

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-236327

(P2005-236327A)

(43) 公開日 平成17年9月2日(2005.9.2)

| | | |
|----------------------------|-------------|-------------|
| (51) Int. Cl. ⁷ | F I | テーマコード (参考) |
| HO 1 S 3/13 | HO 1 S 3/13 | 5 F 1 7 2 |
| HO 1 S 3/06 | HO 1 S 3/06 | B |
| HO 1 S 3/07 | HO 1 S 3/07 | |

審査請求 有 請求項の数 44 O L (全 36 頁)

| | | | |
|--------------|--|----------|---|
| (21) 出願番号 | 特願2005-128427 (P2005-128427) | (71) 出願人 | 593185670 イムラ アメリカ インコーポレイテッド アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アンアーバー ウッドリッジ・アベニュー 1044 |
| (22) 出願日 | 平成17年4月26日(2005.4.26) | (74) 代理人 | 100081776 弁理士 大川 宏 |
| (62) 分割の表示 | 特願平9-30863の分割 原出願日 平成9年2月14日(1997.2.14) | (72) 発明者 | グレッグ ディー スーハ アメリカ合衆国 ミシガン州 マンチェスター シャーロン・ホロー・ロード545 0番地 |
| (31) 優先権主張番号 | 08/602457 | (72) 発明者 | マーチン イー ファーマン アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバー レイバイン・コート4931番地 |
| (32) 優先日 | 平成8年2月16日(1996.2.16) | | |
| (33) 優先権主張国 | 米国 (US) | | |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 短パルスファイバーレーザー安定化法、短パルスファイバーレーザーのタイミングジッター減少法、ファイバーレーザー安定化法、ファイバーレーザーシステム、短パルスレーザー、短パルス

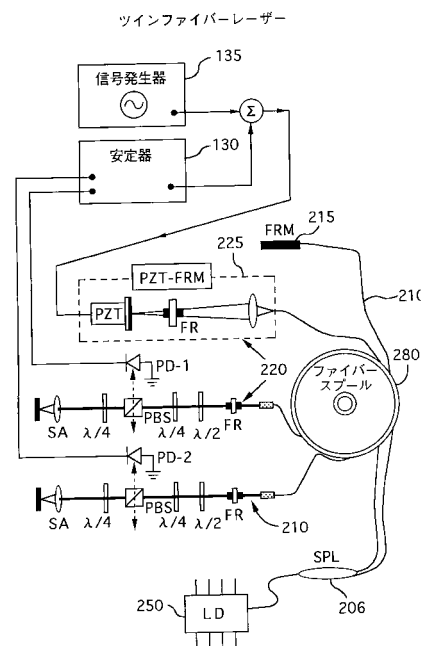
(57) 【要約】

【課題】 振動や空気の乱れ、温度変化などの環境条件の変動により生じるタイミングジッターを最小限に低減する短パルスファイバーレーザーの安定化法を提供すること。

【解決手段】 ファイバーレーザーを外部環境から隔離する隔離ステップと、該ファイバーレーザーをファイバースプールに巻き付ける巻き付けステップと、該ファイバーレーザーが該ファイバースプールに巻き付けられたままで該ファイバーレーザーを動作させる動作ステップと、を有することを特徴とする短パルスファイバーレーザー安定化法。

ファイバーレーザーがファイバースプールに巻き付けられ、外部環境から隔離されるので、環境条件の変動の影響を受けることがなく安定化される。

【選択図】 図4



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

短パルスファイバーレーザーを安定化する方法であって、
該ファイバーレーザーを外部環境から隔離する隔離ステップと、
該ファイバーレーザーをファイバースプールに巻き付ける巻き付けステップと、
該ファイバーレーザーが該ファイバースプールに巻き付けられたままで該ファイバーレーザーを動作させる動作ステップと、
を有することを特徴とする短パルスファイバーレーザー安定化法。

【請求項 2】

前記ファイバースプールは、消音されていることを特徴とする請求項 1 に記載の短パルスファイバーレーザー安定化法。 10

【請求項 3】

前記ファイバースプールの熱膨張係数は、前記光ファイバーの熱膨張係数と一致していることを特徴とする請求項 1 に記載の短パルスファイバーレーザー安定化法。

【請求項 4】

さらに、前記短パルスファイバーレーザーを温度制御された容器内に設置する設置ステップを有することを特徴とする請求項 1 に記載の短パルスファイバーレーザー安定化法。

【請求項 5】

前記短パルスレーザーは、第 1 短パルスレーザーであり、第 2 短パルスレーザーの安定性は、該第 1 短パルスレーザーの安定性と共に制御され、該第 1 短パルスレーザーおよび 20
該第 2 短パルスレーザーは、いずれもファイバーレーザーであって、

該第 1 短パルスレーザーおよび該第 2 短パルスレーザーを同一の要素で同一の仕方で構成する構成ステップと、

該第 1 短パルスレーザーおよび該第 2 短パルスレーザーを共通のレーザーでポンピングするポンピングステップと、

該第 1 短パルスレーザーおよび該第 2 短パルスレーザーを共通のファイバースプールに巻き付ける巻き付けステップと、

該第 1 短パルスレーザーおよび該第 2 短パルスレーザーを単一の容器内に設置する設置ステップと、

を有することを特徴とする請求項 1 に記載の短パルスファイバーレーザー安定化法。 30

【請求項 6】

さらに、前記ファイバーレーザーが巻き付けられている前記ファイバースプールを温度制御され消音された容器中に設置する設置ステップを有することを特徴とする請求項 1 に記載の短パルスファイバーレーザー安定化法。

【請求項 7】

さらに、前記ファイバーレーザーの時間平均キャビティ長 mismatch をゼロに保持する保持ステップを有することを特徴とする請求項 5 に記載の短パルスファイバーレーザー安定化法。

【請求項 8】

二つの短パルスファイバーレーザー間のタイミングジッターを減少させる方法であって 40
、

前記二つのファイバーレーザーを単一のファイバースプールに巻き付ける巻き付けステップを有することを特徴とする二つの短パルスファイバーレーザー間のタイミングジッター減少法。

【請求項 9】

さらに、前記二つのファイバーレーザーを単一のポンプ光源で駆動する駆動ステップと、

前記二つのファイバーレーザーを単一の容器に封入する封入ステップと、
を有することを特徴とする請求項 8 に記載の二つの短パルスファイバーレーザー間のタイミングジッター減少法。

【請求項 10】

さらに、前記単一の容器内の環境を前記単一容器の外部環境に応じて制御する制御ステップを有することを特徴とする請求項 9 に記載の二つの短パルスファイバーレーザー間のタイミングジッター減少法。

【請求項 11】

さらに、前記二つのファイバーレーザーの反復周波数を別々に制御する制御ステップを有することを特徴とする請求項 8 に記載の二つの短パルスファイバーレーザー間のタイミングジッター減少法。

【請求項 12】

ファイバーレーザーを安定化する方法であって、
 該ファイバーレーザーを外部環境から隔離する隔離ステップと、
 環境条件の変化に応じて該ファイバーレーザーのキャビティ長を調節する調節ステップと、
 を有することを特徴とするファイバーレーザー安定化法。

10

【請求項 13】

さらに、 piezoelectronic・トランスデューサーで前記レーザーの反復周波数を変更する反復周波数変更ステップを有し、前記レーザーが短パルスレーザーであることを特徴とする請求項 12 に記載のファイバーレーザー安定化法。

【請求項 14】

さらに、前記 piezoelectronic・トランスデューサーの入力端で該 piezoelectronic・トランスデューサーの駆動信号の前端或いは後端の急な電圧変化を避けるために該駆動信号を整えるステップを有することを特徴とする請求項 13 に記載のファイバーレーザー安定化法。

20

【請求項 15】

さらに、前記 piezoelectronic・トランスデューサーを正弦曲線の駆動信号で駆動するステップを有することを特徴とする請求項 13 に記載のファイバーレーザー安定化法。

【請求項 16】

光エネルギーを伝搬可能な第 1 希土類ドープファイバーと、
 該第 1 ファイバーが巻き付けられるスプールと、
 を有し、該第 1 希土類ドープファイバーが外部環境条件から隔離されていることを特徴とするファイバーレーザーシステム。

30

【請求項 17】

さらに、前記第 1 ファイバーと前記スプールを環境隔離する容器を有することを特徴とする請求項 16 に記載のファイバーレーザーシステム。

【請求項 18】

さらに、前記スプールに共に巻き付けられた第 2 ファイバーと、
 前記第 1 及び第 2 ファイバーとを共に駆動可能な単一ポンプ光源と、
 を有することを特徴とする請求項 16 に記載のファイバーレーザーシステム。

【請求項 19】

さらに、前記レーザーのキャビティ長を変えることができる piezoelectronic・トランスデューサーを有することを特徴とする請求項 16 に記載のファイバーレーザーシステム。

40

【請求項 20】

さらに、前記第 1 及び第 2 ファイバーの出力を動揺させる動揺手段を有することを特徴とする請求項 18 に記載のファイバーレーザーシステム。

【請求項 21】

前記第 1 ファイバーの出力は走査周波数で動揺させられ、前記第 2 ファイバーの出力は該第 1 ファイバーの出力の平均反復周波数に実質的に等しい反復周波数で安定するように動揺させられることを特徴とする請求項 20 に記載のファイバーレーザーシステム。

50

【請求項 22】

さらに、前記第1ファイバーの一端に第1ファラデー回転子ミラーと、
第2ファラデー回転子ミラーとミラーに取り付けられた piezoelectronic トラン
スデューサーを備える光学組立部品と、
を有することを特徴とする請求項18に記載のファイバーレーザーシステム。

【請求項 23】

さらに、モードロックさせる同じ光学系を少なくとも2セット有し、モードロックさせ
る光学系の各々は波長板、ファラデー回転子、及び偏光ビームスプリッタを備え、モード
ロック光学系の少なくとも1セットは前記第1ファイバーと関連し、モードロック光学系
の少なくとも別の1セットは前記第2ファイバーに連合されていることを特徴とする請求
項22に記載のファイバーレーザーシステム。

10

【請求項 24】

パルス出力を発生するファイバーレーザーと、
該ファイバーレーザーの動作安定性を改善するために該ファイバーレーザーが巻き付け
られるファイバースプールと、
を有することを特徴とする短パルスレーザー。

【請求項 25】

短パルスファイバーレーザーを安定化する方法であって、
該短パルスファイバーレーザーを容器内に設置する設置ステップと、
該ファイバーレーザーを外部環境から隔離する隔離ステップと、
該レーザーを安定化するために容器内の温度を制御する制御ステップと、
を有することを特徴とする短パルスファイバーレーザー安定化法。

20

【請求項 26】

さらに、前記ファイバーレーザーをファイバースプールに巻き付ける巻き付けステップ
と、
該ファイバーレーザーが該ファイバースプールに巻き付けられた状態で該ファイバーレ
ーザーを動作させる動作ステップと、
を有することを特徴とする請求項25に記載の短パルスファイバーレーザー安定化法。

【請求項 27】

前記ファイバースプールが消音されていることを特徴とする請求項26に記載の短パルス
ファイバーレーザー安定化法。

30

【請求項 28】

短パルスファイバーレーザーの出力を制御する方法であって、
該ファイバーの温度を制御することで該レーザーの反復周波数を安定化させる安定化ス
テップを有することを特徴とする短パルスファイバーレーザー出力制御法。

【請求項 29】

さらに、piezoelectronic トランスデューサーを前記レーザーに連絡して供給す
る供給ステップと、
該piezoelectronic トランスデューサーに電圧を供給する電圧供給ステップと、
を有し、該レーザーの反復周波数が該piezoelectronic トランスデューサーの移
動によって制御されることを特徴とする請求項28に記載の短パルスファイバーレーザー
出力制御法。

40

【請求項 30】

さらに、前記レーザーの平均反復周波数を制御するための位相ロックループ回路を供給
するステップを有することを特徴とする請求項29に記載の短パルスファイバーレーザー
出力制御法。

【請求項 31】

各々レーザーキャビティを持つ第1と第2短パルスレーザーと、
該第1と第2短パルスレーザーからそれぞれのパルスを受信して比例出力を発生するこ
とができる位相ロックループ回路と、

50

を有し、該第 1 と第 2 レーザーの内少なくとも一方はモードロックレーザーで、長さ変更ユニットを備え、該長さ変更ユニットは該位相ロックループ回路の該比例出力に基づいて該レーザーキャビティの長さを変えることができることを特徴とするレーザー装置。

【請求項 3 2】

前記モードロックレーザーの一方または両方は受動モードロックされることを特徴とする請求項 3 1 に記載のレーザー装置。

【請求項 3 3】

前記長さ変更ユニットは piezoelectric・トランスデューサー (P Z T) を備えることを特徴とする請求項 3 1 に記載のレーザー装置。

【請求項 3 4】

前記モードロックレーザーはファイバーレーザーであり、前記長さ変更ユニットは該ファイバーの長さを伸ばすことができることを特徴とする請求項 3 1 に記載のレーザー装置。

10

【請求項 3 5】

前記長さ変更ユニットは温度制御デバイスを備えることを特徴とする請求項 3 1 に記載のレーザー装置。

【請求項 3 6】

前記長さ変更ユニットは少なくとも一方のレーザーの温度を制御することができる温度制御デバイスを備えることを特徴とする請求項 3 1 に記載のレーザー装置。

【請求項 3 7】

前記長さ変更ユニットは少なくとも一方のレーザーで経験された環境条件を制御することができる環境容器を備えることを特徴とする請求項 3 1 に記載のレーザー装置。

20

【請求項 3 8】

前記位相ロックループ回路は安定器と P Z T 制御器を備えることを特徴とする請求項 3 1 に記載のレーザー装置。

【請求項 3 9】

前記第 1 と第 2 短パルスレーザーは同期されており、前記比例出力で安定化されており、該比例出力は該第 1 と第 2 短パルスレーザーからのそれぞれのパルスの間の差の大きさであることを特徴とする請求項 3 1 に記載のレーザー装置。

【請求項 4 0】

前記位相ロックループ回路のバンド幅は前記 piezoelectric・トランスデューサーの移動周波数以下であることを特徴とする請求項 3 0 に記載の短パルスファイバーレーザー出力制御法。

30

【請求項 4 1】

前記短パルスファイバーレーザーはモードロックされていることを特徴とする請求項 3 0 に記載の短パルスファイバーレーザー出力制御法。

【請求項 4 2】

短パルスファイバーレーザーの出力を制御する方法であって、
該短パルスファイバーレーザーの反復周波数を安定化させることができる位相ロックループ回路を供給するステップと、
piezoelectric・トランスデューサーを前記短パルスファイバーレーザーに接続する接続ステップと、

40

該 piezoelectric・トランスデューサーに電圧を供給する電圧供給ステップと、
を有し、該短パルスファイバーレーザーの反復周波数が該 piezoelectric・トランスデューサーの移動によって制御されることを特徴とする短パルスファイバーレーザー出力制御法。

【請求項 4 3】

短パルスファイバーレーザーの出力を制御する方法であって、
該短パルスファイバーレーザーの反復周波数を安定化させることができる位相ロックループ回路を供給するステップと、

50

該短パルスファイバーレーザーに関連し、該位相ロックループ回路からの出力を受信できる温度制御器を供給するステップと、

を有し、該短パルスファイバーレーザーの反復周波数が該位相ロックループ回路からの出力に基づいて該短パルスファイバーレーザーの温度を制御することで制御されることを特徴とする短パルスファイバーレーザー出力制御法。

