

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-535552
(P2004-535552A)

(43) 公表日 平成16年11月25日(2004.11.25)

(51) Int.Cl.⁷

GO1N 21/17
A61B 10/00
GO1B 9/02
GO1B 11/24
GO2B 26/00

F 1

GO1N 21/17
A61B 10/00
GO1B 9/02
GO2B 26/00
GO2B 26/10

620
E
GO1B
GO2B
26/10

テーマコード(参考)

2FO64
2FO65
2GO59
2HO41
2HO45

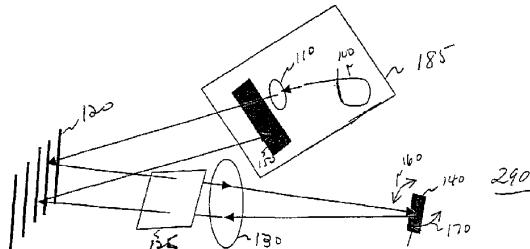
審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 39 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2002-569977(P2002-569977)	(71) 出願人	390032414 カールツアイスースチフツング CARL-ZEISS-STIFTUNG ドイツ連邦共和国ハイデンハイム アン デア ブレンツ (番地なし)
(86) (22) 出願日	平成14年3月1日(2002.3.1)	(71) 出願人	503317201 カールツアイス メディテック インコ ーポレイテッド Carl Zeiss Meditec, Inc.
(85) 翻訳文提出日	平成15年9月1日(2003.9.1)	(71) 出願人	アメリカ合衆国 カリフォルニア ダブリ ン アシェンダ ドライブ 5160
(86) 國際出願番号	PCT/EP2002/002231	(74) 代理人	100061815 弁理士 矢野 敏雄
(87) 國際公開番号	W02002/071117		
(87) 國際公開日	平成14年9月12日(2002.9.12)		
(31) 優先権主張番号	09/797,748		
(32) 優先日	平成13年3月1日(2001.3.1)		
(33) 優先権主張國	米国(US)		
(81) 指定國	EP(AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), JP		

(54) 【発明の名称】光学遅延線

(57) 【要約】

本発明の第1の実施形態は光学遅延線であり、この光学遅延線は、相互に光学的にコミュニケーションする複数の光学素子を有しており、(a)これらの光学素子のうちの少なくとも1つは、光信号のスペクトルを空間的に分散させて、空間的に分散された光信号を生成することができ、(b)これらの光学素子のうちの少なくとも1つは調整可能であり、光信号の位相遅延および群遅延の1つまたは複数に影響を与え、(c)これらの光学素子のうちの少なくとも1つは、他の光学素子によって光信号内に導入された偏光を補正する。



