

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286069

研究課題名(和文) 高出力ナノチューブファイバレーザを用いた高次機能波長可変光周波数コム光源の開発

研究課題名(英文) Development of highly functional wavelength tunable optical frequency comb using high power fiber laser with carbon nanotube

研究代表者

西澤 典彦 (NISHIZAWA, NORIHIKO)

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) 14,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、カーボンナノチューブを用いた高出力超短パルスファイバレーザによる高次機能光周波数コム光源の開発に取り組んだ。まずナノチューブファイバレーザの高度化に取り組み、高繰り返し、且つ高出力なファイバレーザを開発した。次に、シミュリトン増幅器を開発し、台座成分の少ない高強度超短パルス光を生成し、それを用いて1オクターブ以上広がるコヒーレントSC光の生成に成功した。また、高度な光周波数コムシステムを開発し、スペクトルの線幅を1Hz以下に安定化・狭窄化することに成功した。更に、光周波数コムシステムの出力を増幅し、高非線形ファイバに導入して、コヒーレントな広帯域SCコムの生成に成功した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we investigated the development of highly functional optical frequency comb source using high power ultrashort pulse fiber laser with carbon nanotube. First, the improvement of nanotube fiber laser was investigated, and a high-repetition rate, high power fiber laser was developed. Next, a similariton fiber amplifier was developed to generate high power ultrashort pulse with ideal shape, and an octave spanning coherent SC was generated. Then, a high performance optical frequency comb system was developed, and the stabilization and compression of fceo spectrum was realized. Finally, the output pulse from optical frequency comb was amplified and then introduced into highly nonlinear fiber, and wideband, coherent SC comb was realized.

研究分野：応用光学

キーワード：応用光学・量子光工学、ナノチューブ、光周波数コム、光ファイバ、ファイバレーザ、スーパーコンティニウムレーザ

1. 研究開始当初の背景

スペクトルが等周波数間隔で並ぶ光周波数コムは、光計測の分野において、これまでの測定精度を飛躍的に向上させるブレイクスルーをもたらした、多機能な先端的光源として注目を集めている。一般に、光周波数コムは非常に多数のスペクトルで構成される広帯域光源として生成されているため、エネルギーが分散し、1本のコムのエネルギーは非常に微弱で、その高出力化が課題となっている。非線形効果を用いて光周波数コムの特性を保持したまま波長可変超短パルス光を生成し、更に、スペクトル幅を圧縮することができれば、特定のコムモードの高強度化が可能となる。そこで、今回、高出力ナノチューブファイバレーザを用いた高次機能波長可変光周波数コム光源の開発を着想するに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高出力ナノチューブファイバレーザと光ファイバにおける超高速非線形光学効果を用いて、広帯域波長可変光周波数コム光源や、極短パルスコム光源などの高次機能超広帯域光周波数コム光源を開発することにある。

3. 研究の方法

まず、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光源を開発し、発振モードや増幅器等の最適化により、高精度な光周波数コム光源を開発する。次に、パルス内誘導ラマン散乱を用いた波長可変超短パルス光源における縦モードの特性を解析・制御し、波長可変超短光周波数コム光源を開発する。更に、独自に開発したスペクトル圧縮技術を用いて、特定のコム成分の高強度化を実現する。又、スーパーコンティニューム生成により広げたコム光源を Yb 添加ファイバ増幅器で増幅し、可視～中赤外域までをカバーするコムシステムを構築し、高機能広帯域光周波数コム光源を実現する。

4. 研究成果

(1) 高出力超短パルスファイバレーザの開発

まず、光周波数コムの種光源となる超短パルスファイバレーザを開発した。今回は、安定な全ファイバ型の構成を実現できる、カーボンナノチューブフィルムを用いたファイバレーザを開発した。数値解析と実験を並行して行い、ファイバレーザの共振器構成の最適化を図り、繰り返し周波数が 100-160MHz と高い、高繰り返しファイバレーザや、光周波数コムの狭線幅化のために共振器内の分散値を 0 に近づけた状態でのモード同期レーザ発振を実現した。