【請求項 44】

短パルスファイバーレーザーの出力を制御する方法であって、

該短パルスファイバーレーザーの反復周波数に同期した信号を安定化させることができる少なくとも一つの位相ロックループ回路を供給するステップと、

該短パルスファイバーレーザーに関連し、該位相ロックループ回路からの出力を受信できる環境制御デバイスを供給するステップと、

を有し、該短パルスファイバーレーザーの反復周波数は該位相ロックループ回路からの出力に基づいて該短パルスファイバーレーザーで経験された環境条件を制御することで制御される短パルスファイバーレーザー出力制御法。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、短パルスレーザーの技術分野に属し、特にレーザー安定化法と装置、レーザーのタイミングジッター減少法と装置、及びレーザーの出力制御法と装置に属する。本発明は、タイミング校正を高精度（すなわちサブピコ秒）に行うのに有用であり、時間的走査方法や高速走査レーザー装置に対しても有用である。分けても本発明を適用した高速走査レーザー装置は、コリレーターやレンジング、三次元イメージング、コンターリング、トモグラフィおよび光学時間領域レフレクトメトリー（OTDR）を含む他の形式のポンプ・プローブデバイスにおいて、機械的な走査遅延アームの必要性をなくする。

20

【背景技術】

【0002】

超高速レーザー発振器は、今のところ、反復周波数が 5 MHz から 1 GHz 程度までの範囲で、ナノジュールレベルのパルスエネルギーで 10 fs（フェムト秒）のオーダーのパルス幅（のレーザー）を発生する能力があることが知られている。このような短パルスは、タイムゲーティングや度量衡学を含む多くの応用に使用されている。このような短光パルスの応用の多くにおいては、光パルスのワンセットが他の光パルスのワンセットに対して遅れていることが必要である。ここにおいては、時間遅れは非常に高精度であることが必要であり、例えば 10 fs のオーダーの精度であることが必要である。短パルスの時間遅れは、生物学的または医学的なイメージングや、高速光検出および光サンプリング、光時間領域反射率計、並びに度量衡学などの応用で、多く使用されている。光パルスの遅延および走査（スキャン）のための通常の方法は、光パルスを鏡から反射すると共に、この鏡を何らかの機械的な手段で物理的に距離 D だけ動かすことである。距離 D は、遅延時間 T と、真空中では 3.0×10^8 m/s の光速との積で定義される。すなわち、

30

$$D = c / 2 \times T \quad \text{または} \quad D (\text{cm}) = 15 \times T (\text{ns})$$

この種の遅延は、ここでは「物理的遅延」と呼ぶことにする。同様に、走査というのは、ここでは二つの光パルス間の到着時刻の差のシステムティックな変動を指すものとする。鏡の精密な位置決めおよび走査のために、すでに様々な方法やデバイスが開発されている。例えば以下のようなものがある。

40

【0003】

- ・ボイスコイル型デバイス（シェーカー）（例えば、非特許文献 1 参照）
- ・回転鏡対（例えば、非特許文献 2 参照）
- ・ステップモーターを採用しているリニアートランスレーター（多くのベンダーから商品化されている）
- ・ガルバノメーターを採用しているリニアートランスレーター（例えば、非特許文献 3 参照）

50

可調整群遅延（アジャスタブル・グループ・ディレイ）を使用している他のタイプの物理的遅延には、以下のようなものがある。

- ・走査ガルバノメーターを採用しているフェムト秒パルスシェーパー（FPS）（例えば、非特許文献4 - 5参照）
- ・回転ガラスブロック

物理的遅延方法には数々の短所があるが、その最たるものは長い遅延が必要な場合には広い場所をとってしまうことである。例えば、10 ns（ナノ秒）の遅延を得るためには、5フィートの鏡の移動が必要である。その他にもまた、物理的な制約や短所がある。長い遅延が使用されているときには、ミスアラインメントやピント外れは、計測を歪ませる。コーナーキューブ反射器を使用すると、ミスアラインメントの問題は軽減されるが、ピント外れの問題は軽減されない。このピント外れの影響は、走査振幅が光ビームの共焦点パラメーターのかなりの部分に相当する時に起きやすい。10 nsの時間遅れは、10フィート（約3 m）の自由空間での伝搬を必要とする。それゆえ、ピント外れの影響を最小限に抑えるためには、共焦点パラメーター（ Z_R ）はおおよそこの値（10フィート）の10倍、すなわち $Z_R = 30$ mでなくてはならない。このため、1550 nmの波長では12 mmのビーム半径（ w_0 ）が要求される。これでは多くの場合に非現実的に大きいものになってしまう。

【0004】

鏡を大きく移動させることの必要性は、遅延線を何度も通過すること（マルチパッシング）により、低減される。（例えば、遅延線のダブルパッシングによれば、必要とされる鏡の移動距離を半減させることができる。）しかしながら、これによつては、ピント外れの問題は軽減されない。マルチパッシングでは、アラインメント作業がより複雑になり、光学的な損失が増えるといった独自の問題が生じてしまう。

【0005】

しかし、走査率（スキャニングレート）および走査周波数に関する別の制限は、同時に解決することができる。進行中の計測の「リアルタイム」ディスプレイを得るために、素早く（30 Hzより上で）走査する間に平均して信号を送ることが、多くの場合望ましい。それでも、このように高い走査周波数では、走査範囲は限られてしまう。これまでに達成された走査範囲の最高記録は、走査FPS法を用い、100 Hzのレート（走査率）で100 ps（ピコ秒）である。走査範囲およびまたは走査周波数をこれ以上いくらかでも増加させると、高レベルの振動が発生してしまい、レーザーの作動が成り立たなくなってしまう可能性がある。回転しているガラスブロックは、この振動問題を防ぎ、より高い走査速度を出す能力を持っているが、走査範囲を全く調整することができない。さらに、これら（回転ガラスブロック）は、群速度の分散の変動をもたらすので、100 fs未満の幅のパルスに使用するのは不適當である。

【0006】

物理的遅延に加えて、機械的な動きを全く必要としない時間的な走査方法が導入されている。例えば、以下のようなものがある。

- ・自由走査レーザー（例えば、非特許文献6 - 9参照）
- ・分散要素として音響光学デフレクター（偏向器）を採用しているステップミラー遅延線（例えば、非特許文献10参照）

これらの非機械的な方法によれば、とりわけ高速走査が可能である。これらの自由走査レーザーでは、レーザーの反復周期全体にわたるスパン（幅）が得られる。例えば、図1に示す公知の自由走査レーザーシステムは、互いに異なるキャビティー長を持っているマスターレーザー10およびスレーブレーザー20を有し、両者10, 20は互いに異なる反復周波数 f_1 および f_2 でパルス列を生成する。その走査周波数は、周波数差 $f_1 - f_2$ に等しいので、スレーブレーザー20のキャビティー長を所定の長さに調整することにより所望の値に設定される。相関器（コリレーター）40は、二つのレーザーの間の相互相関から信号を生成する。これからこの二つのレーザーの間のタイミングに関する情報が得られ、データ取得電子装置50にトリガー信号が与えられる。例えば、Kafka et

10

20

30

40

50

al.によれば、二つの独立なモードロック・チタン：サファイア・レーザー、つまりマスターレーザー10およびスレーブレーザー20（それぞれの公称反復率は80MHz）が、（80MHz程度の）互いに異なる反復周波数を持つように設定された。反復周波数のオフセットに起因して、おおよそ100kHzのオフセット周波数で、互いを通して走査しあつた。このオフセット周波数は、ローカルRFオシレーターに対して安定化され得る。レーザー反復率が80MHz付近であつたから、総走査範囲は約13nsであつた。それゆえ、機械的に動く遅延線を全く使用することなく、時間走査が達成された。タイミングの較正は、非線形結晶（例えば相関器40）の中へ鏡30から反射された二つのレーザービームの相互相関により達成された。結果として得られた信号は、トリガーデータ取得ユニット50（例えばオシロスコープ）へ送られて使用された。レーザー10, 20からのレーザービーム出力もまた、別の鏡60で反射され、レーザービームを使用した所望の計測や実験を行う計測装置70により受信される。

10

20

30

40

50

【0007】

この技術の最大の欠点は、次の二つの理由によりデータ取得時間が極めて長くかかることである。

1. 固定された走査範囲：走査範囲が、レーザーの反復周波数（すなわちラウンドトリップタイム）の逆数に固定されている。

2. 無駄時間：13nsのパルス空間の全部の代わりに、100psだけとか10psだけとかに関心が流れがちである。それゆえ、10 μ s（マイクロ秒）ある走査時間のうち、ほんの1%（または0.1%）しか活用されておらず、残りの99%（99.9%）は「無駄時間」である。そのため、データ取得時間が100倍とか1000倍とかに増大する。

【0008】

Kafka et al.は、これらの制限に言及しており、もっと高い反復率（例えば $\nu = 1$ GHz）のレーザーを用いればこれを部分的に回避することができると示唆している。しかしながら、たいへん多様な走査範囲が要求される多くの応用のためには、この解決策は受け入れ難い。例えば、半導体のポンププローブ計測は、しばしば多種多様な時間範囲にわたって行われる。半導体のキャリア（すなわち電子および正孔）の寿命は数ナノ秒のオーダーであり、1GHzのレーザーは全く受け入れることができない。なぜなら、次のパルスが届くときにも、以前のレーザーパルスによる残留キャリアが依然として存在しているからである。それでも同時に、極端に高速なダイナミクスを見るために、もっと狭い時間スケールにズームインすることが望ましいことも、しばしばある。それゆえ、自由走査レーザー技術には、多くの応用で要求される走査範囲の選定の柔軟性が欠けている。極端に長い取得時間がかからずに広い時間的なダイナミックレンジを得るための方法は、タイミング調整を粗くも細かくもできる柔軟性を持つことである。

【0009】

関連する研究で、レーザーが能動的にモード同期している場合にも受動的にモード同期している場合にも、あるいは受動モードロックレーザーと能動モードロックレーザーとの組み合わせの場合にも、二つのモードロックレーザーの間でタイミングを安定化させるために、数種類の方法が使用されてきた。同期化のために使用された方法は、大きく分けて（1）受動光学的方法と（2）電子的安定化との二つのタイプに分かれる。最も高い同期精度は、二つのレーザーを光学効果を介して干渉させる受動光学的方法によって達成される（例えば、非特許文献11-14参照）。これらの光学効果（例えば相互位相変調等）は、一パルス幅（100フェムト秒未満）以下に同期される二つのレーザー間での強固なモード同期を発生させる。これらは最も正確な同期化をもたらすものの、レーザー間の時間遅れは強固に固定されている。そのため、これらの間の時間遅れを走査するためには、通常の物理的な走査遅延方法を使用せざるを得ない。

【0010】

単純なRF位相検知を使用した電子的な安定化によれば、相対的な時間遅れを調整する上で最も柔軟性が得られるが、しかし現時点ではこれらのシステムは、2~3ピコ秒より

も良好なタイミングの正確さを維持することができない。このようなシステムは、外部の参照周波数に合わせてTi : サファイア・レーザーを安定化させたり、二つのモードロックTi : サファイア・レーザーの同期を取ったりするために、市販されている(スペクトラフィジックス Lok-to-Clock/TM システム)。パルス光学位相同期ループ(POPLL)を使用すれば、100フェムト秒よりも良好な安定化が達成される。これはハイブリッド光学電子的方法であって、ディジャーリ等の文献(例えば、非特許文献15参照)に開示されている。同文献では、電子安定化回路が、光学的相互相関器からのタイミング誤差信号をもたらず。しかしながら、この方法は、受動的光学方法としての同じタイミング調整の同期(ロック)を被っている。タイミングの変更は、一つのパルス幅未満でのみ可能である。それゆえ、POPLL法を使用するに際して、一つのパルス幅より少しでも大きく相対パルスタイミングを変更したい場合には、一つのレーザービームの中にある種の物理的な遅延線を挿入することが必要になるであろう。

10

20

30

40

50

【0011】

もしもレーザー固有のタイミングジッターが低減されるのであれば、RF法によるタイミング安定化の性能を向上させることができるであろう。二つのレーザーができる限り同一の環境条件に置かれることにより、固有のレーザージッターのある程度の低減が可能である。スティッキーパルス・レーザーは、Dykaar et al. に開示されているが、Ti : サファイア・レーザー結晶の空間的に分かれている二つの領域をポンピングするために、空間的に分割されたレーザービームを採用している。これには、二つの分割されているレーザーが、エンドミラーを除いて同じポンプレーザー、レーザー結晶、空気の空間、およびその他のキャビティー内の要素のほとんどを共有していることが不可欠である。このようにすれば、二つのレーザーは、同じ温度変動、ポンプレーザーのノイズ、および擾乱を経験するので、反復率のジッターにおける差異が最低限に抑制される。こうすれば、たとえ二つのレーザー間での光学的干渉が弱くても、複数のパルスと一緒に同期(ロック)することができる。「環境的カップリング」の一般的な原則は、モードロック・ファイバーレーザーを含む他の形式のレーザーにも適用可能である。しかしながら、Dykaar et al. の目的は二つのレーザーと一緒にロックすることであり、本発明の目的とするところでは好ましくないことに注意すべきである。なぜならば、この時間遅れは走査できないからである。すなわち、前述のスティッキーパルス・レーザーの二つのカップリングされたレーザーからのタイミングパルスは、光学的カップリングを通して一緒にロックされるものであり、独立に制御することはできないからである。

【非特許文献1】R. F. Fork and F. A. Beiser, APPL Opt. 17, 3534(1978)

【非特許文献2】Z. A. Yaza and N. M. Amer, Opt. Comm., 36, 406(1981)

【非特許文献3】D. C. Edelstein, R. B. Romney, and M. Scheuermann, Rev. Sci, Instrum. 62, 579(1990)

【非特許文献4】K. F. Kwong, D. Yankelevich, K. C. Chu, J. P. Heritage, and A. Denes; "400-Hz mechanical scanning optical delay line" Opt. Lett. 18, (7) 558(1993)

【非特許文献5】K. C. Chu, K. Liu, J. P. Heritage, A. Denes, Conference on Laser and Electro-Optics, OSA Tech. Digest Series, Vol.8, 1994, paper CTh123.

