

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5289848号
(P5289848)

(45) 発行日 平成25年9月11日 (2013. 9. 11)

(24) 登録日 平成25年6月14日 (2013. 6. 14)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 J 11/00 (2006. 01)	GO 1 J 11/00
GO 1 J 1/42 (2006. 01)	GO 1 J 1/42 D

請求項の数 15 外国語出願 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2008-189484 (P2008-189484)	(73) 特許権者	512055813
(22) 出願日	平成20年7月23日 (2008. 7. 23)		ハイ キュー レーザー ゲゼルシャフト
(65) 公開番号	特開2009-31285 (P2009-31285A)		ミット ベシュレンクテル ハフツング
(43) 公開日	平成21年2月12日 (2009. 2. 12)		High Q Laser GmbH
審査請求日	平成23年5月12日 (2011. 5. 12)		オーストリア国 ランクヴァイル フェル
(31) 優先権主張番号	07112992.8		トグート 9
(32) 優先日	平成19年7月24日 (2007. 7. 24)		Feldgut 9, A-6830 R
(33) 優先権主張国	欧州特許庁 (EP)		ankweil, Austria
		(74) 代理人	100114890
			弁理士 アインゼル・フェリックス＝ライ
			ンハルト
		(74) 代理人	100099483
			弁理士 久野 琢也
		(74) 代理人	100112793
			弁理士 高橋 佳大

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 超短パルスにおける多重パルス状態の検出と回避のための方法と装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

フェムト秒又はピコ秒パルスを生成するための超短パルスレーザーシステムにおける、
望ましくない二重又は多重パルス状態 (DP/MP) の検出方法であって、該方法は、

少なくとも、

レーザー発光を生成するための増幅用レーザー媒質と、

少なくとも一つの共振器ミラーを有するレーザー共振回路 (10) と、

前記レーザー媒質をポンピングするためのポンプソース (9) と、

を備えており、

前記超短パルスレーザーシステムがソリトン状態で動作し、共振器サイクルにわたって
平均化されたパルスパワー $P(t)$ 又はパルスエネルギーに比例する第一信号 μ を、レー
ザー発光に対して測定し、

共振器サイクルにわたって平均化されたパルスパワー $P(t)$ の二乗に比例する第二信
号 v を、レーザー発光に対して測定し、望ましくない二重又は多重パルス状態 (DP/MP)
の発生を、共振器サイクル期間の範囲で独立な測定された信号 μ と v の比較に基づい
て検出する

ことを特徴とする検出方法。

【請求項 2】

前記第一信号 μ が 1 フォトン吸収によって測定されることを特徴とする請求項 1 に記載
の検出方法。

10

20

【請求項 3】

前記第二信号 v が、2 フォトン又はマルチフォトン吸収によって測定されることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の検出方法。

【請求項 4】

前記第二信号 v が、高調波を用いて測定されることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の検出方法。

【請求項 5】

$|\mu - v| \leq 1$ の条件式が単一パルス状態 (SP) を示し、
二つの信号 μ と v が一致するように、定義された単一パルス特性の状態において該二つの信号 μ と v を較正することを特徴とする請求項 1 ないし 4 のいずれか 1 項に記載の検出方法。

10

【請求項 6】

$|\mu - v| \geq 1.5$ の条件式が二重又は多重パルス状態 (DP/MP) を示し、
二つの信号 μ と v が一致するように、定義された単一パルス特性の状態において該二つの信号 μ と v を較正することを特徴とする請求項 1 ないし 5 のいずれか 1 項に記載の検出方法。

【請求項 7】

請求項 1 ないし 6 のいずれか 1 項に記載の検出方法によって、二重又は多重パルス状態 (DP/MP) を回避し、レーザー動作点 (AP) を最適化する方法であって、
超短パルスレーザーシステムを二重又は多重パルス状態 (DP/MP) に設定し、
動作電流に対する信号 μ と v の依存性を引き出すために、ポンプソースに対する前記動作電流を減少させ、
二重又は多重パルス状態 (DP/MP) から単一パルス状態 (SP) への遷移に対する動作電流値を測定する、
ことを特徴とする方法。

20

【請求項 8】

前記動作電流を減少させた後に、動作電流の限界値まで増加させることを特徴とする請求項 7 に記載の最適化方法。

【請求項 9】

ソリトン状態で動作可能な、フェムト秒又はピコ秒パルスを生成するための超短パルスレーザーシステムにおいて、二重又は多重パルス状態 (DP/MP) を検出するための測定装置であって、

30

共鳴器サイクルにわたって平均化されたパルスパワー $P(t)$ 又はパルスエネルギーに比例する信号が一つ以上のパルスに対して測定可能なように形成および配置された少なくとも 1 つの第一レーザー検出器 (13、15) と、

共振器サイクルにわたって平均化されたパルスパワー $P(t)$ の二乗に比例する信号が一つ以上のパルスに対して測定可能なように形成および配置された第二レーザー検出器 (14、16) と、

前記第一と第二レーザー検出器 (13、14、15、16) の測定信号の比較に基づいて、二重又は多重パルス状態 (DP/MP) の発生を検出するための評価コンポーネントと、
を備えていることを特徴とする測定装置。

