

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月 1日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560038

研究課題名（和文）超高効率スーパーコンティニウム光のリアルタイム光波制御システムの構築

研究課題名（英文）The construction of the ultrahigh efficiency supercontinuum spectrum with the real-time control system

研究代表者

曾根宏靖（Sone Hiroyasu）

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：333667

研究成果の概要（和文）：

本研究は(a)1.55 $\mu\text{m}$ 波長帯 SC 光の光波制御と(b)1 $\mu\text{m}$ 波長帯 SC 光の光波制御の2項目に分けて行なった。

(a)1.55 $\mu\text{m}$ 波長帯 SC 光の光波制御：

数値解析により1.55 $\mu\text{m}$ 波長帯 SC 光の位相情報調査を行った。

(b)1 $\mu\text{m}$ 波長帯 SC 光の光波制御：

製作した分散制御ファイバーとフォトニック結晶ファイバーを用い、SC光発生実験をおこない、光強度と位相情報について調査し、光波制御のために必要な位相情報取得環境を整備した。また、空間位相変調器(SLM)を選定・購入し、光波制御システム構築するための装置環境を整備した。

研究成果の概要（英文）：

This research was executed about the following：

(a) Investigation for optical wave control of supercontinuum (SC) near a 1.55- $\mu\text{m}$  wavelength range:

Optical wave control of Supercontinuum (SC) spectrum near a 1.55- $\mu\text{m}$  wavelength range:

Supercontinuum (SC) spectrum phases of 1.55- $\mu\text{m}$  near a wavelength range was investigated by numerical analysis.

(b) Investigation for optical wave control of supercontinuum (SC) near a 1- $\mu\text{m}$  wavelength range:

Recently, optical pulses propagating through a tapered fiber (TF) immersed in heavy water ( $\text{D}_2\text{O}$ ) or photonic crystal fiber (PCF) of a special design were reported to yield a broad and flat supercontinuum (SC) spectrum because the fiber dispersion characteristics are of low dispersion around 1000 nm. This study was undertaken to investigate spectral intensities and phase distributions of SC pulses generated in low-dispersion fibers. Results show that highly nonlinear PCF with group velocity dispersion (GVD) distributions having an extremum value and zero dispersion around 1000 nm is useful at short fiber length for applications in which the phase distribution is a concern.

Moreover, the spatial light modulator space phase modulator (SLM) was selected and purchased, and the device for assembling a optical wave control system was fabricated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：フォトニック結晶、スーパーコンティニウム

1. 研究開始当初の背景

現代の技術革新の中で光技術は欠かせないものとなっている。そのなかで光による超高速情報処理は早急に開発されなければならない技術のひとつである。光ファイバーのような透明媒質を高強度短光パルスで励起するとその出射パルスが超広帯域スペクトルを示す現象は超広帯域スペクトル光（スーパーコンティニウム（以下、SC と略す））として注目されている。

近赤外波長(1.5 $\mu\text{m}$  付近)の光源を使用した例として、波長分散特性がフラットな特性を有する分散制御された分散フラット - 減少ファイバー(Dispersion Flattened - Decreasing Fiber :DFDF)を用いれば、ファイバー中の低分散効果や非線形光学効果等により、平坦性に優れた SC スペクトルが得られることが報告されている。

通信用の石英ファイバーを熱で延伸することで作製されたテーパーファイバーを重水中に設置することでファイバー周辺の実効屈折率を変化させ、励起光入射波長（1 $\mu\text{m}$  波長帯）付近において低分散でなおかつフラットな波長分散特性を有する分散制御ファイバーを使用した SC 発生例について報告されている。また最近、石英ファイバーのク

ラッドを光の波長と同程度の周期で規則的に配列した空孔で形成することによって、波長分散特性を制御するフォトニック結晶ファイバー（以下、PCF と略す）が開発され市販されている。

しかし、これらの SC 光は光パルスの周波数の変化（チャープ）が伴っているためそのままでは利用できない。このような広帯域光は、時間域と空間域の相互変換が可能な性質を持っている。それを利用した超高速光の処理法に時間情報を空間域で制御する時間空間変換法があり、空間位相変調器等を用いて光制御を行なう光シンセサイジング法が試みられている。しかし、上述された SC スペクトルについては、帯域がとても広く(1000nm 以上)、またチャープが非線形的であり、さらに時間的に揺らいでいて、未だ汎用的ではない。