【非特許文献6】A. Black, R. B. Apte, and D. M. Bloom, Rev. Sci, Instrum. 63, 3191(1992)

【非特許文献7】K. S. Giboney, S. T. Allen, M. J. W. Redwell, and J. E. Bowers; "Picosecond Measurements by Free-Running Electro-Optic Sampling." IEEE Photon. Tech. Lett., pp. 1353-5. Nov. 1994

【非特許文献8】J. D. Kafka, J. W. Pieterse, and M. L. Watts; "Two-color subpicosecond optical sampling technique." Opt. Lett., 17, pp. 1286-9, Sept. 15, 1992

【非特許文献9】M. H. Ober, G. Sucha, and M. E. Fermann; "Controllable dual-wave length operation of a femtosecond neodymium fiber laser." opt. Lett. 20, p. 195-7, Jan. 15, 1995

【非特許文献 1 0】R.payaket, S.Hunter, J.E.Ford, S.Esener; "Programmable ultrashort optical pulse delay using an acousto-optic deflector." Appl.Opt., 34, No. 8, pp.1445-1453, Mar.10, 1995

【非特許文献 1 1】J.M.Evans, D.E.Spence, D.Burns, and W.Sibbet; "Dual-wavelength selfmode-locked Ti:sapphire lasers." Opt.Lett., 13, pp.1074-7, Jul.1, 1993

【非特許文献 1 2】M.R.X.de Barros and P.C.Becker; "Two-color synchronously mode-locked femtosecond Ti:sapphire laser." Opt.Lett., 18, pp.631-3, Apr.15, 1993

【非特許文献 1 3】D.R.Dykaar and S.B.Darak; "Sticky pulses:two-color cross-mode-locked femtosecond operation of a single Ti:sapphire laser." Opt.Lett., 18, pp. 634-7, Apr.15, 1993 10

【非特許文献 1 4】Z.Zhang and T.Yagi, "Dual-wavelength synchronous operation of a mode-locked Ti:sapphire laser based on self-spectrum splitting." Opt. Lett., 18, pp.2126-8, Dec.15, 1993

【非特許文献 1 5】S.P.Dijaili, J.S.Smith, and A.Dienes, "Timing synchronization of a pasively mode-locked dye laser using a pulsed optical phase locked loop" Appl.Phisics.Lett., 55, pp.418-420, Jul.1989

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

20

本発明の第 1 の課題は、たとえば「マスター」レーザーおよび「スレーブ」レーザーのように、光学要素の大きな機械的な動きを必要とすることなく、パルス反復周期 T_R の連続していかようにも選択されるサブインターバルでの操作を可能とする、二つのモードロックレーザーの間での時間遅れを急速に走査（スキャン）するための方法および装置を提供することである。

【0013】

本発明の第 2 の課題は、振動や空気の乱れ、温度変化などの環境条件の変動により生じるタイミングジッターを、最小限に低減する方法及び装置を提供することである。

【0014】

30

本発明の第 3 の課題は、上記走査方法および上記走査方法の結合に使用されるように、サブピコ秒の精度をもって走査時間スケールを較正する方法を提供することである。例えば、一つのレーザー（例えばマスターレーザー）からのパルスを、部分反射する光学要素のシリーズを通して別のレーザー（例えばスレーブレザー）からの通過パルスによって得られるパルスシーケンスに対する相互相関を取る（クロスコリレートする）ために、本発明は使用することができる。

【課題を解決するための手段】

【0015】

40

第 1 の課題を解決するための手段は、二つのレーザー間での平均タイミング（位相）を連続的にモニターするための電子的フィードバック回路を使用しているが、一つのレーザー（たとえばスレーブレザー）のキャビティー長をミクロン単位で適正に調整するようになっている。なお、データ取得のデューティサイクルが大きく改善されるように、反復周期のいくつかのサブインターバルにわたって、自由走査法とは異なり相対時間遅れが走査されるよう、二つのレーザーの RF 安定化を改造（モディファイ）することが望ましい。

【0016】

第 2 の課題を解決するための手段は、二つのレーザーを独立に制御できるようにしながら、同一の容器内で同一の要素を使用して、同じポンプレザーでポンピングされるように、両方のレーザーを構成する。とりわけファイバーレーザーの場合には、同じ軸（スプール）に二つのファイバーと一緒に巻き付けられる。

【発明の効果】

50

【 0 0 1 7 】

同じスプールに二つのファイバーを巻き付け、消音して同じ容器内に構成することで、振動や空気の乱れ、温度変化などの環境条件の変動により生じるタイミングジッターを、最小限に低減することができる。

【 発明を実施するための最良の形態及び実施例 】

【 0 0 1 8 】

[高速走査法の原理]

本発明は、自由走査レーザーシステムと同様に、例えば図 2 (a) に示すようにほとんど同一の反復率をもつマスターレーザー 1 1 0 およびスレーブレザー 1 2 0 の二つのレーザーから構成されている。しかしながら自由走査レーザーシステムとは異なって、マスターレーザー 1 1 0 およびスレーブレザー 1 2 0 からのパルス出力は、互いを通して完全に走査することはできないようになっている。むしろ、波長 λ_1 をもつマスターレーザー 1 1 0 は、一定の反復率 f_1 に保持されているか、自発的にドリフトするのが容認されている一方で、スレーブレザー 1 2 0 の反復周波数 f_2 は、マスターレーザー 1 1 0 の反復率の付近を動揺 (ディザ) させられている。この反復率の動揺は、例えば 3 0 H z から 1 k H z までの範囲の「高」周波でスレーブレザー 1 2 0 のキャビティー長 (L_2) を変えることによって達成されている。その一方で、その「平均的」反復率は、走査周波数未満の帯域幅の「低速」位相同期ループ (P L L) 回路を含む安定器ユニット 1 3 0 により、マスターレーザー 1 1 0 の反復率に合わせて追従ないし制御されている。マスターレーザー 1 1 0 とスレーブレザー 1 2 0 との間の平均的な時間遅れは、スレーブレザー 1 2 0 のキャビティー長を制御する安定器ユニット 1 3 0 により、一定に保持されている。一方、二つのレーザー間の瞬時の遅れを走査するために、信号発生器 1 4 0 からの高速動揺信号出力は、安定器ユニット 1 3 0 からの制御電圧出力と (合算器) で足し合わされている。反復周波数の追従および動揺は、スレーブレザー 1 2 0 のエンドミラーを piezo 素子 (P Z T) 1 2 1 に取付け、周波数信号発生器 1 4 0 からの必須の電圧信号を (P Z T に) 印加することにより、実現することができる。 P L L 回路の帯域幅は動揺周波数未満であることが必要であり、さもないと、 (スレーブレザー 1 2 0 の周波数が) マスターレーザー 1 1 0 に追従しようとしてキャビティー長の走査を妨害してしまうであろう。

【 0 0 1 9 】

図 2 (b) は別の実施例を示しており、この実施例ではマスターレーザー 1 1 0 も P Z T 1 1 1 を装置していて、両レーザー 1 1 0 , 1 2 0 が共に P Z T 1 1 1 , 1 2 1 によりそれぞれ制御されるエンドミラーを有している。この場合には、マスターレーザー 1 1 0 が走査周波数で動揺させられており、スレーブレザー 1 2 0 はマスターレーザー 1 1 0 の「平均的」反復率を追従 (トラック) している。マスターレーザー 1 1 0 のキャビティー長は信号発生器 1 4 0 により急速に動揺させられており、安定器ユニット 1 3 0 はスレーブレザー 1 2 0 を所望の平均的時間遅れに固持している。

【 0 0 2 0 】

繰り返すが、 P L L 回路がタイミング走査と干渉しないために、 P L L 回路の帯域幅を動揺周波数が凌駕していることが必要である。

【 0 0 2 1 】

キャビティー長の走査がどう作用するかを説明する一例として、スレーブレザー 1 2 0 の P Z T 1 2 1 に対して走査周波数 f_s の矩形波を印加する。すると、キャビティー長のミスマッチは、次の数 1 の時間の関数で急速に変動する。

【 0 0 2 2 】

【 数 1 】

$$\Delta L (t) = \Delta L_0 \cdot \text{Sq} (f_s t)$$

【 0 0 2 3 】

ここで、 L_0 は矩形波の振幅であり、 $\text{Sq} (x)$ は矩形波関数である。これにより、走査

サイクルの半分毎に正負の線形走査遅れが生じる（三角波）。安定している場合には、 L だけの一定のキャビティー長のミスマッチが、次の数2のオフセット周波数を生じる。

【0024】

【数2】

$$\Delta \nu = -c \Delta L / (2L^2)$$

または書き改めて、

$$\Delta \nu / \nu = -\Delta L / L$$

【0025】

しかしながら、高速走査法においては、キャビティー長は十分に高い周波数で動揺させられるので、（両レーザーの）パルスは互いにすれ違う可能性はない。すなわち、走査周波数および振幅は、次の数3の条件を満たす。 10

【0026】

【数3】

$$f_s \gg \Delta \nu$$

または

$$f_s \gg c \Delta L / (2L^2)$$

【0027】

この場合には、時間変動する時間遅れ $T_D(t)$ は、次の数4に示すように、キャビティー長のミスマッチの時間積分に比例するであろう。 20

【0028】

【数4】

$$T_D(t) = (2/cT_1) \int \Delta L(t') dt'$$

または

$$T_D(t) = (1/L) \int \Delta L(t') dt'$$

【0029】

ここで、 c は真空中の光速であり、積分期間は走査サイクルのオーダーにある。図3(a)は矩形波変調の例を示しており、同図では1kHzの矩形波が二つのレーザーのうち一つのPZTに印加されている。図3(a)~(c)に示されている波形は、時間に依存しているキャビティー長のミスマッチ $L(t)$ およびその結果として生じる瞬時の時間遅れ $T_D(t)$ を、各種の動揺波形がスレーブレザー120のPZTに印加される際の時間の関数として示している。瞬時の反復率 f_2 は、 f_1 の周辺を動揺しており、相対的な時間遅れは時間に関して線形に前後に走査している。合計走査範囲は基本反復率 f_1 または走査周波数 f_s に依存しており、走査範囲は次の数5に従う。 30

【0030】

【数5】

$$T_{max} = (\Delta L / 2L) \cdot (1 / f_s)$$

またはオフセット周波数で表現して

$$T_{max} = (\Delta \nu / 2\nu) \cdot (1 / f_s)$$

40

【0031】

走査率は、（ミリ秒/ミリ秒）の単位で次の数6により与えられる。

【0032】

【数 6】

$$R_{scan} = 2 \Delta L v / c$$

または

$$R_{scan} = \Delta L / L$$

あるいは研究室で使うのに便利な単位で、

$$R_{scan} = 10^9 \Delta L / L \text{ (ps/ms)}$$

【0033】

「サンプリンググリッド」は、次の数 7 のラウンドトリップあたりの時間的なパルス進みから与えられる。

【0034】

【数 7】

$$\delta t_g = 2 \Delta L / c$$

【0035】

走査速度パラメータを、1 秒あたりの空間的なパルスの進みの総計として、次の数 8 に示すように定義することができる。

【0036】

【数 8】

$$v_{scan} = (2 \Delta L(t)) / T_R = (\Delta L(t)) / L \cdot c$$

【0037】

走査率、サンプリンググリッド、および走査速度の概念は、自由走査（フリー・スキャン）レーザーにもまた適用可能であることに注意されたい。

【0038】

一例を挙げると、公称キャビティ長が $L = 1.5 \text{ m}$ のレーザー対により、 $f_1 = 100 \text{ MHz}$ が得られる。もし $L = 15 \mu\text{m}$ の走査振幅を仮定すると、 $f_s = 1 \text{ kHz}$ のオフセット周波数、 $R_{scan} = 10^4 \text{ ps/ms}$ 、および $t_g = 100 \text{ fs}$ が結果として得られる。もしキャビティ長が動揺させられないと、フルパルス・ウォークオフが 1 ms で起こる。したがって、もし $15 \mu\text{m}$ の走査振幅が使用されると、トータル・ウォークオフを防ぐためには $f_s > 1 \text{ kHz}$ の走査周波数が必要である。

【0039】

表 1 ~ 3 には、 10 MHz 、 100 MHz 、および 1 GHz の反復率をもつモードロックレーザーについて、いくつかの可能な走査範囲、走査率、および各種走査速度パラメータの関数としてのサンプリンググリッド・インターバルが記載されている。表 3 から、 1 GHz のレーザーについて、実際的な走査条件の大半においてトータル・ウォークオフが生じていることが分かり、それゆえに時間遅れは 1 ナノ秒 を超えることができない。したがって、反復率が 1 GHz 未満のレーザーでは、本発明の動揺方法が自由走査レーザー方法として望ましい。

【0040】

10

20

30

40

【表 1】

10MHz レーザー (L=15m) に対する走査速度パラメーター

| 走査周波数 f_s (Hz) | ΔL_0 (μm) | オフセット周波数 $\Delta\nu$ (Hz) | 走査率 (ps/ms) | グリッド (fs) | 走査速度 (m/s) | 走査範囲 (ps) |
|---------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------|---------------|--------------|
| 10 | 0.15 | 1 | 10 | 1 | 3 | 50 |
| 10 | 1.50 | 10 | 100 | 10 | 30 | 500 |
| 10 | 15.00 | 100 | 1000 | 100 | 300 | 5000 |
| 100 | 0.15 | 1 | 10 | 1 | 3 | 5 |
| 100 | 1.50 | 10 | 100 | 10 | 30 | 50 |
| 100 | 15.00 | 100 | 1000 | 100 | 300 | 500 |
| 1000 | 0.15 | 1 | 10 | 1 | 3 | 0.5 |
| 1000 | 1.50 | 10 | 100 | 10 | 30 | 5 |
| 1000 | 15.00 | 100 | 1000 | 100 | 300 | 50 |

10

20

【0041】

【表 2】

100MHz レーザー (L=1.5m) に対する走査速度パラメーター

| 走査周波数 f_s (Hz) | ΔL_0 (μm) | オフセット周波数 $\Delta\nu$ (Hz) | 走査率 (ps/ms) | グリッド (fs) | 走査速度 (m/s) | 走査範囲 (ps) |
|---------------------|-----------------------------------|------------------------------|----------------|--------------|---------------|--------------|
| 0.1 | 0.15 | 10 | 100 | 1 | 30 | 500 |
| 0.1 | 1.50 | 100 | 1000 | 10 | 300 | 5000 |
| 1.0 | 0.15 | 10 | 100 | 1 | 30 | 50 |
| 1.0 | 1.50 | 100 | 1000 | 10 | 300 | 500 |
| 1.0 | 15.00 | 1000 | 10,000 | 100 | 3000 | 5000 |
| 10.0 | 0.15 | 10 | 100 | 1 | 30 | 5 |
| 10.0 | 1.50 | 100 | 1000 | 10 | 300 | 50 |
| 10.0 | 15.00 | 1000 | 10,000 | 100 | 3000 | 500 |
| 100.0 | 1.50 | 100 | 1000 | 10 | 300 | 5 |
| 100.0 | 15.00 | 1000 | 10,000 | 100 | 3000 | 50 |

30

40

【0042】

50

【表 3】

1 GHz レーザー (L=0.15 m) に対する走査速度パラメーター

| 走査周波数 f_s (Hz) | ΔL_0 (μ m) | オフセット 周波数 $\Delta \nu$ (Hz) | 走査率 (ps/ms) | グリッド (fs) | 走査速度 (m/s) | 走査範囲 (ps) |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------------|----------------|--------------|---------------|--------------|
| 0.1 | 0.15 | 1 | 1000 | 1 | 300 | * |
| 0.1 | 1.50 | 10 | 10,000 | 10 | 3000 | * |
| 1 | 0.15 | 1 | 1000 | 1 | 300 | 500 |
| 1 | 1.50 | 10 | 10,000 | 10 | 3000 | * |
| 1 | 15.00 | 100 | 100,000 | 100 | 30,000 | * |
| 10 | 0.15 | 1 | 1000 | 1 | 300 | * |
| 10 | 1.50 | 10 | 10,000 | 10 | 3000 | 500 |
| 10 | 15.00 | 100 | 100,000 | 100 | 30,000 | * |
| 100 | 0.15 | 1 | 1000 | 1 | 300 | 5 |
| 100 | 1.50 | 10 | 10,000 | 10 | 3000 | 50 |
| 100 | 15.00 | 100 | 100,000 | 100 | 30,000 | 500 |

注：表 3 中の*は、トータル・ウォークオフ（最大で1ナノ秒）を示す。

【0043】

対称形の矩形波が唯一の望ましい方法と言うわけではない。図 3 (b) および図 3 (c) は、矩形波変調に加えて別の二つの動揺方法（スキーム）を示している。単方向の走査を得るために、図 3 (b) に示すように方形波（非対称な矩形波）を使用することもできる。こうすれば、後方への走査の無用の無駄時間を低減することができるであろう。無指向性走査が市販のファブリ・ペロー干渉計で使用されているとは言え、図 3 (b) に示す方形波によるよりも、むしろ三角波で（無指向性走査を）実行している。

