

平成22年5月10日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19360031
 研究課題名（和文） パルス捕捉を用いた可視域における広帯域超短パルス光源の開発
 研究課題名（英文） Development of widely wavelength tunable ultrashort pulse source in visible region using pulse trapping
 研究代表者
 西澤 典彦（NISHIZAWA NORIHIKO）
 大阪大学・工学研究科・准教授
 研究者番号：30273288

研究成果の概要（和文）：

本研究では、まず、フォトニック結晶ファイバと超短パルスファイバレーザ光源を用いて、可視域全域をカバーする実用的な超広帯域光源を開発した。また、申請者が見出した新しい現象であるパルス捕捉を用いて、可視域におけるパルス光の制御に初めて成功した。又、超高速な波長可変光源を開発し、波長シフトを制御することで擬似的な超広帯域光源の生成に成功した。更に生成した擬似超広帯域光源を用いて超高分解能光断層計測を行い、その有用性を実証した。

研究成果の概要（英文）：

In this project, first of all, a practical ultra wideband light source covering whole visible region was developed using photonic crystal fibers and ultrashort pulse fiber laser system. Next, the all optical control of visible pulse was demonstrated for the first time using novel phenomenon of pulse trapping. Then, an ultrafast wavelength tunable pulse source was developed and quasi-wideband light source generation was demonstrated. The ultrahigh resolution cross-sectional imaging was demonstrated using the developed light source.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2008年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2009年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

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：超短パルス，フォトニック結晶ファイバ，スーパーコンティニューム，ファイバレーザ，パルス捕捉，非線形光学，可視域，ソリトン

1. 研究開始当初の背景

光ファイバは非線形係数自体はそれほど大きくないものの、微小な断面内に長距離に渡って光を閉じこめることができるため、有効な非線形光学デバイスの一つである。又、近年、フォトニック結晶ファイバや高非線形ファイバなどの高機能な光ファイバの開発によって、低い光強度でも大きな非線形効果を得ることができるようになってきた。

光と物質との相互作用を考えたとき、波長1 μm 以下の領域は、相互作用が顕著な領域である。実際に、3次元光メモリや多光子顕微鏡、レーザー顕微鏡などの応用では、波長1 μm 以下の帯域における実用的な波長可変超短パルス光源、及び、実用的なスーパーコンティニューム光源の開発が強く望まれている。可視域において、このような広帯域光源を実現することができれば、視覚的な方面でも新しい応用技術の開発につながることを期待される。

これまでに、申請者等は、超短パルス光源と光ファイバにおける非線形光学効果について、多くの成果を挙げてきている。また、最近、1.55 μm で発振するEr添加ファイバレーザーの出力パルスから、周期分極反転結晶(PPLN)を用いて第2高調波パルスを生成し、これを微細構造を持つフォトニック結晶ファイバに結合して、波長0.78~1.0 μm まで波長を可変できる超短パルス光の生成に成功した。しかし、可視の領域における波長可変超短パルス光源の開発は、未だ実現されていない。

光ファイバ中で超短パルス光が時間的に重なったとき、群速度整合という条件が満たされる時には、パルス光がパルス光を捕まえる、パルス捕捉という現象が生じる。近年、申請者は、光ファイバにおける超短ソリトンパルスによる二つの新しいパルス捕捉の現象を世界で初めて見出した。パルス捕捉を用いると、異常分散領域において長波長側にラマンシフトするソリトンパルスによって、正常分散領域のパルス光を短波長側に連続にシフトさせることができる。そこで、今回、非線形効果を用いた可視域における新規波長可変超短パルス光源とその応用技術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、フォトニック結晶ファイバと超短パルス光源を用いて、可視域全体をカバーする新しい波長可変超短パルス光源や実用的なスーパーコンティニューム光源を開発することにある。

近年、超短パルスファイバレーザーの研究は進展してきており、最近では、その高出力化が推進されてきている。しかし、波長可変化に対する取り組みは、申請者らを除いてほとんど行われていない。短波長帯における波長可変超短パルス光源は、高密度光メモリなどの分野では不可欠な光源であり、現在、その実現が強く求められている。

本研究ではまず、フォトニック結晶ファイバにおける超短パルス光の間の相互作用を解析し、パルス捕捉が効率よく得られる条件を明らかにする。更に、その結果を元に、可視域において波長可変な超短パルス光の生成を実現する。次に、可視域における高輝度・安定で実用的なスーパーコンティニューム光や、電子制御型ソリトンを用いた疑似スーパーコンティニューム光の生成を試みる。更に、生成されるソリトンパルスやスーパーコンティニューム光の光周波数コムとしての特性を評価する。

