

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6946282号
(P6946282)

(45) 発行日 令和3年10月6日 (2021. 10. 6)

(24) 登録日 令和3年9月17日 (2021. 9. 17)

(51) Int. Cl.

F I

G O 2 F 1/35 (2006. 01)

G O 2 F 1/35 5 O 1

G O 2 F 1/355 (2006. 01)

G O 2 F 1/355 5 O 1

H O 1 S 3/10 (2006. 01)

H O 1 S 3/10 D

H O 1 S 3/16 (2006. 01)

H O 1 S 3/16

H O 1 S 3/094 (2006. 01)

H O 1 S 3/094

請求項の数 9 (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願2018-517577 (P2018-517577)
 (86) (22) 出願日 平成28年9月22日 (2016. 9. 22)
 (65) 公表番号 特表2018-534615 (P2018-534615A)
 (43) 公表日 平成30年11月22日 (2018. 11. 22)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2016/053008
 (87) 国際公開番号 W02017/062181
 (87) 国際公開日 平成29年4月13日 (2017. 4. 13)
 審査請求日 令和1年9月11日 (2019. 9. 11)
 (31) 優先権主張番号 62/237, 821
 (32) 優先日 平成27年10月6日 (2015. 10. 6)
 (33) 優先権主張国・地域又は機関
 米国 (US)

(73) 特許権者 501012517
 アイピージー フォトニクス コーポレー
 ション
 アメリカ合衆国 マサチューセッツ州 O
 1 5 4 O, オックスフォード, オールド
 ウェブスター ロード 5 O
 (74) 代理人 100108453
 弁理士 村山 靖彦
 (74) 代理人 100110364
 弁理士 実広 信哉
 (74) 代理人 100133400
 弁理士 阿部 達彦

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 サブナノ秒広域スペクトル発生レーザーシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

サブナノ秒パルスの特性を増強する方法であって、

パルス信号光を第一波長においてバルク利得媒体に結合させることによって、シングル
 パスで前記バルク利得媒体を通過するように前記信号光の入力サブナノ秒パルスを誘導し
 、前記信号光の各入力サブナノ秒パルスが第一パルス持続時間と第一スペクトル幅と第一
 パルスピークパワーとを有するようにすることと、

前記バルク利得媒体を通過するようにサブナノ秒パルスを誘導しながら、ポンプ光を前
 記第一波長とは異なる第二波長において前記バルク利得媒体に結合させることによって、
 前記第一波長においてサブナノ秒パルスを出力し、各出力サブナノ秒パルスが、

前記第一パルス持続時間よりも短い第二パルス持続時間と、

前記第一スペクトル幅よりも広い第二スペクトル幅と、

前記第一パルスピークパワーよりも高い第二パルスピークパワーと、

を有するようにすることと、

入力サブナノ秒パルスを前記バルク利得媒体に結合させる前に、ピコ秒又はフェムト秒
 遷移金属ドーピング I I - V I 族半導体レーザーによって前記信号光を発生させ、サブナノ秒
 パルスの第一パルスピークパワーが前記バルク利得媒体における自己集束用の臨界パワー
 (P_c) と少なくとも等しくなるようにすることと、

を備え、前記バルク利得媒体が、Cr : ZnS、Cr : ZnSe、Cr : CdS、Fe :
 ZnSe 又は Fe : ZnS 製の遷移金属ドーピング I I - V I 族半導体のナノ結晶又は多結晶

10

20

から選択される、方法。

【請求項 2】

前記バルク利得媒体のポンピングが、Erドープファイバーレーザー、Tmドープファイバーレーザー、又は遷移金属ドープII-VI族半導体レーザーから選択されたポンプファイバーレーザーによる連続波ポンピング又はパルスポンピングを含む、請求項1に記載の方法。

【請求項 3】

前記バルク利得媒体において前記信号光及びポンプ光を光学的に重ね合わせて集束させることを更に備える請求項1又は2に記載の方法。

【請求項 4】

前記バルク利得媒体を通過するように入力サブナノ秒パルスを誘導することが、入力サブナノ秒パルスとバルク媒体を相互作用させることによって、自己集束、自己位相変調、相互位相変調、四波混合、又はこれらの組み合わせを含む非線形効果を生じさせることを含む、請求項1から3のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 5】

