

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6607534号
(P6607534)

(45) 発行日 令和1年11月20日(2019.11.20)

(24) 登録日 令和1年11月1日(2019.11.1)

(51) Int. Cl.	F I	
HO 1 S 3/067 (2006.01)	HO 1 S	3/067
GO 2 B 6/02 (2006.01)	GO 2 B	6/02 4 1 1
GO 2 F 1/355 (2006.01)	GO 2 F	1/355 5 0 1
GO 2 F 1/365 (2006.01)	GO 2 F	1/365
HO 1 S 3/083 (2006.01)	HO 1 S	3/083

請求項の数 3 (全 8 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2014-31286 (P2014-31286)	(73) 特許権者	504261077
(22) 出願日	平成26年2月21日 (2014. 2. 21)		大学共同利用機関法人自然科学研究機構
(65) 公開番号	特開2015-156452 (P2015-156452A)		東京都三鷹市大沢二丁目2 1 番 1 号
(43) 公開日	平成27年8月27日 (2015. 8. 27)	(74) 代理人	100081776
審査請求日	平成28年12月28日 (2016. 12. 28)		弁理士 大川 宏
審判番号	不服2018-13117 (P2018-13117/J1)	(72) 発明者	野村 雄高
審判請求日	平成30年10月2日 (2018. 10. 2)		愛知県岡崎市明大寺町字西郷中3 8 番地
		(72) 発明者	藤 貴夫
			愛知県岡崎市明大寺町字西郷中3 8 番地
			大学共同利用機関法人自然科学研究機構
			分子科学研究所内
			分子科学研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 受動モードロックファイバレーザ装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

リング共振器と、
前記リング共振器内に配置された T m 添加 Z B L A N ファイバ利得媒質と、
前記 T m 添加 Z B L A N ファイバ利得媒質の両端面に端面結合された非線形偏波回転によるモードロックを安定させる二つの T m 無添加 Z B L A N ファイバと、
前記 T m 添加 Z B L A N ファイバ利得媒質をポンプするポンプ光源と、
非線形偏波回転モードロック機構と、を有し、前記ポンプ光源のポンプ波長が 7 9 0 n m で、前記 T m 添加 Z B L A N ファイバ利得媒質の T m 添加濃度が 0 . 5 mol% より高く 1 0 mol% 以下である発振波長が 2 μ m 帯の受動モードロックファイバレーザ装置。

【請求項 2】

前記ポンプ光源はチタンサファイアレーザである請求項 1 に記載の受動モードロックファイバレーザ装置。

【請求項 3】

前記 T m 添加 Z B L A N ファイバ利得媒質の長さが 0 . 6 4 m 未満である請求項 1 または 2 に記載の受動モードロックファイバレーザ装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、波長 2 μ m 近傍の超短パルスレーザを発生する受動モードロックファイバ

ーザ装置に関する。

【背景技術】

【0002】

パルス時間幅が短いコヒーレント光は、ピークパワーが大きく且つ集光性に優れているので、集光スポットの強度がテラワットにもなる。このような超短パルスコヒーレント光は、超精密加工、超高速時間分解計測、分子制御、光コヒーレンストモグラフィーなど、ナノテクノロジー、バイオテクノロジー、医療、産業分野にわたり、有用である。

【0003】

上記の分野へ応用可能な超短パルスレーザとしては、 $0.8\ \mu\text{m}$ 帯のTiサファイアレーザ、 $1\ \mu\text{m}$ 帯のYbレーザ、 $1.5\ \mu\text{m}$ 帯のErレーザ、 $2\ \mu\text{m}$ 帯のTm添加石英ファイバレーザ（非特許文献1参照。）、 $2.8\ \mu\text{m}$ 帯のEr添加フッ化物ガラス（ZBLAN）ファイバレーザ（非特許文献2参照。）等が挙げられる。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【非特許文献1】Andreas Wienke, et.al., "Ultrafast, stretched-pulse thulium-doped fiber-based dispersion management", OPTICS LETTERS, Vol.37, No.13, pp2466-2468, published June 19, 2012.