40

【請求項 10】

前記第一レーザー検出器 (13、15) が、1 フォトン吸収状態で動作するフォトダイオードで構成されていることを特徴とする請求項 9 に記載の測定装置。

【請求項 11】

前記第二レーザー検出器 (14、16) が、2 フォトン又はマルチフォトン吸収状態で動作するフォトダイオード (7) で構成されていることを特徴とする請求項 9 又は 10 に記載の測定装置。

【請求項 12】

50

前記第一と第二レーザー検出器が、異なる動作状態で働くフォトダイオードで構成されていることを特徴とする請求項 10 又は 11 に記載の測定装置。

【請求項 13】

前記第二レーザー検出器（14）が2フォトン又はマルチフォトン効果を有するLED又はフォトレジスタで構成されているか、又は伝送時における2フォトン吸収のためのInPを備えていることを特徴とする請求項9又は10に記載の測定装置。

【請求項 14】

前記第二レーザー検出器（16）が高調波生成用の少なくとも一つのBBO、LBO、PPLN、又はKTP結晶を有していることを特徴とする請求項9又は10に記載の測定装置。

10

【請求項 15】

フェムト秒又はピコ秒パルスを生成するための超短パルスレーザーシステムであって、
少なくとも、
レーザー発光の生成のための増幅用レーザー媒質と、
少なくとも一つの共振器ミラーを有するレーザー共振器（10）と、
レーザー媒質をポンピングするためのポンプソース（9）と、
請求項10ないし14のいずれか1項に記載の測定装置と、
を備えていることを特徴とするレーザーシステム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

20

【0001】

本発明は、請求項1の特徴項前段に従う超短パルスレーザーシステムにおける二重及び多重パルス状態の検出方法と、前記超短パルスレーザーシステムにおける多重パルス状態の回避とレーザー動作点の最適化のための方法と、請求項9の特徴項前段に従う二重又は多重パルス状態を検出するための測定装置と、超短パルスレーザーシステムとに関する。

【背景技術】

【0002】

超短パルスレーザーシステム、即ち、フェムト秒又はピコ秒レンジのパルス幅を有するレーザーパルスを生成するためのレーザーシステムが、従来技術において長く知られてきた。対応するパルス特性を生成するアプローチは、ソリトン法におけるモード同期操作であって、共鳴サイクルあたり単一又は多重パルスを生成することが可能である。これら動作状態は、分散と自己位相変調の両方に依存し、従って共鳴装置における瞬時的パルス強度や、モード同期機構の変調の深さや、利用可能な利得帯域幅その他フィルタ効果に依存する。理論モデルにおけるこれらの効果の組み合わせが、少なくともマスター方程式アプローチとしての断熱的パルス発生を推定して、動作状態間の遷移を事前に求めることを可能にする。その条件の解説とモデリングは、例えばJ. Opt. Soc. Am. 16（1999）の895～904ページに表わされている。しかし上述のアプローチは、特に長い共鳴装置を有するレーザーに関して、貧弱な解説しかされていない。パルス整形上の上述の効果のアクションの離散的性質は、ここにおいてより明確になり、達成できるパルスパラメータ、例えばエネルギーとパルス幅、異なる状態間の遷移、即ち、単一又は多重パルス状態等に順番に作用する。

30

40

【0003】

単一パルスから二重パルス動作に向かうソリトンレーザーの一般的な振る舞いは、例えば個々のパルスが共鳴サイクル以内の場合において、略半減されたエネルギーと略二倍になったパルス幅とに存する。パルス状態間の遷移は、一般的に図2や図3に示すヒステリシス特性を示す。

【0004】

しかし、ここではパルスとエネルギーとパルス幅は最適化されているので、超短パルスレーザーのほとんどの用途には、単一パルス動作が要求される。一般的な非ソリトンレーザーとは対照的に、これらのレーザーは、理想的な動作点を有し、利得力学に関する様

50

相以外（品質切替モード同期等）にも要求される、せいぜい相対的に狭い動作範囲である。最大の可能なエネルギーと最小の可能なエネルギーパルス幅が一般的に応用において要求されるので、レーザーの動作点は、必然的に単一と多重パルス状態のヒステリシスに非常に接近して位置する必要がある。従って、レーザーの動作点は、工業的には一般的な千時間以上の実行時間の後に発生するレーザーパラメーターの僅かな変化によってさえ生じる単一多重パルスヒステリシスの範囲に移動可能である。これは、スイッチが入った後にレーザーが多重パルスを放射する有限の可能性に帰結する。

【0005】

従って、超短パルスレーザーを工業的に適応させるためには、必要ならば二重又は多重パルス状態を回避又は除去するための適切な測定を開始するための、信頼性のある、複雑でないコンパクトな指示計を有することが非常に重要である。

10

【0006】

従来技術は、二重パルスを直線状に検出するための二つの相対的に複雑なアプローチを開示している。第一に、100ピコ秒以上の間隔を有するパルスを自己相関によって検出する。この目的のために必要な遅延を有する自己相関は、商業的に利用可能であるが、この自己相関法は複雑であり、装置に関する要求が厳しい。もう一つのアプローチは、より大きな間隔を有するパルスが、非常に高速なフォトダイオードとオシロスコープによって検出されるという事実に基づいている。この場合にも、複雑さと装置に対する要求は高度である。