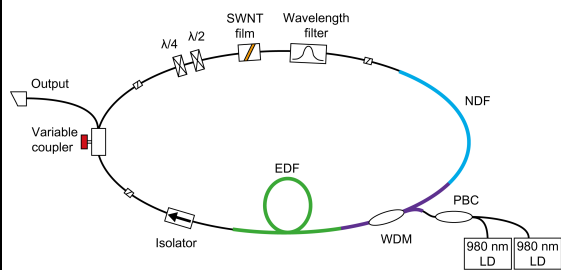


図 1 SWNT を用いた分散制御型超短パルスファイバレーザ

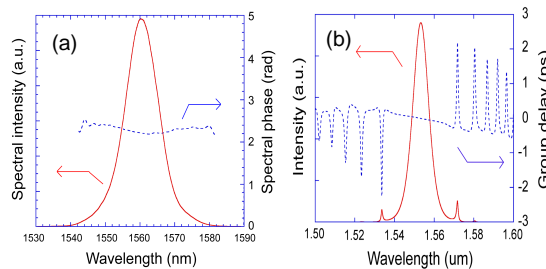


図 2 SWNT ファイバレーザの出力パルスの例, (a)実験結果, (b)計算結果

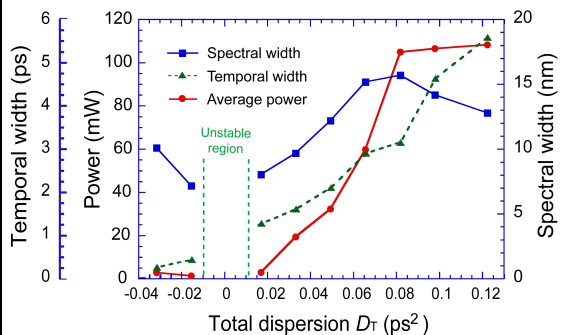


図 3 SWNT ファイバレーザ出力の分散値依存性

(2) シミラリトン増幅器による高出力超短パルス生成・コヒーレント SC 光の生成

光周波数コムシステムや、その出力の高精度増幅のため、正常分散 Er 添加ファイバを用いたシミラリトン増幅器を開発した。ここでは、数値解析と実験を並行して行い増幅器

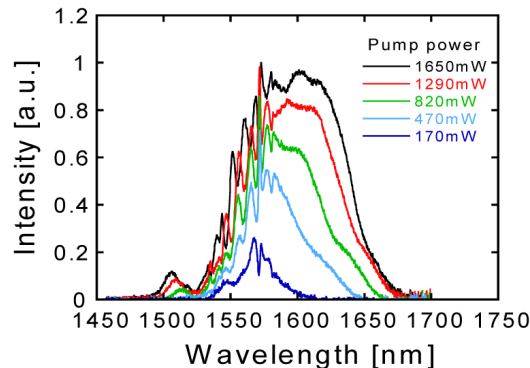


図 4 シミラリトン増幅器の出力パルスのスペクトル

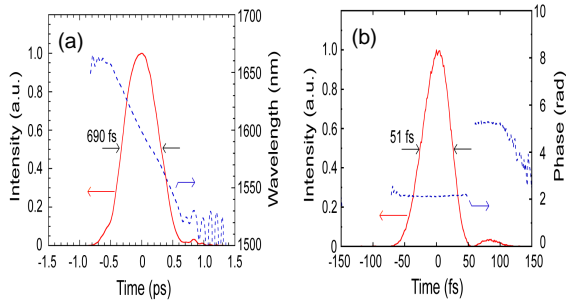


図 5 シミラリトン増幅器の出力パルスの時間波形，(a)分散補償前，(b)分散補償後

の構成の最適化を図った．励起光強度のを大きくするにつれて，スペクトルが放物線状により広く広がるシミラリトンパルスが生成された．時間波形は線形なチャープを有するガウス型に近いパルスとなり，大口径フォトニック結晶ファイバで分散補償することで，時間幅 51 fs の高強度超短パルスを生成することができた．更にその出力を高非線形ファイバに結合することで，1 オクターブ以上広がるコヒーレントな SC 光を生成することに成功した．

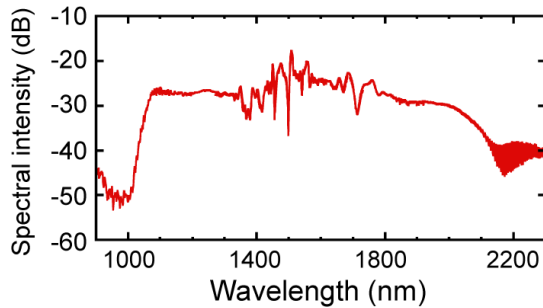


図 6 コヒーレント SC 光のスペクトル

(3) 光周波数コムレーザーシステムの最適化  
SWNT を用いた超短パルスファイバレーザーの共振器の分散特性や SWNT フィルムの最適化を図り，SWNT ファイバレーザーでは困難であったストレッチパルスモード同期を実現した．更に，励起光強度の最適化も行い，コムモードの狭線幅化を実現した．その結果，これまでの線幅を 1/10 まで狭窄化することに成功した．また，非線形偏波回転型のファイバレーザーでは，非制御時ではこれまでの報告の中で最も線幅の狭い 8 kHz を達成した．

