

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6585092号
(P6585092)

(45) 発行日 令和1年10月2日 (2019. 10. 2)

(24) 登録日 令和1年9月13日 (2019. 9. 13)

(51) Int. Cl.	F I
GO 1 J 9/02 (2006. 01)	GO 1 J 9/02
HO 1 S 3/00 (2006. 01)	HO 1 S 3/00 G

請求項の数 10 (全 38 頁)

(21) 出願番号	特願2016-573461 (P2016-573461)	(73) 特許権者	311015001
(86) (22) 出願日	平成27年6月15日 (2015. 6. 15)		コミサリヤ・ア・レネルジ・アトムク・エ
(65) 公表番号	特表2017-519987 (P2017-519987A)		・オ・エネルジ・アルテルナティブ
(43) 公表日	平成29年7月20日 (2017. 7. 20)		フランス国、エフー75015・パリ、リ
(86) 国際出願番号	PCT/EP2015/063367		ユ・ルブラン・25、パティマン “ル・ポ
(87) 国際公開番号	W02015/193253		ナン・デ”
(87) 国際公開日	平成27年12月23日 (2015. 12. 23)	(74) 代理人	110001173
審査請求日	平成30年4月13日 (2018. 4. 13)		特許業務法人川口国際特許事務所
(31) 優先権主張番号	1455472	(72) 発明者	ケレ、ファビアン
(32) 優先日	平成26年6月16日 (2014. 6. 16)		フランス国、78140・ベリジューピラ
(33) 優先権主張国・地域又は機関	フランス (FR)		クブレ、リュ・ピエール・エ・マリー・
			キュリー・21

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光ビームの特性評価のためのデバイスおよび方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光ビーム (F L) の特性評価のための方法 (10) であって、

— 光ビーム (F L) を分離器光学部品 (O s、S R) によって第1のサブビーム (F 1) と第2のサブビーム (F 2) とに分離するステップであり、第1のサブビーム (F 1) が第1の光路 (C 1) を取り、第2のサブビーム (F 2) が第2の光路 (C 2) を取る、分離するステップと、

— 第1の光学部品 (O 1) を介して第1のサブビーム (F 1) を、および第2の光学部品 (O 2) を介して第2のサブビーム (F 2) を伝搬させるステップであり、第1のサブビーム (F 1) が第1の光学部品 (O 1) の表面全体にわたって不均質電磁場を有し、前記第1および第2の光学部品 (O 1、O 2) は、制御手段 (P z) のおかげで、それぞれ、「参照ビーム (F r e f)」と呼ばれる第1の光学部品を出た後の第1のサブビームおよび「被特性評価ビーム (F c a r)」と呼ばれる第2の光学部品を出た後の第2のサブビームがステップ P 1 で時間間隔 T 1 を掃引する時間遅延 τ だけ分離されるように、第1および第2の光路 (C 1、C 2) に配列される、伝搬させるステップと、

— ビームが、空間的に干渉し、2次元干渉パターン (M 1) を形成するように、再結合器光学部品 (O r、S R) によって参照ビーム (F r e f) と被特性評価ビーム (F c a r) とを再結合させるステップと、

— 時間インターフェログラム (S 1) を得るために、参照ビーム (F r e f) と被特性評価ビーム (F c a r) との間の、ステップ P 1 で時間間隔 T 1 を掃引する時間遅延 τ

10

20

に応じて、前記 2 次元干渉パターン (M1) を測定システム (SM1) によって測定するステップと、

— 計算機 (K) によって、時間インターフェログラム (S1) の少なくとも 1 つの空間点の周波数ドメインのフーリエ変換 (TFF) を計算するステップであり、周波数ドメインの前記フーリエ変換 (TFF) が、周波数中心ピーク (f_c) と第 1 および第 2 の周波数サイドピーク (f_{l1} 、 f_{l2}) とを有する、計算するステップと、

— 計算機 (K) によって、周波数ドメインの前記フーリエ変換 (TFF) の前記第 1 および第 2 の周波数サイドピークのうちの 1 つに対して、「相対スペクトル振幅」と呼ばれるスペクトル振幅 $A_R(\omega)$ と「相対空間スペクトル位相」と呼ばれる空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ とを計算するステップとを含む、方法 (10)。

10

【請求項 2】

— 第 1 のサブビーム (F1) が反射される、第 1 の光学部品 (O1) の第 2 の面 (z2) の一部が、第 1 の測定面 (z1) における被特性評価ビーム (Fcar) よりも小さいという事実に基づき、第 1 のサブビーム (F1) の電磁場が第 1 の光学部品 (O1) の第 2 の面 (z2) の前記一部において均質であると仮定する間に、第 1 の測定面 (z1) の参照ビーム (Fref) の電磁場が計算されるステップ i) と、

— 第 1 の光学部品 (O1) に反射された後の、第 1 の光学部品 (O1) の第 2 の面 (z2) の前記一部における第 1 のサブビーム (F1) の電磁場の再構築が、前もって計算された第 1 の測定面 (z1) における参照ビーム (Fref) の電磁場と時間インターフェログラム (S1) とから計算されるステップ ii) と、

20

— 第 1 の測定面 (z1) の参照ビーム (Fref) の電磁場が、前もって計算された第 1 の光学部品 (O1) の第 2 の面 (z2) の前記一部における第 1 のサブビーム (F1) の電磁場の再構築を使用して計算されるステップ iii) とを含むことを特徴とする、請求項 1 に記載の方法 (10)。

【請求項 3】

ステップ i) およびステップ iii) が、

— 被特性評価ビーム (Fcar) の電磁場が再構築され、

— 第 1 の測定面 (z1) の参照ビーム (Fref) の電磁場が、第 1 の光学部品 (O1) による参照ビーム (Fref) の前記電磁場の拡大の結果であるように自己矛盾のない解に向かって収束するまで繰り返されることを特徴とする、請求項 2 に記載の方法 (10)。

30

【請求項 4】

ステップ P1 で時間間隔 T1 を掃引する少なくとも 1 つの時間遅延 τ に関して、計算機 (K) によって、被特性評価ビーム (Fcar) の強度および強度の空間的分布を計算するステップを含むことを特徴とする、請求項 1 から 3 のいずれか一項に記載の方法 (10)。

【請求項 5】

ステップ P1 で時間間隔 T1 を掃引する時間遅延 τ ごとに、計算機 (K) によって、被特性評価ビーム (Fcar) の強度および強度の空間的分布を計算する前記ステップを含むことを特徴とする、請求項 4 に記載の方法 (10)。

40

【請求項 6】

— 参照ビームの周波数 ω_0 での空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を測定するステップであり、前記空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ が、第 1 の光学部品 (O1) によって導入された参照ビーム (Fref) の波面の曲率の特徴を示す、測定するステップと、

— 次いで、被特性評価ビームの修正された相対空間スペクトル位相を得るために、相対空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ から空間スペクトル位相 $(\omega/\omega_0)\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を減じるステップとを含むことを特徴とする、請求項 1 から 5 のいずれか一項に記載の方法 (10)。

【請求項 7】

50

ー 「参照空間スペクトル位相」と呼ばれる第1のサブビームの空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を測定するステップと、

ー 次いで、被特性評価ビームの絶対空間スペクトル位相 $\phi_{abs}(x, y, \omega)$ を得るために、相対空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ から前記参照空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を減じるステップと

を含むことを特徴とする、請求項1から5のいずれか一項に記載の方法(10)。

【請求項8】

ー 参照ビームの周波数 ω_0 での空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を測定するステップであり、前記空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ が、第1の光学部品O1によって導入された参照ビーム(Fref)の波面の曲率の特徴を示す、測定するステップと、

ー 「参照空間スペクトル位相」と呼ばれる第1のサブビームの空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を測定するステップと、

ー 次いで、被特性評価ビームの修正された絶対空間スペクトル位相を得るために、相対空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ から前記参照空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ および空間スペクトル位相 $(\omega/\omega_0)\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を減じるステップと

を含むことを特徴とする、請求項1から5のいずれか一項に記載の方法(10)。

【請求項9】

ー 光ビーム(FL)を第1のサブビーム(F1)と第2のサブビーム(F2)とに分離するための分離器光学部品(Os、SR)であり、第1のサブビーム(F1)のための第1の光路(C1)と第2のサブビーム(F2)のための第2の光路(C2)とを規定する、分離器光学部品(Os、SR)と、

ー 第1の光路(C1)に配列された第1の光学部品(O1)であり、「参照ビーム(Fref)」と呼ばれる第1の光学部品を出た第1のサブビームが第1のタイプの波面を有するように第1の曲率半径を有する、第1の光学部品(O1)と、

ー 第2の光路(C2)に配列された第2の光学部品(O2)であり、「被特性評価ビーム(Fcar)」と呼ばれる第2の光学部品を出た第2のサブビームが、第1のタイプと異なる第2のタイプの波面を有するように第1の曲率半径と異なる第2の曲率半径を有する、第2の光学部品(O2)と、

ー 参照ビーム(Fref)と被特性評価ビーム(Fcar)との間の遅延時間 τ を制御する手段(Pz)と、

ー 参照ビーム(Fref)と被特性評価ビーム(Fcar)とが空間的に干渉し、2次元干渉パターン(M1)を形成するように、参照ビーム(Fref)と被特性評価ビーム(Fcar)とを再結合させるための再結合器光学部品(Or、SR)と、

ー 少なくとも2次元干渉パターン(M1)から時間情報または周波数情報を得ることを可能にする測定システム(SM1)と、

ー 周波数ドメインのフーリエ変換(TFF)の時間情報からの計算、または時間ドメインのフーリエ変換(TFT)の周波数情報からの計算を可能にする計算機(K)と

を含むことを特徴とする、請求項1から8のいずれか一項に記載の方法(10)の実施のための光ビーム(FL)の特性評価のためのデバイス(1、2)。

【請求項10】

分離器光学部品(Os)と再結合器光学部品(Or)とが、一方では、光ビーム(FL)の分離を、他方では、参照ビーム(Fref)と被特性評価ビーム(Fcar)との再結合を保証する単一で同じ光学部品(SR)を形成することを特徴とする、請求項9に記載のデバイス(1)。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の技術分野は、光学測定の技術分野である。したがって、本発明の1つの態様は、光ビーム、特に、多色光ビーム、とりわけ多色レーザビームの特性評価のためのデバイ

10

20

30

40

50

スおよび方法に関する。本発明の1つの態様によるデバイスおよび方法は、特に、光ビーム、とりわけ、一般にフェムト秒持続時間の1つまたは複数のレーザパルスを含むパルスレーザビームの時空間的特性を決定することを可能にする。より一般的には、本発明の1つの態様によるデバイスおよび方法は、参照点として適格な光ビームの1つの点の電磁場と、光ビームのすべての他の点の電磁場との間の相互相関関数を測定するために使用することができる。

【背景技術】

【0002】

本発明は時空間的結合を有する超短レーザパルスの特性評価への適用に関連してより詳細に説明されるが、この使用は排他的ではない。「超短レーザパルス」は、ピコ秒パルス、すなわち、約0.1 psと100 psとの間に含まれる持続時間のパルス、またはフェムト秒パルス、すなわち、100 fs = 0.1 ps以下の持続時間のパルスを意味するものとする。持続時間は、強度プロファイルの中間の高さに適用される。これらのパルスは、相対的に広いスペクトルバンド、すなわち、一般に、数十ナノメートルの程度のバンド、またはさらに数百ナノメートルの程度のバンドを有する。

【0003】

超短レーザパルスは、非常に多くの科学的用途および技術的用途を有し、超短レーザパルスは、数ジュールのエネルギーまで増幅され、「パルスビーム」と呼ばれるビームを形成することができ、ビームの直径は、とりわけビームパワーに応じて数ミリメートルから数センチメートルまで達する。

【0004】

一般的に言えば、パルスビームの電磁場の時間特性は空間的に変化することがあり、または、等価的に、パルスビームの電磁場の空間特性は時間依存となることがある。例えば、パルス持続時間は、ビームの位置(x, y)に依存することがある。本説明では、特に別途述べない限り、方向「z」に伝搬するビームが考慮され、「x」軸、「y」軸、および「z」軸は、正規直交座標系を形成する。

【0005】

そのような依存性が存在する場合、場 $E(x, y, t)$ は、

$$E(x, y, t) = E_1(t) \times E_2(x, y)$$

の形で表すことができない。ここで、 $E_1(t)$ は時間の関数であり、 $E_2(x, y)$ は空間の関数である。そのとき、ビームは時空間的結合(STC)を有すると言われる。

【0006】

時空間的結合は、とりわけ、図1aおよび図1bによって示されるパルスビームの強度面の歪みをもたらすことがある。図1aは理想的な場合を示し、それによれば、方向zに伝搬する超短パルスビームの電磁エネルギーは、直径Dおよび厚さcTの非常に薄い円盤に広げられ、ここで、cは光速であり、Tはパルスの持続時間である。図1aの例では、 $D = 8 \text{ cm}$ および $cT = 10 \text{ } \mu\text{m}$ であり、 $cT = 10 \text{ } \mu\text{m}$ は約33 fsのパルス持続時間に対応する。焦点で得られる光強度を最大化する(それが一般に要望される)ために、前記円盤はできるだけ「平坦」でなければならない。エネルギーのこの空間分布を特性評価するために、レーザの「強度面」という表現が使われる。強度面の概念は「波面」の概念と混同されてはならない。

【0007】

実際には、とりわけ、大きいビーム直径をもつハイパワーレーザの場合には、図1bに示されるように、強度面は平坦ではなく歪んでいることがある。その結果、パルスピークは、面(x, y)のビームの断面の異なる点では異なる時点に到達することがあり、パルス持続時間も点によって変わることがある。他のタイプの時空間的結合、例えば、ある期間にわたる波面の回転なども起こり得る。

【0008】

これら結合を測定する技法が提案されているが、その技法は、性能が制限されたままであり、実施するのに複雑であり、一般にはハイパワー光源から来る大きいサイズのビーム

10

20

30

40

50

には不適當である。その結果、これらの技法は普及していない。実際、光ビームが大きければ大きいほど、時空間的結合を有する可能性が高くなる。したがって、特にそのような光ビームにとっては、時空間的結合の測定を実行できることが重要である。これらの技法が以下に列記される。

【0009】

－ 高価で複雑な「SPIDER-2D」技法は、被特性評価ビームのサイズに制限を課する。SPIDER-2Dは、時間 t および横断方向 x または y に応じて被特性評価ビームの再構築を可能にする。

【0010】

－ 「STRIPED FISH」技法は、SPIDER-2Dよりも実装することが簡単であり、安価である。その上、STRIPED FISHは、時間 t および2つの横断方向 x および y に応じての被特性評価ビームの再構築を可能にする。しかしながら、STRIPED FISHは、やはり、被特性評価ビームのサイズに制限を課し、得ることが非常に困難であるとわかりうる参照ビームの使用を必要とし、小さいスペクトルサンプリングしか可能でない。

【0011】

－ 「HAMSTER」技法が、Cousin等、「Three-dimensional spatiotemporal pulse characterization with an acousto-optic pulse shaper and a Hartmann-Shack wavefront sensor」、Optics Letters 37, 3291 (2012) の論文に記載されている。HAMSTERは、被特性評価ビームのある点において時間測定を実行し、次いで、被特性評価ビームの異なるスペクトルセクションの空間波面を測定するために、音響光学変調器とShack-Hartmannタイプの2D波面センサとを使用する。2つの一連の測定の終りに、HAMSTERは、被特性評価ビームの完全な時空間的再構築に、すなわち、時間 t ならびに2つの横断方向 x および y に応じての時空間的再構築に達する。しかしながら、HAMSTER技法は、とりわけ音響光学変調器を使用するという理由で、ある複雑さと高いコストとを必要とする。他方では、HAMSTER技法は大直径ビームに適さない。