【0044】

矩形波および方形波の前縁および後縁での電圧の急変は、機械的なショックと P Z T の浮き上がりを起こしかねず、それゆえ異なる走査の線形時間スケールを歪ませることになる。これらの影響を低減するような信号条件の何らかのタイプ（例えば遷移のスムージング）が望ましい。あるいは、図 3 (c) に示すように、正弦波電圧を P Z T に印加しても良い。正弦波走査の利点は、矩形波や方形波にある鋭い電圧遷移に関連して起こるショックや浮き上がりを避けることができることである。また、誘起されたキャパティエー長のミスマッチに反応しようとする PLL によるタイミングの歪みをもさけることができる。すなわち、単純なアナログ安定化回路にとって、たとえ走査時間遅れに対してなにがしかの反応をこの安定器がしても、正弦波駆動電圧は正弦波的な走査特性をもたらす。これらの理由により、正弦波走査が実施上もっとも単純である。しかしながら、正弦波走査では、図 3 (b) に示すように単方向の走査を生じる方形波のもつ利点は得られない。それゆえ、単純さが求められる度合いに応じて、正弦波走査で P Z T を駆動するのが望ましくなる。

【0045】

10

20

30

40

50

表 1 ~ 3 中の走査速度パラメータは、P Z T の対称形の矩形波変調に基づいて得られている。正弦波走査では、走査範囲および走査率が若干変わることであろう。時間に依存する遅れは依然として前述の数 4 で求められるが、キャビティ長の変調は次の数 9 により与えられる。

【 0 0 4 6 】

【 数 9 】

$$\Delta L(t) = \Delta L_0 \cdot \cos(2\pi f_s t)$$

【 0 0 4 7 】

その際の遅れは、次の数 10 で与えられる。

【 0 0 4 8 】

【 数 10 】

$$T_D(t) = (\Delta L_0 / L) \cdot (1 / 2\pi f_s) \cdot \sin(2\pi f_s t)$$

【 0 0 4 9 】

以上のようにして正弦波走査（の特性）が求まる。ただし、P Z T の位置に対して時間遅れは 90 度になる。この場合、走査特性は線形ではなく、ある種のスケール補正が必要であることに注意されたい。

【 0 0 5 0 】

ここに記載されているレーザー走査技術は、対のモードロック・ファイバーレーザーを使用して実証されているが、この技術は前述の二つの実施例に限定されるものではなく、むしろソリッドステート、ダイオードレーザー、およびダイレーザーを含むモードロックレーザーの多くのタイプに適用可能である。

【 0 0 5 1 】

[走査ファイバーレーザーシステム]

図 4 に、二つのファイバーレーザーすなわちマスターレーザー 210 およびスレーブレーザー 220 を採用している本発明の好ましい実施例を示す。

【 0 0 5 2 】

両レーザー 210, 220 は、同じレーザーダイオード LD 250 によってポンピングされており、同レーザーダイオードのパワーはスプリッター SPL 206 により二つのレーザーへと分割されている。マスターレーザー 210 は、ファラデー回転子（旋光器）ミラー FRM 215 によって終端が形成されている。一方、スレーブレーザー 220 は、光学アセンブリ P Z T - FRM 225 によって終端が形成されている。これは FRM 215 とほぼ同じであるが、ミラーが P Z T 上に取り付けられている点が異なっている。二つのファイバーレーザー 210, 220 は、同一のモード同期光学系（すなわち波長板 $\lambda/4$, $\lambda/2$ 、ファラデー回転子 FR、および偏光ビームスプリッター PBS）を構成要素としている。レーザーモード同期は、過飽和吸収体 SA によって始動される。両レーザー 210, 220 の低雑音出力ポートからの出力パルスは、それぞれフォトダイオード PD-1, PD-2 によって検知される。両フォトダイオードは、駆動安定器 130 によって使用される。

【 0 0 5 3 】

両ファイバーレーザー 210, 220 は、 $\nu_0 = 4.629 \text{ MHz}$ の公称反復率を持っている。これらは、ファーマン等の文献（M.E.Ferman, L.M.Yang, M.L.Stock, and M.J.Andrejco, "Environmentally stable Kerr-type mode-locked erbium fiber laser producing 360-fs pulses." Opt.Lett., 10, pp.43-5, Jan.1994）に開示されている。同文献では、モード同期機構として非線形偏光エヴォリューション（NPE）が使用されている。両レーザー 210, 220 は、ファラデー回転子ミラーを除いて、同一の構成要素を持っている。すなわち、マスターレーザー 210 は、シングルパッケージのファラデー回転子ミラー FRM 215 で終端を形成されている。一方、スレーブレーザー 220 は、FRM と同一ではあるがミラーが P Z T 上に取り付けられている分離した構成要素である

10

20

30

40

50

アセンブリ-PZT-FRM 225によって終端が形成されている。ここで使用されているPZTは、全移動行程が40ミクロンのものである。両レーザー210, 220は、同じファイバースプール280と一緒に巻き付けられることにより、熱的および力学的にカップリングされている(同一状態に保たれている)。そのうえ、両レーザー210, 220は、同じポンプレーザーダイオードLD 205によってポンピングされているので、二つのレーザー内のポンプノイズは相関している。両レーザー210, 220間の相対的なタイミングは、PLL回路を含む安定器130によって設定され安定化されている。ひとたび安定器130が稼働し両レーザー210, 220が適正な遅れに設定されると、走査させるようにスレーブレザー220のPZTに動揺信号が印加される。動揺信号は、信号発生器135により印加され、PZTを駆動するための信号を生成するために、安定器130からの安定化信号出力に加えられる。あるいは、安定器130の出力が安定化信号および動揺信号の両方を含んでいるようにして、安定器130から動揺信号を発生させても良い。いずれのレーザー210, 220も、キャビティー内の偏光器に関連した二つの出力ポートをそれぞれ持っている。これら二つの出力ポートは、図4中に各PBSの二つの出力として図示されている。これら二つのレーザー出力は、互いに極めて異なった雑音特性を持っている。すなわち、一方はいくぶん雑音があり、他方はほとんど雑音がない。これは、この種のレーザーに起こることが知られている(NPEに起因する)光学限界効果のゆえである。安定化回路130への入力を生成するフォトダイオードPD-1, PD-2によって検出されるのは、この静かな出力ビームである。安定化回路130への入力として静かな出力ビームを使うことは、タイミングジッターを最小限に抑制する助けになる。

10

20

【0054】

正弦波時間走査は、このツインファイバーレーザーシステムを使用した本発明者らによって初めて達成された。図5は、図4に示した二つのファイバーレーザー210, 220の間の相互相関走査(クロスコリレーション・スキャン)の二サイクルを示している。この相互相関走査は、平均化なしの単発のデータ取得により収集されたデータである。より詳しくは、走査周波数106Hz、走査範囲200ピコ秒における本発明の動揺方法により走査させられている二つのファイバーレーザー210, 220間の相互相関信号を、図5は示している。ここで、図5はフルに二サイクル分の走査を図示しており、前進走査(フォワードスキャン)および後退走査(バックワードスキャン)を示している。併せて、PZT制御器に印加されている正弦波電圧と、矩形波として現れている信号発生器135のトリガー出力とが図示されている。図5のプロットは、二つのレーザー210, 220からのパルスを、非線形結晶すなわちベータバリウム・ボレート(BBO)結晶内の和周波混合(サム・フリーケンシー・ミキシング)を使用した変形相互相関器を通して得られたものである。

30

【0055】

走査の機械的な遅延(遅れ、ディレイ)は、公知の相関器(コリレーター)の一枝(ワンアーム)の中で使用される。しかしながら、本発明の相関器では、機械的な遅延は使用されていない。全ての走査は、前述のレーザー動揺法によって行われている。また図5には、PZT制御器に印加されている正弦波電圧と、信号発生器135からのトリガー出力とが図示されている。数9および数10から予期できるように、グラフ上にマークされたPZTの移動端は、印加された正弦波から90度だけ位相が外れていることに留意されたい。走査範囲は、走査周波数100Hzで約200ピコ秒である。これは、反復率100Hzでの3cmの物理的な遅延と等価である。しかし、このツインレーザーシステムでは、これと同じ走査範囲が、スレーブレザー220のPZTをほんの2~3ミクロンだけ動かすことにより達成されている。

40

【0056】

この相互相関法は、二つのレーザー210, 220間のタイミングジッターを計測するために使用された。タイミングの較正は、20ピコ秒だけ分離されたパルス列を作り出す厚さ2mmのガラスエタロンを相関器の一枝に挿置することにより、行われている。これ

50

らのパルス列は、図5中の走査上で明瞭に視認できる。図6は、同じ走査を引き伸ばした時間スケールで図示している。同図から、2mmのガラスエタロンを相関器の一枝に挿置することによって生成されたごく近傍に間隔を空けている二つのパルス(一つのレーザーはサテライトパルスを持っている)と、この一対のパルスの複製とが見取れる。この一対のパルスは、エタロンの光学的厚さに対応している20ピコ秒だけ、主たる(メイン)パルス対(ついで)から離れている。ここで、パルス幅は1ピコ秒のオーダーにあり、またサテライトパルスは2~3ピコ秒だけメインパルスから離れて存在している。したがって、RMSタイミングジッターは、 ± 20 ピコ秒までの状況によるタイミングの偏差を伴って、 $T_j = 5$ ピコ秒と測定された。タイミングジッターのデータは図7に示されており、同図では各データポイントが、走査率106Hzでの各レーザー210, 220の走査間の相対的な時間遅れを表している。この計測されたジッターは、安定器130の電子的PLL回路の精度の限界を例示していると共に、これだけのジッターにもかかわらず如何に精密にタイミングの情報が得られるかをも例示している。もし走査が十分に急速に行われるのであれば、走査時間内の相対的なタイミングジッターは、極めて小さくすることができる。そして、例えばレーザパルスをエタロンに通すことにより、もし安定なタイミングパルス列が得られるのであれば、走査時間の間のジッターさえも正確に知ることができる。このようにして、レーザーに数ピコ秒のジッターがありながらも、走査特性はサブピコ秒の精度で明らかになる。

10

【0057】

一緒にパッケージ(コ・パッケージング)された複数のレーザーの効用は、重大である。

20

【0058】

以前に本発明者により組み立てられたあまりうまくないデュアルレーザーシステムでは、同様の一対のレーザーが異なる基台(ブレッドボード)上に別々に組み上げられており、異なるレーザーによってポンピングされていた。安定器を使用しても、PZTの移動範囲の40ミクロンをキャビティー長のミスマッチが超える前に、そのスレーブレザーがマスターレーザーに追従していたのは、わずかに30分程度であった。この(ミスマッチが40ミクロンを超える)時点で、追従(トラッキング)は不可能となった。それゆえ、正常な室温の下にあっても、5MHzレーザーの一対の間でのキャビティー長のミスマッチのドリフトは、大半のPZTの可動範囲である40ミクロンを容易に超えてしまった。

30

【0059】

これとは対称的に、本発明の一緒にパッケージされたシステムは、無期限に追従することができるので、正常な室内状態の下でPZTによる40ミクロンの制限内にキャビティー長のミスマッチが見事に留まっていることを示している。周波数ドリフトの絶対値の計測と相対値の計測によれば、二つのレーザー210, 220の間の相対的な周波数ドリフトは、一つのレーザーの絶対的なドリフトの7分の1程度に小さいことが分かる。相対的なドリフトは、製作上で二つのレーザーを真に同一に作ることにより、さらに小さく改善することができる。これは、両レーザー210, 220の終端を同一のPZT-FRMアセンブリで形成することによるか、または両レーザー210, 220の終端を同一のFRMパッケージで形成し、スレーブレザー220のキャビティー長をファイバー・ストレッチャーで変更することにより、達成することができる。

40

【0060】

相対的タイミングドリフトおよび絶対的タイミングドリフトの両方をさらに低減するには、ファイバースプール280および他の構成要素を消音して、同じ容器内に二つのレーザーを構成すると良い。こうすると消音されるし、温度も制御される。つまるところ、前述の各方法の全てを用いて、相対的タイミングジッターは量子限界にまで達した(H.A. Haus and A. Mecozzi, "Noise of mode-locked lasers," IEEE J. Quantum Electron., QE-29, pp.983-996, March 0993)。量子限界によるタイミングジッターは、分散(ディスペーション)の増大に伴って増大するので、分散ゼロの波長の付近でモードロックレーザーを作動させることにより、ジッターはさらに低減されうるであろう。

50

【 0 0 6 1 】

モードロックレーザーのエンドミラーを動揺させることにより、ミラーのミスアラインメントとピント外れとのせいで、走査周波数における振幅の変動が誘起される。ミスアラインメントの作用は、角度の感度を減らすように P Z T ミラーに焦点を結ばせることにより、また、市販のファブリペロー干渉計でできるがアラインメントを保つように三点ミラー走査 P Z T を用いることによって、最小化される。ピント外れの影響は、P Z T ミラーのビームウエスト（ビーム・ウエスト・インシデント）の共焦点パラメーターに対し、走査振幅が許容できる程に小さいときに、発生しうる。ファイバーレーザーにおいて、このピント外れは、ファイバー内に戻ってくるビームの結合効率（カップリング・エフェシエンス）の減少を起し、今度はパワーの変動を起す。それゆえ、P Z T ミラーの焦点深度が浅いこと（タイト・フォーカシング）は、望ましくないことである。ビームのコリメーションの賢明な選定により、このピント外れの影響を低減することができる。例えば、もし 40 ミクロンの走査範囲を持つ P Z T を使用すると、共焦点パラメーターは少なくとも 2 ~ 3 mm は必要であろう。そこで、 Z_R が P Z T ミラーでのビーム・ウエストの共焦点パラメーターであるとして、 $(L/Z_R)^2$ の量がおおよそ 10^{-4} であるというのはかなり小さい。この量が小さければ、レーザーの振幅変調はこれに伴って小さい。

10

【 0 0 6 2 】

たとえもしミラーの軽度のミスアラインメントが走査中の振幅にいくらかの変動をもたらしたとしても、ファイバーの導波特性（ガイディング・プロパティ）の故に、ビーム指向性（ポインティング）の安定性はいささかも減退しない。しかしながら、ソリッドステート・モードロックレーザーを使用した場合には、もし出力ビームの偏差の発生を防止するように計測が行われないならば、いくらかの出力ビームの偏差が生じる可能性がある。

20

【 0 0 6 3 】

変形態様のレーザーシステムとして、同一の F R M で両レーザーの終端が形成されていても良く、またキャビティー長が P Z T ファイバー・ストレッチャーにより調整されるようになっていても良い。このようなピエゾセラミックチューブ・アクチュエータ（P i T 40 x 18 x 1）は、ドイツのピエゾメカニク株式会社により製造されている。

【 0 0 6 4 】

[タイミング較正]

P L L 回路安定器 130 が相対的時間遅れの平均値を安定化していても、この位置は数ピコ秒だけ変動することがあり、それゆえ、例えば 100 フェムト秒程度の所望の精度をもつタイミング信号で、データ取得ユニット 50 が適正にトリガーされることが補償されていることが必要である。このような信号は、B B O のような非線形結晶内での非線形光学ミキシングを採用している相互干渉器から得られる。このようなことは、前述の実施例で行われており、Kafka et al. のようなその他の人によっても行われている。走査時間遅れのためにミラーシェーカーを使用する場合にも、この種のトリガリングは、度量衡計測において高精度を得るためにも必須であることが示されている。