(4) fceo の安定化制御システムの開発  
光周波数コムの開発において必須な要素である，キャリア-エンベロープオフセット周波数 fceo の制御回路を開発した．ここでは，fceo 信号が 5MHz に安定になるよう，ファイバレーザーの励起電流を PID 制御する回路を開発し，実験的に評価して高度化を図った．ここでは，励起 LD のピンに直接制御電流を加えることで周波数特性の向上を図り，安定な位相同期を実現した．位相同期時では，

線幅は測定限界の 1Hz 以下となり，高い精度でのコム安定化を達成した．

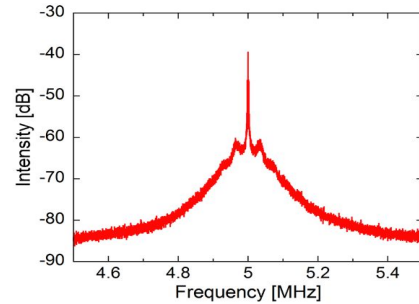
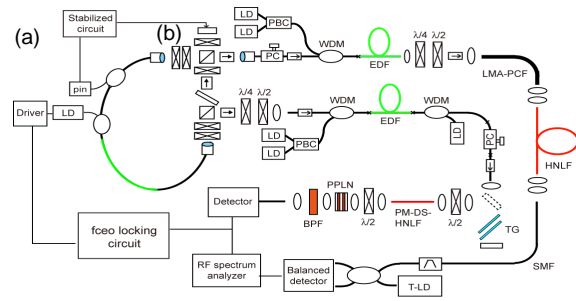


図 7 (a)光周波数コムシステムの構成図，(b)位相同期制御により狭線幅化した fceo の RF スペクトル

(5) 安定化コムシステムを用いた 1~2 $\mu$ m コヒーレント SC 光の生成

上記で安定化を図った光周波数コム出力を増幅するためのシミラリトン増幅器を新たに開発した．そして，分散補償の後に高非線形ファイバに結合して，高い平坦性を有し且つ約 1 オクターブ以上広がるコヒーレ

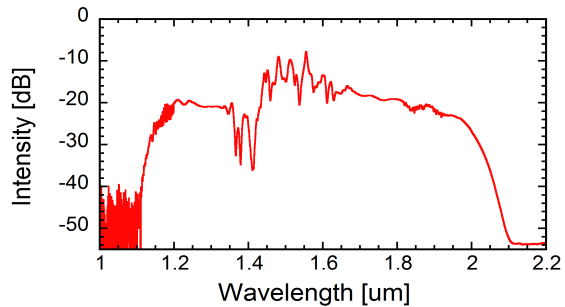


図 8 光周波数コムシステム出力を用いて生成したコヒーレント SC 光のスペクトル

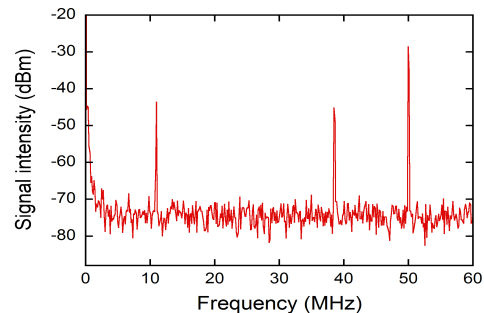


図 9 cw-LD と SC コムの RF ビート信号

ントな SC コムを生成した。更に、高安定な cw-LD を用いて波長 1550 ~ 1680nm 帯において SC コムとのバランス型ヘテロダインビート計測を行い、SC コムのコヒーレンスが保たれていることを確認した。

#### (6) まとめ

本研究の考察と総括を行った。

#### 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 8 件)

M. Yamanaka, H. Kawagoe, and N. Nishizawa, “High-power supercontinuum generation by high-repetition rate ultrashort pulse fiber laser for ultrahigh resolution optical coherence tomography in 1600 nm spectral band,” Applied Physics Express, vol. 9, 22701 (2016) (査読有)

西澤 典彦, “ファイバレーザー,” 日本赤外線学会誌, vol. 25, 6-14 (2016) (招待論文・査読有)

A. Okamura, Y. Sakakibara, E. Omoda, H. Kataura, and N. Nishizawa, “Experimental analysis of coherent supercontinuum generation and ultrashort pulse generation using cross-correlation frequency resolved optical gating (X-FROG),” Journal of Optical Society of America B, vol. 32, 400-406 (2015) (査読有)

N. Nishizawa, L. Jin, H. Kataura, and Y. Sakakibara, “Dynamics of a dispersion-managed passively mode-locked Er-doped fiber laser using single wall carbon nanotube,” Photonics, vol. 2, 808-824 (2015) (査読有)

Y. Nozaki, Y. Nomura, M. Aramaki, and N. Nishizawa, “Octave spanning coherent supercontinuum generation using 51 fs high-power ultrashort pulse from Er-doped similariton amplifier,” Japanese Journal of Applied Physics, vol.53, 20301 (2014)(査読有)