【0007】

20

二重パルスを検出するための自己相関とフォトダイオード測定は、例えば、Lai M. et al., "Multiple pulse operation of a femtosecond Ti:sapphire laser" Optics Communications, Vol.142, No. 1-3, 1 October 1997, pages 45 to 49に記載されている。実験では、二重パルス状態は、動作点を変化させることによって生み出される（ポンピング電流を増加し、カップリングアウトの程度を減少させる）。自己相関幅とスペクトル幅が、それによって著しく変化しないことが観察されている。実験は、選択された測定方法が非常に複雑である（時間分解された自己相関と高速フォトダイオードとオシロスコープによるパルス変動）ことを示すのに有益である。また、自己相関器によってもフォトダイオードによっても明確に決定されないパルス間隔があるので、パルス状態に関して明瞭な説明ができないことは明らかである。ピコ秒分解能を備えたフォトダイオードと長い遅延ケーブルを有する自己相関器の選択のみが、ここで改善策を提供できる。どちらも、信号の視覚的評価が必要なため、工業的使用に対しては非常に高価であり、調整に敏感であり、大がかりであり、信頼性が無い。

30

【0008】

例えば、Buijserd A. N. et al., "CPM laser with electronic feedback", Measurement Science and Technology, Vol. 1, No. 8, 1 August 1990 pages 751 to 753とUS6693927B1 とUS2003/0138006A1にそれぞれの場合で目的は異なるが、同様な検出方法が開示されている。

【0009】

最初の文献には、フォトダイオードを用いた制御ループによる衝突パルスモード同期（CPM）レーザーの安定化が記載されている。そこでは、パルスの自己相関関数の半値全幅が観察され、安定化の質を評価するために出力とともに用いられる。しかし、示された配置は、ソリトンモード同期レーザーにおける二重又は多重パルス状態を検出するために適切なものではなく、これらの望ましくない状態に対する適切な対策を始めるために適切なものではない。

40

【0010】

US6693927B1は、ソリトン発信器のモード同期動作の制御された始動のための方法を開示している。これは、発信器のモード同期状態を検出し、もしモード同期状態でない場合に、いわゆる「オーバードライブ回路」のポンピング電流によってパルスモードに移動させるフォトダイオードによって行われる。Qスイッチモード同期や二重パルスのように従

50

来技術で十分に知られている効果も記載され、また他の検出器（ペクトロメータ、自己相関器、周波数通倍器）もモード同期の検出のために利用可能であることが指摘されている。

【0011】

これと対照的に、US2003/0138006A1には、レーザーシステムへの追加のアナログアクセスによる精密調整とレーザー出力パラメータ、特にパワーの調節を可能にするレーザー安定化法又は調整可能な量子化ステップが記載されている。

【0012】

信頼性のある識別表示を保証する簡易化された及び／又は改良された方法と、増加したロバスト性とコンパクトさに関して最適化された設計と所望のコンポーネント数を有する、ソリトンモードの超短パルスレーザーにおける単一、二重、又は多重パルス状態の検出と識別のための対応する装置とを提供することが本発明の目的である。

10

【0013】

別の目的は、多重パルス状態を避けるためとレーザー動作点を最適化するための方法を提供することである。

【0014】

また別の目的は、動作点に関して最適化された超短パルスレーザーシステムを提供することである。

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

20

【0015】

これらの目的は、請求項1、9、又は15に記載の特徴又は従属請求項に記載の特徴を有する実施例によって達成される。

【0016】

本発明は、レーザーの動作状態が結論付けられるところの二つの検出器の信号を用いることに基づいている。瞬間的なパルス出力 $P(t)$ のカーブと、そのピーク値の両方が、単一と多重パルス状態に対して異なり、平均値

【数1】

$$\langle P \rangle$$

30

のソリトンに対して最大出力

【数2】

$$\hat{P}$$

とし、エネルギー

【数3】

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt$$

40

繰り返し周波数

【数4】

$$f_{rep}$$

と、パルス幅

【数 5】

$$\tau_{FWHM}$$

を用いて、

【数 6】

$$\hat{P} = \frac{\langle P \rangle \cdot 0.89}{\tau_{FWHM} f_{rep}} = \frac{E \cdot 0.89}{\tau_{FWHM}}$$

10

が表わされる。このように、共鳴装置における全エネルギーに対する平均値が一つの検出器によって記録される。即ちパルス曲線に対する積分値である。その一方で、もう一方の検出器の信号は、ピーク強度又はピーク出力（最大値）に反応する。注目すべきは、両信号が平均化され、多数の共鳴装置サイクルの変動を表わす、即ち、フォトダイオードと自己相関を用いた測定と対照的に、共鳴装置のサイクルタイム又はそれ以下の範囲において、時間依存性が無いことである。信号比は、動作状態又は二重又は多重状態の発生に関する情報を提供する。

【0 0 1 7】

20

ソリトンレーザーにおいて、エネルギー

【数 7】

E

と分散

【数 8】

 β_2

と、自己位相変調パラメータ

【数 9】

30

 κ

と、一次ソリトンのパルス幅と、非線形シュレーディンガー方程式

【数 1 0】

$$\tau_{FWHM} = \frac{3.526 \cdot |\beta_2|}{\kappa \cdot E} \quad (1)$$

の解から導出されるパルス幅

【数 1 1】

 τ_{FWHM}

40

との関係は、広い動作範囲において真であり、これは例えばG.P.Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press, 1989, Page 114に記載されている。