30

【 0 0 6 5 】

しかしながら、これは必要条件ではあっても十分条件ではない。ジッターの計測によれば、タイミングの変動は、走査と走査との間で発生するばかりではなく、単一の走査の間にも生じていることが明らかになっている。すなわち、走査率 R_{scan} は、走査と走査の間で変化するばかりではなく、走査サイクルの中でさえも変動する。それゆえ、走査の作動が信号平均化よりも「前に」起こることが必須である。したがって、相関器からの走査毎に「少なくとも」二つのタイミングパルスがあることが必要である。この二つのタイミングパルスのうち、一方はトリガリングのためであり、他方は時間スケール情報のためである。これを行うのに、本発明は、（振幅と時間との両方において）一様なパルス列でも非一様なパルス列でも、走査インターバルを満足することができる。このようにすれば、各走査サイクルの各々における走査インターバルに関して、タイミング情報を得ることができる。

40

50

【0066】

[タイミングスケールの発生]

時間スケールの較正で重要なキーポイントは、タイミング情報を発生させるのに使用するように、光学的方法を選択することである。好ましい実施例においては、図8(a)~(b)に示すように、多数のパルスの列を時間的に一様に生成するよう、フィネスの高いファブリペロー(FP)エタロンから単パルスを反射することにより、パルス列を生成することができる。なぜならば、このFPエタロンは「ガタガタ板」として使用されており、その中ではFPエタロン(すなわちフィネスの高いエタロン)内でパルスが何度も内部反射されるからである。ここではむしろ共振特性が使用されており、透過率はむしろ低い。

10

【0067】

一例として二つのミラーからなる $R = 98\%$ の反射率のFPエタロンを採用したとすると、その透過率は $T = 0.0004$ である。この例について今から説明する。透過したパルス列は、図8(a)に示すように、FPエタロンの通過時間により分離されている一連のパルスであり、ミラー損失およびミスアラインメントに依存している減衰率により弱まって立ち上がっている。すなわち、送信されたパルス列は、 T をエタロン表面の透過率として T^2 のファクターにより減衰する。送信されたパルス列には、パルス強度がラウンドトリップ毎にゆっくりと弱まるが、多かれ少なかれ一様性がある。パルス列中の第1の(かつ最大の)パルスは、FPエタロンに入射するパルスに比べて2500分の1に弱まっている。

20

【0068】

図9および図10は、表面の反射率が $R = 98\%$ でありミラーの間隔が約1mmの実際にエアギャップがあるFPエタロンを通して送信されたパルス列が、ゆっくりと減衰していく様子を示している。図10は、引き伸ばした時間軸上に、17パルスを持つ単一の後退走査(バックワード・スキャン)のプロットと、走査の終端に対応する点とを示している。これらのデータは、単に、ヴォイスコイル(スピーカー)上に取り付けられたリトロフレクターを採用している通常の走査関連器の一枝に、FPエタロンを挿置することにより得られたものである。スピーカーには正弦波電圧が印加されたので、時間遅れは、いくらか正弦波的な仕方で走査されている。パルス間の時間的な間隔により、図11(a)に示すように、シェーカーミラーの走査特性が得られる。総走査範囲(トータル・スキャンレンジ)は、これらのデータから次の数11に従って算出される。

30

【0069】

【数11】

$$T_{max} = \sim (17 \text{パルス}) \times (6.7 \text{ピコ秒/パルス})$$

【0070】

図11(a)に示すデータは、予期されたように、走査特性が正確に線形ではないことを示している。線形性からの偏差を示すために、このデータは直線でフィッティングされ、そしてこのデータはこのベストフィット(の直線)から減算された。その結果を図11(b)に示すように、時間走査特性は線形性からの偏差を有する。

40

【0071】

反射されたパルス列は、図8(b)に示すように、最初の表面反射でありパルスエネルギーの大半(すなわち98%)を含んでいるプロンプトパルスによって減少していること以外は、透過されたパルス列と同一である。この最初に反射されたパルスが強度の大半を占めているので、どのような試験的な応用や計測を行うにも便利である。このプロンプトパルスの強度は、プロンプトパルスの直後に続くパルス列の強度の2500倍であることに留意されたい。ほとんどの場合、この弱いパルス列は計測に影響することはない。しかしながら、それでも受け入れがたい場合もあり得るであろう。

【0072】

もちろん、フィネスの低いエタロンを使用することもできるが、そうすると透過される

50

パルス列の減衰がもっとずっと急速になり、この相関器のダイナミックレンジが限定要素になってしまう。例えば、表面の反射率が $R = 30\%$ のエタロンを使用すると、各パルスが直前のパルスよりも 10 分の 1 に弱くなって急激に減衰する一連のパルスが発生する。それゆえ、ほとんどのデータ取得装置においては一度の測定で三桁のダイナミックレンジであるので、リアルタイムの較正にはたったの三個程度のパルスしか使えない。これは、図 5 ~ 7 に示す相関の場合であった。例えば対数アンプを使用するなどのダイナミックレンジ圧縮スキームによって、この影響はある程度まで除去することができる。

【 0 0 7 3 】

さらに別の実施例では、FPエタロンの組み合わせを使用することができる。例えば、(カバーリップのような)薄いエタロンによれば、極めて近接したパルス (~ 1 ピコ秒) の対を発生させることができ、これをもっと間隔が広く (例えば 20 ピコ秒) よりフィネスの高いFPに送ることができるであろう。その結果、一連の 20 ピコ秒おきのパルス対が得られるであろう。これにより、タイミング特性に関するローカルで派生的な情報が得られる。

【 0 0 7 4 】

上記FPエタロンは、固形 (ソリッド) でも空間型 (エアスペースド) でも構わない。ソリッド・エタロンはもっとでこぼこでコンパクトであるが、エアスペースド・エタロンは調整可能でパルスの広がり避けることができる。ここで、パルスの広がり、エタロンを透過して多数回のラウンドトリップをしてきたパルスに起こる現象である。高精度を得るためには、エタロンの温度を制御することが必要である。例えば、融けたシリカの一片を透過して起こる群遅延 (グループ・ディレイ) の機能的な変化は、近似的に $1/1 \sim 10^{-6}$ である。それゆえ、もし 1 ミクロン (6 フェムト秒) の精度が全長 1 m (6 ナノ秒) の範囲で要求される場合には、エタロンの温度は 1 以内で一定にすべきである。エアスペースド・エタロンには、温度補償取付け技術を使用して構成できる点で利点がある。したがって、ソリッド・エタロンの温度感度は低減することができ、正常な室温での作動には温度制御は必要ないかもしれない。

【 0 0 7 5 】

その他にも実施可能なものとしては、図 12 (a) に示すように、光ファイバー 300 上に形成された光反射率の異なる一連のファイバー格子 310 を使用するものがある。これらの格子 310 は、一様にも非一様にもパルス・シーケンスを顕すように製作することができる。この場合には、間隔 (スペーシング) は一様であるが、同図に示す如く 5 パルス毎または 10 パルス毎に大きなパルスが生じる「規則的な (ルーラー) スケール」を形成するように、その振幅は非一様である。もちろん、ファイバー 300 内であれば所望の位置にどこにでもファイバー格子 310 を形成することができることは、たいへんに融通性に富んだことであり、格子 310 を非一様に配設することは、タイミングの曖昧さを取り除く上で有利であろう。

【 0 0 7 6 】

そのうえ、もしファイバー 300 の実長をパルスが通過するようにしたいのであれば、ファイバー 300 内での群速度分散 (GVD) によってパルスが広がってしまう。そこで、通過すべきファイバー 300 の GVD が適正に補償されるようなやり方で、チャープ格子 310 を形成しても良い。実際にも、ノーマルなチャープのない格子では反射帯域幅がほんの 2 nm 程度しかないので、サブピコ秒のパルスに対しては不安定になってしまい、高精度の時間分解能を得ようとすればチャープ格子が必要である。中央波長 800 nm の 100 フェムト秒パルスは、半値全幅 (FWHM) 帯域幅が 8 nm である。そして波長 1500 nm では、帯域幅は約 30 nm である。これらのパルスに対しては、チャープ格子だけが十分に広い帯域幅を持っている。

【 0 0 7 7 】

チャープ格子からのフェムト秒の反射パルスは、それらのパルス自身が広がっておりかつチャープされていることが知られている。この場合には、図 12 (b) に概要を示すように、チャープの方向が互いに逆の二つのチャープ格子 320 , 330 からのパルスを連

10

20

30

40

50

続的に反射することが必要である。ここでは、パルスは、まず最初にチャープ格子シーケンス C F G S 3 2 0 から反射され、続いて反対向きにチャープされたほとんど同一のチャープ格子 3 3 0 から反射されるという補償スキームを使用することにより、パルスの拡大（ブロードニング）が防止されている。この順番は逆にしても（すなわち C F G の次に C F G S の順で反射されても）、同様の結果が得られる。偏光ビームスプリッタ P B S 3 4 0 により、また 1 / 4 波長板 Q W P 3 5 0 によって、有効な分割（スプリッティング）および反射がもたらされる。

【 0 0 7 8 】

この技術は、ガルバナスカス等によるファイバー内でのチャープパルス増幅に応用されて成功を収めている（ A.Galvanauskas, M.E.Fermann, K.Sugden, and Bennion, "All-fiber femtosecond pulse amplification circuit using chirped Bragg gratings." Appl.Phys.Lett., 66, pp.1053-5, Feb.27, 1995 ）。しかしながら、本発明のこの見地での目的は、ガルバナスカス等のそれとは異なっている。彼らの研究では、チャープパルス増幅のために光パルスを非常に長い持続時間（ > 3 0 0 ピコ秒 ）に引き伸ばすためと、そしてそのパルスを再び圧縮するためとに、一对の格子が使われている。本発明では、チャープされていない格子は短パルスをサポートするのに帯域幅（ ~ 1 n m ）が不十分であるので、また、ファイバーの実長を横切るパルスに対してファイバーの G V D を補償する必要性がいくらか生じるであろうからという理由で、チャープ格子が使用されている。ここで、本発明のこの見地での目的は短パルスのシーケンスを発生させることであるから、パルスを引き伸ばそうという要求はない。

【 0 0 7 9 】

二つのファイバー格子は、透過にも反射にも使用可能なファイバー F P エタロンを形成するためにも使用できる。あるいは、受動的光ファイバーループを使用しても良い。反射を起こせる他の構造は、ファイバー内の光ファイバーとマイクロバンドとの接合が不十分である。これらの場合には、温度制御が必要であろうし、タイミングの較正のバリエーションは前もって知ることができ数学的に補償されるであろう。

【 0 0 8 0 】

パルス列は、物理的に可能であれば、所望のパルス列が得られるように注意深く選ばれた各ミラーの反射率および間隔により、部分的に反射する一連のミラーによってもまた、生成が可能である。単一のパルスから所望のパルス列を生じるために必要なミラーパラメータを計算するためのアルゴリズムがすでに開発されている（ V.Narayan et al., "Design of multimirror structure for hig-frequency bursts and codes of ultrashort pulses," IEEE J.Quantum Electron. QE-30, pp.1671-1680, July 1994 ）。単一のパルスからパルス列を生成するためにも使用できる部分レフレクターからなる光学デバイスは、その他にも数々ある。

【 0 0 8 1 】

任意にプログラムすることができるパルス列は、パルスシェーピング分散遅延線（ D D L ）にレーザパルスを通すことによって生成できる。これによれば、前述の方法よりもずっと大きな柔軟性が得られるが、しかし達成しうる最大のパルス間隔の点で限界がある。実際上の限界は、おおよそ 1 0 0 ~ 2 0 0 ピコ秒である。パルス間隔をこれよりいくらかでも大きくしようとすると、物理的に大きな装置が必要になり、法外に高価なものになってしまう。

【 0 0 8 2 】

波長が 1 5 5 0 n m 付近の低い反復率（ 3 0 M H z 以下 ）のレーザーに最も有用な別の実施例は、ゲイン・セクション（例えば E r ドープされたファイバー）のあるファイバーループからなる再生ソリトン保存リング内に、パルス列を注入するためのものである。このリング内に注入されたパルス列は、ここで説明した方法を含むいろいろな方法で得られるであろう（例えば、ファブリペロー・エタロン、ファイバー格子、パルスシェーパ、その他）。このループは再生的であるので、各レーザパルスについてダンピングすることと再注入することが必要である。これは、 5 M H z のレーザーでは 2 0 0 ナノ秒毎に起

10

20

30

40

50

こるであろう。ダンピングおよび注入は、A O (音響光学的) であっても E O (電気光学的) であっても、市販のある種の光スイッチで達成されうる。

【0083】

ただし、別の実施例は、閾値(スレッシュホールド)またはその付近にまでバイアスされたレーザーダイオードに、単一のレーザーからの複数の短パルスを入力するためのものである。レーザーダイオードの複数の小面は、30%の反射率を持ち、フィネスが低いF P エタロンを形成している。しかしながら、このレーザーダイオードの利得は、光パルスの「リングダウン」を阻止ないし防止するであろう。このようにして、数十のパルスからなるパルス列を得ることが可能になる。実際に、このダイオード中での群速度分散および利得の狭まり(ゲイン・ナローイング)は、その構造を通して多数回のラウンドトリップをするパルスを拡げてしまい、それゆえに実際に使用可能なパルスの数を制限してしまうことになる。このデバイスは、反射にも透過にも使用することができる。

10

【0084】

特別に細かい(サブミクロンの)較正は、その計測システムの一つのビーム内に複屈折結晶(例えば水晶)を挿入して、その結晶の常軸および異常軸に沿って伝搬するパルスの到着時刻を比較することによってなし得る。1mmの典型的な板厚では2~3波長分のリターデーションを生じ、そのリターデーションにより、100フェムト秒以下の持続時間のパルスが使用されるならば容易に認められる違いを生じるであろう。

【0085】

[相互相関器光学系]

前述の方法によって生成されたパルス信号列は、ある種の非線形要素を使用して、別のレーザパルスと相互相関を取ることができる。パルスの同時性や相対的なパルスタイミングを検出するためには、各種の非線形プロセスを使用することができる。使用可能なある種の非線形性としては、第2高調波発生(SHG)、和周波発生、利得飽和、吸収飽和、四波混合、および光電流があるが、これらに限定されるものではない。非線形要素のありそうな選択としては、SHG結晶がある。しかしながら、SHG結晶を使用すると、レーザパルス間にオーバーラップがあったときにしか信号が発生しないという短所がある。それゆえ、これは同時性の検出器としてしか使用できない。そういうわけで、前述のパルス列発生器、パルスシェーパ、エタロン、その他の各種を使用することが必要になる。ある状況においては、SHG結晶の使用によって得られる非常に高い精度は必要がない。ある場合には、非即時の応答を持つ故に「振幅」情報を介して時間遅れに関する情報が得られる要素を使用することが、より望ましいこともある。トラベリングウェーブ・レーザーダイオード増幅器(TWA)や飽和吸収器や光検出器などの適切なデバイスや材料、あるいはPINフォトダイオードやアバランシェ・フォトダイオードあるいはSEEDデバイスなどのように飽和作用で中継するデバイスなどは、数多くある。例えば、TWAなどは、光通信の中で光学時計のリカバリーに使用されてきている。これら(TWA)は、十分に飽和状態に駆動されると、振幅の変動に比較的鈍感になる。ここで、その精度と範囲とは、そのデバイスの回復時間(リカバリータイム)によって決まる。TWAデバイスは、 10^{-3} ラジアン程度までの位相精度で計測ができることが分かっている。このような光電子デバイスでは、光学的吸収の非線形性だけがタイミング情報をもたらす唯一の方法ではない。そのデバイスを通してパルスが伝搬していくにつれて変化するそのデバイスの光電流や電圧、電気容量などの電氣的な特性を観測することによってもまた、パルスタイミング情報が得られる。光学的特性の変化を検出するに当たり、これは大きな単純化である。