H. Kawagoe, S. Ishida, M. Aramaki, Y. Sakakibara, E. Omoda, H. Kataura, and N. Nishizawa, “Development of a high power supercontinuum source in the 1.7 um wavelength region for highly penetrative ultrahigh-resolution optical coherence tomography,” Biomedical Optics Express, vol.5, 932-943 (2014) (査読有)

N. Nishizawa, “Ultrashort pulse fiber laser and their applications,” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 53, 090101 (2014) (招待論文・査読有)

Y. Nomura, H. Kawagoe, Y. Hattori, M.

Yamanaka, E. Omoda, H. Kataura, Y. Sakakibara, and N. Nishizawa, “Supercontinuum generation for ultrahigh-resolution optical coherence tomography at wavelength of 0.8 um using carbon nanotube fiber laser and similariton amplifier,” Applied Physics Express, vol. 7, 122703 (2014) (査読有)

〔学会発表〕(計 11 件)

西澤典彦, 金磊, 山中真仁, “高機能超短パルスファイバレーザー光源の開発と応用展開,” レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会, 2016 年 1 月 9 ~ 11 日, 名古屋(招待講演)

Y. Nomura, H. Kawagoe, Y. Hattori, M. Yamanaka, Y. Sakakibara, E. Omoda, H. Kataura, and N. Nishizawa, “Supercontinuum generation for ultrahigh resolution optical coherence tomography at 0.8 um from ultrashort pulse fiber laser,” ALPS'15, ALPS11-3, April 22-24, 2015, Yokohama, Japan.

Y. Nomura, Y. Sakakibara, E. Omoda, H. Kataura, and N. Nishizawa, “Coherent evaluation of octave spanning supercontinuum using carbon nanotube fiber laser and similariton amplifier,” CLEO/Europe-EQEC2015, CJ\_4.4, June 21-25, Munich, Germany, 2015.

N. Nishizawa, L. Jin, and M. Yamanaka, “Highly functional ultrashort pulse fiber laser sources and application for optical coherence tomography,” IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ) 2015, November 9-11, 2015, Kyoto, Japan (招待講演).

A. Okamura, Y. Sakakibara, E. Omoda, H. Kataura, and N. Nishizawa, “Ultrashort pulse generation using supercontinuum generated by Er-doped fiber laser with carbon nanotube,” CLEO2014, JW2A.40, June 8-13, 2014, San Jose, USA.

Y. Nomura, Y. Nozaki, Y. Sakakibara, E. Omoda, H. Kataura, and N. Nishizawa, “Octave spanning coherent supercontinuum generation by 46 fs pedestal free ultrashort pulse using similariton amplifier and Er-doped fiber laser with carbon nanotube,” CLEO2014, STh3N.5, June 8-13, 2014, San Jose, USA.

Y. Nozaki, N. Nishizawa, H. Kataura, E. Omoda, and Y. Sakakibara, “285 mW high power, dissipative soliton mode-locked, Er-doped fiber laser using carbon nanotube,” CLEO2013, CM2I.5, June 9-14, 2013, San Jose, USA.

N. Nishizawa, T. Nagaike, M. Aramaki, E. Omoda, H. Kataura, and Y. Sakakibara, “Optical frequency comb using dispersion managed

Er-doped ultrashort pulse fiber laser using carbon nanotube polyimide film,” CLEO-PR&OECC/PS2013, TuF1-3, June 30-July 4, 2013, Kyoto, Japan.

Y. Nozaki and N. Nishizawa, “Octave spanning coherent supercontinuum generation by 51 fs pedestal free high power ultrashort pulse from similariton amplifier,” CLEO-PR&OECC/PS2013, WA1-2, June 30-July 4, 2013, Kyoto, Japan.

<sup>10</sup> N. Nishizawa and S. Ishida, “Dynamics of Er-doped soliton-similariton fiber laser and application for ultrahigh resolution optical coherence tomography,” ALPS’13, ALPS3-2, April 23-25, 2013, Yokohama, Japan.

<sup>11</sup> H. Kawagoe, S. Ishida, M. Aramaki, Y. Sakakibara, E. Omoda, H. Kataura, and N. Nishizawa, “Highly sensitive ultrahigh resolution OCT using high power supercontinuum at 1.7 um wavelength region based on single wall carbon nanotube fiber laser,” ALPS’13, APLS5-4, April 23-25, 2013, Yokohama, Japan.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/optel/lab/nishizawagroup.html>

## 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

(2) 研究分担者 なし

### (3) 連携研究者

荒巻 光利 (ARAMAKI MITSUTOSHI)  
名古屋大学・工学研究科・助教  
研究者番号：50335072