【非特許文献2】時田茂樹、"中赤外OH吸収帯波長高出力超短パルスファイバレーザの開発"、[online]、[平成25年2月11日検索]、インターネット<URL: [http://kaken.nii.ac.jp/pdf/2010/seika/mext/14301/20760032seika.pdf#search='%EF%BC%BA%EF%BC%A2%EF%BC%AC%EF%BC%A1%EF%BC%AE+%E6%99%82%E7%94%B0'](http://kaken.nii.ac.jp/pdf/2010/seika/mext/14301/20760032seika.pdf#search='%EF%BC%BA%EF%BC%A2%EF%BC%AC%EF%BC%A1%EF%BC%AE+%E6%99%82%E7%94%B0'>)>

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

Andreas Wienke等は、長さ $0.64\ \text{m}$ のTm添加石英ファイバを利得媒質とする非線形偏波回転型受動モードロックレーザで、パルス幅 $500\ \text{fs}$ 、パルスエネルギー $170\ \text{pJ}$ 、繰り返し周波数 $45.42\ \text{MHz}$ 、平均パワー $7.8\ \text{mW}$ （光-光変換効率： 14% ）のレーザを得ている。なお、Andreas Wienke等は、上記の $500\ \text{fs}$ のパルスを外部圧縮器で圧縮することで、 $119\ \text{fs}$ のパルス幅を達成している。

【0006】

一方、時田は、長さ $30\ \text{m}$ のEr添加ZBLANファイバを利得媒質とする非線形偏波回転型受動モードロックレーザで、繰り返し周波数 $6.7\ \text{MHz}$ （モード同期が不安定のためパルス幅等は報告されていない）のレーザ発振に成功している。

【0007】

上記のように、 $2\ \mu\text{m}$ 帯の波長域では、パルス幅が $119\ \text{fs}$ のレーザしか報告されていない。パルス幅が $119\ \text{fs}$ では波長変換や周波数コム、二光子顕微鏡などへ用いることが難しい。一般に、パルス幅は短ければ短い程良い。

【0008】

そこで、本発明は、 $2\ \mu\text{m}$ 帯でこれまでよりパルス幅の短いレーザを発生する、受動モードロックファイバレーザ装置を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記の課題を解決するためになされた本発明の受動モードロックファイバレーザ装置は、共振器と、前記共振器内に配置されたファイバ利得媒質と、前記ファイバ利得媒質をポンプするポンプ光源と、モードロックを誘起するモードロック機構と、を有し、前記ファイバ利得媒質がTm添加ZBLANファイバであることを特徴とする。

【0010】

Tm添加ZBLANガラスのエネルギー準位とZBLANファイバの波長分散特性とにより、波長 $2\ \mu\text{m}$ 帯でパルス幅が従来よりも短いパルスレーザを発生させることができる。

【 0 0 1 1 】

上記の受動モードロックファイバレーザ装置において、前記共振器内に分散補償手段を有するとよい。これにより、さらにパルス幅の短いパルスレーザを発生させることができる。

【 0 0 1 2 】

また、前記モードロック機構が非線形偏波回転であるとよい。発振するレーザのスペクトル幅（帯域）は共振器内の光学要素の帯域によって決まるが、これにより、帯域を狭める光学要素を使用しなくてよいので、発振するレーザのスペクトル幅が狭くならない。

【 0 0 1 3 】

また、前記共振器はリング共振器であるとよい。モードロック機構が非線形偏波回転の場合、線形（ファブリペロ型）共振器では波長板を1往復の間に2回透過してしまうために、非線形偏波回転による受動モードロックが安定しない。そのため、ファラデー回転子鏡などを必要とする。リング共振器では、波長板を1回しか透過しないので、非線形偏波回転による受動モードロックが安定する。

10

【 0 0 1 4 】

また、前記ポンプ光源のポンプ波長が790nmであるとよい。これにより、2μm近傍で高効率発振させることができる。

【 0 0 1 5 】

また、前記Tm添加ZBLANファイバに接続された無添加ZBLANファイバを備えるとよい。これにより、非線形効果が大きくなり、非線形偏波回転による受動モードロックが安定する。