【0012】

－ 「SEA TADPOLE」技法は、第1の光ファイバをビームの異なる点に移動させながら被特性評価ビームの異なる点の光を前記第1の光ファイバで収集することにある。補助ビームが第2の光ファイバに注入される。第1および第2の光ファイバの出力端部は、発散するとき、前記第1および第2の光ファイバを出るビームが空間的に重なり、空間干渉を引き起こすように互いに近くに置かれる。これらの空間干渉は、インターフェログラムを得るために分光器を使用してスペクトル的に分解される。このインターフェログラムにより、第1のファイバに注入されたビームと、第2のファイバに注入されたビームとの間のスペクトル位相を決定することができる。このようにして、被特性評価ビームのある点で収集された光のスペクトル特性が、補助ビームのものと比較される。被特性評価ビームの複数の点に第1のファイバを移動させることによって、これらの点の各々が補助ビームと比較され、それにより、被特性評価ビームのスペクトル位相を再構築することが可能になる。SPIDER-2D技法およびSTRIPED FISH技法と異なり、SEA TADPOLE技法は、被特性評価ビームのサイズを制限しないという利点を有する。STRIPED FISHと同じように、実装具が比較的簡単で安価であり、被特性評価ビームの再構築が3次元 (x , y , t) によって実行される。しかしながら、SEA TADPOLEによるビームの特性評価は、多くのレーザショットを必要とし、スペクトル位相は、一点ごとに決定される。いくつかのレーザショットを実行する必要性は、特性評価すべきレーザビームがショットごとに安定であり再現可能であることを課し、フェムト秒レーザ、特に、ハイパワーフェムト秒レーザでは必ずしもそうならない。SEA TADPOLE技法の別の制限は、ランダム位相揺らぎをもたらす光ファイバの使用によって引き起こされる。

10

20

30

40

50

【0013】

ー 最新技術が、特許FR2976663(A1)に記載されている「MUFFIN」と呼ばれる技法によって与えられる。前に引合いに出したSPIDER-2D技法、STRIPED FISH技法、およびSEA TADPOLE技法は、特許FR2976663(A1)のプリアンブルにも詳細に記載されている。MUFFIN技法は、SEA TADPOLE技法への改善の代表例である。2つの光ファイバ、すなわち、被特性評価ビームのN個の点へと連続的に移動される第1の光ファイバと、参照として役立つ第2の光ファイバとを使用する代わりに、MUFFINは、1組のN個の光ファイバを直接使用することを提案している。これらのN個のファイバの入力端部は、被特性評価ビームのN個の異なる点で光を収集する。これらのN個のファイバの出力端部は、1列に互いに隣接して置かれ、その結果、前記ファイバを出た後のビームは互いに重なり空間的に干渉する。したがって、MUFFIN技法は、シングルショットで、および必ずしも補助ビームを利用することなしに、SEA TADPOLEの結果に達する。MUFFINは、SEA TADPOLEで既に確認された光ファイバの位相揺らぎの問題を直ちには除去しない。そのような位相揺らぎは、被特性評価ビームの完全な再構築を妨げることがある。この問題の解決策が上述で引用した特許に提案されているが、それは、MUFFIN技法の使用をより複雑にしている。さらに、多数の光ファイバを使用することはMUFFIN技法では困難である。実際には、光ファイバの最大数は、数十の程度である。その結果、MUFFIN技法は、被特性評価ビームの限定的な空間サンプリングしか可能ではない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0014】

【特許文献1】仏国特許出願公開第2976663号明細書

【非特許文献】

【0015】

【非特許文献1】Cousin等、「Three-dimensional spatiotemporal pulse characterization with an acousto-optic pulse shaper and a Hartmann-Shack wavefront sensor」、Optics Letters 37、3291(2012)

【非特許文献2】T. Oksenhendler等「Self-referenced spectral interferometry」、Applied Physics B (99)、7-12

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0016】

したがって、本発明は、大きいサイズの光ビームに適した光ビームの特性評価のためのデバイスおよび方法を提案し、実施することが比較的簡単で安価なままであるのに良好な空間サンプリングおよび良好なスペクトルサンプリングにより前記光ビームの完全な再構築を可能にすることによって前述の問題への解決策を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0017】

したがって、本発明の1つの態様は：

ー 光ビームを第1のサブビームと第2のサブビームとに分離するための分離器光学部品であり、第1のサブビームのための第1の光路と第2のサブビームのための第2の光路とを規定する、分離器光学部品と、

ー 第1の光路に配列された第1の光学部品であり、「参照ビーム」と呼ばれる第1の光学部品を出た後の第1のサブビームが第1のタイプの波面を有するように第1の曲率半径を有する、第1の光学部品と、

ー 第2の光路に配列された第2の光学部品であり、「被特性評価ビーム」と呼ばれる

第2の光学部品を出た後の第2のサブビームが第1のタイプと異なる第2のタイプの波面を有するように第1の曲率半径と異なる第2の曲率半径を有する、第2の光学部品と、

- － 参照ビームと被特性評価ビームとの間の遅延時間 τ を制御する手段と、
 - － ビームが、空間的に干渉し、2次元干渉パターンを形成するように、参照ビームと被特性評価ビームとを再結合させるための再結合器光学部品と、
 - － 少なくとも2次元干渉パターンから時間情報または周波数情報を得ることを可能にする測定システムと、
 - － 周波数ドメインのフーリエ変換の時間情報からの計算、または時間ドメインのフーリエ変換の周波数情報からの計算を可能にする計算機と
- を含む光ビームの特性評価のためのデバイスに関する。

10

【0018】

本発明のおかげで、有利には、第1のサブビームの、点光源であると見なされる一部が、被特性評価ビームの全体を特性評価できるようにする大きいサイズの参照ビームを発生するために使用される。「大きいサイズの参照ビーム」は、所望の測定面において、参照ビームのサイズが被特性評価ビームのサイズ以上あることを意味するものとする。第1の光学部品と第2の光学部品との間の曲率半径の差のおかげで、参照ビームの波面は第1のタイプのものであり、被特性評価ビームの波面は第2のタイプのものであり、第2のタイプは第1のタイプと異なる。波面のタイプは、とりわけ、前記波面の曲率半径に応じて決定される。したがって、所望の測定面において、点光源から来ると見なされる参照ビームは、被特性評価ビームの各点と空間的に干渉する。したがって、被特性評価ビームの特性評価が、参照ビームと比較して得られ、前記参照ビームは、簡単で効率的で安価な方法で得られる。

20

【0019】

前節で述べた特徴とは別に、本発明の1つの態様による光ビームの特性評価のためのデバイスは、個別に考えられる、またはそれらの任意の技術的に可能な組合せにより考えられる以下のものの中の1つまたは複数の補完的な特徴を有することができる。

【0020】

- － 分離器光学部品と再結合器光学部品とは、一方では、光ビームの分離を、他方では、参照ビームと被特性評価ビームとの再結合を保証する単一で同じ光学部品を形成する。

【0021】

- － 計算機は、時間タイプ情報と周波数タイプ情報との間のフーリエ変換の計算機であり、それは、これらのタイプのうちの1つの情報から他のタイプのフーリエ変換を計算する。

30

【0022】

本発明の別の態様は、本発明の1つの態様による光ビームの特性評価のためのデバイスを使用する光ビームの特性評価のための第1の方法に関し、第1の方法は：

- － 光ビームを分離器光学部品によって第1のサブビームと第2のサブビームとに分離するステップであり、第1のサブビームが第1の光路を取り、第2のサブビームが第2の光路を取る、分離するステップと、
- － 第1の光学部品を介して第1のサブビームを、および第2の光学部品を介して第2のサブビームを伝搬させるステップであり、前記第1および第2の光学部品は、制御手段のおかげで、それぞれ、「参照ビーム」と呼ばれる第1の光学部品を出た後の第1のサブビームおよび「被特性評価ビーム」と呼ばれる第2の光学部品を出た後の第2のサブビームがステップP1で時間間隔T1を掃引する時間遅延 τ だけ分離されるように、第1および第2の光路に配列される、伝搬させるステップと、
- － ビームが、空間的に干渉し、2次元干渉パターンを形成するように、再結合器光学部品によって参照ビームと被特性評価ビームとを再結合させるステップと、
- － 時間インターフェログラムを得るために、参照ビームと被特性評価ビームとの間の、ステップP1で時間間隔T1を掃引する時間遅延 τ に応じて、前記2次元干渉パターンを測定システムによって測定するステップと、

40

50

ー 計算機によって、時間インターフェログラムの少なくとも1つの空間点の周波数ドメインのフーリエ変換を計算するステップであり、周波数ドメインの前記フーリエ変換が、中心周波数ピークと第1および第2の周波数サイドピークとを有する、計算するステップと、

ー 計算機によって、周波数ドメインの前記フーリエ変換の前記第1および第2の周波数サイドピークのうちの1つに対して「相対スペクトル振幅」と呼ばれるスペクトル振幅 $A_R(\omega)$ と「相対空間スペクトル位相」と呼ばれる空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ とを計算するステップを含む。

【0023】

10

本明細書では、「時間インターフェログラム」は、ステップP1で時間間隔T1を掃引する遅延時間 τ ごとの2次元干渉パターンをすべてを意味するものとする。したがって、時間インターフェログラムは、2つの空間次元および1つの時間次元に沿った3次元情報を含む。本発明の1つの態様による光ビームの特性評価のための第1の方法は、被特性評価ビームの優れた空間サンプリングを可能にする。ステップP1での時間間隔T1の遅延時間 τ による掃引のおかげで、本発明の1つの態様による光ビームの特性評価のための第1の方法は、被特性評価ビームの優れたスペクトルのサンプリングを可能にする。スペクトルサンプリングの品質は、実際、遅延時間 τ を走査する時間間隔T1の長さに関連する。

【0024】

20

前節で述べた特徴とは別に、本発明の1つの態様による光ビームの特性評価のための第1の方法は、個別に考えられる、またはそれらの任意の技術的に可能な組合せにより考えられる以下のものの中の1つまたは複数の追加の特徴を有することができる。

【0025】

ー 第1の方法は、ステップP1で時間間隔T1を掃引する少なくとも1つの時間遅延 τ に関して、計算機によって、被特性評価ビームの強度および強度の空間的分布を計算するステップを含む。前記ステップは、有利には、ある期間にわたる、すなわち、一般に、パルス光源の場合におけるあるパルスから次のパルスまでの光源の特性の潜在的な揺らぎを考慮に入れることを可能にする。掃引時間間隔T1の間の光源の強度および強度の空間的分布の潜在的な揺らぎは、実際、測定された2次元干渉パターン、したがって、そこから推定される複素スペクトルを劣化させる可能性がある。

30

【0026】

ー 優先的に、第1の方法は、ステップP1で時間間隔T1を掃引する時間遅延 τ ごとに、計算機によって、被特性評価ビームの強度および強度の空間的分布を計算する前記ステップを含む。

【0027】

ー 第1の方法は、有利には：

○ 参照ビームの周波数 ω_0 での空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を測定するステップであり、前記空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ が、第1の光学部品によって導入された参照ビームの波面の曲率の特徴を示す、測定するステップと、

40

○ 次いで、被特性評価ビームの修正された相対空間スペクトル位相を得るために、相対空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ から空間スペクトル位相 $(\omega/\omega_0)\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を減じるステップとを含む。

それにより、第1の光学部品によって導入される参照ビームの波面の曲率が考慮に入れられる。

【0028】

ー 第1の代替によれば、第1の方法は、有利には：

○ 「参照空間スペクトル位相」と呼ばれる第1のサブビームの空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を測定するステップと、

50

○ 次いで、被特性評価ビームの絶対空間スペクトル位相 $\phi_{abs}(x, y, \omega)$ を得るために、相対空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ から前記参照空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を減じるステップとを含む。

それにより、被特性評価ビームの絶対特性評価が、参照ビームと無関係に得られる。

【0029】

ー 第2の代替によれば、第1の方法は、有利には：

○ 参照ビームの周波数 ω_0 での空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を測定するステップであり、前記空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ が、第1の光学部品によって導入された参照ビームの波面の曲率の特徴を示す、測定するステップと、

○ 「参照空間スペクトル位相」と呼ばれる第1のサブビームの空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を測定するステップと、

○ 次いで、被特性評価ビームの修正された絶対空間スペクトル位相を得るために、相対空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ から前記参照空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ および空間スペクトル位相 $(\omega/\omega_0)\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を減じるステップとを含む。

それにより、被特性評価ビームの絶対特性評価が、第1の光学部品によって導入される参照ビームの波面の曲率を修正しながら得られる。

【0030】

ー 第1の方法は、有利には、前記第1のサブビームの品質を向上させることを可能にする第1のサブビームをフィルタ処理するステップを含む。それにより、これは、第1のサブビームの、点光源に同化している部分から導き出される参照ビームの品質を向上させるのに寄与する。フィルタ処理ステップは、線形フィルタ処理のステップとすることができる。それにより、第1のサブビームの空間特性は、有利には、改善される。代替として、フィルタ処理ステップは、非線形フィルタ処理のステップとすることができる。それにより、第1のサブビームのスペクトルは、有利には、広げられ、それにより、第1の光学部品を出た後の第1のサブビームである参照ビームである。参照ビームのスペクトルを広げることによって、これは、有利には、前記フィルタ処理ステップの前に、被特性評価ビームのいくつかのゾーンが参照ビームのスペクトルに存在しない周波数を含む場合を少なくとも部分的に除去する。フィルタ処理ステップは、線形フィルタ処理の第1のサブステップと、非線形フィルタ処理の第2のサブステップとをさらに含むことができる。

【0031】

本発明の別の態様は、本発明の1つの態様による光ビームの特性評価のためのデバイスを使用する光ビームの特性評価のための第2の方法に関し、第2の方法は：

ー 光ビームを分離器光学部品によって第1のサブビームと第2のサブビームとに分離するステップであり、第1のサブビームが第1の光路を取り、第2のサブビームが第2の光路を取る、分離するステップと、

ー 第1の光学部品を介して第1のサブビームを、および第2の光学部品を介して第2のサブビームを伝搬させるステップであり、前記第1および第2の光学部品は、制御手段のおかげで、それぞれ、「参照ビーム」と呼ばれる第1の光学部品を出た後の第1のサブビームおよび「被特性評価ビーム」と呼ばれる第2の光学部品を出た後の第2のサブビームが時間遅延 τ だけ分離されるように第1および第2の光路に配列される、伝搬させるステップと、

ー ビームが、空間的に干渉し、第1の面に沿って延びる2次元干渉パターンを形成するように、再結合器光学部品によって参照ビームと被特性評価ビームとを再結合させるステップと、

ー 2次元干渉パターンの少なくとも1つの部分の周波数スペクトルを測定システムによって測定するステップであり、測定システムが、第1の面の第1の空間方向に沿って延びる入口スリットを有する分光器を含む、測定するステップと、

ー 周波数スペクトルの少なくとも1つの空間点の時間ドメインのフーリエ変換を計算するステップであり、時間ドメインの前記フーリエ変換が、時間中心ピークと第1および第2の時間サイドピークとを有する、計算するステップと、

ー 計算機によって、前記第1および第2の時間サイドピークのうちの1つに対して周波数ドメインのフーリエ変換を計算するステップと、

ー 計算機によって、周波数ドメインの前記フーリエ変換に関して「相対スペクトル振幅」と呼ばれるスペクトル振幅 $A_R(\omega)$ と「相対空間スペクトル位相」と呼ばれる空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ とを計算するステップとを含む。

【0032】

10

本発明の1つの態様による光ビームの特性評価のための第2の方法は、有利には、ある期間にわたる光源の特性の潜在的な揺らぎを除去することを可能にする。実際、前記第2の方法は、「シングルショット」と呼ばれる測定、すなわち、パルス光源の場合には単一の光パルスのみを使用する測定、または、代わりに、連続スペクトル光源の場合には、光源の特性が変動しないと考えることができる非常に短い持続時間のみ光源を使用する測定を可能にする。