前記信号光の出力サブナノ秒パルスを前記ポンプ光と光学的に分離することを更に備え、サブナノ秒パルスがフェムト秒又はピコ秒パルスを含む、請求項1から4のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 6】

サブナノ秒広域スペクトル発生レーザーシステムであって、
第一波長において一経路に沿って入力サブナノ秒パルスのパルス信号光を放出するマスター発振器であって、各入力サブナノ秒パルスが第一パルス持続時間と第一スペクトル幅と第一パルスピークパワーとを有するようにするマスター発振器と、

前記マスター発振器の下流の非線形バルク利得媒体と、

前記第一波長とは異なる第二波長において連続又は不連続ポンプ光を放出する光学ポンプと、

前記マスター発振器と前記非線形バルク利得媒体との間の入力光学アセンブリであって、シングルパスで前記非線形バルク利得媒体において前記パルス信号光及び前記ポンプ光を重ね合わせて集束させて、前記非線形バルク利得媒体が前記第一波長においてサブナノ秒パルスを出力し、各出力サブナノ秒パルスが

前記第一パルス持続時間よりも短い第二パルス持続時間と、

前記第一スペクトル幅よりも広い第二スペクトル幅と、

前記第一パルスピークパワーよりも高い第二パルスピークパワーと、

を有するようにするように構成されている入力光学アセンブリと、
を備え、

前記マスター発振器が、自己集束、自己位相変調、相互位相変調、四波混合、フィラメンテーション、パルス圧縮、又はこれらの組み合わせを含む非線形効果を前記非線形バルク利得媒体に生じさせるための臨界パワー (P_c) に少なくとも等しいピークパワーを有する入力サブナノ秒パルスを発生させるように動作し、

前記非線形バルク利得媒体が、Cr:ZnS、Cr:ZnSe、Cr:CdS、Fe:ZnSe又はFe:ZnS製の遷移金属ドープII-VI族半導体のナノ結晶又は多結晶を含む、レーザーシステム。

【請求項 7】

前記非線形バルク利得媒体の下流において出力サブナノ秒パルスを前記ポンプ光から分離するように構成された出力光学アセンブリを更に備える請求項6に記載のレーザーシステム。

【請求項 8】

前記光学ポンプが、Erドープファイバーレーザー、Tmドープファイバーレーザー、又は遷移金属ドープII-VI族半導体レーザーから選択されていて、前記マスター発振器がピコ秒又はフェムト秒遷移金属ドープII-VI族半導体レーザーから選択されてい

10

20

30

40

50

る、請求項 6 又は 7 に記載のレーザーシステム。

【請求項 9】

前記非線形バルク利得媒体の上流又は下流に位置する少なくとも一つの分散素子を更に備え、前記分散素子が、平行平板、一組の分散プリズム、分散ミラー、又はこれらの組み合わせのいずれかであり、前記分散素子が入力サブナノ秒パルスのパラメータを制御するように構成されている、請求項 6 から 8 のいずれか一項に記載のレーザーシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、利得特性及び非線形特性を有する固体物質の同時シーディング及びポンピングに基づいた新規レーザーシステム構成及び出力に関し、その固体物質は、その固体物質を通るシングルパス（一回の通過）において、シードパルスを少なくとも増強し且つスペクトルの的に広げる。パルス圧縮等の追加的な非線形光学効果も認められる。

10

【背景技術】

【0002】

パルスレーザー源は、超短又はフェムト秒（fs）パルス持続時間（パルス幅）と、高平均パワーと、広域光スペクトルとを兼ね備えるものであり、分光、感知、コヒーレントモグラフィー、生物医学等の多様な応用において大きな需要がある。スペクトルの的に広いレーザー発振を 2～10 μm、つまり所謂中赤外（mid-IR）領域に拡張することが、中赤外領域に共振フィンガープリント（共振特徴部）を有することを特徴とする物質、例えば、一般的な分子（H₂O、CO₂、CO、NH₄ が挙げられるが、これらに限定されない）、生物医学的物質、大気汚染物質、危険物等の検出のために強く望まれている。更に、広域でコヒーレントな光スペクトルを有する高パワー中赤外 fs 源は、物理及び化学における基本的過程の時間分解研究にとって極めて重要である。