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

光学遅延線であって、

相互に光学的にコミュニケーションする複数の光学素子を有しており、

当該複数の光学素子のうちの少なくとも1つは、光信号のスペクトルを空間的に分散させて、空間的に分散された光信号を形成し、

前記複数の光学素子のうちの少なくとも1つは調整可能であり、光信号の位相遅延および群遅延の1つまたは複数に影響を与える、

前記複数の光学素子のうちの少なくとも1つは、他の光学素子によって光信号内に導入された偏光を補正する、

ことを特徴とする光学遅延線。

【請求項 2】

少なくとも1つの調整可能な光学素子は繰り返し走査して、光学群遅延および時間で変化する光学位相遅延を変化させる、請求項1記載の光学遅延線。

【請求項 3】

前記空間的分散素子は回折性素子を含む、請求項1記載の光学遅延線。

【請求項 4】

前記調整可能な光学素子はミラーを含む、請求項1記載の光学遅延線。

【請求項 5】

前記ミラーは回転機構によって回転させられる、請求項4記載の光学遅延線。

【請求項 6】

前記回転機構は検流計を含む、請求項5記載の光学遅延線。

【請求項 7】

前記調整可能な光学素子は回転多角形ミラーを含む、請求項1記載の光学遅延線。

【請求項 8】

前記複数の光学素子のうちの少なくとも1つは重行路ミラーである、請求項4記載の光学遅延線。

【請求項 9】

光学遅延線であって、

コリメーターレンズ系と、

当該コリメーターレンズ系からの放射出力を受け取るように配置された格子と、

当該格子によって回折された放射の少なくとも一部を受け取るように配置されたコレクターレンズ系と、

実質的に当該コレクターレンズ系の後焦点面に配置された回転可能なミラーと、

前記格子によって回折された放射の少なくとも一部を反射するように配置された反射器と、

当該光学遅延線を通過する放射の経路内に配置された偏光補償窓を有している、
ことを特徴とする光学遅延線。

【請求項 10】

前記コリメーターレンズ系、前記反射器および光ファイバーの出力端部がユニットに固定され、

当該ユニットは移動機構によって動かされる、請求項9記載の光学遅延線。

【請求項 11】

光学遅延線であって、

コリメーターレンズ系と、

当該コリメーターレンズ系からの放射出力を受け取るように配置された格子と、

当該格子によって回折された放射の少なくとも一部を受け取るように配置されたコレクターレンズ系と、

実質的に当該コレクターレンズ系の後焦点面に配置された回転可能なミラーと、

前記格子によって回折された放射の少なくとも一部を反射するように配置された反射器を

10

20

30

40

50

有しており、

前記コリメーターレンズ系、前記反射器および光ファイバーの出力端部がユニットに固定され、

当該ユニットは移動機構によって動かされる、
ことを特徴とする光学遅延線。

【請求項 1 2】

サンプルを結像する結像システムであって、

光学スペクトルを有する光信号を形成する光源と、

当該光源とコミュニケーションする干渉計と、

当該干渉計と光学的にコミュニケーションする検出器と、

相互に光学的にコミュニケーションする複数の光学素子を有する、干渉計と光学的にコミュニケーションする光学遅延線を有しており、

ここで (i) 複数の光学素子のうちの少なくとも 1 つは光信号のスペクトルを空間的に分散させて、空間的に分散された光信号を形成し、

(i i) 前記複数の光学素子のうちの少なくとも 1 つは調整可能であり、光信号の位相遅延および群遅延の 1 つまたは複数に影響を与え、

(i i i) 前記複数の光学素子のうちの少なくとも 1 つは、他の光学素子によって光信号内に導入された偏光を補正する、

ことを特徴とする結像システム。

【請求項 1 3】

少なくとも 1 つの調整可能な光学素子は繰り返し走査して、光学群遅延および時間で変化する光学位相遅延を変化させる、請求項 1 2 記載の結像システム。

【請求項 1 4】

検出器と電気的にコミュニケーションする信号処理ユニットを有しており、ここで調整可能な光学素子は繰り返し走査され、

前記信号処理ユニットは、位相遅延の変化のあらゆる均一でないレートを補償する、請求項 1 3 記載のシステム。

【請求項 1 5】

前記空間的分散素子は回折性素子を有している、請求項 1 3 記載の結像システム。

【請求項 1 6】

前記光学遅延線と光学的にコミュニケーションする音響 - 光学変調器を有している、請求項 1 3 記載の結像システム。

【請求項 1 7】

前記光学遅延線と光学的にコミュニケーションする電器 - 光学ビーム偏向器を有している、請求項 1 3 記載の結像システム。

【請求項 1 8】

前記調整可能な光学素子は多角形走査ミラーを有している、請求項 1 3 記載の結像システム。

【請求項 1 9】

前記空間的分散素子は調整可能な周期を有する周期性光学構造を有しており、該空間的分散素子は光信号を角度的に分散させる、請求項 1 3 記載の結像システム。

【請求項 2 0】

前記複数の光学素子のうちの少なくとも 1 つは重行路ミラーである、請求項 1 3 記載の結像システム。

【請求項 2 1】

走査光コヒーレンストモグラフィ結像システムであって、

光学スペクトルを有する光信号を形成する光源と、

当該光源とコミュニケーションする干渉計と、

当該干渉計と光学的にコミュニケーションする検出器と、

当該検出器と電気的にコミュニケーションする信号処理部と、

10

20

30

40

50

前記干渉計と光学的にコミュニケーションする、光学素子から成る光学遅延線を有しており、

ここで(i)前記光学素子のうちの少なくとも1つは光信号を空間的に分散させ、(ii)少なくとも1つの光学素子は、他の光学素子によって光信号内に導入された偏光を補正し、

当該光学遅延線は、光学素子のうちの少なくとも1つを調整して光学群遅延をコントロールする走査デバイスを有しており、

ここで(i)前記干渉計は遅延された光信号を、サンプルによって散乱された光信号の一部と干渉によって結びつけ、

(ii)前記検出器は、干渉によって結合された信号を検出して、それに応じて1つまたは複数の実質的に0周波数のヘテロダイン信号および実質的に0でない周波数のヘテロダイン信号を形成し、