20

【 0 0 1 6 】

また、前記Tm添加ZBLANファイバと前記無添加ZBLANファイバとは端面結合されるとよい。ZBLANファイバは融点が300℃と低いので、石英ファイバのように融着することが困難である。Tm添加ZBLANファイバから出た光を空中伝播させて無添加ZBLANファイバに結合させるには、少なくとも2枚のレンズを必要とする。光学要素が増えると、反射・吸収損失が増え、軸ずれが起こりやすくなり、光学系の調整に時間がかかる。端面結合すれば、損失を大幅に減らすことができ、軸ずれや調整の問題も生じない。

【 0 0 1 7 】

また、前記Tm添加濃度は0.5mol%より高く10mol%以下であるとよい。Tm添加濃度は1~4mol%の範囲がより好ましい。

30

【 0 0 1 8 】

ポンプ波長が790nmの場合、2μm付近で発振させるためには、Tmイオン同士が接近している必要があり、少なくとも0.5mol%より高くなければならない。Tm添加濃度が10mol%以下ではポンプ光がTm添加ZBLANファイバの全長に亘って有効に吸収される。Tm添加濃度が1mol%以上ではTmイオン同士が十分接近しており、相互作用（cross relaxation）が一層起きやすくなる。Tm添加濃度が4mol%以下では、ポンプ光がTm添加ZBLANファイバの全長に亘って一層有効に吸収される。

【 0 0 1 9 】

また、前記Tm添加ZBLANファイバの長さが0.64m未満であるとよい。これにより、ポンプ光がTm添加ZBLANファイバの全長に亘って有効に吸収される。

40

【 発明の効果 】

【 0 0 2 0 】

Tm添加ZBLANガラスのエネルギー準位とZBLANファイバの波長分散特性とにより、波長2μm帯でパルス幅が従来よりも短いパルスレーザを発生させることができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 2 1 】

【 図 1 】 実施形態1に係る本発明の受動モードロックファイバレーザ装置の概略構成図である。

50

【図2】実施形態2に係る本発明の受動モードロックファイバレーザ装置の概略構成図である。

【図3】実施形態3に係る本発明の受動モードロックファイバレーザ装置の概略構成図である。

【図4】実施形態4に係る本発明の受動モードロックファイバレーザ装置の概略構成図である。

【図5】実施例の受動モードロックファイバレーザ装置で発生したパルス波形である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

(実施形態1)

本実施形態の受動モードロックファイバレーザ装置は、図1に示すように、2つの反射要素1a、1bで構成されるファブリペロ型共振器1と、共振器1内に配置されたファイバ利得媒質2と、ファイバ利得媒質2をポンプするポンプ光源3と、モードロック機構4を有している。

【0023】

本実施形態の反射要素1aは、反射鏡Mの表面にモードロック機構4の半導体可飽和吸収体SAを形成したものである。モードロック機構4としては、可飽和吸収体の他に共振器1を構成する反射要素1bを光軸方向に移動させるものでもよい。

【0024】

ファイバ利得媒質2は、ZBLAN (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF) ファイバのコアにTmを添加したものである。Tm添加ZBLANファイバ2は、コア径が例えば6μmのシングルモードファイバーである。また、Tm添加ZBLANファイバ2の長さは、Tm添加濃度とポンプ光源4のポンプ光波長、ポンプパワ等によって決められる。

【0025】

例えば、チタンサファイアレーザをポンプ光源に使用する場合、ポンプ光波長が790nmになる。ポンプ光波長が790nmのとき2μm帯で発振させるためには、Tmイオン同士を十分接近させて、相互作用(cross relaxation)を引き起こす必要がある。したがって、Tm添加濃度は0.5mol%より高く10mol%以下が好ましく、1~4mol%の範囲がより好ましい。

【0026】

例えば、Tm添加濃度が4mol%の場合、Tm添加ZBLANファイバ2の長さは、0.2mである。Tm添加濃度が2mol%の場合、Tm添加ZBLANファイバ2の長さは、0.4mである。