20

【0003】

fs パルスをスペクトルの的に広げるための標準的な方法は、所謂スーパーコンティニウム発生（SCG, supercontinuum generation）である。過去十年において、SCG はファイバー及び導波路において多く研究されてきた。つい最近になって、カルコゲニドステップインデックス型ファイバーにおいて、中赤外「フィンガープリント領域」全体をカバーする SCG が実証された。しかしながら、ファイバーや導波路に基づいた SCG には、固有のピーク及び平均パワーの制限や、整列感度の問題が存在する。

30

【0004】

より最近では、バルク物質における SCG が、比較的単純であること、フレキシブルであること、高いピーク及び平均パワーを有すること等の利点により新たな可能性を示し始めている。更に、一部のバルク物質における SCG は、フェムト秒入力パルスをほんの数回の光サイクルのみを有する更に短い出力パルスに圧縮するという特徴を有する。バルク媒体が広域なコンティニウムを発生させる性能を定義する重要なパラメータは、所謂自己集束（self-focusing）の臨界パワー P_c である。臨界パワーは、物質特有のパラメータであり、非線形屈折率 n_2 での物質の三次非線形性によって定義される： $P_c \sim \lambda^2 / n_2$ 。臨界パワーは、数百 kW（例えば、ZnSe や ZnS 等の II-VI 族半導体の場合）から数十 MW（例えば、YAG や CaF₂ の場合）まで様々である。

40

【0005】

一般的な中赤外バルク SCG 設定が図 1 に示されている。そのシステムは、fs マスター発振器（MO）、周波数変換ステージ（FC）、fs レーザー増幅器（AMP）、集束光学系（例えば、レンズ L）、コンティニウム発生用のバルク媒体（SCG）から成る。システムは、中赤外コンティニウム（Out）をスペクトルの的に広げるように構成される。周波数変換ステージ FC は任意選択的なものであり、増幅器（AMP）の前又は後で使用可能である。

【0006】

50

典型的には、 f_s 発振器から直接的には、臨界パワーを超えるピークパワーレベルに到達することはできない。従って、SCGステージに伝える前に、 f_s パルスを増幅する必要がある。更に、多くの標準的な f_s 発振器（Ti：サファイア、ファイバーに基づくもの）は、近赤外（near-IR）で放出する。従って、近赤外 f_s パルスを中赤外領域に周波数変換するための追加のステージが必要とされる（増幅ステージの前又は後に）。 f_s パルスの周波数変換及び増幅の方法が十分に開発されている一方で、他方では、その設定全体は非常に複雑で、嵩張り、コストが高く、既存の中赤外バルクSCG源の実用的な使用を大きく制限している。

【先行技術文献】

【特許文献】

10

【0007】

【特許文献1】国際出願第PCT/US2015/23232号（2015年3月30日出願）

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

広域スペクトル出力を、そのような出力を生じさせるために多数の高価な部品に頼らずに生じさせるピコ秒、更に好ましくはフェムト秒レーザーが要求されている。本発明者は、その要求を、シードパルスを同時に増幅し、スペクトル的に広げ、且つ圧縮するシングルパス増幅器を備えるレーザーシステムを構築することによって満たした。

20

【課題を解決するための手段】

【0009】

本発明は、利得媒体においてシードパルスを増幅しスペクトル的に広げるように構成された光学方式を活用する短パルス広域スペクトル発生レーザーシステムを提供する。具体的には、非線形特性を有するバルク利得媒体が、連続又は不連続ポンプ出力及びシードパルスを同時に受ける。誘導光学系を用いて、光学ポンプから放出されるポンプ放射とマスター発振器デバイスから放出されるマスター発振器放射とをシングルパス（一回の通過）でバルクにおいて重ね合わせる。追加の光学系が、出力パルスを透過したポンプ放射から分離するために用いられる。

【0010】

30

本開示の一態様では、マスター発振器からのパルスのピークパワーは、バルク媒体における自己集束用の臨界パワー（ P_C ）に略等しいかそれを超える。

【0011】

上記態様を参酌可能な本開示の他の態様では、マスター発振器からの入力パルスとバルクとの非線形相互作用が、非線形光学効果をもたらす。その非線形光学効果は、自己集束、自己位相変調、相互位相変調、四波混合、フィラメンテーション、及び、パルス圧縮のうちのいずれか一つ又は任意の組み合わせを含み得る。