【0033】

前節で述べた特徴とは別に、本発明の1つの態様による光ビームの特性評価のための第2の方法は、個別に考えられる、またはそれらの任意の技術的に可能な組合せにより考えられる以下のものの中の1つまたは複数の追加の特徴を有することができる。

20

【0034】

ー 2次元干渉パターンの少なくとも1つの部分の周波数スペクトルを測定するステップは：

○ 分光器の入口スリットが、2次元干渉パターンの前記少なくとも1つの部分を受け取るように構成されるように測定システムの分光器を配列するサブステップであり、前記少なくとも1つの部分が第1の面の第1の空間次元に沿って延びる、配列するサブステップと、

○ 分光器のおかげで、第1の面の第1の空間次元に沿って延びる2次元干渉パターンの前記少なくとも1つの部分の周波数スペクトルを測定するサブステップとを含む。

30

【0035】

ー 代替として、2次元干渉パターン of の少なくとも1つの部分の周波数スペクトルを測定するステップは：

○ 複数の光ファイバを含む測定システムが、第1の面の第1の空間方向に沿っておよび第1の面の第2の空間方向に沿って2次元干渉パターンをサンプリングすることができるように2次元マトリクスに従って第1の面に前記複数の光ファイバの入力端部を配列するサブステップと、

○ 前記複数の光ファイバの出力端部を測定システムの分光器の入口スリットに配列するサブステップと、

○ 測定システムの分光器のおかげで、第1の面の第1および第2の空間方向に沿って2次元干渉パターンのサンプリングの周波数スペクトルを測定するサブステップとを含む。

40

【0036】

ー 第2の方法は、有利には：

○ 参照ビームの周波数 ω_0 での空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を測定するステップであり、前記空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ が、第1の光学部品によって導入された参照ビームの波面の曲率の特徴を示す、測定するステップと、

○ 次いで、被特性評価ビームの修正された相対空間スペクトル位相を得るために、相対空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ から空間スペクトル位相 $(\omega/\omega_0)\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を減じるステップと

50

を含む。

それにより、第1の光学部品によって導入される参照ビームの波面の曲率が考慮に入れられる。

【0037】

ー 第1の代替によれば、第2の方法は、有利には：

○ 「参照空間スペクトル位相」と呼ばれる第1のサブビームの空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を測定するステップと、

○ 次いで、被特性評価ビームの絶対空間スペクトル位相 $\phi_{abs}(x, y, \omega)$ を得るために、相対空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ から前記参照空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を減じるステップと

を含む。

それにより、被特性評価ビームの絶対特性評価が、参照ビームと無関係に得られる。

【0038】

ー 第2の代替によれば、第2の方法は、有利には：

○ 参照ビームの周波数 ω_0 での空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を測定するステップであり、前記空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ が、第1の光学部品によって導入された参照ビームの波面の曲率の特徴を示す、測定するステップと、

○ 「参照空間スペクトル位相」と呼ばれる第1のサブビームの空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を測定するステップと、

○ 次いで、被特性評価ビームの修正された絶対空間スペクトル位相を得るために、相対空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ から前記参照空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ および空間スペクトル位相 $(\omega/\omega_0)\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を減じるステップと

を含む。

それにより、被特性評価ビームの絶対特性評価が、第1の光学部品によって導入される参照ビームの波面の曲率を修正しながら得られる。

【0039】

ー 第2の方法は、有利には、前記第1のサブビームの品質を向上させることを可能にする第1のサブビームをフィルタ処理するステップを含む。それにより、これは、第1のサブビームの、点光源に同化している部分から導き出される参照ビームの品質を向上させるのに寄与する。フィルタ処理ステップは、線形フィルタ処理のステップとすることができる。それにより、第1のサブビームの空間特性は、有利には、改善される。代替として、フィルタ処理ステップは、非線形フィルタ処理のステップとすることができる。それにより、第1のサブビームのスペクトルは、有利には、広げられ、それにより、第1の光学部品を出た後の第1のサブビームである参照ビームである。したがって、参照ビームのスペクトルを広げることによって、これは、有利には、前記フィルタ処理ステップの前に、被特性評価ビームのいくつかのゾーンが参照ビームのスペクトルに存在しない周波数を含む場合を少なくとも部分的に除去する。フィルタ処理ステップは、線形フィルタ処理の第1のサブステップと、非線形フィルタ処理の第2のサブステップとをさらに含むことができる。

【0040】

本発明およびその異なる適用は、以下の説明を読み、添付の図を検討することによって一層よく理解されるであろう。

【0041】

図は、表示するために提示され、本発明を全く限定しない。

【図面の簡単な説明】

【0042】

【図1a】時空間的結合がない理想的な場合の超短パルスレーザービームの電磁エネルギーの分布の一例を示す図である。

【図1b】時空間的結合がある非理想の場合の超短パルスレーザービームの電磁エネルギー

10

20

30

40

50

の分布の一例を示す図である。

【図 2 a】光ビームの特性評価のための第 1 のデバイスを使用する、本発明の第 1 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法の第 1 のステップを示す図である。

【図 2 b】光ビームの特性評価のための第 1 のデバイスを使用する、本発明の第 1 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法の第 2 のステップを示す図である。

【図 2 c】光ビームの特性評価のための第 1 のデバイスを使用する、本発明の第 1 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法の第 3 のステップを示す図である。

【図 3】光ビームの特性評価のための第 2 のデバイスを使用する、本発明の第 1 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法の代替構成を示す図である。

【図 4】本発明の第 1 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法のステップの間に実験的に測定された所与の時間遅延での 2 次元干渉パターンの一例を示す図である。

10

【図 5 a】参照ビームと被特性評価ビームとの間の第 1 の時間遅延での前記被特性評価ビームと前記参照ビームとの時空間的プロファイルの第 1 のシミュレーションを示す図である。

【図 5 b】参照ビームと被特性評価ビームとの間の第 2 の時間遅延での前記被特性評価ビームと前記参照ビームとの時空間的プロファイルの第 2 のシミュレーションを示す図である。

【図 5 c】参照ビームと被特性評価ビームとの間の第 3 の時間遅延での前記被特性評価ビームと参照ビームとの前記時空間的プロファイルの第 3 のシミュレーションを示す図である。

20

【図 6 a】図 5 a の配置に対応する第 1 の 2 次元干渉パターンを示す図である。

【図 6 b】図 5 b の配置に対応する第 2 の 2 次元干渉パターンを示す図である。

【図 6 c】図 5 c の配置に対応する第 3 の 2 次元干渉パターンを示す図である。

【図 7 a】所与の点 (x, y) で測定された部分的時間インターフェログラムの外観を示す図である。

【図 7 b】図 7 a の部分的時間インターフェログラムのフーリエ変換の外観を示す図である。

【図 8】本発明の一実施形態による光ビームの特性評価のための方法の第 1 の変形を示す図である。

【図 9】本発明の一実施形態による光ビームの特性評価のための方法の第 2 の変形を示す図である。

30

【図 10】本発明の一実施形態による光ビームの特性評価のための方法の第 5 の変形を示す図である。

【図 11 a】光ビームの特性評価のための第 3 のデバイスを使用する、本発明の第 2 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法を示す図である。

【図 11 b】光ビームの特性評価のための第 3 のデバイスの部分的斜視図である。

【図 11 c】本発明の第 2 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法のステップの間に実験的に測定された所与の時間遅延での 2 次元干渉パターンの周波数スペクトルの一例を示す図である。

【図 12 a】光ビームの特性評価のための第 4 のデバイスを使用する、本発明の第 2 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法の代替構成を示す図である。

40

【図 12 b】光ビームの特性評価のための第 4 のデバイスの部分的斜視図である。

【発明を実施するための形態】

【0043】

特に別途述べられない限り、異なる図に現れる同じ要素は単一の参照を有する。

【0044】

図 1 a および図 1 b は前に説明された。

【0045】

図 2 a、図 2 b、および図 2 c は、それぞれ、本発明の第 1 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法 10 の第 1 のステップ a)、第 2 のステップ b)、および第 3 の

50

ステップc)を示す。第1の実施形態は、「マルチショットモード」とも呼ばれる。「ワンショットモード」と呼ばれる第2の実施形態は、後で説明される。

【0046】

本発明の第1の実施形態によれば、方法10は、図2aから図2cに示される光ビームの特性評価のための第1のデバイス1を使用する。デバイス1は：

- － 光学部品SRと、
- － 第1の光学部品O1と、
- － 第2の光学部品O2と、
- － 時間遅延 τ を制御する手段Pzと、
- － 測定システムSM1と、
- － 計算機Kと

を含む。

【0047】

図2aから図2cに詳細に示されている実施形態の例では、第1の光学部品O1および第2の光学部品O2は、ミラーなどの反射光学部品である。図示されていない代替によれば、第1の光学部品O1および/または第2の光学部品O2は、光学レンズとすることもできる。いずれかの場合において、第1の光学部品O1および第2の光学部品O2は、異なる曲率半径を有する。図2aから図2cに詳細に示されている実施形態の例では、第1の光学部品O1は、発散光学部品、より正確には発散ミラーであり、一方、第2の光学部品O2は、平面光学部品、より正確には平面ミラーである。図示されていない代替によれば、第1の光学部品O1は収束光学部品とすることができ、および/または第2の光学部品O2は発散または収束光学部品とすることができ、したがって、第1の光学部品O1の曲率半径が第2の光学部品O2の曲率半径と異なる限り、複数の組合せが第1の光学部品O1および第2の光学部品O2に関して想定され得る。

【0048】

本説明の残りの部分では、面Oxz、Oxy、およびOyzを画定する中心Oならびに軸x、y、およびzの正規直交系が参照される。

【0049】

図2aに示された前記第1のステップa)の間、光源SLによって発生された光ビームFLは、光学部品SRに送られる。本明細書で説明する実施形態の特定の例では、光源SLは、10Hzの周波数で25フェムト秒の程度のパルスが発生することができて各パルスが2.5Jの程度のエネルギーを有するパルスフェムト秒レーザである。このパルスレーザのピークパワーは100TWの程度であり、一方、その平均パワーは約25Wに達する。したがって、光源SLの出力部の光ビームFLは、考察している例では、一連の光パルスによって形成される。光ビームFLは、考察している例では、80mmの程度の直径を有する。一般的に言えば、ビームの直径は、前記ビームの伝搬の方向に対して垂直な面で測定される。したがって、光ビームFLの直径は、面Oxzに平行な面で測定される。光学部品SRは、例えば自己反射ミラーであり、自己反射ミラーは、光ビームを受け取ると、光ビームの一部を反射し、光ビームの別の一部を透過する。

【0050】

次いで、光ビームFLは、光学部品SRによって第1のサブビームF1と第2のサブビームF2とに分離される。光学部品SRは、第1のサブビームF1のための第1の光路C1と、第2のサブビームF2のための第2の光路C2とを規定する。第1および第2のサブビームは、最初の光ビームFLと実質的に同じ直径を有する。第1のサブビームの直径は、面Oxyに平行な面で測定され、一方、第2のサブビームの直径は、面Oxzに平行な面で測定される。ここで説明する実施形態の例では、光ビームFLは、45°の程度の入射 α の下で光学部品SRに達する。光ビームFLは、さらに、等価的に、135°の程度の入射の下で光学部品SRに達することができる。ここで説明する実施形態の例では、第1のサブビームF1は光学部品SRによって透過され、一方、第2のサブビームF2は光学部品SRによって反射される。優先の代替によれば、第1のサブビームF1は光学部

品 S R によって反射され、一方、第 2 のサブビーム F 2 は光学部品 S R によって透過される。

【0051】

図 2 b に示された第 2 のステップ b) の間、第 1 のサブビーム F 1 は、伝搬し、第 1 の光路 C 1 に配列された第 1 の光学部品 O 1 に少なくとも部分的に達し、一方、第 2 のサブビーム F 2 は、伝搬し、第 2 の光路 C 2 に配列された第 2 の光学部品 O 2 に少なくとも部分的に達する。第 1 の光路 C 1 の第 1 の光学部品 O 1 および第 2 の光路 C 2 の第 2 の光学部品 O 2 の位置付けは、「参照ビーム F r e f」と呼ばれる第 1 の光学部品を出た後の第 1 のサブビームおよび「被特性評価ビーム F c a r」と呼ばれる第 2 の光学部品を出た後の第 2 のサブビームが時間遅延 τ だけ分離されるように選ばれる。

10

【0052】

第 1 の光学部品 O 1 は、第 1 のサブビーム F 1 が垂直入射の下で第 1 の光学部品 O 1 に達するように優先的に配列される。第 2 の光学部品 O 2 は、第 2 のサブビーム F 2 が垂直入射の下で第 2 の光学部品 O 2 に達するように優先的に配列される。言い換えれば、考察している例では、第 1 の光学部品 O 1 は面 O x y と平行に配列され、一方、第 2 の光学部品 O 2 は面 O x z と平行に配列される。

【0053】

図 2 a から図 2 c に詳細に示されている実施形態の例では、第 1 のサブビーム F 1 および第 2 のサブビーム F 2 は、平坦なまたは事実上平坦な波面を有する。発散ミラーである第 1 の光学部品 O 1 の下流で、参照ビーム F r e f は球状波面を有する。したがって、参照ビーム F r e f の波面は、第 1 の光学部品 O 1 の第 1 の曲率のために、第 1 のサブビーム F 1 の波面に関して変更される。平面ミラーである第 2 の光学部品 O 2 の下流で、被特性評価ビーム F c a r は、第 2 のサブビーム F 2 の波面と実質的に同様である平坦なまたは事実上平坦な波面を有する。図示されていない代替によれば、第 1 の光学部品 O 1 の曲率半径が第 2 の光学部品 O 2 の曲率半径と異なる限り、第 1 の光学部品 O 1 は、第 1 のサブビーム F 1 に対して参照ビーム F r e f の曲率半径を変更しなくてもよく、および／または第 2 の光学部品 O 2 は、第 2 のサブビーム F 2 に対して被特性評価ビーム F c a r の曲率半径を変更してもよい。

20

【0054】

第 2 の光学部品 O 2 は、優先的に、光ビーム F L の直径以上の直径（ここで、面 O x z と平行な面で測定されている）を有し、その結果、被特性評価ビーム F c a r の直径は、第 2 の光学部品 O 2 の下流および上流で実質的に同じままである。一般的に言えば、第 2 の光学部品 O 2 の直径 $d O 2$ は、有利には、

30

【数 1】

$$dO2 > DFL * \sqrt{2}$$

であるように選ばれ、ここで、D F L は光ビーム F L の直径である。ここで説明する実施形態の例では、光ビーム F L の直径 D F L は 8 c m の程度であり、直径 $d O 2$ は、有利には、

40

【数 2】

$$dOp1 > 8 * \sqrt{2}$$

であるように選ばれる。したがって、第 2 の光学部品 O 2 が 1 5 c m の程度の直径 $d O 2$ を有するように選ぶことが可能である。

【0055】

本発明の第 1 の実施形態による特性評価のための方法 1 0 では、参照ビーム F r e f と被特性評価ビーム F c a r との間の時間遅延 τ を制御して、前記時間遅延 τ がステップ P 1 で時間間隔 T 1 を走査できることが望まれる。時間間隔 T 1 およびステップ P 1 の選択

50

肢は後で詳述される。制御手段P_zが、参照ビームF_{ref}と被特性評価ビームF_{car}との間の時間遅延 τ を制御するために使用される。制御手段P_zは、一般に、250 μ mの移動距離を有し、数オングストロームÅの程度の精度で移動を実行できるようにする圧電ステージである。制御手段P_zにより、優先的に、第1の光学部品O₁のz軸に沿った位置付けを調節することが可能になる。前記第1の光学部品O₁をz軸に沿って平行移動させることによって、すなわち、第1の光路C₁と第2の光路C₂との間の光路の差を変化させることによって、参照ビームF_{ref}と被特性評価ビームF_{car}との間の時間遅延 τ が制御される。代替によれば、制御手段P_zにより、第2の光学部品O₂のy軸に沿った位置付けを調節することが可能になる。別の代替によれば、制御手段P_zにより、第1の光学部品O₁のz軸に沿った位置付けを調節すること、および第2の光学部品O₂のy軸に沿った位置付けを調節することの両方が可能になる。この後者の代替によれば、そのとき、制御手段P_zは、一般に、第2の圧電ステージを含む。本説明の残りの部分では、「制御手段」および「圧電ステージ」という用語は、無差別に利用される。