【0 0 1 8】

従って、パルス幅とパルスエネルギーの間には、間接的な比例関係がある。注目すべきは、この関係が単一パルスでも多重パルスでも真であるということである。一定利得飽和、従ってサイクル当たり一定の総エネルギーの下で、単一パルス状態から二重パルス状態への遷移は、二重パルス状態の個々のコンポーネントが単一パルス状態の半分のエネルギーと二倍のパルス幅を有する原因となる。しかし、注目すべきは遷移の際の利得飽和が、共鳴装置の動的損失のシフトによって、容易に変化することであり、これはJ. Opt. Soc.

50

Am. 16(1999), pages 895-904に記載されており、ヒステリシスの原因となり、二重パルス状態において抽出がより効率的になる。

【0019】

本発明に係るソリトン状態での超短パルスレーザーシステムにおける二重又は多重状態の検出法と、関連する検出用配置は、以下に図面とともにより詳細に記述する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0020】

図1に、ソリトンレーザーの単一と二重パルス状態の概略図を示す。フェムト秒とピコ秒パルスを生ずるための超短パルスレーザーシステムは、レーザー発光のための増幅機能を有するレーザー媒質と、少なくとも一つの共振器鏡を有するレーザー共振器と、レーザー媒質をポンピングするための例えばレーザーダイオード配置のようなポンプ源とを有する。超短パルスレーザーシステムは、ソリトン状態で動作し、レーザー発光に対して、例えば一フォトン吸収状態において動作するフォトダイオードによって、一つ以上のパルスに対して、共鳴器サイクルに対する平均の（平均出力、エネルギー）パルスパワー $P(t)$ に比例した（2）式で定義される第一信号

【数12】

μ
を測定することが可能である。

【数13】

$$\mu \cong \frac{1}{T_R} \cdot \int_{-T_R/2}^{T_R/2} P(t) dt \quad (2)$$

ここで、 T_R は共鳴器サイクル時間であり、 $P(t)$ は瞬間的パルスパワーである。

【0021】

単一パルス状態SPにおいて、単一パルスが共鳴装置内を巡回運動し、パルスは時間間隔 T_R を有する。二重又は多重パルス状態が発生した場合、単一パルスは時間的に分離した2つ以上のパルスに分解する。これらは、抽出時に単一パルスより低い強度と、一般的に単一パルスより幾分高い総エネルギーを有する。これは、共鳴装置サイクル内の単一パルスの場合、二重パルスの場合に較べてエネルギーがおおよそ半分であり、パルス幅がおおよそ2倍であるということになる。この特徴は、本発明によれば、強度に敏感な検出器と総エネルギーに敏感な検出器の組み合わせによって、二つの状態間を識別するために用いられる。強度と総エネルギー又はそれらの比の検出信号に基づいて、状態を識別することが可能である。

【0022】

図2に第一信号

【数14】

μ
に対する単一パルスと二重パルス状態間の遷移のヒステリシスサイクルを示す。ここで、水平軸はポンプ源の電流値であり、従って間接的に増幅されたレーザー媒質に結合したパワーを示し、一方、垂直軸はアウトカップルドパワーを表わす。図示したヒステリシスカーブは、パワーメータ又はフォトダイオードを用いて測定することができる。従って本例での第一信号

【数15】

μ
は、共鳴器サイクル時間当たりで平均した一つのフォトン吸収の結果である。点線のカーブは、単一パルス状態SPから二重パルス状態DPへ遷移する際のレーザーの上昇挙動1を示している。実線は二重パルス状態から単一パルス状態への遷移の際のレーザーの下降挙動2に対応している。等式（1）で表現した関係は、両方の状態に対して真であり、遷

10

20

30

40

50

移に際して、共鳴装置内の動的損失のシフトによって、利得飽和が僅かに変化し、これがヒステリシスを生じさせることに留意する必要がある。超短パルスレーザーの可能な動作点 A P は、このヒステリシスの直下で選択可能である。

【0023】

図3は、一つと二つの光子検出に対応したヒステリシスサイクルを有する単一と二重パルス状態の図である。本発明によれば、共鳴器サイクルに対して平均化したパルスパワー $P(t)$ の平方に比例した第二信号

【数16】

V

10

が、検出された二重パルスに対して記録される。

【数17】

$$V \cong \frac{1}{T_R} \cdot \int_{-T_0/2}^{T_0/2} P^2(t) dt \quad (3)$$

これは、例えば一つの光子吸収でなく、二つの光子吸収を表現する第二フォトダイオードを用いて実現可能である。ピークパワー又はピーク強度は、信号に対する決定的な基準であるので、この第二信号

20

【数18】

V

としての二つの光子信号4は、第一信号

【数19】

μ

としての一つの光子信号3とは異なる遷移状態をとる。實際上、二つの光子信号4に貢献するピークパワー又はピーク強度は、単一パルスから二重パルス状態に遷移する際に減少し、一方、一つの光子エネルギー又は一つの光子パワー、即ち、レーザーの平均パワーは増加する。この差異、即ち、一つの光子信号と二つの光子信号という二つの信号の評価は、測定した信号