【0012】

上記態様のうちいずれかとは別に又は組み合わせて検討される本開示の更なる態様では、バルク媒体は、遷移金属ドーピングII-VI族物質（TM：II-VI）ナノ結晶又は多結晶を備える。好ましくは、TM：II-VIナノ結晶又は多結晶は、Cr：ZnSと、Cr：ZnSeと、Cr：CdSと、Fe：ZnSeと、Fe：ZnSとのうちいずれか一つである。

40

【0013】

上記態様のいずれかにおける本発明用のポンプについては、Er又はTmドーピングファイバーのうち一方から選択されたレーザーとして構成されることが好ましいが、TM：II-VIレーザーも本発明の範囲内において想定されている。ポンプは連続波（CW, continuous wave）方式で動作し得る。

【0014】

本発明は、上記態様のいずれかに関する範囲内において、マスター発振器を用いて、バ

50

ルクに入力されるシードパルスを生じさせることができる。本発明の目的にとっては、パルスの波長は物質のバンドギャップを大幅に超えなければならない。好ましくは、マスター発振器は、ピコ秒又はフェムト秒 T M : I I - V I レーザーから選択されたレーザーである。

【0015】

更に、本発明のレーザーシステムは、上記態様のうちいずれかの構造に組み込まれた追加の光学部品を活用することができる。好ましくは、レーザーシステムは、バルク媒体の前又は後に位置する少なくとも一つの分散素子を含む。このような分散素子は、平行平板と、一組の分散プリズムと、分散ミラーとのうちいずれか一つか又はこれらの組み合わせを含み得る。

10

【0016】

好ましくは、分散素子は、システムの上記バルク及び他の構成要素の分散を補償するように構成され、また、他の実施形態では、分散素子は、マスター発振器からの入力パルスのパラメータを制御するように構成される。

【0017】

また、本発明は、上記態様のいずれか又は組み合わせに従って構成されたレーザーシステムによって実施される方法も提供する。本発明の方法は、まず、シードのピークパワーを増大させ且つスペクトルを広げることができるバルク媒体にマスター発振器からのシードパルスを入力すると同時に、バルク媒体においてシードパルスとのレーザー相互作用を生じさせるのに十分な光学ポンプを用いてバルク媒体をポンピングして、シードパルスのものよりも大きいパルスエネルギー及び広いスペクトルを有する出力パルスがバルクから放出されるようにすることによって、ピコ秒又はフェムト秒シードパルスの特性を増強することを可能にする。

20

【0018】

好ましくは、伝播している光学パルスとバルク媒体との間の非線形相互作用は、バルク媒体を光学的にポンピングすることで誘起されるレーザー相互作用によって増強される。

【0019】

好ましくは、出力パルスのスペクトルは、マスター発振器からの入力シードパルスのスペクトルと比較して顕著に広げられる。

【0020】

好ましくは、出力パルスの持続時間は、マスター発振器からの入力パルスの持続時間と比較して顕著に短くされる。

30

【0021】

本開示の上記態様及び他の態様、特徴及び利点は、図面を活用してより容易に明らかとなるものである。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】従来技術の一般的な中赤外 S C G システムを与える。

【図2】図2(a)は、「コールド増幅器」を備えるマスター発振器の光学概略を与える。図2(b)は、図2(a)の光学概略の測定スペクトルを与える。

40

【図3】本発明の光学概略を与える。

【図4】図3の光学概略によって放出された出力パルスの測定スペクトルを与える。

【図5】出力パルスの自己相関を与える。

【図6】ポンプを備えるデバイスの測定特性を比較する。

【図7】本発明用のマスター発振器の概略を与える。

【発明を実施するための形態】

【0023】

以下、本発明の実施形態を詳細に説明する。可能である限り、同一又は同様の参照番号及び文字を図面及び明細書において使用して、同一又は同様の部分やステップを指称する。図面は単純化されたものであり縮尺通りではない。利便性及び明確性のためのみに

50

て、方向に関する用語（上下等）、運動に関する用語（前後等）を図面に関して用いることがある。「結合」との用語や同様の用語は、必ずしも直接的で直の接続を表すものではなく、中間要素やデバイスを介した接続も含む。