10

【0056】

次いで、参照ビームF_{ref}および被特性評価ビームF_{car}は、それぞれ、参照ビームF_{ref}と被特性評価ビームF_{car}との再結合のために第1の光路C₁および第2の光路C₂に沿って光学部品SRに伝搬する。ここで考察している構成の例では、光学部品SRは、第1に、光ビームFLの分離の機能を、第2に、参照ビームF_{ref}と被特性評価ビームF_{car}との再結合の機能を保証する。とはいえ、単一の光学部品SRの代わりに、光ビームFLの分離の機能を保証する第1の光学部品と、参照ビームF_{ref}と被特性評価ビームF_{car}との再結合機能を保証する、第1の光学部品と別の第2の光学部品とを代替として使用することができる。この代替の構成は、後で説明する図3に詳細に示される。

20

【0057】

図2cに示された第3のステップc)の間、参照ビームF_{ref}と被特性評価ビームF_{car}とは、光学部品SRによって再結合される。次いで、参照ビームF_{ref}および被特性評価ビームF_{car}は、測定システムSM1に伝搬する。測定システムSM1は、被特性評価ビームF_{car}が実質的に垂直な入射の下で測定システムSM1に達するように配列される。面O_{xy}と平行な2つの面がこの後考察される：

- 時間遅延 τ ごとに2次元干渉パターンM1の測定が実行される第1の面z₁と、
- 第1の光学部品O₁の面である第2の面z₂。

30

【0058】

第1の面z₁および第2の面z₂は、図2bと図2cとに示されている。第1の光学部品O₁を基準にした測定システムSM1の引き離し（ここで、z軸に沿って測定される）は、参照ビームF_{ref}と被特性評価ビームF_{car}とが第1の測定面z₁に達するとき、参照ビームF_{ref}の直径が被特性評価ビームF_{car}の直径以上となる、優先的には、被特性評価ビームF_{car}の直径よりも大きくなるように選ばれる。したがって、これにより、参照ビームF_{ref}は被特性評価ビームF_{car}の全体と空間的に干渉することができる。参照ビームF_{ref}の直径が被特性評価ビームF_{car}の直径と等しい場合、参照ビームF_{ref}の全体は被特性評価ビームF_{car}の全体と干渉する。参照ビームF_{ref}の直径が被特性評価ビームF_{car}の直径よりも大きい優先の場合には、参照ビームF_{ref}の一部のみが被特性評価ビームF_{car}と干渉する。測定システムSM1が光学部品SRからz軸に沿って遠ければ遠いほど、参照ビームF_{ref}の直径は大きくなり、被特性評価ビームF_{car}と干渉する参照ビームF_{ref}の部分は小さくなる。それにより、被特性評価ビームF_{car}と干渉する参照ビームF_{ref}の部分が小さければ小さいほど、参照ビームF_{ref}の前記部分が欠陥を有す可能性が小さくなり、したがって、本発明の第1の実施形態による特性評価のための方法10によって得ることができる結果の品質が良くなる。参照ビームF_{ref}は、さらに、2次元干渉パターンM1のコントラストに、したがって、測定の品質に影響を及ぼす。2次元干渉パターンM1のコントラストは、実際、被特性評価ビームF_{car}の強度と参照ビームF_{ref}の強度との間の比、

40

50

すなわち、第1の測定面 z_1 における被特性評価ビーム F_{car} のサイズと参照ビーム F_{ref} のサイズとの間の比によって影響される。2次元干渉パターン M_1 のコントラストは、被特性評価ビーム F_{car} の強度と参照ビーム F_{ref} の強度とが第1の測定面 z_1 において等しい（これは参照ビーム F_{ref} があまり小さくないことを意味する）ときに最適である。したがって、それは、参照ビーム F_{ref} のサイズに対する妥協を見いだすことを必要とする。

【0059】

参照ビーム F_{ref} および被特性評価ビーム F_{car} は、それらの再結合の後、空間的に干渉する。所与の時間遅延 τ だけ分離されている参照ビーム F_{ref} および被特性評価ビーム F_{car} が測定システム SM_1 に達すると、それらは2次元干渉パターン M_1 を形成する。2次元干渉パターン M_1 は2つの横断方向 x および y に依存し、所与の時間遅延 τ に対して測定される。したがって、2次元干渉パターン M_1 は、 $M_1_\tau(x, y)$ で示すことができる。所与の時間遅延 τ に対して実験的に測定された2次元干渉パターン M_1 の一例が、図4に示される。2次元干渉パターン M_1 は、一般に、1組の同心リングであり、リングの太さは、リングがパターンの中心から遠ざかるにつれて減少する。

【0060】

次いで、2次元干渉パターン M_1 は、測定システム SM_1 によって測定される。少なくとも2つのタイプの測定システムが、被特性評価ビーム F_{car} のサイズ、すなわち直径に応じて提案される。

【0061】

— カメラに属する1つのセンサ CCD （電荷結合素子）のみを含む第1のタイプの測定システムは、被特性評価ビーム F_{car} が前記センサ CCD の直径以下の直径である場合に使用することができる。実際には、この第1のタイプの測定システムは、一般に、1cm未満の直径の被特性評価ビーム F_{car} の場合に使用することができる。

【0062】

— 被特性評価ビーム F_{car} が前記センサ CCD の直径よりも大きい直径である場合には、第2のタイプの測定システムを使用することができる。この第2のタイプの測定システムは、センサ CCD から離れたところに、拡散スクリーン E と、対物レンズ Obj とを含む。図2aから図2cにおいてより詳細に示されているのがこの第2のタイプの測定システムである。例えば面 Oxy と実質的に平行に配列された拡散スクリーン E は、2次元干渉パターン M_1 の信号 s_1 を拡散させる。対物レンズ Obj は、信号 s_1 を捕捉し、センサ CCD 上に2次元干渉パターン M_1 の縮小した画像を形成する。

【0063】

次いで、第2のタイプと同様に第1のタイプの測定システム SM_1 を用いて、センサ CCD は、2次元干渉パターン M_1 の画像を記録する。次いで、前記画像は計算機 K に送出され得る。2次元干渉パターン M_1 の前記画像で必要とされる空間分解能は、後で論じる。

【0064】

図2a、図2b、および図2cを参照しながらちょうど説明した3つのステップは、ステップ P_1 で時間間隔 T_1 を掃引する時間遅延 τ ごとに繰り返される。2次元干渉パターン M_1 を測定するのに望ましい時間遅延 τ の数 N に対応するステップa)、b)、およびc)の反復の総数 N は、 $N = E(T_1 / P_1) + 1$ に等しく、ここで、 E は整数部分を示す。

【0065】

次に、時間遅延 τ の掃引または走査のための時間間隔 T_1 およびステップ P_1 の選択肢が再検討される。2つの主要な条件が満たされる：

【0066】

— 第1の条件はステップ P_1 に関する。シャノン基準によれば、ステップ P_1 は、被特性評価ビーム F_{car} の光学周期を適切にサンプリングする、とりわけエイリアシング効果を避けるのに十分な小ささである。したがって、シャノン基準は、光学周期当たり

点の測定が少なくとも2回実行されることを示している。したがって、スペクトルの中心が800nmである被特性評価ビームFcarでは、2.6fsの程度の光学周期の場合、ステップP1は約1.3fs未満である、すなわち、第1の光学部品O1または第2の光学部品O2の移動は $c \times P1 / 2 = 200\text{nm}$ 未満であり、cは光速を示す。したがって、十分な精度で、すなわち、一般に、nmの程度の精度で、第1の光学部品O1または第2の光学部品O2の移動を制御することが望ましい。したがって、前に述べたような圧電ステージPzは、第1の光学部品O1または第2の光学部品O2の移動を保証するために優先的に使用される。そのような圧電ステージPzは、実際、1nm未満の精度を保証する。実際には、被特性評価ビームFcarのスペクトルは、ある一定の幅を有しており、前記スペクトルの最高周波数でのエイリアシングを避けるために、ステップP1は、
10
優先的に、シャノン基準から導き出される一般に最小値の1/2よりも小さく選ばれる、すなわち、この特定の例では、P1 0.7fsである。

【0067】

ー 第2の条件は時間間隔T1に関係する。それは、参照ビームFrefと被特性評価ビームFcarのすべての点との干渉を観察するために十分に大きい時間間隔T1の掃引を必要とする。実際、光ビームFLのパルスの性質のために、参照ビームFrefと被特性評価ビームFcarとの間の干渉は、所与の時間遅延 τ に対して、被特性評価ビームFcarの一部のみをカバーする頭部においてのみ観察される。したがって、被特性評価ビームFcarの全体を再構築するには、この頭部が被特性評価ビームFcarのすべての点を連続的に通り過ぎるように十分に大きい時間間隔T1を走査することが必要である。
20
この概念が、図5aから図5cおよび図6aから図6cに示される。

【0068】

○ 図5aは、被特性評価ビームFcarと参照ビームFrefとの間のゼロ時間遅延 τ での前記被特性評価ビームFcarおよび前記参照ビームFrefの時空間的プロファイルの第1のシミュレーションを示す。この第1のシミュレーションでは、参照ビームFrefは、被特性評価ビームFcarの中心に位置する第1のゾーンInt1において被特性評価ビームFcarと干渉する。この第1のゾーンInt1のどちらの側でも、被特性評価ビームFcarのサイドゾーンは参照ビームFrefと干渉しない。図6aは、図5aの配置に対応する、すなわち、参照ビームFrefと被特性評価ビームFcarとの間のゼロ時間遅延 τ の場合の第1の2次元干渉パターンを示す。
30

【0069】

○ 図5bは、被特性評価ビームFcarと参照ビームFrefとの間の13fsの時間遅延 τ での前記被特性評価ビームFcarおよび前記参照ビームFrefの時空間的プロファイルの第2のシミュレーションを示す。この第2のシミュレーションでは、参照ビームFrefは、第2のゾーンInt2および第3のゾーンInt3において被特性評価ビームFcarと干渉する。前記第2のゾーンInt2と前記第3のゾーンInt3との間で、被特性評価ビームの中央ゾーンは、参照ビームFrefと干渉しない。図6bは、図5bの配置に対応する、すなわち、参照ビームFrefと被特性評価ビームFcarとの間の13fsの時間遅延 τ の場合の第2の2次元干渉パターンを示す。

【0070】

○ 図5cは、被特性評価ビームFcarと参照ビームFrefとを分離する27fsの時間遅延 τ での前記被特性評価ビームFcarおよび前記参照ビームFrefの時空間的プロファイルの第3のシミュレーションを示す。この第3のシミュレーションでは、参照ビームFrefは、事実上、もはや被特性評価ビームFcarと干渉しない。図6cは、図5cの配置に対応する、すなわち、参照ビームFrefと被特性評価ビームFcarとの間の27fsの時間遅延 τ の場合の第3の2次元干渉パターンを示す。次いで、カバーすべき時間間隔T1、または、等価的に、カバーすべき距離間隔 Δz は、当業者によく知られている方法で容易に計算することができる。したがって、距離間隔 Δz は、
40

【数 3】

$$\Delta z = \frac{\Delta x^2}{2L}$$

で表すことができ、ここで、 $\Delta x = \Delta y$ は被特性評価ビーム F c a r の半径であり、L は第 1 の光学部品 O 1 と測定面との間の距離である。 λ を被特性評価ビームの波長として、距離のステップはせいぜい $\lambda / 2$ にあることが分かっているので、完全な走査のために達成すべきステップの最小総数 N は、

$$N = \Delta x^2 / L \times \lambda$$

である。

10

【0071】

25 fs のパルスを発生し、100 TW のピークパワーに達するレーザ源 S L についての前に説明した特定の例では、被特性評価ビームは、半径 $\Delta x = 40 \text{ mm}$ および波長 $\lambda = 800 \text{ nm}$ を有する。

【0072】

したがって、特定のこの場合には、結果は、 $N = 2 \times 10^6 / L$ であり、第 1 の光学部品 O 1 と測定面との間の距離 L は mm 単位で表されている。したがって、完全な走査のために実行すべきステップの最小数 N があまり重要でないように、有利には、第 1 の光学部品 O 1 と測定面との間の距離 L に対して大きい値が使用されることになる。例えば、 $L = 1000 \text{ mm}$ では、実行すべきステップの最小数 N は、 $N = 2 \times 10^3$ に等しい。検討中のレーザ源 S L の反復率は 10 Hz であることが分かっているので、そのとき、測定点当たり単一レーザショットのみを実行することによる完全な走査は約 3 分を必要とする。

20

【0073】

測定点の数が重大になる、すなわち、測定点の数が、レーザ源 S L の速度を考慮すると長すぎる測定時間をもたらすという前提では、1 つの可能性は、いくつかの「精細」走査を実行することである、すなわち、上述で説明したようなシャノン基準を重んじるステップで実行することであり、それらのステップの間では、走査が、シャノン基準を重んじない非常に大きいステップで実行されることであることに留意すべきである。それにより、一連の連続しない同心リングにわたる被特性評価ビーム F c a r の特性評価が得られ、これは、多くの場合、被特性評価ビームに存在する時空間的歪みを評価するのに十分であり得る。

30

【0074】

次に、本発明の第 1 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法 10 のステップの説明が続く。図 2 a、図 2 b、および図 2 c を参照しながら前に説明した 3 つのステップが、ステップ P 1 で時間間隔 T 1 を掃引する時間遅延 τ ごとに繰り返されることを思い起こすことができる。したがって、これらの N 反復の終りに、センサ C C D は、ステップ P 1 で時間間隔 T 1 を掃引する時間遅延 τ ごとに、対応する 2 次元干渉パターン M 1 の画像、すなわち、N 個の画像を記録している。

【0075】

次いで、第 4 のステップ d) の間に、計算機 K は、N 個の 2 次元干渉パターン M 1 の前記 N 個の画像から、時間インターフェログラム S 1 を構築することができる。時間インターフェログラム S 1 は、2 つの横断方向 x および y と、時間遅延 τ とに依存し、時間遅延 τ はステップ P 1 で時間間隔 T 1 を掃引する。したがって、時間インターフェログラム S 1 は、 $S 1(x, y, \tau)$ と表すことができる。図 7 a は、所与の点 (x, y) で測定された部分的時間インターフェログラム p 1 の典型的な外観を示す。したがって、部分的時間インターフェログラム p 1 は、 $p 1_{x, y}(\tau)$ と表すことができる。時間インターフェログラム S 1 は、部分的時間インターフェログラム p 1 の、すべての点 (x, y) についての組として見ることができる。

40

【0076】

次いで、計算機 K は、後続の第 5 のステップ e) および第 6 のステップ f) を実行する

50

:

e) 点 (x, y) ごとに、変数 τ に関して時間インターフェログラム $S1$ のフーリエ変換 $S1'$ を計算して、周波数 ω の空間に渡す。したがって、フーリエ変換 $S1'$ は、 $S1'(x, y, \omega)$ と表すことができる。フーリエ変換 $S1'$ は、周波数中心ピーク f_c と、第1の周波数サイドピーク f_{l1} および第2の周波数サイドピーク f_{l2} とを有する。図7bは、図7aの部分的時間インターフェログラム $p1$ の部分フーリエ変換 $p1'$ の典型的な外観を示す。したがって、部分フーリエ変換 $P1'$ は、 $p1'_{x, y}(\omega)$ と表すことができる。したがって、部分フーリエ変換 $p1'$ は、所与の点 (x, y) における、フーリエ変換 $S1'$ の周波数中心ピーク f_c と第1の周波数サイドピーク f_{l1} および第2の周波数サイドピーク f_{l2} とを部分的に表す。フーリエ変換 $S1'$ は、部分フーリエ変換 $p1'$ の、すべての点 (x, y) についての組として見ることもできる。