30

【数20】

μ

と

【数21】

V

40

との比較に基づいて、一義的にかつ瞬間的にレーザーの動作状態を検出することを可能にする。

【0024】

検出器として用いることが出来るフォトダイオードは、一般に一つの光子形態で動作する。これは、PN遷移におけるバンドエッジよりも大きなエネルギーを有する光子が吸収されて、それによって電子正孔対が生成することを意味する。もしフォトダイオードが適切な抵抗によって終端されたなら、印加されたバイアス電圧又はPN遷移の内臓ポテンシャルが、電流の流れをもたらす。この電流は、放射電力密度に直線的に依存する。もし光子エネルギーがバンドエッジのエネルギーよりも低い場合、線吸収はなく、光電流は生成しない。他方で、仮想準位以上の二つの光子のカスケード接続によって

50

電子正孔対が生成される可能性がある。仮想準位の寿命が短いという性質のせいで、このプロセスはとても起こりにくいが、適切な高いパワー密度によって増幅することが可能である。いわゆる2フォトン吸収は、パワー密度の二乗に比例し、それは例えばR. L. Sutherland, "Handbook of Nonlinear Optics", Marcel Dekker, 1996, page 498で説明されている。

【0025】

すでに説明したように、レーザーは二重パルス状態DP又は多重パルス状態MPにおいて幾分より高いエネルギーを放出する。しかし、等式(1)に基づいて、2フォトン光電流に寄与する総ピークパワーは、単一パルス状態SPの場合に較べて幾分低い。2フォトン検出は強度の二乗に依存するので、単一パルス状態SPより低い信号が期待される。単一パルス状態SPから二重DP又は多重パルス状態MPへの遷移時に、1フォトン信号において正のジャンプが期待され、2フォトン信号において負のジャンプが期待され、それらは以下のように表わすことができる。

【0026】

便宜上、パワーヒステリシスは無視し、レーザーはソリトン $\text{sech}^2(t)$ としてパルス幅

【数22】

$$\tau_{FWHM} = 1.763 \cdot t_0$$

でエネルギーEの単一パルス、を放射すると仮定する。パラメータをわすかに変えることによって、例えばポンピング電流等を変えることによって、レーザーは二重パルス状態DPに変化する。式(1)と(3)に基づいて、両方の場合の2フォトン信号は、次式になる。

【数23】

$$v_1 \propto \int \left(\frac{E}{2t_0} \cdot \text{sech}^2 \left(\frac{t}{t_0} \right) \right)^2 dt \quad \text{and} \quad v_2 \propto \int 2 \cdot \left(\frac{E}{8t_0} \cdot \text{sech}^2 \left(\frac{t}{2t_0} \right) \right)^2 dt = \frac{v_1}{4} \quad (4)$$

一般的に、多重パルス状態の場合の2フォトン信号は次式になる。

【数24】

$$v_n \propto \int n \cdot \left(\frac{E}{2n^2 t_0} \cdot \text{sech}^2 \left(\frac{t}{nt_0} \right) \right)^2 dt = \frac{v_1}{n^2} \quad (5)$$

実際には、遷移時のパワーの増加を考慮して、2フォトン信号の場合の予期された差異は、因子 n^2 より小さい。

【0027】

一例として、high-Q laser社のfemtoTRAIN 2000 1040nm 20MHzでのヒステリシスサイクルを1フォトンと2フォトン検出で測定し、その結果を図3に示す。より高い強度を生成するために、出力パワーの約1%をHamamatsu G1116 GaAsP-フォトダイオード上に集めた。後者はレーザー波長1040nmのところで非線形吸収であったが、事実上この波長で十分に有益な2フォトン有効断面があった。エレクトロニクスは、図4に示すシンプルな増幅器から成る。

【0028】

ヒステリシス測定結果は図3に示す。点線のラインは1フォトン信号3を表わし、実線のラインは2フォトン信号4を表わす。ここで、2フォトン信号4は、単一パルス状態SPに対して対応する1フォトン信号と合致するようにスケールされている。カーブは、種々の領域に分割することができ、1フォトン信号3の下側のラインと2フォトン信号

4の上側ラインとは、単一パルス状態SPを表わしている。1光子信号3の上側ラインと2光子信号4の下側ラインは、二重パルス状態DPに対応している。パルス状態を識別するための十分にシンプルかつ明白な基準として、

【数25】

$$|\mu - \nu| \leq 1$$

の比が単一パルス状態を示し、一方で

【数26】

$$|\mu - \nu| \geq 1.5$$

10

の条件式が二重パルス又は多重パルス状態DP/MPを示すように定めることができる。シンプルなソフトウェアルーチンによって、二つの信号の評価が二つの状態(SP又はDP/MP)間を識別可能にする。

【0029】

一般に、nパルスを有するパルス状態から(n+1)パルスを有する次の最も高いパルス状態へのレーザーの遷移は、パワージャンプを用いて見る事が出来る。nパルスとn+1パルスを有する多重パルス状態間で、平均パワーは増加し、パルス幅は長くなる。多重パルス状態nMPと(n+1)MP間の差別化は、n=1に対する上述の基準と同様の基準によって実行可能である。二つの状態に対する差分