20

30

40

【0086】

これらのタイミング較正技術は、高速走査レーザー法と共に使用するようになっているとはいえ、ここに述べられたレーザー走査システムだけにとは限らず、自由走査レーザー、二重波長モードロックレーザー、および物理的な遅れを採用している通常の走査システムにさえも、応用できると期待している。その一例としては、図9~11に示されている較正データーがある。このデーターは、ヴォイスコイル(スピーカー)上に取り付けられ

50

たリトロレフレクターからなる走査システムから取得された。そのスピーカーに正弦波電圧が印加されているから、その時間遅れは、いくらか正弦波的な調子で走査された。図 11 (a) に示す走査特性は、走査中に取得されたどんなデータの時間スケールの修正にも使用することができる。そのアクチュエータがもっと大きな振幅で駆動されると、その走査特性は明らかに正弦波的に偏差を生じる。これもまた、修正可能である。回転しているガラスブロックや回転ミラーなどのような他のデバイスでもまた、ここで説明された本発明のタイミング法によって修正可能な非線形走査特性を持っている。

【0087】

[レーザー安定化]

いかなるキャビティー長の誤差もレーザーキャビティーのラウンドトリップ毎にコンスタントに蓄積されるので、非常に小さなキャビティー長の変動であっても大きなタイミング誤差を生じうる。それゆえ、サーボループを使って、「時間平均」反復率を γ に、または等価であるが「時間平均」キャビティー長 mismatch L をゼロに保持することが必要になる。平均キャビティー mismatch を制御するために使われるフィードバック信号は、図 13 に示すように、一对の光検出器 PD - 1, PD - 2 によって検知され、通常の位相同期ループ (PLL) 回路に導入される。以前に説明したように、このような PLL 安定化システムの精度は、すでに計測されており、20 ピコ秒までの最大タイミング移動で 5 ピコ秒以内の RMS に、二つのファイバーレーザーを同期させることができることが分かっている。ここに引用されている安定化の精度は現在の技術水準によるものであって、絶対的な達成可能限界を示すものではない。本質的には、1 ピコ秒未満まで精度を向上させることが可能なはずである。しかしながら、場合によっては 1 フェムト秒以下にまでなる所望の時間分解能に達するとまでは、期待されていない。この理由により、ここで説明したタイミング較正法は、依然として必要である。

【0088】

図 13 に、好ましい実施例として、安定器 130 を含むレーザー安定化動揺システムの詳細な模式図を示す。安定器 130 は、タイミング弁別装置 TD 131, 132、位相検出器 133、フィルター 134、直流電圧発生器 135、アンプ 136、周波数発生器 140 および加算器 137 を含んでいる。パルスアンプ (PA) 430, 440 は、それぞれ光検出器 PD - 1, PD - 2 からの電気パルス出力を受け取る。パルスアンプ 430, 440 は、これらの受け取った電気パルスを増幅して、タイミング弁別装置 TD 131, 132 にそれぞれ出力する。タイミング弁別装置 TD 131, 132 は、その信号が位相検出器 133 に入力される前にその信号を整える。PZT 制御装置 450 には、ここでは市販の PZT 制御装置を使用している。高電圧アンプは、1 ~ 10 V の範囲の入力信号を取り込み、これに比例した 0 ~ 150 V の範囲の出力を生成する。PZT 制御装置 450 は別ユニットとして図示されているが、安定器 130 内に統合してしまうこともでき、その方が望ましい。

【0089】

安定器 130 のこの好ましい実施例においては、PLL のための位相検出器 133 は、標準的な RF 位相検出器か、線形性が高い XOR ゲートのような混合器 (ミキサー) でよい。ラウンドトリップ時間のどんなサブインターバルの走査を行おうとする場合にも、線形性は非常に重要である。あるいは、時間振幅コンバーター (TAC) を位相検出器 133 として使用しても良い。これもまた線形性がとても高く、5 MHz などという低い反復率においては特に適当であろう。高度に精密な位相安定性の一つの限界は、単純な RF 混合器の中で起こり得る AM から FM への変換 (コンバージョン) である。すなわち、この混合器によって、レーザーの振幅の変動がタイミングの変動へと変換されてしまうのである。それゆえ、光ダイオード PD - 1, PD - 2 によって生成された電気パルスに対し、信号調整 (シグナル・コンディショニング) を行うことが望ましい。こうすれば図 13 に示すように、位相検出器 133 の前のタイミング弁別装置 131, 132 により、最も容易に行うことができる。しかしながら、レーザーの振幅雑音を低減することによってもまた、この影響は最小化され得る。ある条件下のモード同期作動の間に、レーザーのある出

10

20

30

40

50

力ポートに対して、光学的制限プロセスが起こることが知られている。これにより、安定器 130 が作動する場合に、タイミングジッターを大幅に低減することができる。

【0090】

安定化システムの帯域幅よりも走査周波数が大きいこともまた、重要である。このため、PLL は平均時間位置を適正に維持するが、適用されたミラー走査を妨害することはない。前述のツインファイバーレーザーは、たった 30 Hz の帯域幅の PLL 回路を使用して安定化されていた。このずいぶん低めの帯域幅には、走査率の範囲を 30 Hz から数 kHz に至るまでの範囲で設定できるという利点がある。30 Hz の安定器の帯域幅を使用しながら 10 ピコ秒未満の精度で同期を維持し続けるためには、一对のレーザーの固有の相対的タイミングジッターは極めて低くなければならない。これは、以前に説明した構成の方法を使用して達成される。その方法とは、可能な限り大きな範囲で同じ環境条件に二つのレーザーを置くことを確実にするものである。

10

【0091】

安定化のために必要なフィードバック信号を、単純な相関器で生成することもまた可能である。レーザーが走査している間に、相関器により計測されるピーク位置を、安定器 130 にフィードバックする誤差信号として使用することもできる。本発明においてはレーザーがコンスタントに走査しているので、Dykaar et al. の単純な静的相互相関器の技術はここではうまく行かないことに留意されたい。

【0092】

本発明の高速走査システムは、多くの点で通常の走査物理遅延や自由走査レーザーに勝っている。

20

【0093】

とりわけ、可動アーム（ムービング・アーム）を持つ通常の走査物理遅延とは異なり、走査に数ナノ秒の大きな遅れが生じた場合にも、本発明ではレーザービームにミスアライメントやピント外れが起こらない。物理的遅延では、アライメントは非常に注意深く行わなくてはならず、共焦点パラメータは 1 ナノ秒の遅延線に対しても 1 m より大きくなければならない。そのうえ、本発明によれば、音速を超えることもできる高速走査速度が可能である。しかし物理的遅延では、100 Hz で 1 ナノ秒（100 フィート毎秒）の走査さえおぼつかない。それなのに本発明によれば、大きな（調整可能な）走査範囲が実施でき、例えば 5 MHz のファイバーレーザーで約 50 ピコ秒から 200 ナノ秒に至るまでの範囲での走査が可能である。このような走査範囲を通常の走査システムで達成するには、200 フィートの遅延線が必要であろう。また、通常の自由走査システムと同様に、よりよい衝撃係数（デューティサイクル）のために高反復率のレーザーを採用する必要もない。

30

【0094】

さらに、大きな時間的ダイナミックレンジが可能であり、これは離れた目標の走査や OTDR をする上で有用である。例えば、1 フェムト秒未満の時間分解能を持ち総走査範囲が $T_R = 200$ ナノ秒であれば、 10^8 の時間ダイナミックレンジが得られる。また、通常の自由走査システムとは異なって、無駄時間が大幅に減っており向上した衝撃係数が達成されている。さらに今や本発明によれば、可動部品を一切必要とせず、極めて単純でコンパクトな相互相関器の設計が化のである。例えば、この相関器は、ゲームボーイ（商品名）のサイズにすることもできる。そのうえ本発明では、行程の長さがマッチしている必要がないので、実験のセットアップは極めて単純になる。

40

【0095】

前述の高速走査および較正の方法は、多種多様な計測や実験を行うために使用することができる。本発明の方法および装置を使用できる 2 ~ 3 の応用について、以下に説明する。しかしながら、当業者であれば、本発明は多くの応用に適用でき、以下に説明する応用に限定されるものではないことが、容易に理解できるであろう。

【0096】

図 14 は、本発明による、FP エタロンを使用しているタイミング較正方法と高速走査

50

レーザーシステムとを採用している一般的な計測システムの好ましい実施例を示す。レーザー510（レーザー510がマスターレーザーであるかスレーブレーザーであるかは不問）は、FPエタロンに入射している。FPエタロンを通過して発射されたパルス列は、タイミングユニット540に送られ、レーザー520からの単パルスと相互相関を取られて、較正された時間スケールを与える一連のデータ（データストリーム）が発生する。上記エタロンから反射されたパルス列は、レーザー520からの単パルスに沿って計測ユニット（図略）に送られる。この計測ユニットからの上記一連のデータは、データ取得システム（DAQ）550の「Yチャンネル」に入力され、一方、タイミングユニット540からの一連のデータは、DAQ 550の「Xチャンネル」に入力される。この情報には、次の異なる二つの用途がある。

10

【0097】

1. 飛行時間スケール修正：この技術では、タイミングパルスは時間スケールを形成する。例えば、もし正弦波走査が使われるなら、一様なパルスシーケンスであっても時間において非一様性を表す。高速プロセッサであれば、信号平均化以前の正確な時間スケールで（補間法を用いて）適正に走査データを調整するために、この時間スケール情報を使用できるであろう。

【0098】

言い換えれば、タイミングパルスにより形成された時間スケールに基づいた高速プロセッサによって、各走査点が修正されるのである。例えば、図11(a)は、図10に示してある走査の各ピークに対する走査特性を示しており、そして図11(b)は、これらの点の線形性からの偏差を示している。この時間スケール情報はこの偏差の修正に使用され、「飛行中」の各ピークを本質的に修正することができる。

20

【0099】

2. 走査の排除（賢明なトリガリング）：この技術は、トリガーパルスと相対的に上手に定義された所定の時間スロット内で起こるたくさんの（少なくとも二つの）タイミングパルスを探す「走査選択器（スキャンセクター）」を使用する。この選択器は、信号平均化器に入る走査データの合計をするか否か（ゴー/ノーゴー）の決定をする。相関器からのタイミングパルスがこの時間スロットにはまり込むと、現在のデータバッファに走査を合計する。逆にもしタイミングパルスがその時間スロットを「ミス」した場合には、その走査は排除される。信号の平均化が済んだ後、時間スケールのいかなる非線形性も適正に補償することができる。

30

【0100】

この賢明なトリガリング法は、実施するには最も単純なものであるが、多くの走査が無駄になってしまう。飛行中スケール修正はもっと洗練されており、走査の無駄から言えばもっと効率的ではあるが、もっと計算負荷が大きい。したがって、応用での制限がどちらの技術を使うかを定めることになる。

【0101】

[表面計測システム]

さらに明確な応用の一例として、図15および図16に示すように、通常の間ミラー法の代わりに本発明の高速レーザー走査技術を採用している表面計測システムの好ましい二つの実施例がある。

40

【0102】

図15は、表面計測システムの一実施例を示す。同実施例では、スレーブレーザー620からのビームは、タイミングユニット641に入力されるパルス列を発生するFPエタロンに入射する。マスターレーザー610からのビームは、普通のビームスプリッターBS 660によって分割される。スレーブレーザー620の分割されたビームの一方は、タイミングユニット641に入力される。同ビームの他方は検査される表面に向けられ、同表面で反射される。反射されたビームは相関器640に入力される。同様に、FPエタロンから反射された単パルスも相関器640に入力される。したがって、相関器640は計測されるべき目標物（供試体）のために使用され、タイミングユニット641は時間ス

50

ケール較正のために使用される。相関器 640 からの出力である目標物に対応しているデータストリームは、DAQ 650 の Y チャンネルへ入力される。そして、また相関器を含むタイミングユニット 641 から出力されたデータストリームは、DAQ 650 の X チャンネルへ入力される。X チャンネルに入力されたタイミングユニットデータは、時間スケールをもたらす。そして、相関器 640 から出力され Y チャンネルに入力されたデータからは、目標物表面の距離情報が得られる。

【0103】

図 16 は、本発明の複数の技術を採用している表面計測システムの別の実施例を示す。同実施例では、タイミングデバイス (FP エタロン) は、目標物へのビーム経路の中に挿置されている。FP エタロンから反射されたビームは、計測すべき目標物を照射する。目標物表面から散乱する光は、レンズ L1 によって集光され、FP エタロンを通過した較正済みのパルス列と (ビームスプリッタ BS 670 を介して) 再結合される。スレーブレーザー 620 からのゲーティングパルスと目標物およびエタロンからのパルス列との間の結果として得られる相互相関からは、このエタロンからの複数パルス・タイミングスケールに重畳された目標物までの距離情報 (単一パルス) が得られる。この結果は単一データストリームであって、これには目標物までの距離情報と時間スケール較正との両方が含まれている。さすれば、目標物表面上の一点までの距離は、データストリーム中のタイミングパルスと目標物パルスとの間の相対的な時間遅れを計測することによって推定される。目標物パルスとエタロンパルスとの間のこの比較は、超短パルスを用いた差分計測法の一変形である。

【0104】

図 15 および図 16 では、FP エタロンは入力ビームに対して鋭角で対向しているように図示されている。この入射角は、明瞭にするために誇張されている。FP エタロンを垂直入射から傾けていくと、図 8 (a) に示すように、このエタロンからの一連の反射光が横にずれる量が増えていくことが、当業者にはお分かりになる。したがって、入射角を実現可能な限り小さくして FP エタロンを使うことが望ましい。もし FP エタロンの前に偏光子およびファラデー回転子があれば、垂直入射角での使用も可能である。この空間的なずれは、相関器 640, 740 のレンズや他の開口からはみ出さない限りは、同相関器の性能を損なうことはない。

【0105】

あるいは、この横ずれの影響は、急激な劣化とは異なった何かであるパルス列の包絡線の形を変えて、なにがしかの利点を生じることあり得る。このようなことは、ビームの光景を介してか、または相関器内の非線形混合結晶の位相マッチング条件の角度の選択可能性により、起こりうるであろう。

【0106】

[OTDR システム]

図 17 は、本発明の高速走査レーザーおよびタイミングシステムを採用している光学時間領域反射率計 (OTDR) システムの模式図である。走査レーザーシステムは、使用可能な明瞭な範囲が広がるように、低い反復率のレーザー (~ 5 - 10 MHz) からなることが望ましい。マスターレーザー 710 からの短パルスは、ビームスプリッタ BS 760 により二つのビームに分割される。分割されたビームのうち一方はタイミングユニット 741 に送られ、他方はファイバーなどの導波供試デバイス (DUT) 790 に送られる。DUT 790 内の表面や接続部、欠陥などから反射されたパルスは、約 10 フェムト秒すなわち約 3 ミクロンの精度での精密なタイミングないし距離の計測のために、相関器 740 に送られる。これは、次のような方法で実現される。

【0107】

すなわち、スレーブレーザー 720 からの単一パルスは、二つのビームに分割される。それらのビームのうち一方は、ファイバーからの信号のためのゲーティングパルスとして使用されるために、相関器 740 に送られる。その他方は、データ取得 (DAQ) ユニット 750 のために較正された時間スケールをもたらすために、次にはそれ自身が別の相

関器であるタイミングユニット741によって使用されるパルスシーケンスを生成するパルスシェーパ780に送られる。5MHz ($T_R = 200\text{ ns}$)程度の低い反復率のシステムのためには、パルスシェーパ780は、200ナノ秒のタイミングインターバル全体をだいたい満たすパルスシーケンスを生成しなければならない。この好ましい実施例では、パルスシェーパは、図12(b)に示すようなチャープ・ファイバブラッグ格子を利用して構成できるであろう。