10

【0077】

f) フーリエ変換 $S1'$ の第1の周波数サイドピーク f_{l1} または第2の周波数サイドピーク f_{l2} を選択し、選択された周波数サイドピークに対して、「相対スペクトル振幅」と呼ばれるスペクトル振幅 $A_R(\omega)$ と、「相対空間スペクトル位相」と呼ばれる空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ とを計算する。選択される周波数サイドピークの選択肢は、その後得られる結果に適用するための符号規約を決定する。

【0078】

選択された周波数サイドピークの空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ は、被特性評価ビーム $Fcar$ の空間スペクトル位相および参照ビーム $Fref$ の空間スペクトル位相の差である。選択された周波数サイドピークのスペクトル振幅 $A_R(\omega)$ は、被特性評価ビーム $Fcar$ のスペクトル振幅と参照ビーム $Fref$ のスペクトル振幅との積である。したがって、説明したステップにより：

20

- 参照ビームの空間スペクトル位相に対する被特性評価ビーム $Fcar$ の空間スペクトル位相、このゆえに、名称「相対空間スペクトル位相」と、
 - 参照ビームのスペクトル振幅に対する被特性評価ビーム $Fcar$ のスペクトル振幅、このゆえに、名称「相対スペクトル振幅」と
- を得ることが可能になる。

【0079】

したがって、被特性評価ビーム $Fcar$ のすべての点 (x, y) は、潜在的に未決定のままであり得る同じ参照と比較することができる。参照に対するビームのこのタイプの特性評価により、一般に、横断方向 x および y ならびに時間 t に応じての電磁場 $E(x, y, t)$ の形状の変動を取得することが可能になる。

30

【0080】

次に、測定システム $SM1$ のセンサ CCD によって2次元干渉パターン $M1$ の画像を遅延時間 τ ごとに取得する間に必要とされる空間分解能に戻る。例えば、図4に示すように、本発明の第1の実施形態による光ビームの特性評価のための方法10は、非常に密に詰まった干渉縞を測定することを意味する。これは、事実上平坦な波面、すなわち、被特性評価ビーム $Fcar$ の波面が、球状波面、すなわち、参照ビーム $Fref$ の波面と干渉させられることから生じる。したがって、再結合されたビームの中心から離れると、これらの2つの前面の間の角度は、例えば、図5aから図5cに示されるようになります。ますます大きくなり、その結果、干渉縞は、ますます密に詰まるようになる。例えば、80mmの直径の光ビーム FL を放出する上述の光源 SL の特定の場合のような大きい直径の光源 SL の場合には、これは、2次元干渉パターン $M1$ の測定、したがって、時間インターフェログラム $S1$ にとって利用可能な良好な空間分解能を有することを意味する。実際には、これは、画素の数が干渉縞の分解を可能にするのに十分であるカメラを使用することを課する。したがって、本明細書で説明する構成の例では、29Mpxカメラが使用される。他方では、これらの画素の組で被特性評価ビームの電磁場を再構築しようと努めることは必要でなく、その理由は、大多数の既存の光源では前記電磁場の構造がそのような高い周波数によって空間的に変化することがあまり起こりそうもないからである。x軸およびyの軸に

40

50

沿った 100×100 メッシングは、実際には、レーザビームを再構築して F_{car} を特性評価するのに全く十分である。したがって、処理すべきデータの量および処理時間を制限するために、有利には、2次元干渉パターンの画像が取得された後、2次元干渉パターンの画像をサブサンプリングすることと、データを初期画像のサブメッシングで単に保持することとが可能である。

【0081】

本発明の第1の実施形態の提供した説明の補足として、前記方法10の数学的解析が以下に提示される。 $E_{car}(x, y, z, t)$ を被特性評価ビーム F_{car} の電磁場とする。 $E_{ref}(x, y, z, t)$ を参照ビーム F_{ref} の電磁場とし、その正確な表現は、可能性として決定されないままとすることができ、または、その代わりに、後で説明する変形によって正確に決定することができる。前に説明したように、参照ビーム F_{ref} の電磁場 $E_{ref}(x, y, z, t)$ は、遅延時間 τ すなわち遅れ（リターデーション）によってシフトされることができ、被特性評価ビーム F_{car} の電磁場 $E_{car}(x, y, z, t)$ を基準にして可変である。

10

【0082】

被特性評価ビーム F_{car} の電磁場 $E_{car}(x, y, z, t)$ および参照ビーム F_{ref} の電磁場 $E_{ref}(x, y, z, t)$ は、複素数的に定義することができ、すなわち、一般形では、

【数4】

$$E(t) = \hat{E} \exp(i\omega_L t)$$

20

であり、ここで、

【数5】

$$\hat{E}$$

は複素包絡線であり、 ω_L は搬送周波数である。

【0083】

第1の面 z_1 の1つの点 (x, y, z_1) において、被特性評価ビーム F_{car} の場 $E_{car}(x, y, z, t)$ および参照ビーム F_{ref} の場 $E_{ref}(x, y, z, t)$ の重畳に由来する全場 $E_{tot}(x, y, z_1, t)$ は、

30

$$E_{tot}(x, y, z_1, t) = E_{car}(x, y, z_1, t) + E_{ref}(x, y, z_1, t - \tau)$$

に等しい。

【0084】

時間インターフェログラム S_1 が測定され、すなわち、第1の面 z_1 の各点の入射光の量が時間積分され、したがって、それは、

$$S_1(x, y, \tau) = \int |E_{car}(x, y, z_1, t) + E_{ref}(x, y, z_1, t - \tau)|^2 dt$$

40

に比例する。それゆえに、これは、

【数6】

$$\begin{aligned} S_1(x, y, \tau) = & \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ & + \int E_{car}(x, y, z_1, t) \times E_{ref}^*(x, y, z_1, t - \tau) dt \\ & + \int E_{car}^*(x, y, z_1, t) \times E_{ref}(x, y, z_1, t - \tau) dt \end{aligned}$$

になり、ここで、 ε_1 および ε_2 は、測定面 z_1 の点 (x, y) においてそれぞれ被特性評価ビーム F_{car} のみおよび参照ビーム F_{ref} のみで得られる信号である。

50

【0085】

時間インターフェログラム $S1(x, y, \tau)$ が τ に応じて測定される場合、したがって、3つの項が得られる。

【0086】

τ と無関係の第1の項 $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$ は、被特性評価ビーム F_{car} および参照ビーム F_{ref} のインコヒーレントな和である。

【0087】

$J(x, y, \tau) = \int E_{car}(x, y, z_1, t) \times E_{ref}^*(x, y, z_1, t - \tau) dt$ で示された第2の項は、被特性評価ビームの電磁場 $E_{car}(x, y, z_1, t)$ と参照ビームの電磁場 $E_{ref}(x, y, z_1, t)$ との間の相互相関関数である。

10

【0088】

$J^*(x, y, \tau) = \int E_{car}^*(x, y, z_1, t) E_{ref}(x, y, z_1, t - \tau) dt$ で示された第3の項は、第2の項の共役であり、すなわち、参照ビームの電磁場 $E_{ref}(x, y, z_1, t)$ と被特性評価ビームの電磁場 $E_{car}(x, y, z_1, t)$ との間の相互相関関数である。

【0089】

複素数および搬送包絡線への分解を使用することによって、第2の項 $J(x, y, \tau)$ の結果は、

【数7】

$$J(x, y, \tau) = e^{i\omega_L \tau} \int \hat{E}_{car}(x, y, z_1, t) \times \hat{E}_{ref}^*(x, y, z_1, t - \tau) dt$$

20

となる。したがって、関数 $J(x, y, \tau)$ は、 τ に応じて周波数 ω_L で振動し、一方、その共役は、 τ に応じて周波数 $-\omega_L$ で振動する。 τ に関して $S1(x, y, \tau)$ のフーリエ変換を実行することによって、それにより、上述の和の3つの項に対応して3つのピークが得られ、それぞれ、0、 ω_L 、および $-\omega_L$ の周波数に中心がある。この点は、前に説明した図7bに特に示されている。

【0090】

次いで、 $J(x, y, \tau)$ のフーリエ変換に対応するピークを選択することが可能である。

30

【0091】

$J(x, y, \tau)$ の前の式および相互相関定理によれば、関数 $J(x, y, \tau)$ の変数 τ に関するフーリエ変換 $J'(x, y, \omega)$ は、関係式

【数8】

$$J'(x, y, \omega) = \hat{E}_{car}'(x, y, z_1, \omega) \times \hat{E}_{ref}'^*(x, y, z_1, \omega) \otimes \delta(\omega - \omega_L)$$

で与えられ、ここで、 $\langle \rangle$ で示された関数は、 τ に関するフーリエ変換に対応する。言い換えれば、 τ に関して $S1(x, y, \tau)$ のフーリエ変換を実行することによって、およびこのフーリエ変換の ω_L に中心がある周波数サイドピークを選択することによって、被特性評価ビームの電磁場のスペクトル

40

【数9】

$$\hat{E}_{car}'(x, y, z_1, \omega)$$

と参照ビームの電磁場の共役スペクトル

【数10】

$$\hat{E}_{ref}'^*(x, y, z_1, \omega)$$

50

との積が得られる。 $-\omega_L$ に中心がある周波数サイドピークを選ぶこともできることが観察され得る。それにより、被特性評価ビームの電磁場の共役スペクトルと参照ビームの電磁場のスペクトルとの積が得られる。選択される周波数サイドピークの選択肢は、その後得られる結果に適用するための符号規約を簡単に決定する。

【0092】

それにより、上述のように、したがって、この測定は、スペクトル振幅および空間スペクトル位相の定義を使用して：

- － 被特性評価ビームの電磁場のスペクトル振幅と参照ビームの電磁場のスペクトル振幅との積を、

- － ならびに被特性評価ビームの電磁場の空間スペクトル位相および参照ビームの電磁場の空間スペクトル位相の差を取得する。

【0093】

次に、本発明の第1の実施形態の第1の変形が説明される。前記第1の変形は、有利には、ある期間にわたる、すなわち、一般に、パルス光源SLの場合におけるあるパルスから次のパルスまでの光源SLの強度および／または強度の空間的分布などの特性の潜在的な揺らぎを考慮に入れることを可能にする。掃引する時間間隔T1の間の光源SLの強度および／または強度の空間的分布の潜在的な揺らぎは、実際、測定された2次元干渉パターンM1、したがって、そこから推定される複素スペクトルを劣化させる可能性がある。

【0094】

この第1の変形では、本発明の第1の実施形態による光ビームの特性評価のための方法10は、ある期間にわたる光源SLの強度および／または強度の空間的分布などの少なくとも1つの特性を計算する、図8に示したステップg)を含む。次いで、強度の空間的分布を計算する場合には、前記計算は、実行された干渉測定での光源SLの強度の空間的分布の潜在的な揺らぎの影響を少なくとも部分的に修正するために使用することができる。光源SLの少なくとも1つの特性を計算するために、光ビームFLに単純なサンプル取得を実行することおよび前記サンプル取得を画像化することが可能である。これは、例えば、光学部品SRの上流で光ビームFLの経路に分離器光学部品を置くことによって実行される。しかしながら、この解決策は、大きい直径の超短ビームでは前記分離器光学部品が光ビームFLの時空間的特性に著しく影響する可能性があるので理想的ではない。優先の解決策は、部分的にのみ反射する第2の光学部品O2、すなわち、例えば、ベアガラススライドを使用することにある。次いで、被特性評価ビームFcarの空間的強度プロファイルを実行する第2の光学部品O2を透過した部分で測定することが可能であり、前記透過部分はその後干渉目的に使用されない。その上、部分反射光学部品の使用は、被特性評価ビームFcarおよび参照ビームFrefのエネルギーのより良好なバランス化に寄与し、それにより、2次元干渉パターンM1のより良好なコントラストを得ることを可能にする。

【0095】

図8に示された特定の例では、ステップg)は、光ビームFLの分離の第1のステップa)の後に、かつ参照ビームFrefと被特性評価ビームFcarとの再結合の第3のステップc)の前に実行される。図8の光学実装具は、図2aから図2cに関連して前に説明した光学実装具と比較して：

- － 被特性評価ビームFcarの一部を透過させることをさらに可能にする第2の光学部品O2、例えば、ベアガラススライドと、

- － 第2の測定システムSM2と、オプションとして、第2の計算機K2とを含む。

【0096】

第1の変形によれば、前記第1のステップa)の終りに、第2のサブビームF2は、第2の光学部品O2に伝搬する。第2の光学部品O2は、第2のサブビームF2の第1の部分を反射し、第2のサブビームF2の第2の部分を透過する。反射された第2のサブビームF2の第1の部分は、被特性評価ビームFcarの第1の部分であり、光学部品SRに

伝搬し、前に説明したように参照ビーム F_{ref} と再結合される。透過された被特性評価ビーム F_{car} の第 2 の部分は、被特性評価ビーム F_{car} の第 2 の部分であり、第 2 の測定システム SM_2 に伝搬する。

【0097】

第 2 の測定システム SM_2 は、被特性評価ビーム F_{car} の第 2 の部分が実質的に垂直な入射の下で前記第 2 の測定システム SM_2 に達するように配列される。さらに、第 2 の測定システム SM_2 は、図 2 a から図 2 c に関連して前に説明した第 1 の測定システム SM_1 と類似している。したがって、第 2 の測定システムは、被特性評価ビーム F_{car} の第 2 の部分のサイズに応じて：

- ただ一つのものとして、「 CCD_2 」で参照される 1 つの第 2 のセンサ CCD を、
- または第 2 のセンサ CCD_2 に加えて第 2 の拡散スクリーン E_2 および第 2 の対物レンズ Obj_2

を含む。これは、図 8 に、より詳細に示されている事例である。

【0098】

第 2 の拡散スクリーン E_2 は、ここで、面 Oxz に平行に配列されており、被特性評価ビーム F_{car} の第 2 の部分の信号 s_2 を拡散させる。第 2 の対物レンズ Obj_2 は、前記信号 s_2 を捕捉し、被特性評価ビーム F_{car} の第 2 の部分の縮小した画像を第 2 のセンサ CCD_2 に形成する。次いで、第 2 のセンサ CCD_2 は、被特性評価ビーム F_{car} の第 2 の部分の画像を記録する。次いで、前記画像は、被特性評価ビーム F_{car} の第 2 の部分の特性の分析のために、前に説明した計算機 K にまたは代替として第 2 の計算機 K_2 に送出することができる。被特性評価ビーム F_{car} の前記第 2 の部分の特性は、光束 FL の特性の特性値である。

【0099】

ちょうど説明したステップ g) は、ステップ P_1 で時間間隔 T_1 を掃引する時間遅延 τ ごとに少なくとも 1 回、すなわち、少なくとも N 回実行することができる。特に、パルス光源 SL の場合には、説明したステップ g) は、パルスごとに実行することができる。掃引持続時間を最小にするために、優先的に、遅延時間 τ 当たり単一パルスが使用される。しかしながら、時間間隔 T_1 の所与の遅延時間 τ では、いくつかのパルスが代替として使用されてもよい。

【0100】

次に、本発明の第 1 の実施形態の第 2 の変形が、図 9 に関連して説明される。前記第 2 の変形は、有利には、参照ビーム F_{ref} と無関係に被特性評価ビーム F_{car} の絶対特性評価を得ることを可能にする。第 1 の変形および第 2 の変形は、組み合わせるか、互いに無関係に使用することができることに留意すべきである。

【0101】

これは、被特性評価ビーム F_{car} の絶対特性評価を達成するために：

- 参照ビーム F_{ref} の空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ および
- 参照ビーム F_{ref} のスペクトル振幅 $A_{ref}(\omega)$