【0027】

反射要素1bは石英ガラスに誘電体多層膜をコートしたもので、発振波長(2μm)に対して90%の反射率(10%の透過率)を有する。

【0028】

5は2色ミラーで、790nmのポンプ光を反射し、2μm帯の発振光を透過する。6a、6bは、カップリングレンズである。

【0029】

本実施形態の受動モードロックファイバレーザ装置は、Tm添加ZBLANガラスのエネルギー準位とZBLANファイバの波長分散特性とにより、波長2μm帯でパルス幅が80fsと従来よりも短いパルスレーザを発生させることができる。

【0030】

(実施形態2)

本実施形態の受動モードロックファイバレーザ装置は、図2に示すように、実施形態1の受動モードロックファイバレーザ装置に分散補償手段7を追加したものである。実施形態1と同一の要素には同一の符号を付し、説明を省略する。

【0031】

本実施形態の分散補償手段7は回折格子型で、回折格子7a、球面鏡7b、平面鏡7c

10

20

30

40

50

を備えている。例えば、回折格子 7 a の + 1 次回折光を球面鏡 7 b と平面鏡 7 c とで分散補償する場合、7 d は、回折格子 7 a の - 1 次光を出力として取り出す平面鏡である。

【 0 0 3 2 】

本実施形態の受動モードロックファイバレーザ装置は、分散補償手段 7 を備えているので、実施形態 1 の受動モードロックファイバレーザ装置よりパルス幅の短い ~ 5 0 f s のパルスレーザを発生することができる。

【 0 0 3 3 】

本実施形態では、分散保諸手段 7 に回折格子型を用いたが、チャープファイバブラッグ格子、チャープミラー等を用いてもよい。

【 0 0 3 4 】

なお、T m 添加 Z B L A N ファイバ 2 のコア径を大きくしたり、コア/クラッドの屈折率比を変えることで波長分散を小さくすることができる。しかし、コア径を大きくすると、シングルモードになり難い問題が生じる。また、コア/クラッドの屈折率比を変えると、T m 添加濃度が制約される。したがって、分散保諸手段 7 を備えることで、そのような問題、制約を回避することができる。

【 0 0 3 5 】

(実施形態 3)

本実施形態の受動モードロックファイバレーザ装置は、図 3 に示すように、実施形態 1 の受動モードロックファイバレーザ装置におけるモードロック機構 4 を可飽和吸収体 S A を用いる方式から非線形偏波回転方式に変更した以外は、実施形態 1 の受動モードロックファイバレーザ装置と同じである。実施形態 1 と同一の要素には同一の符号を付し、説明を省略する。

【 0 0 3 6 】

両端に配置された 1 c と 1 d は、共振器 1 を構成する反射鏡で、1 d は非線形偏波回転のためのファラデー回転子鏡 4 e を兼ねている。4 a と 4 b は 1 / 4 波長板であり、直線偏光を楕円偏光に、楕円偏光を直線偏光に変換する。4 c は 1 / 2 波長板であり、偏光の向きを回転する。4 d はファラデー回転子、4 e はファラデー回転子鏡である。4 f は出力取り出しのための偏光ビームスプリッタである。

【 0 0 3 7 】

ファラデー回転子 4 d とファラデー回転子鏡 4 e とは、共振器 1 内の線形偏波回転の補正及び共振器 1 内の非線形偏波回転を安定させるために用いられる。

【 0 0 3 8 】

本実施例において、非線形偏波回転による受動モードロックは、偏光ビームスプリッタ 4 f と T m イオン添加 Z B L A N ファイバ利得媒質 2 との間に配置された 1 / 4 波長板 4 b と 1 / 2 波長板 4 c によって達成される。

【 0 0 3 9 】

偏光ビームスプリッタ 4 f で取り出される出力の大きさは、1 / 4 波長板 4 a によって調節される。

【 0 0 4 0 】

本実施形態の受動モードロックファイバレーザ装置は、共振器内に可飽和吸収体を備えていないので、帯域の広い 2 μ m 帯の超短パルスレーザを発生させることができる。

【 0 0 4 1 】

(実施形態 4)