(c)前記信号処理部はサンプルのイメージを0周波数ヘテロダイン信号または0でない周波数ヘテロダイン信号にそれぞれ応じて形成する、

ことを特徴とする、走査光コヒーレンストモグラフィ結像システム。

【請求項22】

サンプルを結像する結像システムであって、

光学スペクトルを有する光信号を形成する光源と、

当該光源とコミュニケーションする干渉計と、

当該干渉計と光学的にコミュニケーションする検出器と、

光学遅延線を有しており、ここで当該光学遅延線は、

(i)コリメーターレンズ系と、

(ii)当該コリメーターレンズ系からの放射出力を受け取るように配置された格子と、

(iii)当該格子によって回折された放射の少なくとも一部を受け取るように配置されたコレクターレンズ系と、

(iv)当該コレクターレンズ系のほぼ後焦点面に配置された回転可能なミラーと、

(v)前記格子によって回折された放射の少なくとも一部を反射するように配置された反射器を有しており、

前記コリメーターレンズ系、前記反射器および光ファイバーの出力端部は、ユニットに固定されており、当該ユニットは移動機構によって動かされる、

ことを特徴とする結像システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

発明の技術分野

本発明は光学遅延線に関する。特に本発明の1つの実施形態は、格子ベース位相コントロール光学遅延線に関する。この光学遅延線は制限ではなく例えば、光コヒーレンストモグラフィ(''OCT'')および光コヒーレンス領域反射率測定(''OCDR'')において使用される。

【0002】

発明の背景

低コヒーレンス光干渉計は、散乱媒体を研究するために様々な装置において使用されてきた。図4には光コヒーレンストモグラフィ(''OCT'')システムのブロックダイヤグラムが示されている。図4に示されたように、OCTシステム50は干渉計を含んでいる。ここでこの干渉計は参照経路5、サンプル経路10、スプリッタ/コンバイナー15(スプリッタ/コンバイナー15のある実施形態は50/50ビームスプリッタを有し、または干渉計が光ファイバーを用いて実現される場合には3dBカッップラーを有している)、低コヒーレンス放射源20、検出器25およびプロセッサ30を有している。走査光学遅延線35(ODL35)は、干渉計の参照経路5の端部に配置されている。さらに図4ではサンプル経路10がプローブモジュール40を含み、放射をサンプル45に向かわせ、

10

20

30

40

50

サンプル 4 5 から散乱された放射を集め。さらに図 4 では検出器 2 5 が、サンプル 4 5 から反射されたサンプルビームと、走査 ODL 線 3 5 によって反射された参照ビームとを結びつける。サンプル経路 1 0 と参照経路 5 の間で一致しない光路長が、低コヒーレンス放射源 2 0 のコヒーレンス長よりも短い場合には、サンプルビームと参照ビームとの間に干渉が生じる。当該技術分野において公知であるように、検出器 2 5 が干渉信号をセンシングするとき参照ビームの光路長が既知であるならば、低コヒーレンス放射源のコヒーレンス長の精度の範囲内でサンプルビームの光路長が測定可能である。

【 0 0 0 3 】

参照経路で使用される光学遅延線の幾つかの設計が当該分野において開示してきた。Science 第 254巻、1991年、1178~1181頁における記事「Optical Coherence Tomography (Huangら著)」において記載されているように、参照ビームを反射して検出器に戻すのにミラーが使用される。この記事によると、サンプル媒体からの深さ情報が、ステップモータを用いてミラーを動かして参照経路の光路長を変えることによって得られる。アメリカ合衆国特許第 5321501 号 (Swansonら) には、Huangらの設計における変更が開示されている。ここではミラーは逆反射体によって置き換えられて光学的アライメントの安定性が改善され、ステップモータは検流計によって置き換えられてトモグラフィーによる生体組織のイメージが良好になる程度まで走査スピードが上昇される。

【 0 0 0 4 】

アメリカ合衆国特許第 6111645 号 (Tearneyら) には Swansonらの設計における変更が開示されている。ここで可動逆反射体は格子ベース位相コントロール光学遅延線によって置き換えられる。アメリカ合衆国特許第 6111645 号はここで参考文献として組み込まれている。この設計変更によって、Swansonらで開示された設計よりも走査速度が上昇され、参照経路によって形成された位相および群遅延の独立したコントロールも可能になる。しかし Tearneyらによって公開されたこの格子ベース位相コントロール光学遅延線は、研究室環境での使用に制限してきた。

【 0 0 0 5 】

上述の記載をかんがみると、高い走査速度を生じさせることができ、かつ光学干渉計における使用に適し、生体組織のトモグラフィーによるイメージを生じさせる光学遅延線が必要とされている。