を測定することを必要とする。

【0102】

参照ビーム F_{ref} の前記空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ およびスペクトル振幅 $A_{ref}(\omega)$ が分かると、実際、被特性評価ビーム F_{ref} の絶対空間スペクトル位相および絶対スペクトル振幅を決定すること、および時間インターフェログラム S_1 の測定が実行された任意の点 (x, y) でそうすることが可能である。

【0103】

したがって、この第 2 の変形では、本発明の第 1 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法 10 は：

- 第 1 のサブビーム F_1 の空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を測定する図 9 に示されたステップ i) と、
- 第 1 のサブビーム F_1 のスペクトル振幅 $A_{ref}(x, y, \omega)$ を測定するステッ

プと
を含む。

【0104】

ちょうど説明した2つのステップは、一般に、同じデバイスによって同時に実行することができる。

【0105】

図9に示された特定の例では、ステップi)は、光ビームFLが第1のサブビームF1と第2のサブビームF2とに分離される第1のステップa)の後で、かつ第1のサブビームF1が第1の光学部品O1によって反射される第2のステップb)の前に実行される。図9の光学実装具は、図2aから図2cに関連して前に説明した光学実装具と比較して：

- 時間測定システムMTと、
- 着脱可能ミラーMaであり、それが所定に位置にあるとき、参照ビームの少なくとも1つの部分を時間測定システムMTに導くことを可能にする、着脱可能ミラーMaとを含む。

【0106】

第2の変形によれば、着脱可能ミラーMaは、第1のステップa)の終りに、前記第1のサブビームF1の少なくとも1つの部分が時間測定システムMTに伝搬するように第1のサブビームF1の第1の光路C1に配列される。着脱可能ミラーMaの代替として、第1のサブビームF1の第1の部分を透過し、第1のサブビームF1の第2の部分を反射できるようにする非着脱可能半反射光学部品の使用を想定することができる。しかしながら、光学部品を通るビームのいかなる透過も一般に前記ビームの特性に影響を及ぼすので、着脱可能ミラーMaを使用することが好ましい。時間の測定システムMTは、例えば：

- FROG（周波数分解光ゲート法）デバイス、
 - SPIDER（直接電場再構築のためのスペクトル位相干渉法）デバイス、または
 - SRSI（自己参照スペクトル干渉法）デバイス
- を使用することができる。

【0107】

したがって、これが、ちょうど説明したステップi)の終りに、第1のサブビームF1の空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ の測定結果をもたらす。次いで、例えば計算機Kによって相対空間スペクトル位相 $\phi_R(x, y, \omega)$ から前記空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を減じることによって、「絶対空間スペクトル位相」と呼ばれる被特性評価ビームFc arの空間スペクトル位相を取得することが可能である。

【0108】

スペクトル振幅 $A_{ref}(\omega)$ は、一般に、空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を測定するのに使用される時間測定システムMTのおかげで測定することができ、または代替として分光器を使用して測定することができる。

【0109】

それにより、参照ビームFrefのスペクトル振幅 $A_{ref}(\omega)$ の測定値が得られる。相対スペクトル振幅 $A_R(\omega)$ を参照ビームFrefのスペクトル振幅 $A_{ref}(\omega)$ で割ることによって、「絶対スペクトル振幅」と呼ばれる被特性評価ビームFc arのスペクトル振幅を取得することが可能である。

【0110】

本発明の第1の実施形態の第1の変形についてなされた説明に加えて、前記第1の変形の数学的解析が以下に提示される。本発明の第1の実施形態による光ビームの特性評価のための方法10は、実際、簡単な式を有する参照ビームの電磁場を得ることを可能にし、例えば、それは前記第2の変形によって実験的に決定することができる。

【0111】

(x_0, y_0) を第1の光学部品O1の第2の面z2の参照点の座標とする、すなわち、遅延時間 τ ごとに2次元干渉パターンM1の第1の測定面z1において被特性評価ビームFc arと有効に干渉する参照ビームFrefを発生する点とする。実際、第1の面z

1で被特性評価ビームF c a rと干渉する参照ビームF r e fが第1の面z 1の被特性評価ビームF c a rと比較して小さい第2の面z 2の前記参照ビームF r e fの一部から導き出される限り、前記参照点(x 0, y 0)は点光源であり、点光源の電磁場は均質であると考えることが可能である。実際には、第2の面z 2の参照ビームF r e fの前記部分の表面区域は、一般に、第1の面z 1の被特性評価ビームF c a rの表面区域の10%程度である。第2の面z 2における参照ビームF r e fの前記小さい部分の表面区域は、第1の光学部品O 1の表面と必ずしも等しくない。

【0112】

参照点場は、第2の面z 2において、次のように記される。

$$P_{ref}(t) = P_{ref}(x_0, y_0, z_2, t)$$

10

【0113】

すると、第1の測定面z 1における参照ビームF r e fの電磁場は、

$$E_{ref}(x, y, z_1, t) = P_{ref}(t - r/c)$$

で近似することができ、ここで、rは、座標(x 0, y 0, z 2)の参照点と、座標(x, y, z 1)の第1の測定面z 1の各点(x, y)との間に距離である。したがって、距離r(x, y)は、幾何学的に計算することができ、関係式

【数11】

$$r(x, y) = \sqrt{(D + f)^2 + x^2 + y^2}$$

20

で与えられ、ここで、D = z 1 - z 2は、第1の光学部品O 1と第1の面z 1との間の距離であり、fは、第1の光学部品O 1の焦点距離である。実際には、一般に、D ≫ fである。ここで説明する実施形態の特定の例では、D = 3 mおよびf = 250 mmである。したがって、第1の面z 1の参照ビームの電磁場のスペクトルは、関係式

【数12】

$$\hat{E}_{ref}'(x, y, z_1, \omega) = \hat{P}_{ref}'(\omega) \times \exp\left[i \times \frac{\omega}{c} \times r(x, y)\right]$$

で与えられる。振幅および位相に関する

【数13】

30

$$\hat{E}_{car}'(x, y, z_1, \omega)$$

の特性評価は、再度振幅および位相に関して

【数14】

$$\hat{E}_{ref}'(x, y, z_1, \omega)$$

(したがって、

【数15】

$$\hat{P}_{ref}'(\omega)$$

40

の測定を通して)が分かることを必要とする。1つの点の複素電磁場のこの測定は、前に述べたFROG、SPIDER、またはRSSI方法を使用している、現在市販のデバイスで実施されている既存の技術を使用して完全に実行することができる。

【0114】

次に、本発明の第1の実施形態の第3の変形が説明される。前記第3の変形は、有利には、第1の光学部品O 1によって潜在的に導入される参照ビームF r e fの波面の曲率、および/または第2の光学部品O 2によって潜在的に導入される被特性評価ビームF c a rの波面の曲率を考慮に入れることを可能にする。今までに説明した実施形態の例では、

50

第1の光学部品O1に入ったときの第1のサブビームF1は平面であり、第1の光学部品O1を出たときの参照ビームFrefは球状波である。したがって、第3の変形が、第1の光学部品O1によって導入される参照ビームFrefの波面の曲率を考慮に入れている事例がより詳細に説明される。前記第3の変形は、前に説明した第1の変形および／または第2の変形と組み合わせることができ、または前記第1および第2の変形と無関係に実施することができることに留意すべきである。

【0115】

前記第3の変形によれば、第1の光学部品O1での第1のサブビームF1の反射の後で、および参照ビームFrefの被特性評価ビームFcarとの再結合の前に、参照ビームの所与の周波数 ω_0 での空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ の測定が実行される。Shack-Hartmannデバイスが、一般に、参照ビームの空間位相の測定を実行するために使用され得る。前記空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ は、第1の光学部品O1によって導入された参照ビームFrefの波面の曲率の特徴を示す。

10

【0116】

したがって、例えば、計算機Kによって、前に得られた相対空間スペクトル位相または被特性評価ビームFcarの絶対空間スペクトル位相から空間スペクトル位相 $(\omega/\omega_0)\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ を減じて、それぞれ修正された相対空間スペクトル位相または被特性評価ビームFcarの修正された絶対空間スペクトル位相を得ることが可能である。

【0117】

20

この第3の変形の代替を想定することができ、次に、それが、図3に関連して説明される。図3は、光ビームの特性評価のための第2のデバイス2を示し、それは、代替として、本発明の第1の実施形態による方法10で実施することができる。デバイス2は：

- 光ビームFLを第1のサブビームF1と第2のサブビームF2とに分離するための分離器光学部品Osと、
- 第1の光学部品O1と、
- 波面修正器光学部品Corおよび第3の光学部品O3と、
- 有利には第1、第2、第3、および第4のミラーmi1、mi2、mi3、およびmi4を含む第2の光学部品O2と、
- 時間遅延 τ を制御する手段Pzと、
- 参照ビームFrefと被特性評価ビームFcarとの再結合のための再結合器光学部品Orと、
- 測定システムSM1と、
- 計算機Kと

30

を含む。

【0118】

第1の光学部品O1は、第1のサブビームF1の光路において分離器光学部品Osの下流に配列される。波面修正器光学部品は、参照ビームFrefの光路において第1の光学部品O1の下流に配列される。一般に平面ミラーである第3の光学部品O3は、参照ビームFrefの光路において波面修正器光学部品の下流でかつ再結合器光学部品Orの上流に配列される。

40

【0119】

第2の光学部品O2を形成する第1、第2、第3、および第4のミラーmi1からmi4は、第2のサブビームF2の光路において分離器光学部品Osの下流に配列される。再結合器光学部品Orは、参照ビームFrefの光路において第3の光学部品O3の下流だけでなく、被特性評価ビームFcarの光路において第2の光学部品O2の第4のミラーmi4の下流に配列される。

【0120】

波面修正器光学部品Corは、有利には、第1の光学部品O1での前記参照ビームFrefの反射に起因する前記参照ビームFrefの波面の曲率を修正すること、および前記

50

参照ビーム F_{ref} の平坦波面を得ることを可能にする。それにより、これは、有利には、参照ビーム F_{ref} と被特性評価ビーム F_{car} との間の 2 次元干渉パターン M_1 に対してそれほど密に詰められていない干渉縞を得ることに寄与する。前記干渉縞間の間隔を増加させると、測定システム SM_1 への空間分解能制約を緩和することが可能になる。実際、干渉縞が密に詰められれば詰められるほど、測定システム SM_1 の空間分解能は高くなければならない。前記干渉縞間の間隔を大きくすると、走査すべき時間間隔を減少させることも可能になる。

【0121】

これは、参照ビーム F_{ref} の光路において第 1 の光学部品 O_1 の下流でかつ再結合器光学部品 O_r の上流に波面修正器光学部品 $C_o r$ を導入することを必要とする。図 3 に示した代替構成のおかげで、光学実装具にそのような修正器光学部品を導入することが、被特性評価ビーム F_{car} に影響を及ぼさない。波面修正器光学部品 $C_o r$ は、一般に、参照ビーム F_{ref} の平坦波面を維持しながら参照ビーム F_{ref} を広げることを可能にする：

- 第 1 の光学部品 O_1 が収束レンズの主物体焦点に配置されるように配列された収束レンズ、

- 発散ミラーおよび収束ミラーを含む望遠鏡

とすることができる。

次いで、修正器光学部品 $C_o r$ を出る参照ビーム F_{ref} は平行であり、実質的に平坦な波面を有する。

【0122】

デバイス 2 は、有利には、第 2 の光学部品 O_2 を形成する第 1、第 2、第 3、および第 4 のミラー m_{i1} 、 m_{i2} 、 m_{i3} 、および m_{i4} を含む。第 1 のミラー m_{i1} は、第 2 のサブビーム F_2 の光路において分離器光学部品 O_s の下流に配列される。第 1 のミラー m_{i1} は、第 2 のサブビーム F_2 を制御手段 P_z に導くことを可能にする。ここで説明する特定の構成では、制御手段 P_z は、 z 軸に沿って第 2 のミラー m_{i2} および第 3 のミラー m_{i3} の位置付けを同時に調節することを可能にする。制御手段 P_z は、有利には、第 2 のミラー m_{i2} および第 3 のミラー m_{i3} を正確に、同時に、および同様に移動させるための単一の圧電ステージを含む。代替として、制御手段 P_z は、第 2 のミラー m_{i2} および第 3 のミラー m_{i3} の各々のための圧電ステージを含むことができる。第 2 のサブビーム F_2 は、第 3 のミラー m_{i3} を出るとすぐに第 4 のミラー m_{i4} に導かれる。第 4 のミラー m_{i4} は、第 2 のサブビーム F_2 を再結合器光学部品 O_r に導くことを可能にする。第 1、第 2、第 3、および第 4 のミラー m_{i1} から m_{i4} と制御手段 P_z との説明したアセンブリのおかげで、参照ビーム F_{ref} と被特性評価ビーム F_{car} との間の遅延時間 τ は、有利には、光学実装具の位置合せを維持しながら正確に制御することができる。実際、制御手段 P_z によって制御された第 2 ミラー m_{i2} および第 3 のミラー m_{i3} の z 軸に沿った平行移動は、第 1 のミラー m_{i1} および第 4 のミラー m_{i4} も他の光学部品要素も再位置合わせを必要としない。

【0123】

次に、本発明の第 1 の実施形態の第 4 の変形が説明される。前記第 4 の変形は、有利には、被特性評価ビーム F_{car} のスペクトルと参照ビーム F_{ref} のスペクトルとが重ならないかまたは部分的にしか重ならない第 1 の測定面 z_1 の被特性評価ビーム F_{car} の潜在的な点 (x, y) を識別することを可能にする。実際、そのような点 (x, y) では、被特性評価ビーム F_{car} と参照ビーム F_{ref} との間に干渉が生じず、本発明の第 1 の実施形態による光ビームの特性評価のための方法 10 は、限界に直面する。しかしながら、これらのまれな場合は、ある一定のタイプの時空間的結合で、例えば、被特性評価ビーム F_{car} が、第 1 の測定面 z_1 において空間「チャープ」または空間周波数ドリフトを有する場合、すなわち、被特性評価ビーム F_{car} のスペクトル振幅が空間的に変化する場合、生じることがある。前記第 4 の変形は、前に説明した第 1 の変形および／または第 2 の変形および／または第 3 の変形と組み合わせることができ、または前記第 1、第 2

、および第3の変形と無関係に実施することができることに留意すべきである。

【0124】

したがって、本発明の第1の実施形態の第4の変形では、第1の平面光学部品O1と第2の平面光学部品O2との使用が提案される。そして、参照ビームF r e fは被特性評価ビームF c a rと同一であり、それにより、調達された光学実装具は、被特性評価ビームの各点をそれ自体と干渉させることを可能にする。次いで、空間分解フーリエ分光法を実行することが可能である。被特性評価ビームF c a rの各点で測定された時間インターフェログラムのフーリエ変換により、その点の各々の被特性評価ビームのスペクトル強度を取得することが可能になる。次いで、ビームのある一定の点の空間チャープの潜在的な問題を検出することができ、それにより、本発明の第1の実施形態による方法10によって

10

【0125】

次に、本発明の第1の実施形態の第5の変形が説明され、それは、有利には、被特性評価ビームF c a rのスペクトルと参照ビームF r e fとのスペクトルが重ならないかまたは部分的にしか重ならない、第1の測定面z1における被特性評価ビームF c a rの潜在的な点(x, y)を少なくとも部分的に除去することを可能にする。前記第5の変形は、前に説明した第1、第2、第3、および第4の変形の1つまたは複数と組み合わせることができ、または前記第1、第2、第3、および第4の変形と無関係に実施することができることに留意すべきである。