20

【数27】

$$|\mu - \nu|$$

の限界は、実験的に求められる。例えば、三重パルス状態は比

【数28】

$$|\mu - \nu| \geq 2.5$$

30

によって特徴付けられ、一方で二重パルス状態は条件式

【数29】

$$1.5 \leq |\mu - \nu|$$

で定義される。従って、すべての可能性のあるパルス状態は、ルーチンによって識別可能である。ここでまた注目すべきは、自動的にパルス状態を検出可能であり、例えば高速フォトダイオードと自己相関器を用いた測定の場合において、オペレータによる評価はまったく必要でない。

【0030】

40

検出器に関して、ただ一つのフォトダイオードを用いて1光子と2光子吸収に連続して測定が成立するように、即ち、既知の方法で第一信号

【数30】

μ

が測定され、2光子又はマルチ光子吸収によって第二信号

【数31】

ν

が測定されるように、フォトダイオードの異なる動作状態として、第一と第二レーザー検

50

出器を形成することが可能である。

【0031】

2 フォトン又はマルチフォトン検出の別な可能性は、例えばLED又はマルチフォトン効果を有する光伝導セル、又はシリコンアバランシェフォトダイオード (APD) の使用に存する。基本的な取り組みは、例えば以下の文献に記載されている。Reid D.T. et al., "Light-emitting diodes as measurement devices for femtosecond laser pulses", Optics Letters, Vol. 22, No. 4, 15 February 1997, pages 233 to 235とKikuchi K., "Highly sensitive interferometric autocorrelator using Si avalanche photodiode as a two-photon absorber", Electronics Letters, Vol. 34, No. 1, 8 January 1998, pages 123 to 125.

10

【0032】

これらのコンポーネントの入力信号に対する応答は、ピーク強度に依存する。強度が高いほど、信号も大きくなる。レーザーパワーと比較すると、この信号の測定も、動作状態の決定を可能にする。

【0033】

例えばInPを2フォトン吸収体として用いることによって、2フォトン又はマルチフォトン吸収の測定が伝送時においても同様に行われる。吸収がパルスのピークパワーに依存するので、伝送された、即ちスイッチスルーされたパワーを測定すれば十分である。もしパワーが高い場合、レーザーは二重パルスDP又は多重パルス状態MPにある。

【0034】

第二信号

20

【数32】

v

を記録するための代替案は、高調波、特に第二高調波又は第三高調波の使用に存する。このような方法では、例えばBBO (ホウ酸バリウム)、LBO (リチウムトリボレート)、PPLN (周期的に分極されたニオブ酸リチウム) 又はKTP (チタンリン酸カリウム) といった結晶が用いられる。SPとDP/MP遷移の場合の信号比は、2フォトン吸収の場合の信号比に相当する。二重DP又は多重パルス状態MPの場合、ピーク強度は低いので、信号は単一パルス状態の場合より小さく、実行されるべき検出に対して、例えばパワーメータを用いることができる。単一パルス状態SPと二重DP又は多重パルス状態MPの比は、4分の1又は $1/n^2$ である。

30

【0035】

動作状態の検出は、多重パルス状態を避けるための方法やレーザー動作点の調整又は最適化の方法の提供を可能にする。

【0036】

可能なキャリブレーション方法は、以下のようになる。

- レーザーを温度自動調節し、最適に調節する。
- 単一パルス状態SPから二重DP又は多重パルス状態MPへの遷移を測定するために、レーザーを二重又は多重状態になるように変更する。この目的のために、ポンピングパワーを許容最大値にまで増加させる。
- 二重DP又は多重パルス状態MPの始まりから、例えば0.5 Aステップといった段階的にポンプソースの動作電流を減じることによって、パワー対動作電流曲線の切片を測定する。

40

—測定した信号の

【数33】

$$|\mu - v|$$

を基にして、MP-DP-SP遷移を観測する。DP-SP遷移が確立された後に、この遷移に供給された動作電流を、動作点のための電流として定義することができる。この動

50

作電流値又は測定されたパワーは、最初に測定される動作点A Pである。

ー得られたA Pの安定性は、数回スイッチのオンとオフを繰り返すことによって検証することができる。複数のスイッチオン／オフプロセスの間、（例えば5～10サイクル、各サイクル約10秒）二重又は多重パルス状態D P／M Pは発生することが許容されない。

【0037】

いくつかのソリトンレーザーの場合において、スイッチングオン時のレーザーがモード同期動作に入る動作パラメータは、種々の理由から、相対的にS P－D P／M Pヒステリシスに近いが、又はその範囲内にある場合がある。この場合、例えば、レーザーをスイッチングオンする方法として、電流ランプを選択することができる。

ー増加した電流と共に、レーザーがスイッチングオンされる。加えて、モード同期動作が、更なるパラメータの変更（分散、聴覚障害、等）によって励起される。これにより、レーザーがモード同期二重パルス又は多重パルス状態D P／M Pになる。増加した動作電流は、数秒間維持される。

ー次に動作電流は、レーザーをモード同期単一パルス状態S Pにする、D P－S P遷移以下の値にまでゆっくり減少する。減少した動作電流は、数秒間維持される。

ー次に動作電流は、ゆっくり正常値にまで戻り、一定の環境下でS P－D P／M Pヒステリシス内に存在する。

【0038】

図4に、2つの100kΩ抵抗4と1MΩ抵抗5と3つの470pFキャパシタ6と浜松G1116GaAsPフォトダイオード7とオペアンプ8を備えた2フォトン検出用の単純な増幅回路の概要図を示す。Vccは供給電圧を指す。