2. 研究の目的

超短パルス発生から超高効率超広帯域光発生、光波制御まで一貫して全て自作することにより、後段装置を意識したフレキシブルなシステム設計を容易にし、システムの高効率化や様々な光波への応用の可能性を広げ

る。また、複数の波長帯の超短パルス光を扱い、さらに複数の分散制御ファイバーを用いて種々の新しい SC 発生法を試みることで、光波制御に適した SC 光生成を調査する。これらの調査によって、多様な波長や光パルスに転用可能なフレキシブルなスペクトル制御技術の確立と汎用化を目指す。

### 3. 研究の方法

(1) 超短パルスレーザー装置 (モード同期エルビウムドープファイバーレーザー、モード同期イットリビウムドープファイバーレーザー) によって超短パルス光を得る。

(2) (1) で得られた超短パルスを分散制御ファイバー (分散フラット-分散減少ファイバー、フォトリソニック結晶ファイバー) に通すことによってファイバー中の低分散効果や非線形光学効果等により、超広帯域スペクトル光が効率的に得られる。

(3) (2) で得られた超広帯域スペクトル光の評価をおこなう。超短パルス時間情報および位相情報を得るには計測器 (スペクトル情報 : 光スペクトラム・アナライザー、時間情報 : 自己相関器、位相情報 : FROG 装置) を使用する。

(4) (3) で得られた情報を基にプログラマブル位相変調ユニットを使用することにより、超広帯域の光波制御の検討を行なう。

なお、以上の各項目において、(a)1.55 $\mu\text{m}$  波長帯と(b)1 $\mu\text{m}$  波長帯に分けておこなう。

### 4. 研究成果

(1) 超短パルスレーザー装置によってパルス幅がフェムト秒 ( $10^{-15}$  秒) オーダーの超短パルス光を得、その特性について詳細に調査した。

(a)モード同期エルビウムドープファイバーレーザー

汎用化を目指し製作した。詳細は、下記文献を参考の事。

近藤 宏武, "1.5 $\mu\text{m}$  波長帯ファイバレーザー実用化への検討," 2012 年度 北見工業大学 情報システム工学科 卒業論文(2013).

(b)モード同期イットリビウムドープファイバーレーザー

研究協力者 吉富大 研究員 (独立行政法人産業技術総合研究所電子光技術研究部門 所属) の協力を得て、当該項目の研究を行った。その結果、中心波長 1035 nm において、時間幅 100 fs の安定した超短パルス光が得られ、更に、高出力光増幅器を使用することにより、平均パワー10 W 程度までの増幅光を利用可能にした。詳細は下記文献を参考の事。

Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS) pp.25-26 (2012).

Proceedings of CLEO 2011, p.CFE6(2011).

Optics Express, Vol.18, pp.26027-26036 (2010).

Optics Letters, Vol.35, pp.1713-1715 (2010).

(2) および (3)

(a) 1.55 $\mu\text{m}$  波長帯の SC 光のスペクトル分布と位相情報の調査に関しては、以下の論文を再精査し、さらに詳細な数値解析をおこない調査した。

IEICE Transactions on Electronics, Vol. E86-C, No. 5, pp. 714-718 (2003).

Optical Review, Vol.9, No.3, pp.89-93 (2002).

光学, Vol.30, No.8, pp.522-527 (2001).

結果、波長分散特性が入射波長において極値を持つ特性を有する DFDF を用いことで、SC 光の位相の波長依存性が、2 次関数に近くなり位相制御前段の位相補償やその後の位相制御において有効であることが分かった。

(b)1 $\mu$ m 波長帯の SC 光のスペクトル分布と位相情報の調査に関しては、重水中テーパーファイバーと PCF を用いた数値解析および実験による評価（超短パルス時間情報および位相情報）を行った。その結果、1000 nm 波長帯の効率的な SC 発生には、NKT Photonics 社製の NL-1050-zero-2 という型番の PCF を利用するのが有効で、なおかつ短い長さで使用するのが位相制御に適していると確認した。詳細については、下記文献を参照の事。

①数値解析による検証（重水中テーパーファイバーを用いた場合のみ）：  
56th 応物学会予稿集, Vol.3, p.1248(2009).  
光学, Vol.40, No.8, pp.439-447(2011).

