井沢  
西澤典彦, フェムト秒ファイバーレーザー技術とイメージングへの展開, レーザー学会第35回年次大会(招待講演), 2015年1月11~12日, 東海大学  
安藤栄充, 榊原陽一, 面田恵美子, 片浦弘道, 西澤典彦, 広帯域波長可変狭線幅光源の高出力化及びスペクトル圧縮の高度化, 第75回応用物理学会秋季学術講演会, 2014年9月17~20日, 北海道大学  
安藤栄充, 榊原陽一, 面田恵美子, 片浦弘道, 西澤典彦, 櫛状分布ファイバーを用いた広帯域波長可変狭線幅光源の高出力化及び台座成分の抑圧, レーザー学会ファイバーレーザー技術専門委員会第3回公開講演会, 2014年11月28日, 名古屋大学  
Y.Ando, Y.Sakakibara, E.Omoda, H.Kataura, and N.Nishizawa, Improvement of output power and suppression of pedestal components for wideband wavelength tunable narrow linewidth source, Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS)2015, 2015年4月22~24日, Yokohama, Japan

〔図書〕(計1件)

西澤典彦, 松村浩由, タンパク質結晶の最前線, シーエムシー出版, 2013, 288.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/optelelab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西澤典彦(NISHIZAWA NORIHIKO)  
名古屋大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 30273288