【0039】

図5は、例えばソリトン状態において動作し、フェムト秒又はピコ秒パルスを生成するために用いられる超短パルスレーザーシステムにおいて使用可能な、二つのレーザー検出器を備えた本発明に係る第一実施例の詳細を説明している。このレーザーシステムは、少なくとも一つの共振器ミラーを備えたレーザー共振器としての発信器10と、レーザー発光のための増幅用レーザー媒質と、調整されたポンプソース9、特にレーザー媒質をポンピングするためのレーザーダイオードソースを有する。レーザー光は、発信器10又は空洞共振器の内側又は外側に設けられた偏向ミラー11によって結合され、スプリッターミラー12へ供給される。ここで、EXはレーザーシステムの出口を示す。第一レーザー検出器13と第二レーザー検出器14は、スプリッターミラーの後ろに設けられており、第一レーザー検出器13は一つ以上のパルスに対する平均パルスパワー又はパルスエネルギーを測定するためのものである。第一レーザー検出器13は、1フォトン吸収状態で動作するフォトダイオードとすることができる。

【0040】

第二レーザー検出器14は、一つ以上のパルスに対するピークパルスパワー又はピークパルス強度を測定するようになっている。第一と第二レーザー検出器の測定信号の比較に基づき二重D P又は多重パルス状態M Pの発生を検出するための評価コンポーネントは、ここでは明瞭さのために図示していない。第二レーザー検出器14は、2フォトン又はマルチフォトン吸収状態で動作するフォトダイオードを用いて実現することができる。

【0041】

1フォトン又はマルチフォトン吸収状態の使用は、また異なるモードによる二つの別々のレーザー検出器の機能性の実現を可能にする。即ち、第一と第二レーザーダイオード13、14はフォトダイオードの異なる動作状態によって実現される。

【0042】

第二レーザー検出器は、しかし、LED又は2フォトン又はマルチフォトン効果を有するフォトレジスターであってもよく、又は送信時に2フォトン吸収を行うInPを備えることもできる。

【0043】

本発明に係る二つのレーザー検出器を備えた配置の第二実施例を図6に示す。偏向ミラ

10

20

30

40

50

ー 11 を介して発振器 10 から出力した後、レーザー光はスプリッターミラー 12 によって、第一検出器としてのパワーメータ 15 と、第二検出器としての組み合わせである高調波生成用コンポーネント 16b を備えたパワーメータ 16a 上に供給される。第二レーザー検出器の特定の機能を実現するために、少なくとも一つの BBO, LBO, PPLN, 又は KTP 結晶からなる追加の機能的コンポーネント 16b が、パワーメータ 16a の前に接続されており、パワーメータ 16a は、原理的に第一検出器としてのパワーメータ 15 と同一又は同種類となるように設計することができる。

【0044】

本発明によれば、二重又は多重パルス状態を検出するための別の検出器の概念を、二つの検出器からなるアプローチに組み合わせることができる。又は、それらを補完し、特定の環境下でそれらを置換することができる。これらは図 7 ないし図 9 (a)、9 (b) で説明されている。しかし、それらは原理的に本発明に係る二つの検出器を用いたアプローチから独立している。

【0045】

図 7 に、適切な吸収体 18 を備えた本発明に係る第一の代替的な、又は補足的な配置の実施例を示す。レーザー光がレーザーシステム 17 から供給され、偏向ミラー 20 を介して出口 EX へと向かう。ビームスプリッティング用に設計された偏向ミラーが、光の一部が可飽和吸収体 18 を介してレーザー検出器 19 に入射することを可能にする。これにより、高速可飽和吸収体 18 を通る透過率が測定され、これに対し、例えば適切なエネルギーギャップを有する GaAs 又は他の材料との間の InGaAs といった量子波吸収体を有することができる。これは強度依存飽和挙動を示し、異なるパルス状態間の区別が同様に実現可能です。可飽和材料は、入力エネルギーを吸収し、飽和時に、パルスが通過することを許容します。飽和は、パルス幅とパルス強度に依存します。可飽和吸収体の適切な選択は、単一パルス状態 SP のパルスの透過を許容し、二重 DP 又は多重パルス状態 MP のパルスをブロックするので、レーザーの動作状態は、透過することが許されたパワーに基づいて求めることができる。以下の計算で示されるように、可飽和材料の非飽和動作における二つの状態間の信号のコントラストは、飽和状態での動作時のものより大きい。

【0046】

強度依存透過率は、以下のように記述できる。

【数 34】

$$T(I) = 1 - \frac{A_0}{1 + \frac{I}{I_{Sat}}} \quad (6)$$

ここで、 I_{sat} は飽和強度であり、 A_0 は吸収力である。 $I = I_{sat}$ で $A_0 = 1$ の飽和状態に対して、以下の式が成り立つ。