20

【0126】

したがって、本発明の第1の実施形態の第5の変形では、第1のサブビームF1の品質を向上させるために前記第1のサブビームF1のフィルタ処理のステップを加えることが提案される。前記フィルタ処理ステップは、一般に、第1のサブビームF1の光路への非線形光学部品要素の導入にあり得る。図10は、図2a、図2b、および図2cに関連して前に説明した光学実装具を概略的に示し、非線形光学部品要素F R N Lが第1のサブビームF1の光路に配列されている。前記非線形光学部品要素は、非線形光学部品要素を出たときに、最初の第1のサブビームのすべてのスペクトル成分を含む第1のフィルタ処理されたサブビームの発生を可能にし、被特性評価ビームF c a rと最適な方法で干渉できるように選ばれる。一般的に言えば、それは、第1のフィルタ処理されたサブビームのスペクトルが第1のフィルタ処理なしのサブビームのスペクトルを含むことを意味する。そのようなフィルタ処理ステップは、一般に、「X P W」と呼ばれる3次非線形プロセスに基づく。その3次非線形性のために、X P Wプロセスは、入射参照ビームF r e fのスペクトルをかなり広げる。したがって、これは、参照ビームF r e fと被特性評価ビームF c a rとの間のスペクトル重なり of 潜在的な問題を著しく制限することに寄与する。その上、X P Wプロセスは、時間フィルタとして働き、その結果、入射参照ビームがそのフーリエ限界からあまり遠くないとき、非線形光学部品要素を出たときのフィルタ処理された参照ビームはフーリエ変換によって制限されると見なすことができることが実証されている。言い換えれば、入射参照ビームの空間スペクトル位相が比較的平坦あり、前記参照ビームがX P Wプロセスによって広げられる場合、フィルタ処理された参照ビームは、やはり、平坦な空間スペクトル位相を有すると考えることができる。したがって、これは、可能性として、参照の空間スペクトル位相を測定するステップを除去することを可能にすることになる。

30

40

【0127】

次に、本発明の第1の実施形態の第6の変形が説明され、それは、有利には、参照ビームF r e fにわたる潜在的な残留時空間的結合を考慮に入れることを可能にする。前記第6の変形は、前に説明した第1、第2、第3、第4、および第5の変形の1つまたは複数と組み合わせることができ、または前記第1、第2、第3、第4、および第5の変形と無関係に実施することができることに留意すべきである。

【0128】

50

本発明の第1の実施形態では、第1の光学部品O1の表面の上流の第1のサブビームF1の電磁場は一樣であるという仮定がなされている。しかしながら、第1の光学部品O1は有限の表面を有し、その直径はあまり小さくなるように選ばれ得ず、そうでなければ、第1の光学部品O1の下流の参照ビームと被特性評価ビームとの間の信号比は、1からあまりにも異なることになり、良好なコントラストで2次元干渉パターンを観察できなくなる。これらの条件では、第1の光学部品O1の上流の第1のサブビームF1の時空間的結合は、前記第1のサブビームF1の電磁場が第1の光学部品O1の表面全体にわたって均質であると思なすには系統的に十分に弱くない。それにより、この近似は、最終的に再構築された被特性評価ビームFcarの電磁場に誤差を誘起することがある。

【0129】

したがって、本発明の第1の実施形態の第6の変形では、以下の反復アルゴリズムを使用することが提案される：

i. 第1のサブビームF1の電磁場が第1の光学部品O1にわたり事実上均質であることが仮定され、前に説明したように、測定面z1の参照ビームFrefの電磁場がそれから推定される、

ii. 測定面z1の参照ビームFrefの前記場が分かり、本発明の第1の実施形態による方法10を使用して測定された時間インターフェログラムS1を使用することにより、第1のサブビームF1の場の再構築が、空間においておよび時間において、または空間においておよび周波数において推定される、

iii. 第1のサブビームF1の場のこの再構築は、第1の光学部品O1で反射されて、測定面z1の参照ビームFrefの場を生成する第1のサブビームF1の場の一部を含み、それはこのスケールでは必ずしも空間的に均質でない。この再構築は、測定面z1の参照ビームの新しい場を決定するのに使用され、このときそれは、第1のサブビームF1の場が第1の光学部品O1の表面全体にわたって均質であるという前提にもはや基づいていない。

【0130】

次いで、参照ビームFrefのこの新しい場は、ステップiiにおいて再導入され、ステップiiおよびステップiiiは：

- 被特性評価ビームFcarの電磁場が再構築され、
- 第1の測定面z1の参照ビームの電磁場が、制限された表面でさえ潜在的に非均質であるこの場の第1の光学部品O1による拡大の結果であるように自己矛盾のない解に向かって収束するまで反復して繰り返される。

【0131】

説明したこのタイプの反復アルゴリズムは、T. Oksenhendler等「Self-referenced spectral interferometry」、Applied Physics B (99)、7-12の論文に、より詳細に記載されている。

【0132】

次に、「ワンショットモード」と呼ばれる本発明の第2の実施形態が説明される。

【0133】

図11aは、光ビームの特性評価のための第3のデバイス3を使用する、本発明の第2の実施形態による光ビームの特性評価のための方法20を示す。

【0134】

第3のデバイス3は、第2のタイプの測定システムSM3を含み、第2のタイプの測定システムSM3は：

- 入口スリットFeを有する分光器SPと、
- 第1の測定システムSM1および第2の測定システムSM2に関して前に説明したようなカメラのセンサCCDとを含む。

【0135】

図11bは、光ビームの特性評価のための第3のデバイス3の部分的斜視図を示す。このように、図11bは、方向xに沿って向きを定められた入口スリットFeを有する分光器SPを示す。

【0136】

図11cは、本発明の第2の実施形態による光ビームの特性評価のための方法20のステップの間に分光器SPによって実験的に測定された所与の遅延時間 τ の2次元干渉パターンM1の周波数スペクトルSpeの一例を示す。このように、図11cの周波数スペクトルSpeは、2次元干渉パターンM1が分光器SPのスリットFeによって捕捉された方向xの周波数情報を含む。

【0137】

図12aは、光ビームの特性評価のための第4のデバイス4を使用する、本発明の第2の実施形態による光ビームの特性評価のための方法20の代替構成を示す。第4のデバイス4は、第2のタイプの測定システムSM4を含み、第2のタイプの測定システムSM4は：

- 入口スリットFeを有する分光器SPと、
- 第1の測定システムSM1および第2の測定システムSM2に関して前に説明したものなどのカメラのセンサCCDと、
- 複数の光ファイバfo_1、fo_2、…、fo_nとを含む。前記複数光ファイバは、少なくとも2つの光ファイバを含む。複数の光ファイバの光ファイバの数は、センサCCDの垂直画素の数以下である。垂直画素のこの数は、500を超えることがある。

優先的に、前記複数の光ファイバは、4と100との間に含まれる光ファイバの数を含む。

【0138】

複数の光ファイバfo_1、fo_2、…、fo_nの入力端部は、第1の面z1に、優先的に、2次元マトリクスで、すなわち、少なくとも2つのラインおよび2つの列を含んで、代替として、マトリクス—ラインで、すなわち、単一のラインおよびいくつかの列を含んで、またはマトリクス—列で、すなわち、単一の列およびいくつかのラインを含んで配列される。マトリクスが2次元である場合、2次元干渉パターンM1の信号は、有利には、第1の面z1の2つの空間次元に沿ってサンプリングされ得る。

【0139】

図12bの例では、2次元マトリクスは、数 $L > 1$ のラインと、数 $C > 1$ の列とを有し、各ラインはy軸と平行に延び、各列はx軸と平行に延び、x軸とy軸とは直交する。より一般的には、各ラインは第1の軸と平行に延びることができ、各列は第1の軸と別の第2の軸と平行に延びることができ、第1の軸と第2の軸とは、それらの間に非ゼロの角かつ非平角を形成する。2次元マトリクスは、優先的には、正方形であり、すなわち、列と同数のラインを有し、または代替として長方形であり、すなわち、数Cの列と異なる数Lのラインを有する。

【0140】

次いで、複数の光ファイバfo_1、fo_2、…、fo_nの出力端部が、分光器SPの入口スリットFeに、有利には、光ファイバの各々から来る信号を空間的に分離するように注意して配列される。

【0141】

図12bは、光ビームの特性評価のための第4のデバイス4の部分的斜視図を示す。したがって、図12bは、複数の光ファイバfo_1、fo_2、…、fo_nの出力端部が2次元マトリクスに配列されている第1の面z1と、前記複数の光ファイバの出力端部が整列されている分光器SPの入口スリットFeとを示す。

【0142】

図9に関連して前に説明した、および、有利には、参照ビームFrefと無関係に被特性評価ビームFcarの絶対特性評価を得ることを可能にする第1の実施形態による方法10の第2の変形は、さらに、本発明の第2の実施形態による方法20と両立する。した

10

20

30

40

50

がって、この第2の変形では、本発明の第2の方式による光ビームの特性評価のための方法20は：

- ー 第1のサブビームF1の空間スペクトル位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega)$ を測定する図9に示されたステップi)と、
- ー 第1のサブビームF1のスペクトル振幅 $A_{ref}(\omega)$ を測定するステップとを含む。

【0143】

前に説明した、および第1の光学部品O1によって導入された参照ビームFrefの波面の曲率を考慮に入れることを有利には可能にする第1の実施形態による方法10の第3の変形は、やはり、本発明の第2の実施形態による方法20と両立する。次いで、第3の変形は、当然、第2の変形と組み合わせることができ、または前記第2の変形と無関係に実施することができる。

【0144】

したがって、本発明の第2の方式による光ビームの特性評価のための方法20の第3の変形では、第1の光学部品O1での第1のサブビームF1の反射の後で、かつ参照ビームFrefの被特性評価ビームFcarとの再結合の前に、参照ビームの周波数 ω_0 での空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ の測定が実行される。前記空間位相 $\phi_{ref}(x, y, \omega_0)$ は、第1の光学部品O1によって導入された参照ビームFrefの波面の曲率の特徴を示す。

【0145】

前に説明した第3の変形の代替は、やはり、本発明の第2の実施形態と両立する。

【0146】

前に説明した、および被特性評価ビームFcarのスペクトルと参照ビームFrefのスペクトルとが重ならないかまたは部分的にしか重ならない第1の測定面z1における被特性評価ビームFcarの潜在的な点(x, y)を識別することを有利には可能にする第1の実施形態による方法10の第4の変形は、やはり、本発明の第2の実施形態と両立する。次いで、第4の変形は、当然、第2の変形および／または第3の変形と組み合わせることができ、または前記第2の変形および前記第3の変形と無関係に実施することができる。

【0147】

図10に関連して前に説明した、および被特性評価ビームFcarのスペクトルと参照ビームFrefのスペクトルとが重ならないかまたは部分的にしか重ならない第1の測定面z1における被特性評価ビームFcarの前記潜在的な点(x, y)を少なくとも部分的に除去することを有利には可能にする本発明の第1の実施形態による方法10の第5の変形は、やはり、本発明の第2の実施形態による方法20と両立する。次いで、前記第5の変形は、当然、前に説明した第2、第3、および第4の変形のうちの1つまたは複数と組み合わせることができ、または前記第2、第3、および第4の変形と無関係に実施することができることに留意すべきである。

【0148】

本発明の第1の実施形態による方法10の第6の変形は、やはり、第2の実施形態による方法20と両立する。第2の実施形態による方法20に適用される、第6の変形による反復アルゴリズムは、以下の通りである：

i. 第1のサブビームF1の電磁場が第1の光学部品O1にわたり事実上均質であることが仮定され、前に説明したように、測定面z1の参照ビームFrefの電磁場がそれから推定される、

ii. 測定面z1の参照ビームFrefの前記場が分かり、本発明の第2の実施形態による方法20のおかげで測定された少なくとも1つの周波数インターフェログラムを使用することにより、第1のサブビームF1の場の再構築が、空間においておよび時間において、または空間においておよび周波数において推定される、

iii. 第1のサブビームF1の場のこの再構築は、第1の光学部品O1で反射されて

、測定面 z_1 の参照ビーム F_{ref} の場を生成する第 1 のサブビーム F_1 の場の一部を含み、それはこのスケールでは必ずしも空間的に均質でない。この再構築は、測定面 z_1 の参照ビームの新しい場を決定するのに使用され、このときそれは、第 1 のサブビーム F_1 の場が第 1 の光学部品 O_1 の表面全体にわたって均質であるという前提にもはや基づいていない。

【0149】

本明細書において、「周波数インターフェログラム」は、参照ビーム F_{ref} と被特性評価ビーム F_{car} との間の、固定した時間遅延 τ_0 で周波数 ω に応じて測定された空間干渉パターンを意味するものとする。測定された空間干渉パターンは 1 次元または 2 次元とすることができる。

10

【0150】

— 測定された空間干渉パターンが 1 次元である場合、周波数インターフェログラムは、1 つの空間次元に沿ったおよび 1 つの周波数次元に沿った情報、したがって、2 次元情報を含む。

【0151】

— 測定された空間干渉パターンが 2 次元である場合、周波数インターフェログラムは、2 つの空間次元に沿ったおよび 1 つの周波数次元に沿った情報、したがって、3 次元情報を含む。

【0152】

2 次元周波数インターフェログラムは、単一のレーザショットで得られ、イメージング分光器の入口スリットに沿った空間分解能を利用することができる。他方、3 次元周波数インターフェログラムを得るには、分光計の入口スリットにわたるレーザビームを、2 つの空間次元のうちの 1 つに沿って掃引することが必要とされる。

20

【0153】

次いで、参照ビーム F_{ref} のこの新しい場は、ステップ i_i において再導入され、ステップ i_i およびステップ i_{ii} は：

— 被特性評価ビーム F_{car} の電磁場が再構築され、
— 第 1 の測定面 z_1 の参照ビームの電磁場が、制限された表面でさえ潜在的に非均質であるこの場の第 1 の光学部品 O_1 による拡大の結果である
ように自己矛盾のない解に向かって収束するまで反復して繰り返される。