【0024】

遷移金属ドーピングII-VI族半導体(TM:II-VI)に基づいたフェムト秒(fs)発振器の最近の登場が、中赤外スペクトル領域におけるfs光学パルスを直接得ることで、標準的な近赤外fs発振器の中赤外への周波数変換用の複雑で嵩張る設定の必要性を回避することを可能にした。更に、多結晶 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 及び $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ カーレンズモード同期レーザー技術におけるつい最近の発展が、fs中赤外発振器の出力パラメータの顕著な改善を、平均パワー(2W)、パルスエネルギー(24nJ)、及びパルス持続時間($\leq 29\text{fs}$)に關してもたらしている。

10

【0025】

重要なのは、中赤外多結晶 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ fs発振器から直接得られる略0.5MWのピークパワーが、 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 、 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 、及び他のII-VI族半導体における自己集束の臨界パワーに略等しいということである。

【0026】

多数の実験が、0.5MWレベルのピークパワーが、多結晶 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}/\text{ZnSe}/\text{CdSe}$ においていくらかのスペクトル拡大を得るのに十分高いということを示している。バルクの $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 、 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 、及び $\text{Cr}^{2+}:\text{CdSe}$ における中赤外fs発振器のスペクトル拡大に対する実験が図2(b)に示されている。

20

【0027】

特に、図2(a)及び図2(b)はそれぞれ本発明の光学概略及び測定スペクトルを与えていて、中赤外fsレーザーがシードレーザーとして用いられ、バルクは、 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}/\text{ZnSe}/\text{CdSe}$ のいずれかのII-VI族物質である。図2(a)は、fsマスター発振器(MO)、集束レンズ(L)、バルク $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}/\text{ZnSe}/\text{CdSe}$ 物質から成る設定の概略を与える。図2(b)は、対数スケールで、パルスの測定スペクトルを入力(破線)と出力(実線)について示す。この構成では、バルクはポンピングされず、「コールド増幅器」とみなされ、バルクに与えられたエネルギーはシードパルスからのみのものである。

【0028】

図3は、「ホット増幅器」を用いる本発明の光学概略を与える。この構成で用いたポンプは、IPGフォトンクス社(マサチューセッツ州オックスフォード)製のエルビウムファイバーレーザー(型番ELR-20-1567-LP)である。「ホット増幅器」が、同時にポンピングされ且つシードパルスに晒されるバルクであることは明らかである。この設定は、シングルパス(一回の通過)で、fs光学パルスのスペクトル拡大及び増幅を生じさせる。図3に与えられるシステムは、fsマスター発振器(MO)、MOビーム用の集束光学系(L1)、ポンプレーザー(Pump)、Pumpビーム用の集束光学系(L2)、Pumpビーム及びMOビームを重ね合わせるための光学系(例えば、ダイクロイックミラーDM1)、ビームステアリング用の任意選択的な光学系(M)、レーザー利得媒体及び非線形媒体の特性を併せ持つバルク物質(GM-NM)(例えば、多結晶 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}/\text{ZnSe}$)、及び、出力ビーム(Out)を残余のポンプ放射から分離するための光学系(例えば、ダイクロイックミラーDM2)を備える。

30

40

【0029】

図3の概略では、ダイクロイックミラーDM1を用いて、中赤外fsマスター発振器(MO)からの放射が、Erドーピングファイバーレーザー(Pump)のCW放射と重ね合わせられる。MOビーム及びPumpビームは、GM-NM多結晶 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 又は $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ (GM-NM)で集束される。これは、レーザー利得媒体及び非線形媒体の特性を併せ持つので、(i)GM-NMの光学ポンピングが、MOからの入力パルスの増幅をもたらす(従来のレーザー増幅器と同様に)、(ii)GM-NMの非線形性が、入力パルスのスペクトル拡大をもたらす、(iii)GM-NMを伝播中のパルスの増

50

幅が、ピークパワーの増大、つまりは更なるスペクトル拡大等をもたらす。明らかなように、初期スペクトル拡大は、入力パルスの十分に高いピークパワーにおいて達成される。

【0030】

本提案のデバイスの測定特性が図4、図5、図6にまとめられている。実験は、多結晶 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ をバルク、つまりGM-NMとして用いて行われた（同様の結果が、多結晶 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ を用いても得られた）。