本実施形態の受動モードロックファイバレーザ装置は、図 4 に示すように、実施形態 2 の受動モードロックファイバレーザ装置におけるファブリペロ型共振器 1 をリング共振器 1 0 に、モードロック機構 4 を可飽和吸収体 S A を用いる方式から非線形偏波回転方式に変更し、T m 添加 Z B L A N ファイバ 2 に無添加 Z B L A N ファイバ 2 a 、 2 b を接続した以外は、実施形態 2 の受動モードロックファイバレーザ装置と同じである。実施形態 2 と同一の要素には同一の符号を付し、説明を省略する。

【 0 0 4 2 】

10

20

30

40

50

無添加 ZBLANファイバ 2 a、2 b は、Tm 添加 ZBLANファイバ 2 の Tm 添加前の状態に等しい。すなわち、無添加 ZBLANファイバ 2 a、2 b のコア径、波長分散特性等は、Tm 添加 ZBLANファイバ 2 と同じである。

【0043】

無添加 ZBLANファイバ 2 a、2 b を Tm 添加 ZBLANファイバ 2 に接続する理由は、非線形偏波回転によるモードロックを安定させるためである。すなわち、ファイバが短いと、ファイバ内を伝播する光が受ける非線形効果が小さく、偏波回転が十分に起こらない。非線形偏波回転を十分に起こすためには、Tm 添加 ZBLANファイバ 2 を長くする必要はある。しかし、長くすると、ポンプ光源 3 からのポンプ光が Tm 添加 ZBLANファイバ 2 の途中で吸収され尽くし、Tm 添加 ZBLANファイバ 2 の全長に亘って利得作用を奏することができなくなる。しからば、Tm 添加濃度を下げればよいが、前述したように、Tm 添加濃度には下限がある。本実施形態では、例えば、Tm 添加濃度が 4 mol% の場合、ポンプ光が Tm 添加 ZBLANファイバ 2 の全長に亘ってポンプ作用するように、Tm 添加 ZBLANファイバ 2 の長さが、0.2 m に設定された。Tm 添加 ZBLANファイバ 2 の長さが 0.2 m では、ファイバ内を伝播する光が受ける非線形効果が小さく、非線形偏波回転が十分に起こらない。そこで、本実施形態では、Tm 添加 ZBLANファイバ 2 の両端に、何も添加しない例えば長さ 1 m の無添加 ZBLANファイバが接続された。

10

【0044】

Tm 添加 ZBLANファイバ 2 と無添加 ZBLANファイバ 2 a、2 b とは、図 4 のように端面結合されている。端面結合する理由は以下の通りである。すなわち、ZBLANファイバは融点が 300 と低いため、石英ファイバのように融着することが困難である。Tm 添加 ZBLANファイバから出た光を空中伝播させて無添加 ZBLANファイバに結合させると、少なくとも 2 枚のレンズを必要とし、反射・吸収損失が増え、軸ずれを起こしやすくなり、光学系の調整に時間がかかる。端面結合すれば、損失を大幅に減らすことができ、軸ずれや調整の問題も生じない。

20

【0045】

リング共振器 10 は、アイソレータ 10 a、反射鏡 10 b、2 色ミラー 10 c、10 d 及び反射鏡 10 e で構成される。

【0046】

偏光ビームスプリッタ 4 f は、非線形偏波回転でモードロックする際、不要な偏光成分を除去する。

30

【0047】

(実施例)

実施例の受動モードロックファイバレーザ装置は、図 4 に示す実施形態 4 の受動モードロックファイバレーザ装置である。

【0048】

Tm 添加 ZBLANファイバ 2 は、長さが 0.2 m で、コア径が 6 μ m の偏光保持シングルモードファイバに Tm を 4 mol% 添加したものである。

【0049】

無添加 ZBLANファイバ 2 a、2 b は、長さが 1 m でコア径が 6 μ m の偏光保持シングルモードファイバである。

40

【0050】

ポンプ光源 3 は、チタンサファイアレーザシステムであり、波長 793 nm のポンプ光を発生する。

【0051】

カップリングレンズ 6 a、6 b は、焦点距離が 6 mm であり、表面に 790 nm と 1.6 ~ 2.0 μ m の光に対する AR コートが施されている。