【0108】

このレーザーの変形態様としては、タイミングユニットおよび相関器が使用可能である。例えば、マスターレーザー710の役とスレーブレザー720の役とは、交換可能である。パルスシェーパとしては、ファイバFPエタロンまたは(受動でも利得ありでも)ファイバリングが使用可能である。

10

【0109】

[EOサンプリング・オシロスコープ]

図18は、本発明の高速走査レーザーおよびタイミングシステムを使用した、ジッターなしの電気光学サンプリング・オシロスコープの模式図である。本実施例では、十分に確立されている非接触EOサンプリング技術が、ここで説明された高速走査技術と組み合わせられており、時間スケールの調整にかなり大きな柔軟性がもたらされている。

【0110】

マスターレーザー810からのパルスは、二つのビームに分割される。一方のビームはタイミングユニット841に送られ、他方のパルスは供試デバイス(DUT)上に電気パルスを発生させるために送られる。この場合、供試デバイスは、光導電(PC)スイッチ891を介して、集積回路(IC)上に取り付けられている。スレーブレザー820からのパルスもまた、二つのビームに分割される。一方のビームは、電気光学(EO)プローブチップ892に送られ、他方のビームは、パルス列を生成するパルスシェーパ880に送られる。このパルス列は、時間スケールの較正のために、次にはタイミングユニット841に送られる。EOプローブチップ892から返ってきたパルスは、DUTからの電圧とEOプローブチップ892との間の干渉によって変調されている。これらのパルスは、偏光光学素子893によって検出され、DAQ850のYチャンネルに送られる。したがって、精密タイミング較正が、図17のODTRのために説明したのと同じようにして得られる。

20

30

【0111】

時間遅れ、走査インターバル、および走査周波数は、安定器830によって所望の値に設定することができる。例えば、もし(走査範囲ではなく)走査周波数を二倍に増加させたければ、スレーブレザー820内の変調周波数を倍にして、対応する量だけPZTの走査電圧を増大させる必要がある。それに比べ、走査周波数を変化させないで走査範囲を増大させるには、単純にPZTの走査電圧を増せばよい。時間掃引範囲(タイム・スウィープレンジ)の相対遅れは、安定器830の位相制御によって調整される。時間スケールの調整のこの柔軟性は、通常オシロスコープの遅れ時間ベースによって与えられるものと同様である。

【0112】

この目的のために、光導電性サンプリングを使用することもまた、同様に可能であろう。こうすればずっと高い感度を得られるが、時間分解能は約2ピコ秒までに限られる。

40

【0113】

短レーザーパルスおよび走査遅れの最も広く使用される応用は、ずっと物理、化学、または電子システムのポンプ・プローブ計測であった。しかしながら、この技術のための応用範囲は急速に広がってきており、この技術が科学市場を越えて商品になることは今も起こりそうなことである。ここに説明された高速走査および時間較正の技術は、超短レーザーパルスを利用するほとんど全ての応用に使用可能である。なぜならば、これらの応用の事実上全てが、レーザーパルス間の時間遅れの調整を何らかの形式で必要としているからである。これらの応用は、半導体材料および半導体デバイスの分野での超高速電子/光電

50

子デバイスのチャージ・ダイナミクス特性の電気光学試験や、全光信号処理光導電サンプリング、および各種各様の時間分解ナノメーター・プロービングなどに適用でき、またこれらに限定されずに広く応用可能である。

【0114】

したがって、テラヘルツ・イメージングを含むこれらの走査方法が応用できるテラヘルツ・ビームのための新しい応用は、数多く開発中である。その一例としては、フー等の文献 (B.B.Hu et al., "Imaging with Terahertz Waves", Optic Letters, Vol.20, No.16, August 15, 1995, pp.1716-1719) により開示されているものがある。最近では、超高速光検出器が市販されるようになり、そのスピード (50 GHz , 10 ps FWHM) は、市販のオシロスコープ (例えばPicometrix製の Newport Corp. Model #PX-D7) の計測能力を遥かに凌駕するものである。ピコ秒レーザーおよび走査遅れは、これらの検出器のスピードの利点を最大限に引き出すために必要である。そのうえさらに、本発明の走査方法は、その走査範囲の選定の非常なる優越性のゆえに、サブミリメートルの分解能のレーザーレーダーおよび目標物のリモート・プロファイニングに特に適当である。その走査範囲調整の柔軟性により、高速走査システムをオシロスコープの可調整時間ベースと相似にすることができる。

10

【0115】

ここで説明された高速走査方法によって達成できる非常に高い走査率によれば、新しい潜在的な応用をたくさん実施可能にすることができる。走査速度パラメーター (表1~3参照) は、特別に利用価値がある長所の象徴である。表1~3の走査速度は、3 m / s から30,000 m / s にまで範囲が及んでいることに留意されたい。それゆえ、自由走査技術でも高速走査技術でも超音速の走査速度が可能であるから、例えばレーザーに誘起される固体中および液体中の音響効果および光弾性効果などの研究や応用で、本発明は潜在的に利用価値がある。このような応用では、通常の走査方法を使用するのは実際的ではない。というのは、通常の走査方法では物理的遅延システムの中で走査ミラーを音速で動かすことが必要であり、非現実的だからである。

20

【0116】

本発明は、好ましい実施例を参照して説明されてきたが、これらの実施例に応用が限定されることはない。以上の開示と教唆から、本発明に対するその他の変形態様やヴァリエーションがあることは、当業者にとっては明白である。したがって、ここで取り上げて説明してきた本発明の実施例はほんのいくつかなのであるが、本発明の思想および見解から離れることなく、なおその上に数々の変形が可能であることは明白である。

30

【図面の簡単な説明】

【0117】

【図1】公知の自由走査レーザーシステムの構成を示す模式図。

【図2】本発明の高速走査レーザーシステムの構成を示す組図。

(a) スレーブレザーのキャビティー長制御の場合の模式図。

(b) 両レーザーのキャビティー長が制御される場合の模式図。

【図3】時間遅れ $T_0(t)$ と、レーザーキャビティー内の P Z T に印加される電圧とを示す組図。

40

(a) 印加電圧が矩形波の場合のグラフ。

(b)

(b) 印加電圧が方形波の場合のグラフ。

(c) 印

加電圧が正弦波の場合のグラフ。

【図4】本発明のツインファイバーレーザーシステムの構成を示す模式図 (同システムでは、両レーザーのファイバーは同じ軸に巻かれており、モード同期機構として非線形偏光展開 (エヴォリューション) を使用する二つの同一のモードロック・ファイバーレーザーを使用。) 。

【図5】本発明の動揺法により走査された二つのファイバーレーザーの間の相互相関信号を示すグラフ。

【図6】本発明の動揺法により走査された二つのファイバーレーザーの間の相互相関信号

50

を示す拡大グラフ。

【図 7】本発明の動揺法により走査された二つのファイバーレーザーの間のタイミングジッターを示すグラフ。

【図 8】ファブリペロー・エタロンの作用を示す組図。

(a) ファブリペロー・エタロンの作用を示す模式図。

(b) 発射パルス列と反射パルス列との時間配列を示す概念図。

【図 9】単レーザーパルスとエタロンを通ったパルス列との間の相互相関信号を示す全走査サイクル二つ分のグラフ。

【図 10】単レーザーパルスとエタロンを通ったパルス列との間の相互相関信号を示す半走査サイクル分の拡大グラフ。

【図 11】ファブリペロー・エタロンのピーク位置を示す組図。

(a) ピーク位置の線形フィッティングを示すグラフ。

(b) 線形フィッティングの偏差を示すグラフ。

【図 12】光屈折性成長チャープファイバー格子の並びからなるパルス列ジェネレーターの構成を示す組図。

(a) パルス列ジェネレーター単体の構成および作用を示す模式図。

(b) 二つのパルス列ジェネレーターの組み合わせを示す模式図。

【図 13】レーザー安定化動揺システムの構成を詳細に示す模式図。

【図 14】本発明の高速走査レーザーおよびタイミング較正法を採用している計測システムの模式図。

【図 15】本発明の高速走査レーザーを採用している計測システムの模式図。

【図 16】本発明の高速走査レーザーを採用している計測システムの模式図。

【図 17】本発明の高速走査レーザーおよびタイミング較正法を採用しているフェムト秒 OTDR システムの構成を示す模式図。

【図 18】本発明の高速走査レーザーシステムおよびタイミング較正法を採用している電気光学サンプリング・オシロスコープの構成を示す模式図。

【符号の説明】

【 0 1 1 8 】

1 0 , 1 1 0 , 2 1 0 , 5 1 0 , 6 1 0 , 7 1 0 , 8 1 0 : マスターレーザー

2 0 , 1 2 0 , 2 2 0 , 5 2 0 , 6 2 0 , 7 2 0 , 8 2 0 : スレーブレーザー

3 0 : ハーフミラー 4 0 , 6 4 0 , 7 4 0 : 相関器 (コリレーター)

5 0 : オシロスコープ 6 0 : ミラー 7 0 : 計測装置

1 1 1 , 1 2 1 : ピエゾ素子、ピエゾアクチュエータ (P Z T)

1 3 0 , 6 3 0 , 8 3 0 : 安定器ユニット、駆動安定器、PLL 回路安定器

1 3 1 : タイミング弁別装置 (T D) 1 3 3 : 位相検出器

1 3 4 : フィルター、濾波器 1 3 5 : 信号発生器

1 3 6 : オペアンプ 1 3 8 : 加算器 () 1 4 0 : 低周波信号発生器

2 0 5 : レーザーダイオード (L D) 2 0 6 : スプリッター (S P L)

2 1 5 : ファラデー回転子 (旋光器) ミラー (F R M)

2 2 5 : 光学アセンブリ (P Z T - F R M) 2 8 0 : ファイバースプール

3 0 0 : ファイバー 3 1 0 , 3 2 0 , 3 3 0 : チャープ・ファイバー格子

3 4 0 : 偏光ビームスプリッタ (P B S)

3 5 0 : 四分の一波長板 (Q W P)

4 3 0 , 4 4 0 : パルスアンプ (P A) 4 5 0 : P Z T 制御装置

5 4 0 : タイミングユニット、相互相関器

5 5 0 , 6 5 0 , 7 5 0 , 8 5 0 : データ取得システム (D A Q)

6 4 1 , 7 4 1 , 8 4 1 : タイミングユニット

6 6 0 , 6 7 0 , 7 6 0 , 7 7 0 : ビームスプリッター (B S)

7 8 0 , 8 8 0 : パルスシェーパ 7 9 0 : 供試デバイス (D U T)

8 9 1 : 光導電 (P C) スイッチ 8 9 2 : 電気光学 (E O) プローブチップ

10 20 30 40 50

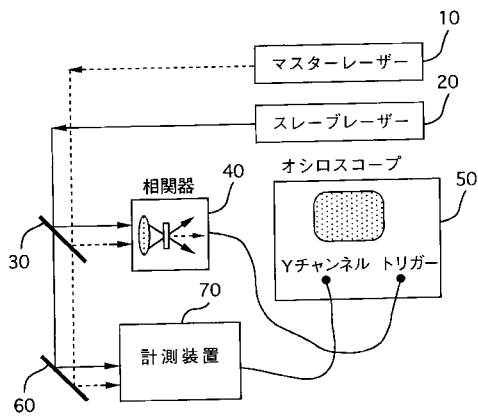
893 : 偏光光学素子

L1 : 集光レンズ FP : FPエタロン FR : ファラデー旋光器

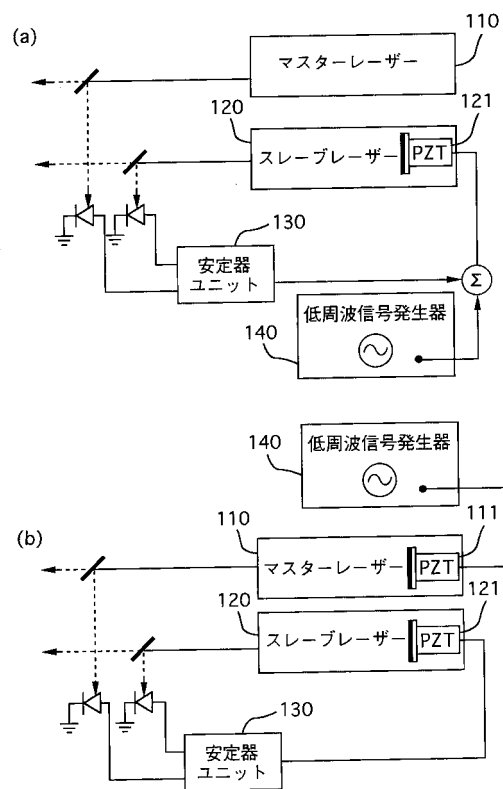
PD-1, PD-2 : フォトダイオード、光検出器 SA : 過飽和吸収体

/2 : 半波長板 /4 : 四分の一波長板 (QWP)