【0031】

これらの結果は、バルクを通るシングルパスで、中赤外 f_s パルスの増幅、スペクトル拡大、及び圧縮があることを意味している。デバイスは多結晶 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 又は $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ に基づくものであり、低コストで効率的なCWファイバーレーザーによって光学的にポンピングされる。デバイスの出力特性が更に大幅に改善可能であることに疑いはない。

【0032】

図4は、出力パルスの測定スペクトルを与える。「コールドスペクトル」は、ポンプレーザーをオフにして、つまり「コールド増幅器」で測定された。「ホットスペクトル」は、シードパルスと同時に入力される20WのCWポンプパワーで、つまり「ホット増幅器」で測定され、7.1W平均出力パワーが、シードの1.9Wからの増大であった。灰色の線が、ポンプパワーの増大と共にスペクトル拡大を示す。上のグラフは、1mの標準的空気とポンプセパレータ(DM2)の透過率を示す。見て取れるように、得られたスペクトルは、2.0~2.5 μm の大気透明度ウィンドウを完全に満たしている。

【0033】

図5は、出力パルスの自己相関の測定結果を示す。「コールド自己相関」は、Pumpレーザーをオフにして測定され、「ホット自己相関」は、20WのCWポンプパワー及び7.1Wの出力パワーで測定された。見て取れるように、入力パルスの増幅は、44 fsから略33 fsへの圧縮を伴っている。

【0034】

図6は、デバイスの測定特性対ポンプパワーを与える。上のグラフは、スペクトルバンド幅(-10 dBレベルにおける)及びパルス持続時間を比較している。下のグラフは増幅器の利得を比較している。見て取れるように、ポンプパワーの増大が、(i) スペクトル拡大、(ii) パルス圧縮、(iii) 出力パワーの増大をもたらしている。重要なのは、 f_s パルスの増幅が、CWレーザーの増幅と同じくらい効率的に生じていることである。

【0035】

本発明で用いられるマスター発振器が図7に示されている。このレーザーは特許文献1により詳細に記載されていて、その内容全体は参照として本願に組み込まれる。図7に与えられているように、Erドープファイバーレーザー(EDFL, Er-doped fiber laser)によって、レーザーは1567 nmで光学的にポンピングされる。反射防止(AR, anti-reflective)コーティングされた多結晶 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$ 利得要素が、二つの湾曲ミラーの間において垂直入射で共振器に取り付けられる。利得要素は、長さ5 mmで、11%の低信号透過率を有し、室温の水で冷却される。共振器のレッグは等しくなく、典型的な比は2:5である。レーザーは、二つの光学出力、つまり、出力カプラー(OC, output coupler)を介する中赤外と、第二次高調波発生(SHG)波長範囲において高い透過率を有する湾曲ダイクロイックミラー(DM, dichroic mirror)を介するSHGとを有する。光学コーティングの反射率及び群遅延分散(GDD, group delay dispersion)は、2200~2700 nmの波長範囲において最適化された。共振器の正味のGDDは、負のGDDを有して設置される高反射体(HR, high reflector)の種類及び数を変更することによって離散的ステップにおいて調整可能である。利得要素の三次分散(TOD, third order dispersion)は、専用のミラー(HR*)によって補償された。レーザーは最大のCW出力パワー用に最適化された。

次いで、カーレンズモード同期方式（OC変換によって開始される）を可能にするために、湾曲ミラー同士の間を距離を微調整した。モード同期レーザーのスペクトルパラメータ及び時間パラメータを、0.15 m二重格子モノクロメータ及び干渉自己相関器を用いて特性評価した。OCの厚さ3.2 mmのZnSe基板を介する伝播に起因する出力パルスの歪み（2400 nmにおいて $GDD = +710 \text{ fs}^2$ ）を、共振器の外部で、厚さ5 mmのYAGプレート及びTOD補償器HR*の組み合わせによって補償した。