②実験による調査結果：  
57th 応物学会予稿集, p.19P-B-3(2010).  
2010 OPJ 予稿集, pp.124-125(2010).  
The Review of Laser Engineering, Vol.39, No.11, pp.862-865(2011).  
Proceedings of SPIE, Vol.7753, p.77536D(2011).  
59th 応物学会予稿集, p.15A-GP1-3(2012).  
電気学会論文誌 C, Vol.132, No.11, pp.1873-1879(2012).

(4) SC 光の光波制御システム構築のための環境整備

(a)(b)空間位相変調器(SLM)を選定・購入し、光波制御システム構築するための装置環境

を整備し、光学系を構成し、基礎的測定を行った。光学系構成の超短パルス光を扱うため、ガラスによる分散が生じやすい、そのため凹面鏡や反射型の回折格子を使用した。また、反射型 SLM を使用することで、その前後の凹面鏡や回折格子の素子数の軽減を行い光学系の簡素化を図った。当該項目に関しては、更なる発展の可能性がある。現段階の状況の詳細については、以下の文献を参考の事。

黒杉 恭義, “空間光変調器を用いた光制御システムの構築,” 2012 年度 北見工業大学 情報システム工学科 卒業論文(2013).

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)

① 曾根 宏靖, 原田 康浩, 中村 真毅, 吉富大, 高田 英行, 笠原 亮, 鳥塚 健二, 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌), Vol.132, No.11, 2012, pp.1873-1879.

② H. Sone, D. Yoshitomi, X. Zhou, Y. Harada, S. Nakamura, F. Abrishamian, R. Kasahara, K. Kikuchi, and K. Torizuka, The Review of Laser Engineering, Vol.39, No.11, 2011, pp.862-865.

③ 曾根 宏靖, 原田 康浩, 今井 正明, 辻寧英, 中村 真毅, 光学, Vol.40, No.8, 2011, pp.439-447.

④ H. Sone, D. Yoshitomi, X. Zhou, K. Kikuchi, R. Kasahara, F. Abrishamian, S. Nakamura, Y. Harada, K. Torizuka, Proceedings of SPIE, Vol.7753, 2011, p.77536D.

⑤ H. Sone, D. Yoshitomi, X. Zhou, K. Kikuchi, R. Kasahara, F. Abrishamian, S. Nakamura, Y.

Harada, K. Torizuka, Proceedings of 21st International Conference on Optical Fiber Sensors(OFS-21), 2011.

⑥ Y. Harada, W. Aizuddin, H. Sone, Proceedings of OSA Topical Meeting of Digital Holography and Three Dimensional Imagin (DH), 2011.

⑦ Y. Harada, W. Aizuddin, and H. Sone, Technical Digest of International Workshop on Modern Science and Technology 2010 (IWMST 2010), 2010.

[学会発表] (計 4 件)

① 曾根 宏靖, 原田 康浩, 中村 真毅, 吉富大, 高田 英行, 笠原 亮, 引田 雄翔, 鳥塚 健二, 応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (CD-ROM) 59th ROMBUNNO, 15A-GP1-3 2012 年 2 月

② 曾根 宏靖, 吉富大, ZHOU X., 菊地 弘祐, 笠原 亮, ABRISHAMIAN Fatemeh, 中村 真毅, 原田 康浩, 鳥塚 健二, Optics & Photonics Japan 講演予稿集, 124-125 2010 年 11 月

③ 曾根 宏靖, 吉岡 宏晃, 吉富大, ZHOU X., 中村 真毅, 原田 康浩, 今井 正明, 鳥塚 健二, 応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (CD-ROM) 57th ROMBUNNO, 19P-B-3 2010 年 3 月

④ 曾根 宏靖, 原田 康浩, WANG Zhaoyang, 辻 寧英, 今井 正明, 応用物理学関係連合講演会講演予稿集 56th(3), 1248 2009 年 3 月

[図書] (計 1 件)

① “Single-Shot Phase-Shifting Digital

Holography Based on the Spatial Carrier Interferometry,” Y. Harada, W. Aizuddin, and H. Sone, InTech Open Access Publisher, Advanced Holography - Metrology and Imaging, ISBN 978-953-307-729-1, 2011, pp.91-102.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

曾根 宏靖 (SONE HIROYASU )

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00333667

(2) 研究分担者

中村 真毅 (NAKAMURA SHINKI )

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：90323211

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

吉富大 (YOSHITOMI DAI)

独立行政法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・研究員

研究者番号：10392680

原田 康浩 (HARADA YASUHIRO)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：80198928