30

【図 1 a】

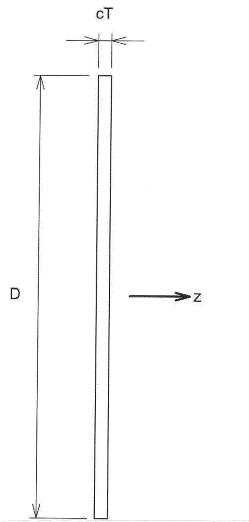


Fig. 1a

【図 1 b】

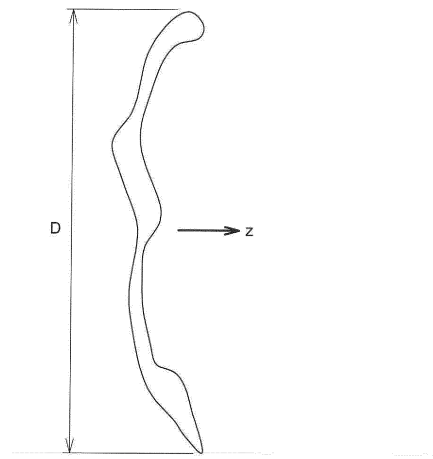


Fig. 1b

【図 2 a】

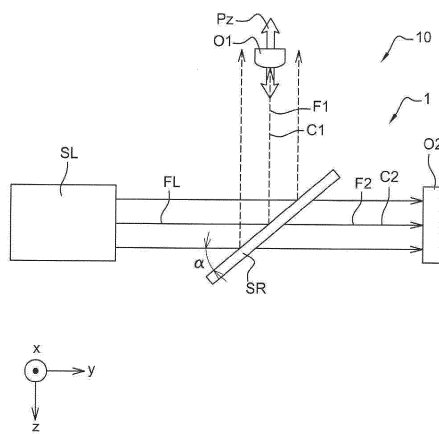


Fig. 2a

【図 2 b】

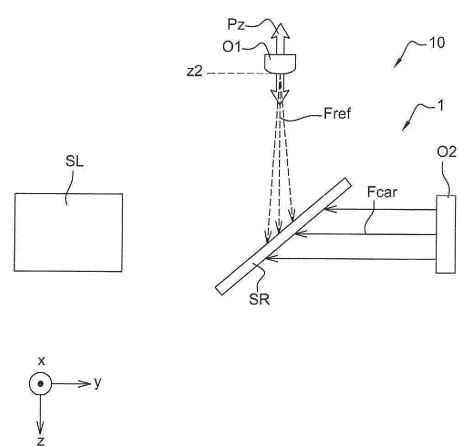
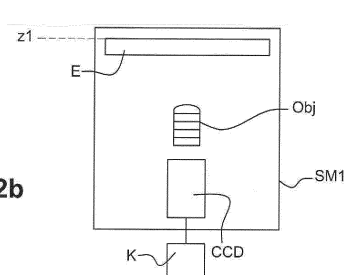
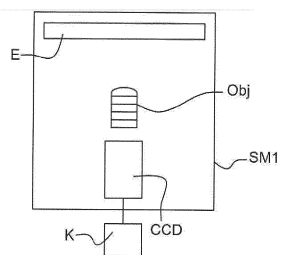
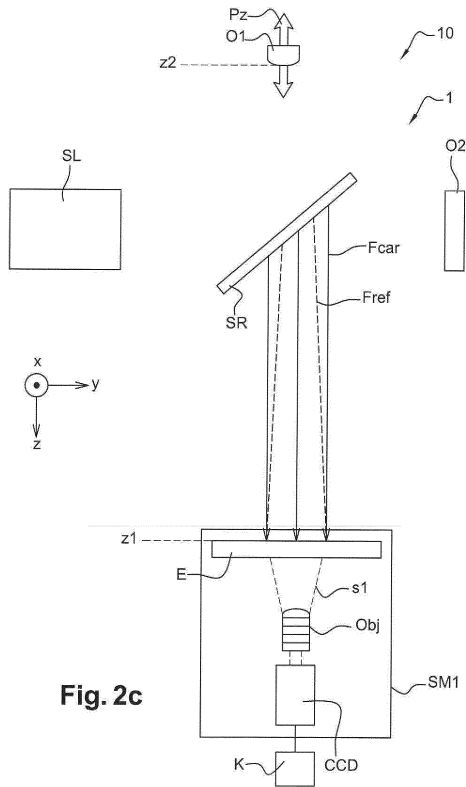


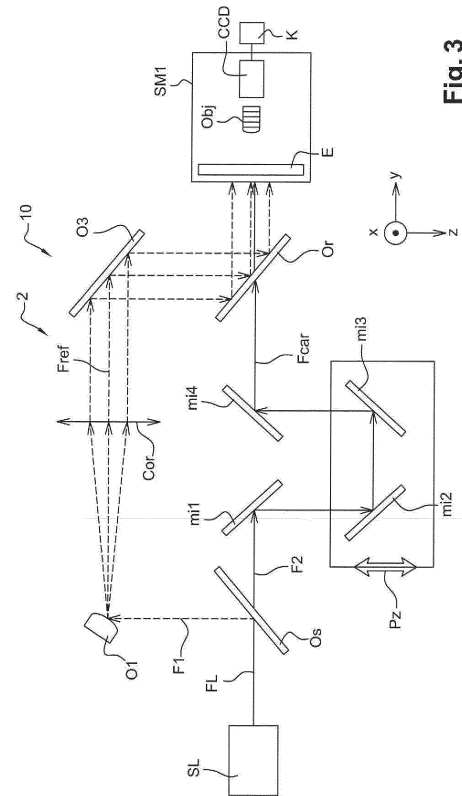
Fig. 2b



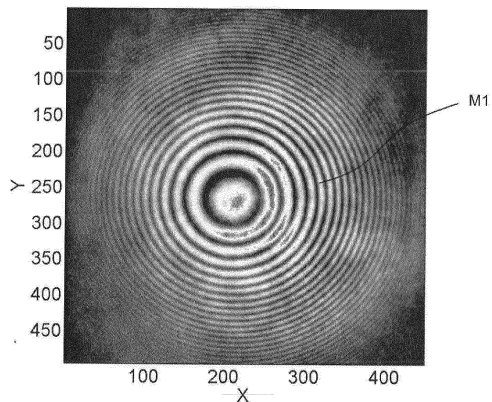
【図 2 c】



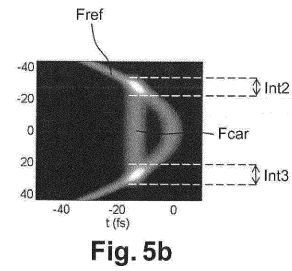
【図 3】



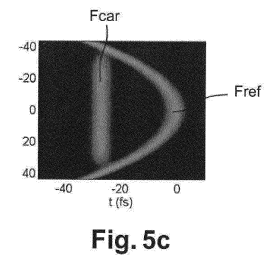
【図 4】



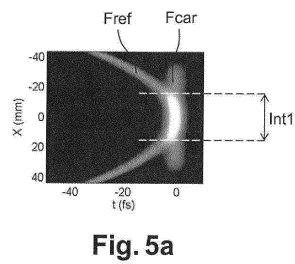
【図 5 b】



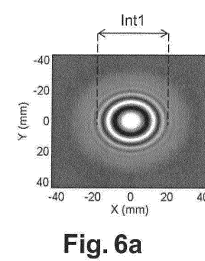
【図 5 c】



【図 5 a】



【図 6 a】



【図 6 b】

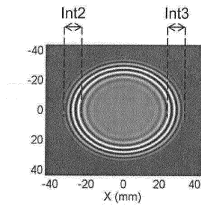


Fig. 6b

【図 6 c】

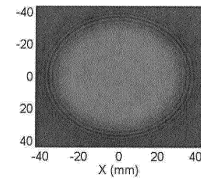


Fig. 6c

【図 7 a】

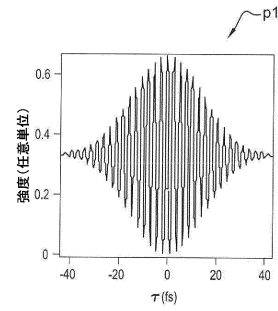


Fig. 7a

【図 7 b】

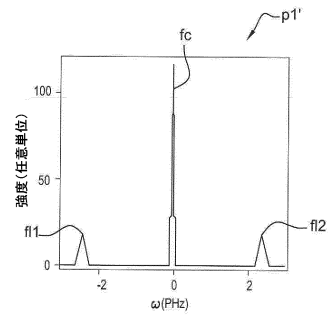


Fig. 7b

【図 8】

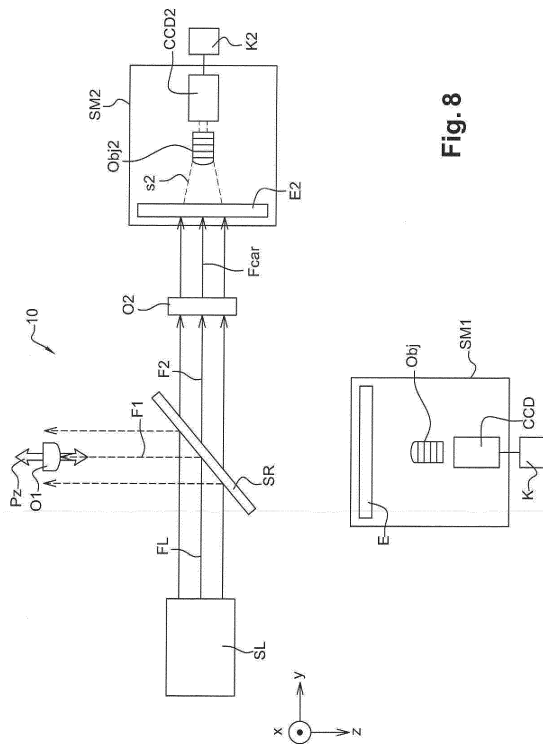


Fig. 8

【図 9】

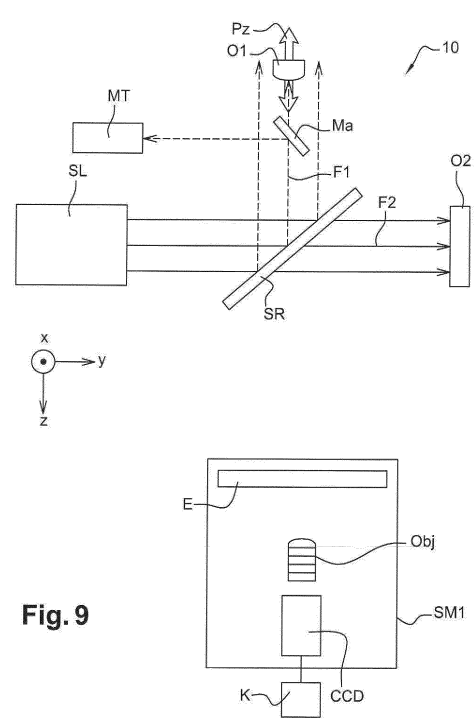
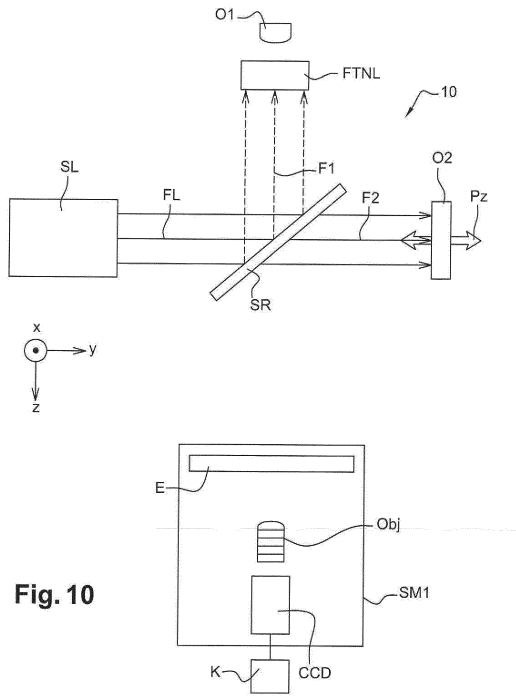
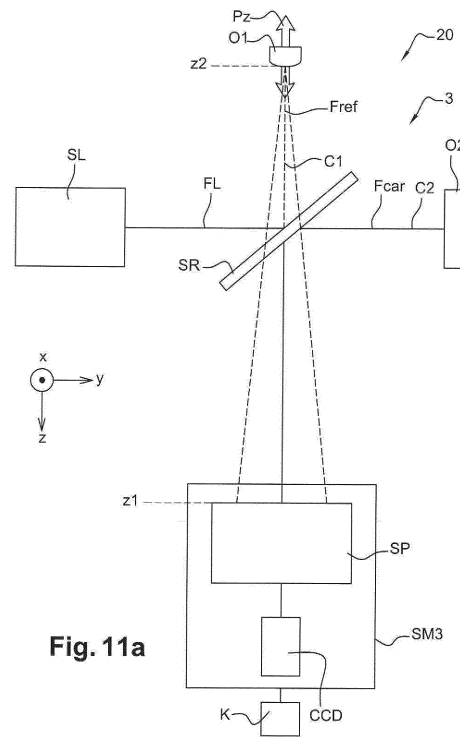


Fig. 9

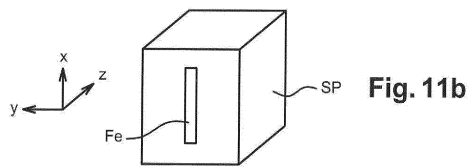
【図 10】



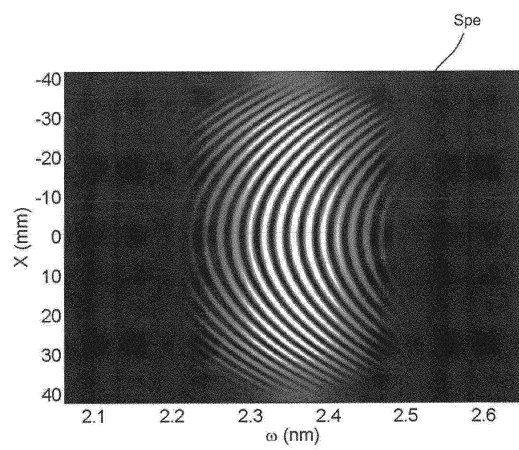
【図 11 a】



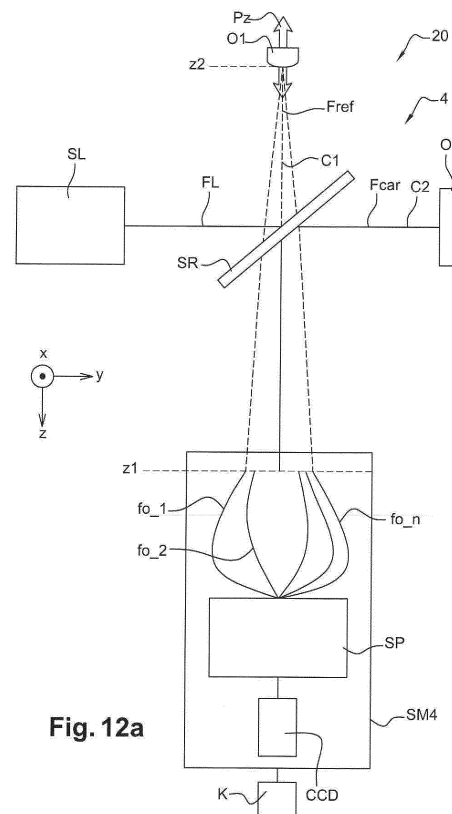
【図 11 b】



【図 11 c】



【図 12 a】



【図 12 b】

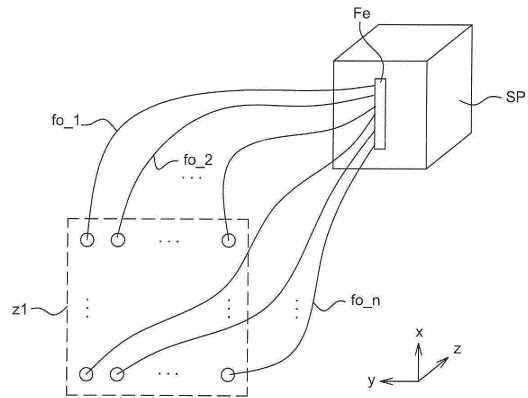


Fig. 12b

フロントページの続き

(72)発明者 ガレ, バランタン

フランス国、9 1 3 6 0・エピネイ・シュール・オルジュ、リュ・デ・サブロン、2 1

(72)発明者 パリアント, ギュスターブ

フランス国、7 5 0 1 3・パリ、ブルバール・ドゥ・ロピタル、1 0 0

審査官 横尾 雅一

(56)参考文献 特表2017-519988 (JP, A)

国際公開第2006/018897 (WO, A1)

特公昭51-019996 (JP, B1)

特開昭63-238525 (JP, A)

米国特許第05754292 (US, A)

BENJAMIN ALONSO, FREQUENCY RESOLVED WAVEFRONT RETRIEVAL AND DYNAMICS OF DIFFRACTIVE FOCUSED ULTRASHORT PULSES, JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA - B, 米国, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, 2012年 8月, VOL:29, NR:8,, PAGE(S):1993 - 2000, URL, <http://dx.doi.org/10.1364/JOSAB.29.001993>

DORRER C, CHARACTERIZATION OF THE SPECTRAL PHASE OF ULTRASHORT LIGHT PULSES, COMPTES RENDUS DE L'ACADEMIE DES SCIENCES - SERIES IV - PHYSICS-ASTROPHYSICS, EDITIONS SCIENTIFIQUES ET MEDICALES ELSEVIER, 2001年12月, VOL:2, NR:10,, PAGE(S):1415 - 1426, URL, [http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2147\(01\)01279-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2147(01)01279-3)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01J 9/00-9/04

G01J 11/00

H01S 3/00

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580 (JDreamII)