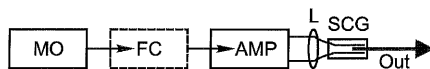
【0036】

当業者は、単に通常の実験を用いて、本開示の発明の具体的な実施形態の多くの等価物を認識し、又は確かめることができる。本開示の概略は光イメージングシステムで使用可能であるが、本開示の構造には拡張性である。従って、上記実施形態は単に例示によって与えられているものであり、添付の特許請求の範囲及びその等価物の範囲内において、本発明を具体的に説明されている以外のやり方で実施し得ることを理解されたい。本開示は、本願に記載の個々の特徴、システム、物質、及び／又は方法を対象としている。また、そうした特徴、システム、物質及び／又は方法の二つ以上の組み合わせは、そうした特徴、システム、物質及び／又は方法が互いに矛盾していなければ、本発明の範囲内に含まれるものである。

10

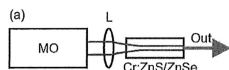
【図1】

FIGURE 1

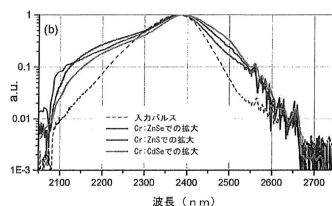


【図2】

FIGURE 2

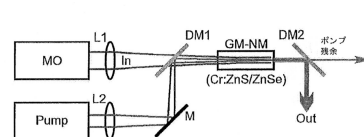


(b)



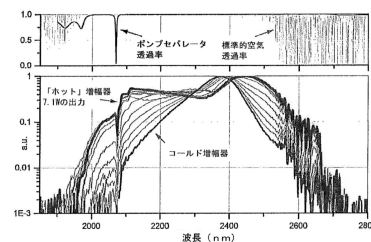
【図3】

FIGURE 3

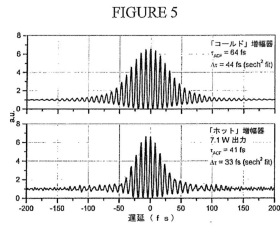


【図4】

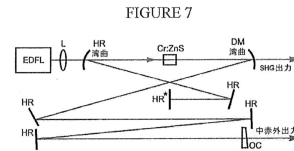
FIGURE 4



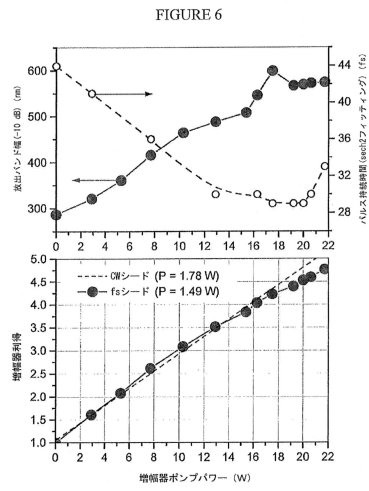
【図 5】



【図 7】



【図 6】



フロントページの続き

- (72)発明者 イゴール・モスカレフ
アメリカ合衆国・マサチューセッツ・01540・オックスフォード・オールド・ウェブスター・
ロード・50・アイピージー・フォトニクス・コーポレーション内
- (72)発明者 セルゲイ・ヴァシリエフ
アメリカ合衆国・マサチューセッツ・01540・オックスフォード・オールド・ウェブスター・
ロード・50・アイピージー・フォトニクス・コーポレーション内
- (72)発明者 ミハエル・ミロフ
アメリカ合衆国・マサチューセッツ・01540・オックスフォード・オールド・ウェブスター・
ロード・50・アイピージー・フォトニクス・コーポレーション内
- (72)発明者 ヴァレンティン・ガボンツェフ
アメリカ合衆国・マサチューセッツ・01540・オックスフォード・オールド・ウェブスター・
ロード・50・アイピージー・フォトニクス・コーポレーション内

審査官 奥村 政人

- (56)参考文献 特開2001-242495 (JP, A)
特開2000-340870 (JP, A)
特開平10-213827 (JP, A)
国際公開第2015/153391 (WO, A1)
特表2017-510081 (JP, A)
米国特許出願公開第2009/0122816 (US, A1)
VASILYEV et al., Kerr-lens mode-locked femtosecond polycrystalline Cr²⁺:ZnS and Cr²⁺:ZnSe lasers, OPTICS EXPRESS, Vol.22 No.5, 米国, OSA, 2014年02月26日, p.5118-p.5123, DOI :10.1364/OE.22.005118

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/00- 1/125
G02F 1/21- 7/00
H01S 3/00- 4/00
IEEE Explore