3. 研究の方法

(1) フォトニック結晶ファイバにおける超短パルス光によるパルス捕捉現象の特性解析

可視域におけるパルス捕捉による超短パルス光の波長シフトを実現するために、まず、Ti:Sapphire レーザー、又はNd:Glass レーザーを用いてフォトニック結晶ファイバにおける超高速非線形光学現象の解析を行う。まず、超短パルス光をフォトニック結晶ファイバに入射し、可視域の信号パルスと長波長側の制御パルスを生成する。そして、二つのパルスを時間差を調整して新たなフォトニック結晶ファイバに入射し、制御光による信号光のパルス捕捉を誘起する。超短パルス光間の非線形相互作用は、周波数分解光ゲート法(FROG)測定装置や光スペクトルアナライザなどを用いて出力光を観測し、その特性を調べていく。そして、フォトニック結晶ファイバにおいて、パルス捕捉が生じる条件、及びパルス捕捉によって可視域においてパルス光の波長をシフトできる条件を明らかにする。又、実験と並行して、コンピュータシミュレーションも行い、解析を進める。

(2) フォトニック結晶ファイバを用いた可視域波長可変超短パルス光源の開発

上記の研究の結果を踏まえ、パルス捕捉などの非線形相互作用を用いて、可視域における波長可変な超短パルス光の生成に取り組む。まず、Ti:Sapphire レーザー、又はNd:Glass レーザーとフォトニック結晶ファイバを用いて、制御パルスと信号パルスを生成する。こ

ここで、可能であれば単一のファイバでソリトンとアンチストークスパルスを生成し、パルス捕捉を誘起する。また、必要であれば、励起光を二つに分け、異なるファイバを用いて信号光と制御光を生成し、時間差を調整して、最終段のファイバに入射し、パルス捕捉を誘起する。

(3) 可視域超広帯域スーパーコンティニューム光の生成

上記において生成した高出力超短パルス光を非線形性の高いフォトニック結晶ファイバに入射し、可視の領域まで広がる全ファイバ型のスーパーコンティニューム光の生成に取り組む。可視の領域では、チタンサファイアレーザーとフォトニック結晶ファイバを用いてスーパーコンティニューム光の生成が報告されているが、これらは雑音レベルが高く、微細構造も多く、不安定で、実用上、問題になっている。しかし、超高分解能 OCT や各種光計測などの応用では、スペクトル形状が優れ、雑音の低いスーパーコンティニューム光が必要になる。

ここでは、周波数分解光ゲート法測定装置を用いた実験と、数値解析を合わせて行い、時間的・スペクトル的に重なる成分のない、良質で実用的な可視域のスーパーコンティニューム光の生成に取り組む。

理想的なスーパーコンティニューム光の生成には、フォトニック結晶ファイバを用いた生成系を最適化して用いる。

(4) 全ファイバ型可視域超広帯域スーパーコンティニューム光源の開発

上記の研究成果を元に、全ファイバ型の可視域超広帯域スーパーコンティニューム光源の開発に取り組む。波長1.55 μm で発振するファイバレーザーの出力をLiNbO₃の周期分極反転結晶に結合し、第2高調波パルスを高効率に生成することで、波長1 μm 以下の帯域にSC光の励起用パルスを生成する。ここで、励起パルスの波長は、上記の研究の結果から、可視域のSC光の生成に最適な波長とする。励起パルスの波長は、まず光ファイバ中でのラマンシフトを用いて所望の波長に基本波パルスをシフトさせ、次にその波長のパルスに合わせて設計した周期分極反転結晶を用いる方法で最適な波長に合わせる。生成した励起パルスは、最適なフォトニック結晶ファイバに入射し、可視域において広帯域に広がる実用的なスーパーコンティニューム光を生成する。又、波長1.06 μm で発振するYb添加超短パルスファイバレーザーは、波長は若干長波長ではあるが、大きな出力を得ることができるため、可視域のスーパーコンティニューム光の生成には有効である可能性もある。Yb添加超短パルスファイバレーザーとフォト