【数 35】

$$T(I_{SP}) = 0.5$$

$$T(I_{DP}) = 2 \cdot T(I_{SP} / 4) = 0.4$$

$$T(I_{SP}) / T(I_{DP}) = 1.25$$

一方で、 $I = 0$ 、 $1 I_{sat}$ で $A_0 = 1$ の非飽和状態に対して、比較的高い信号コントラスト $T(I_{SP}) / T(I_{DP})$ は以下ようになる。

10

20

30

40

【数 3 6】

$$T(I_{SP}) = 0.091$$

$$T(I_{DP}) = 2 \cdot T(I_{SP} / 4) = 0.049$$

$$T(I_{SP}) / T(I_{DP}) = 1.86$$

【0047】

10

図8に一例として、吸収体の前の正規化された強度 I / I_{sat} の関数としての高速可飽和吸収体を通る透過率 $T(I)$ の曲線を示す。

【0048】

スペクトラルパルス分析を備えた本発明に係る配置の第二の代替的な又は補足的な実施例を図9(a)、9(b)をもとに詳細に説明する。パルス状態を検出するための、この別の代替物は、パルスのスペクトル分解の使用に存する。二重又は多重状態DP/MPにおいて、パルスはより長いパルス幅を有するが、他方で、そのスペクトルバンド幅は、単一パルス状態SPのものより小さい。例えばスペクトロメータを用いたスペクトルバンド幅の比較によって、レーザーの状態を求めることができる。あいまいさを避けるために、レーザーパワーも測定して、両方の測定を評価することができる。例えば、発信器10で発生してアウトカップリングミラー21を経由したパルスが、後続の回折格子22に供給され、そしてパルスを空間的に分解することが可能である。その後、例えばCMOS又はCCDカメラ23又は他の光学的検出器が、結果として生じる斑点の記録を可能にする。斑点のサイズに基づいて、又はアパーチャーとパワーメーターとによって、SPとDP状態の区別が可能である。より広がったスペクトラム又は斑点を備えた単一パルス状態SPの場合を図9(a)に示し、比較的より狭いスペクトラム又は斑点を備えた二重DP又は多重状態MPの場合を図9(b)に示す。

20

【0049】

もちろん、図示した配置は、単に例示のためのものであり、コンポーネントは他の位置に設けることができ、又は、特定の設計への依存は、例えばスプリッターミラー又はアウトカップリングミラーは省略可能である。また、図7ないし図9(a)、9(b)に示した実施例は、第二検出器として、本発明に係る第一検出器を用いたアプローチに組み合わせることができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0050】

【図1】ソリトンレーザーにおける単一と二重パルス型の概略図である。

【図2】単一と二重パルス型間の遷移におけるヒステリシスサイクルを示す図である。

【図3】一つと二つのフォトン検出それぞれに対するヒステリシス特性を有する単一と多重パルス状態の図である。

【図4】二つのフォトン検出に対する増幅回路の概略図である。

40

【図5】本発明に係る二つのレーザー検出器を備えた配置の第一実施例である。

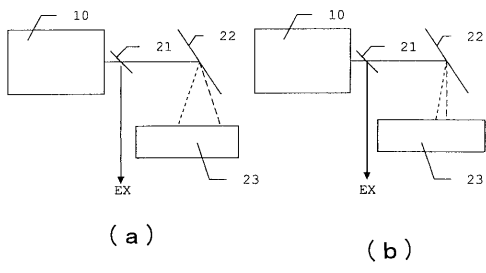
【図6】本発明に係る二つのレーザー検出器を備えた配置の第二実施例である。

【図7】本発明に係る可飽和吸収器を備えた配置の第一の代替的な又は補足的な実施例である。

【図8】高速可飽和吸収器による伝達を示す図である。

【図9】(a)、(b)本発明に係るスペクトルパルス分析を用いた配置の第二の代替的な又は補足的な実施例である。

【図 9】



フロントページの続き

- (74)代理人 100114292
弁理士 来間 清志
- (74)代理人 100116403
弁理士 前川 純一
- (74)代理人 100128679
弁理士 星 公弘
- (74)代理人 100135633
弁理士 二宮 浩康
- (74)代理人 100143959
弁理士 住吉 秀一
- (74)代理人 100156812
弁理士 篠 良一
- (74)代理人 100162880
弁理士 上島 類
- (74)代理人 100165939
弁理士 山崎 孝博
- (74)代理人 100165940
弁理士 大谷 令子
- (74)代理人 100167852
弁理士 宮城 康史
- (74)代理人 100061815
弁理士 矢野 敏雄
- (72)発明者 マキシミリアン ヨゼフ レデラー
オーストリア国 アー 6 8 6 1 アルベルシュヴェンデ、シュヴァルツェン 6 8 7
- (72)発明者 アンーラオル カレンドロン
オーストリア国 アー 6 8 4 5 ホーエネムス、カオルパッハシュトラーセ 7

審査官 平田 佳規

(56)参考文献 特表 2 0 0 5 - 5 3 9 3 8 0 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 0 1 J 1 1 / 0 0
G 0 1 J 1 / 0 0 - 1 / 0 2
G 0 1 J 1 / 4 2 - 1 / 4 6
G 0 1 M 1 1 / 0 0
H 0 1 S 3 / 0 0
H 0 1 S 3 / 1 0
H 0 1 L 3 1 / 1 0
H 0 4 B 1 0 / 0 0 - 1 0 / 9 0