【0052】

2 色ミラー 5 は、790 nm の光を透過し、1.6 ~ 2.0 μ m の光を反射するように

50

誘電体多層膜が形成されている。

【 0 0 5 3 】

回折格子 7 a の格子密度は、6 0 0 本 / m m であり、回折格子 7 a から平面鏡 7 c までの光路長は 0 . 0 7 5 m である。

【 0 0 5 4 】

ポンプ光源 3 のポンプパワーが 1 4 0 m W のとき、スペクトル幅 0 . 3 μ m 、平均パワー 1 3 m W 、パルス幅 5 0 f s (図 5 参照) 、繰り返し周波数 6 7 . 5 M H z の超短光パルスレーザが発生された。光 - 光変換効率は 9 % であった。

【 0 0 5 5 】

すなわち、2 μ m 帯でパルス幅が 5 0 f s と従来の約半分の超短光パルスが発生することができた。

10

【 0 0 5 6 】

なお、図 5 のパルス波形は、周波数分解光ゲート (F R O G) 法により得られた時間スペクトル分解画像を解析することで得られたものである。

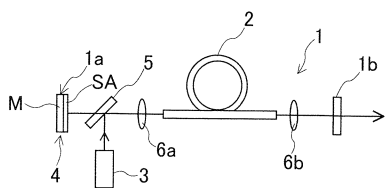
【 符号の説明 】

【 0 0 5 7 】

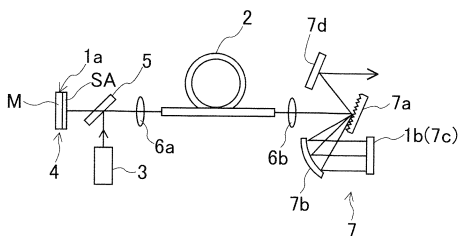
- 1 共振器
- 2 ファイバ利得媒質 (T m 添加 Z B L A N ファイバ)
- 2 a 、 2 b 無添加 Z B L A N ファイバ
- 3 ポンプ光源
- 4 モードロック機構
- 7 分散補償手段
- 1 0 リング共振器

20

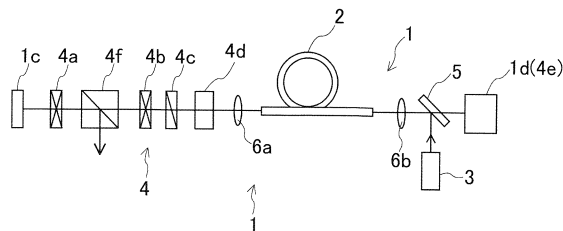
【 図 1 】



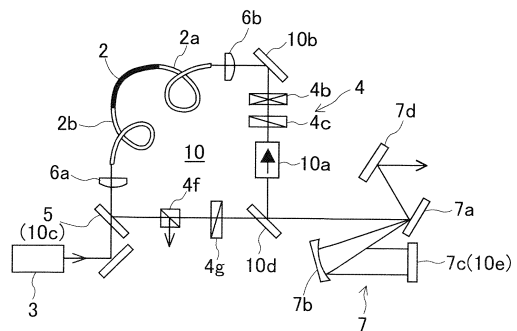
【 図 2 】



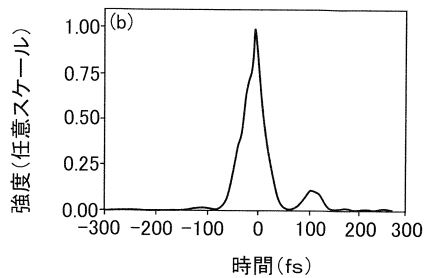
【 図 3 】



【 図 4 】



【 図 5 】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 S 3/098 (2006.01) H 0 1 S 3/098

(72)発明者 三村 榮紀
埼玉県ふじみ野市大原2丁目1番15号 ファイバーラボ株式会社内

(72)発明者 小川 和彦
埼玉県ふじみ野市大原2丁目1番15号 ファイバーラボ株式会社内

合議体

審判長 井上 博之

審判官 山村 浩

審判官 星野 浩一

(56)参考文献 特表2005-534933(JP,A)
特表2004-527001(JP,A)
国際公開第2012/125391(WO,A1)

(58)調査した分野(Int.Cl.,DB名)
H01S1/00-4/00