ニック結晶ファイバを用いたSC光の生成実験も合わせて行う。

(5) 電子制御型波長可変ソリトンを用いた疑似スーパーコンティニューム光の生成と特性評価

これまでの研究成果を活かし、可視域の波長可変超短パルス光源、及び波長可変ソリトン光源の波長を超高速にシフトさせ、擬似的なスーパーコンティニューム光を生成する。実験では、全ファイバ型光源、又は、超短パルス固体レーザーを用いた波長可変光源に、音響光学変調器を適用し、パーソナルコンピュータでソフト的に波長を電子制御する。この光源において、波長可変ソリトンの波長を連続に高速にスキャンすると、低速の光検出器では、連続的なスペクトルを持つ擬似的なスーパーコンティニューム光として検出される。又、可視域のアンチストークスパルスの波長をシフトさせると、可視域における擬似的なスーパーコンティニューム光を生成することができる。この方式では、スペクトルの振幅や中心波長を調整することで、任意の中心波長や帯域を実現することが出来る。

ここでは、更に、生成した疑似スーパーコンティニューム光をインコヒーレント干渉計測に用いた場合のコヒーレンス長やS/N比、感度などの諸特性を評価し、SC光の干渉計測用の光源としての特性を評価する。

(6) 研究の総括

本研究のまとめ、議論・検討を行う。

4. 研究成果

(1) フォトニック結晶ファイバにおける超短パルス光による超高速非線形現象の特性解析
まずTi:Sapphireレーザーを用いて、各種フォトニック結晶ファイバにおける超短パルス光の伝搬特性を実験的に解析した。そして、波長800nm帯の励起パルスを用いたときに、最も広帯域、且つ平坦に広がるフォトニック結晶ファイバの特性を見出した。

(2) フォトニック結晶ファイバを用いた全ファイバ型可視～近赤外域スーパーコンティニューム(SC)光源の開発

波長1.55 μm で発振するEr添加超短パルスファイバレーザーからの出力パルスを、新規に開発したEr添加ファイバによるチャープパルス増幅システムを用いて増幅し、大口径フォトニック結晶ファイバを用いて分散補償することにより、高強度超短パルス光を生成した。更に、周期分極反転結晶を用いて第2高調波パルスを生成し、非線形性の高いフォトニック結晶ファイバに結合して、波長450 - 1400 nmの可視～近赤外に渡って広がる超広帯域ス

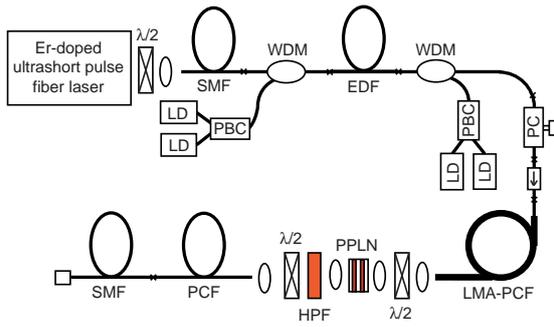


図1 全ファイバ型可視域SC光生成システム

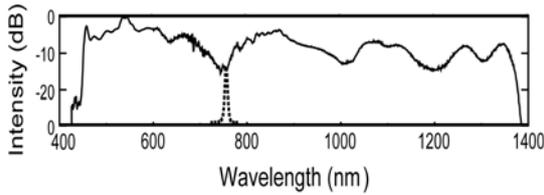


図2 可視域スーパーコンティニューム光のスペクトル

ーパーコンティニューム光源を開発することに成功した. 平坦性は帯域全域に渡って±6dBと良好で, また光強度34mWと高い光出力を得ることができた.

(3) フォトニック結晶ファイバを用いた可視域波長可変超短パルス光の生成I

まず, Nd:Glassレーザーから出力されるパルス光を周期分極反転結晶に集光して第2高調波を生成する. そして二つのパルスを零分散波長が800nm帯にあり, 群速度整合をほぼ満たすフォトニック結晶ファイバに結合して, パルス捕捉を誘起する. そして, 基本波の強度を変化させることで長波長側にシフトするラマンソリトンパルスを生成し, また, このソリトンパルスによって第2高調波のパルス光を捕捉し, 波長を短波長側にシフトさせる. このように, パルス捕捉を用いて可視域における波長可変超短パルス光を生成した. 今