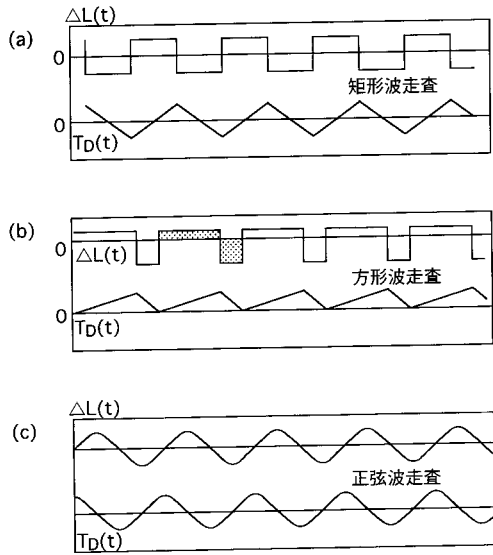
【図1】



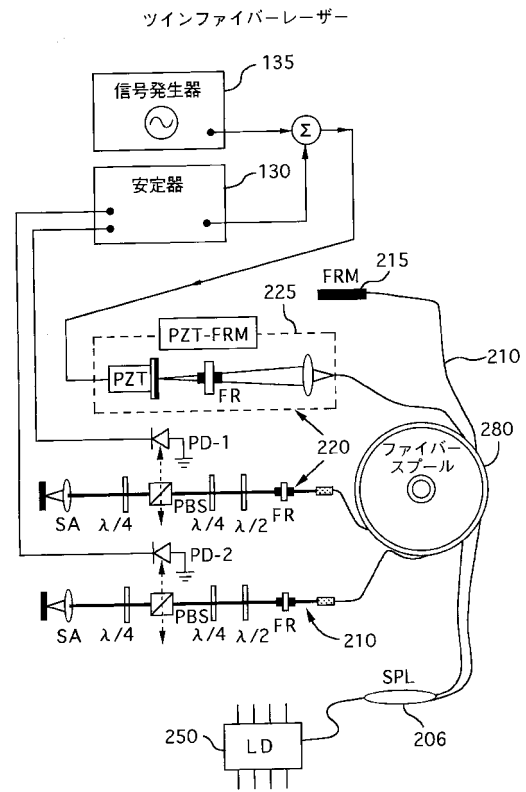
【図2】



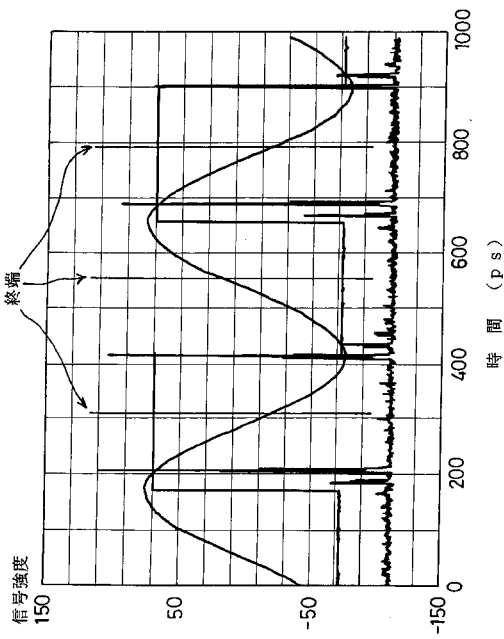
【 図 3 】



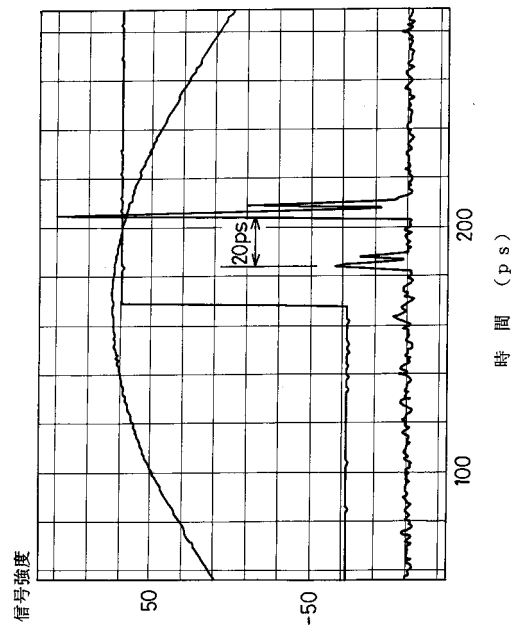
【 図 4 】



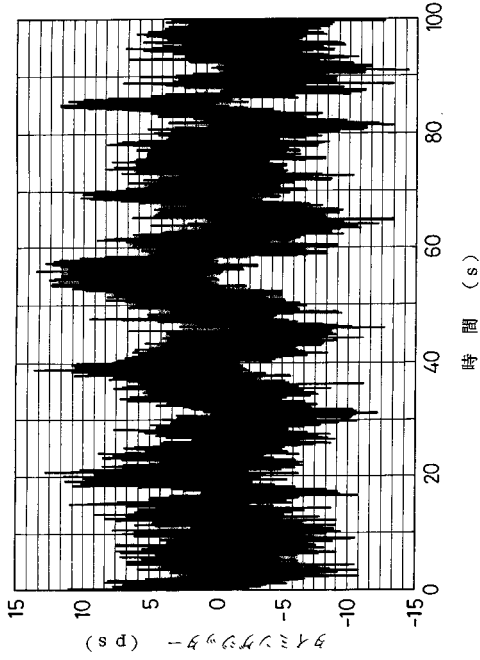
【 図 5 】



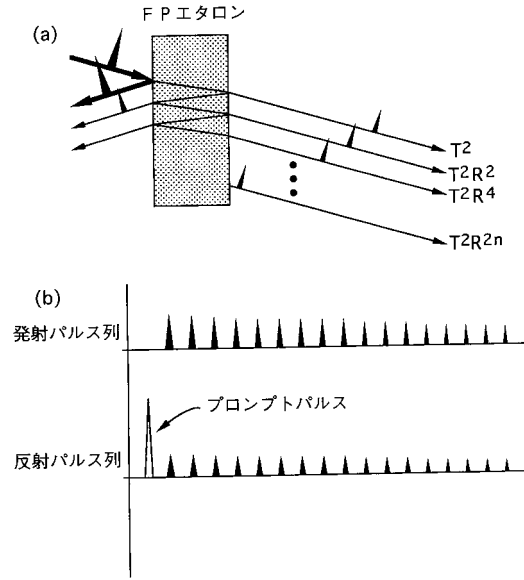
【 図 6 】



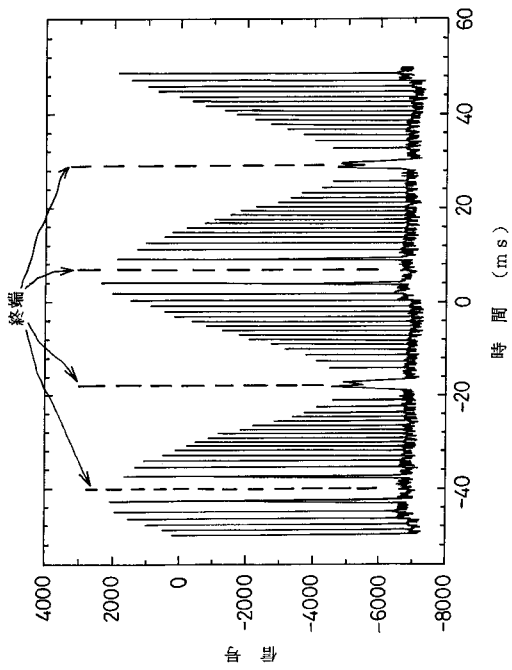
【 図 7 】



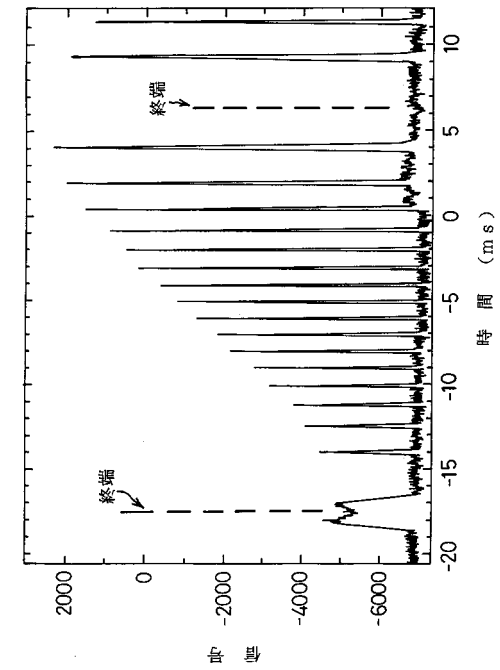
【 図 8 】



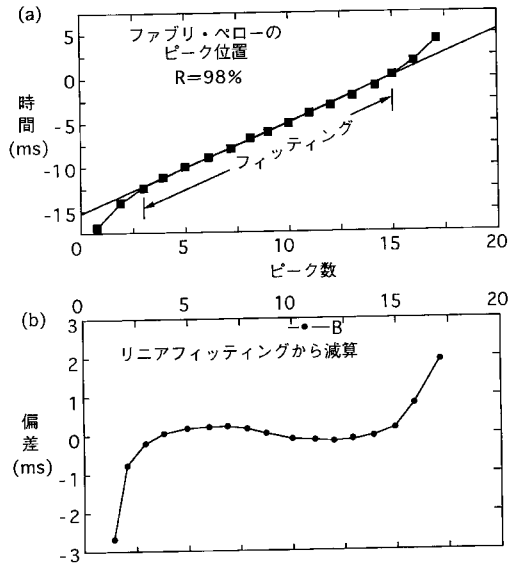
【 図 9 】



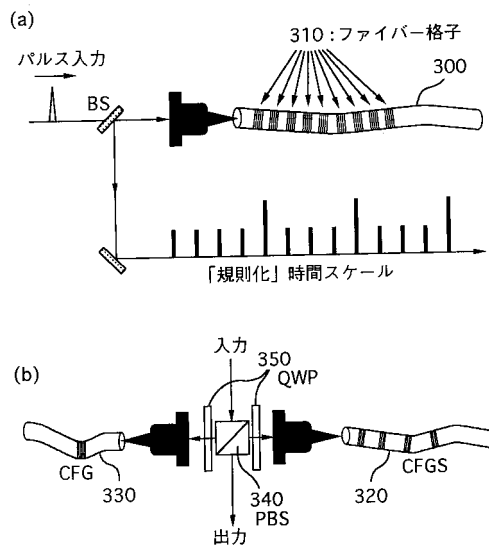
【 図 10 】



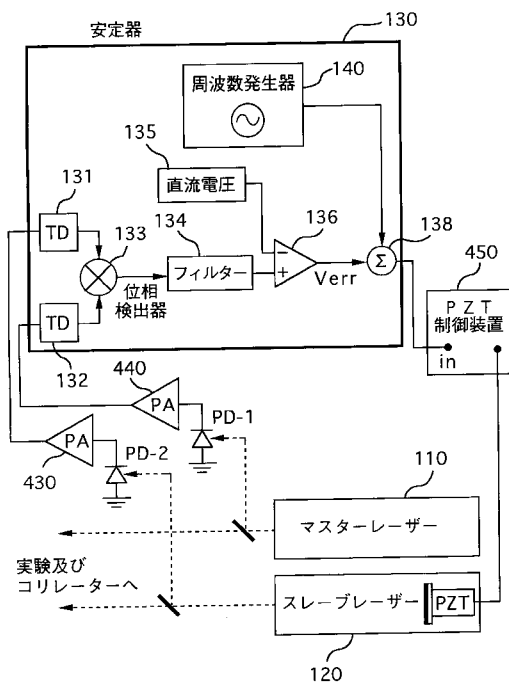
【図 1 1】



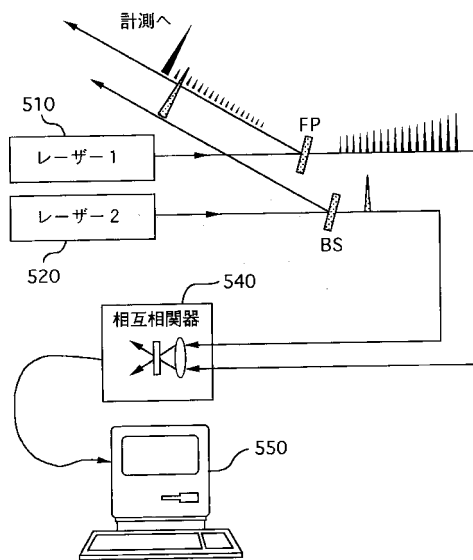
【図 1 2】



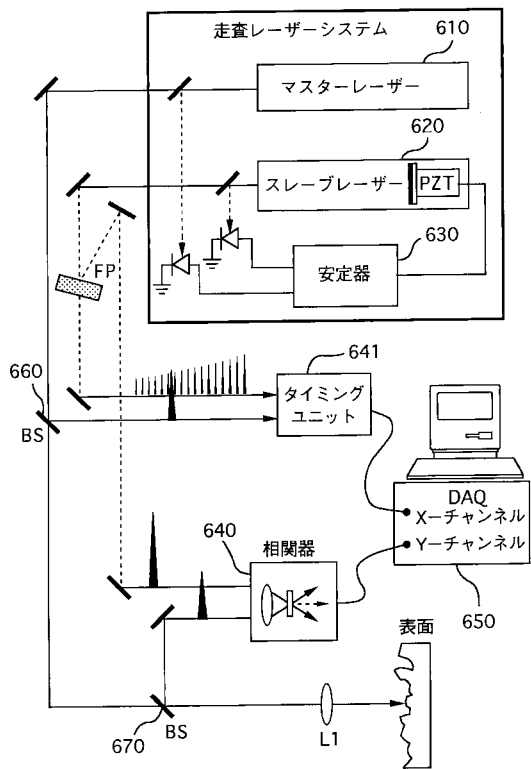
【図 1 3】



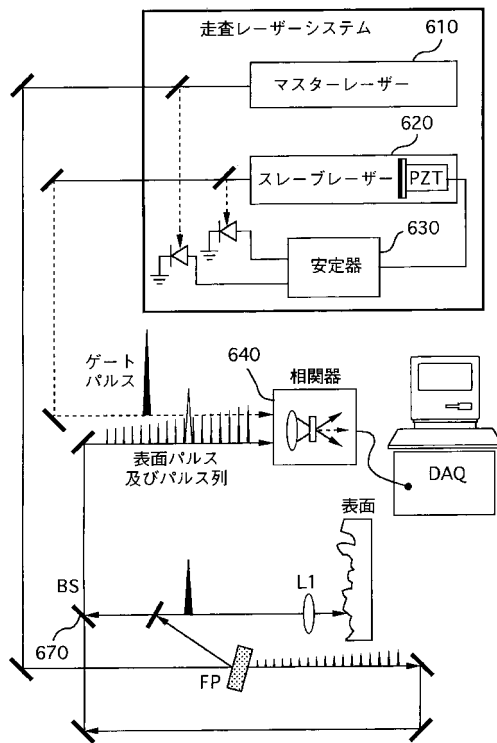
【図 1 4】



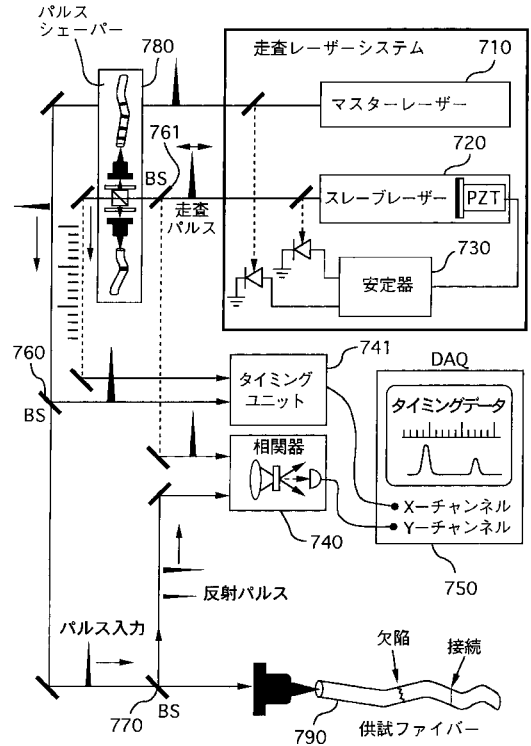
【図15】



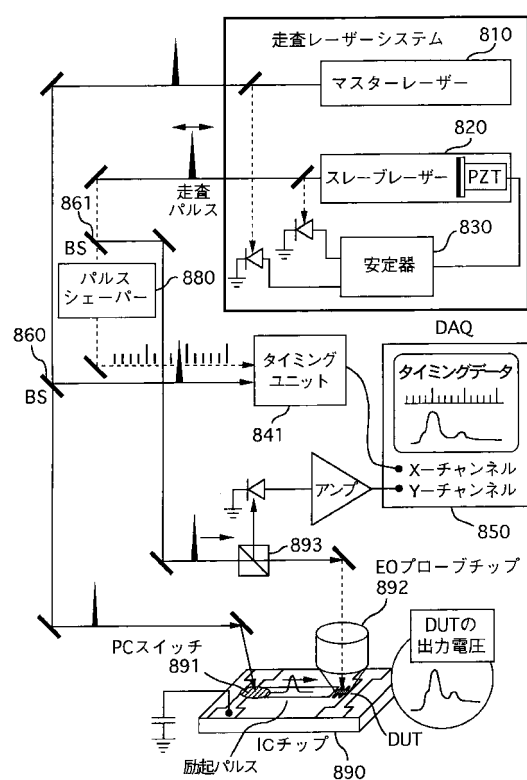
【図16】



【図17】



【図18】



フロントページの続き

(72)発明者 ドナルド ジェー ハーター

アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバー サルグレイブ・プレイス 3 5 3 5 番地

Fターム(参考) 5F172 AE12 AM08 DD04 NN14 NN16 NN27 NQ17 NQ43 NS18 NS22

WW15 ZA04

(54)【発明の名称】短パルスファイバーレーザー安定化法、短パルスファイバーレーザーのタイミングジッター減少法、ファイバーレーザー安定化法、ファイバーレーザーシステム、短パルスレーザー、短パルスファイバーレーザー出力制御法、及びレーザー装置