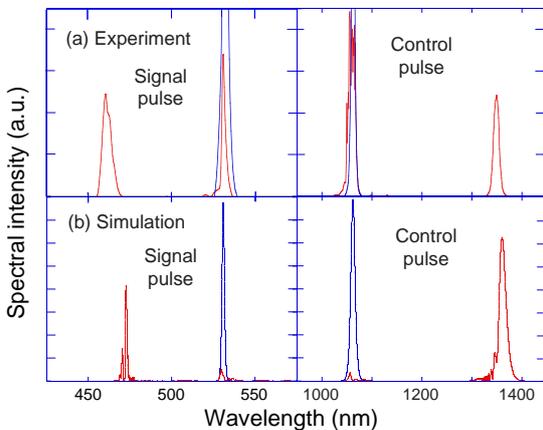


図3 可視域における波長制御時のスペクトル

回の実験では, 530nmから450nmまでの連続的な波長シフトを得ることができた.

(4) フォトニック結晶ファイバにおけるパルス捕捉現象の特性解析

上記1と同様にして生成した第2高調波パルスと基本波をダイクロイックミラーを用いて分離し, 光路差を調整した後, ダイクロイックミラーにおいて再び重ね合わせる.

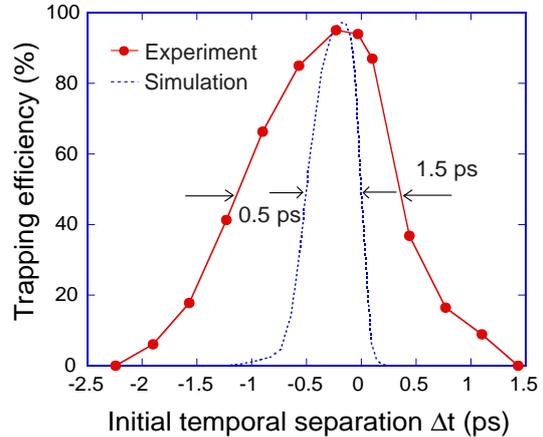


図4 パルス捕捉の時間応答特性

そして重ね合わせた光を特性の異なるフォトニック結晶ファイバに結合し, パルス捕捉の特性を評価した. 今回の実験では, 時間差を最適に調整することで, 最大95%の捕捉効率を得ることができた. また, パルス捕捉の時間応答は0.5ps程度であり, 超高速な光制御が実現できることが分かった. また, 数値解析も併せて行い, ファイバ長依存性や強度依存性などを明らかにすることができた. 数値計算の結果は実験結果と良く一致し, 数値計算の信頼性を確認することができた.

(5) フォトニック結晶ファイバを用いた可視域波長可変超短パルス光の生成II

Nd:Glassレーザーから出力される超短パルス光をYb添加ファイバを用いて増幅し, 分散補償を行うことによって高強度な超短パルス光を生成した. 時間幅84fs, パルスエネルギー4.5nJの超短パルス光を得ることができた. その後, 零分散波長が900nm帯にあるフォトニック結晶ファイバを用いて波長可変ソリトンとともに, パルス捕捉を持ちいて可視域の波長可変アンチストークスパルス光を生成した. 550~670nmの赤から緑の帯域で, 連続的な波長可変動作に成功した.

(6) 電子制御型波長可変ソリトンを用いた擬似スーパーコンティニューム光の生成と特性評価

上記のシステムにおいて, 変調器と任意波

形が生成可能な発振器を用いて、擬似的なスーパーコンティニューム(SC)光を生成した。発振器における任意波形は計算から求め、生成される擬似SC光のスペクトル形状を観測しながら調整した。中心波長1220nmで半値全幅220nmの単峰な擬似SC光の生成に成功した。更にこの擬似SC光を用いて超高分解能光断層計測実験を行い、ハムスターの頬肉や豚の食道などの生体サンプルの超高分解能イメージングに成功した。空気中での分解能5 μm 、生体中分解能3.3 μm 、感度95dBの特性を確認し、擬似SCによる超高分解能OCTイメージングを実証した。

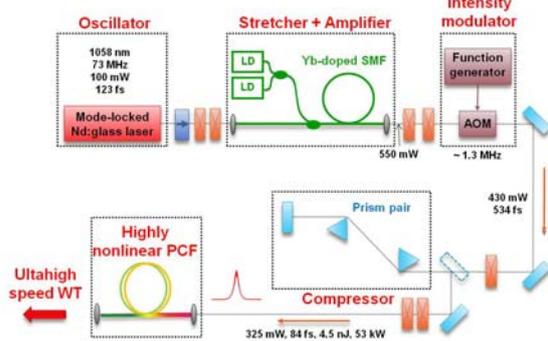


図5 1.0 μm 帯超短パルス光源を用いた超高速波長可変超短パルス光生成システム

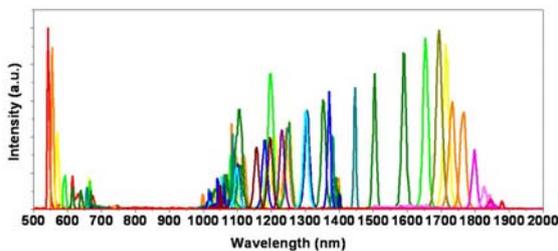


図6 フォトニック結晶ファイバを用いた超広帯域波長可変超短パルス光のスペクトル

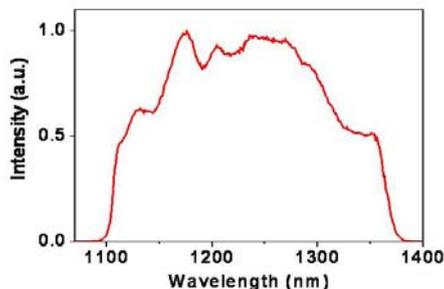


図7 フォトニック結晶ファイバを用いた超広帯域波長可変超短パルス光のスペクトル

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計16件)

①N. Nishizawa and K. Itoh, "Control of optical pulse at visible region using pulse trapping by soliton pulse in photonic crystal fibers," Applied Physics Express, vol.2 (2009) 062501.(査読有)

②N. Nishizawa, "Highly functional all-optical control using ultrafast nonlinear effects in optical fibers," IEEE Journal of Quantum Electronics, vol.45 (2009) 1445. (査読有)

③Y. Seno, N. Nishizawa, Y. Sakakibara, K. Sumimura, E. Itoga, H. Kataura, and K. Itoh, "Polarization maintaining, high energy, wavelength tunable, Er-doped ultrashort pulse fiber laser using carbon-nanotube polyimide film," Optics Express, vol.17 (2009) 20233. (査読有)

④N. Nishizawa, H. Mitsuzawa, J. Takayanagi, and K. Sumimura, "Generation of 0.45-1.38 μm visible to near-infrared widely broadened super continuum using Er-doped ultrashort pulse fiber laser system," Journal of Optical Society of America B, vol.26 (2009) 426. (査読有)

⑤N. Nishizawa and T. Goto, "Octave spanning high quality super continuum generation using 10 nJ and 104 fs high energy ultrashort soliton pulse," Applied Physics Express, vol.1 (2008) 022009. (査読有)

[学会発表] (計21件)

①N. Nishizawa, "Highly functional all optical control using ultrafast nonlinear phenomena in optical fibers," ICTON2009, June 29, 2009, Azores, Portugal.

②西澤典彦, 住村和彦, 伊東一良, "高機能超短パルスファイバレーザー技術の進展," レーザー学会学術講演会第30回年次大会, 平成22年2月4日, 大阪府吹田市.

③N. Nishizawa and K. Itoh, "Control of optical pulse at visible region using pulse trapping in photonics crystal fibers," CLEO2009, June 1, 2009, Baltimore, USA.

④西澤典彦, 伊東一良, "フォトニック結晶ファイバにおけるパルス捕捉を用いた可視域のパルス光の制御", 第69回応用物理学会学術講演会, 平成20年9月3日, 中部大学.

⑤満沢秀幸, 西澤典彦, 高柳順, 住村和彦,

“全ファイバ型システムにおける可視域SC光の生成”，平成19年9月6日，北海道工業大学

〔図書〕（計1件）

①西澤典彦，「RGB3原色白色レーザーの開発」，第3章，第1節，サイエンス&テクノロジー，（2007）12p.

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：スーパーコンティニューム光源

発明者：西澤典彦

権利者：大阪大学，名古屋大学，NUシステム（株）

種類：特許

番号：特願2008-6500

出願年月日：平成20年1月16日

国内外の別：国内

○取得状況（計1件）

名称：広帯域波長可変超短パルス光発生装置

発明者：後藤俊夫，西澤典彦

権利者：科学技術振興事業団

種類：特許

番号：特許第4066120号

取得年月日：平成20年1月18日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西澤 典彦 (NISHIZAWA NORIHIKO)

大阪大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30273288