【 0 0 0 6 】

発明の要約

本発明の実施形態は有利には、当該分野における上述の必要性を満たしている。特に本発明の 1 つの実施形態は、生体組織のトモグラフィイメージを生じさせる光干渉計での使用に適している光学遅延線 (ODL) である。とりわけ本発明の第 1 の実施形態は、相互に光学的にコミュニケーションする複数の光学素子を有する光学遅延線である。ここで：(a) 複数の光学素子のうちの少なくとも 1 つは光信号のスペクトルを空間的に分散させて、空間的に分散された光信号を形成し；(b) 複数の光学素子のうちの少なくとも 1 つは調整可能であり、光信号の 1 つまたは複数の位相遅延および群遅延に影響を与える；(c) 複数の光学素子のうちの少なくとも 1 つは、他の光学素子によって光信号内に導入された偏光を補正する。さらに本発明の第 2 の実施形態は：(a) コリメーターレンズ系；(b) コリメーターレンズ系からの放射出力を受け取るように配置された格子；(c) 格子によって回折された放射の少なくとも一部分を受け取るように配置されたコレクターレンズ系；(d) 実質的にコレクターレンズ系の後焦点面に配置された回転可能なミラー；(e) 格子によって回折された放射の少なくとも一部分を反射するように配置された反射器を有する光学遅延線である。ここでコリメーターレンズ系、反射器、光ファイバーの出力端部がユニットに固定 (affixed) される。ここでこのユニットは、移動機構によって動かされる。

【 0 0 0 7 】

本発明の別の実施形態は光干渉結像システムである。この光干渉結像システムは、制限ではなく例えば、臨床的なセッティングで使用される。特に、本発明の 1 つの実施形態は：

10

20

30

40

50

(a) 光学スペクトルを有する光信号を生じさせる光源；(b) 光源とコミュニケーションする干渉計；(c) 干渉計と光学的コミュニケーションする検出器；(d) 干渉計と光学的にコミュニケーションする、相互に光学的にコミュニケーションする複数の光学素子を有する光学遅延線を有している、サンプルを結像するための光干渉結像システムである。ここで(i) 複数の光学素子のうちの少なくとも1つは、光信号のスペクトルを空間的に分散させて、空間的に分散された光信号を形成し；(ii) 複数の光学素子のうちの少なくとも1つは調整可能であり、光信号の位相遅延および群遅延の1つまたは複数に影響を与える；(iii) 複数の光学素子のうちの少なくとも1つは、他の光学素子によって光信号内に導入された偏光を補正する。

【0008】

10

図面の簡単な説明

図1には、アメリカ合衆国特許第6111645号(G. J. Tearneyら)において公開された、格子ベース位相コントロール光学遅延線の概略図が示されている。

【0009】

図2には、本発明の第1の実施形態に従って構成された、格子ベース位相コントロール光学遅延線の概略図が示されている。

【0010】

図3には、本発明の第2の実施形態に従って構成された、格子ベース位相コントロール光学遅延線の概略図が示されている。

【0011】

20

図4には、光コヒーレンストモグラフィ(''OCT'')システムのブロックダイヤグラムが示されている。

【0012】

詳細な説明

図1には、アメリカ合衆国特許第6111645号(''645特許'')において公開された、光学遅延線(''ODL'')の1つの実施例である、格子ベース位相コントロール光学遅延線の概略図が示されている(''645特許の図13を参照')。図1に示されているように、シングルモード光ファイバー100からの放射出力はレンズ系110によって視準され(レンズ系110は単一レンズとして示されているが、当該技術分野の通常の技術を有する者は、このレンズ系110が複数のレンズを含み得ることを容易に理解する)、格子120(格子120は、所定の格子溝密度を有している)に格子入射角で入射する(例えば通常は格子120に関して角度_i)ように導かれる。格子120は、格子上に入射する放射ビームを異なるスペクトル周波数または波長成分に分散させる。これらはレンズ系130によって集められて、ミラー140上に焦点合わせされる(レンズ系130は単一レンズとして示されているが、当該技術分野の通常の知識を有する者は、このレンズ系130が複数のレンズを含み得ることを容易に理解する)。レンズ系130の光軸は、格子出射角(例えば格子120に関して通常は角度_d)で配置され、ミラー140は実質的にレンズ130の後焦点面に配置される。

30

【0013】

40

さらに図1に示されているように、ミラー140は反射された放射をレンズ系130を通って格子120およびさらに重行路ミラー(double-pass mirror)150に戻るように導く。格子120からの放射出力は実質的にミラー150と直交するので、これはODL90を通過してシングルモード光ファイバー100に戻される。

【0014】

「645特許で示されているように、スペクトル分散された放射ビームのフーリエ変換はミラー140に存在する。ミラー140の表面がある角度(例えばレンズ130の光軸に対して通常は角度_c)で配置されている場合、位相勾配または線形位相ずれがミラー140を横切るスペクトルに加わる。その後、ビームがレンズ系130を通って格子120の方向へ戻って伝播するのでスペクトルの逆フーリエ変換が生じる。線形位相ずれの逆フーリエ変換は時間遅延であるので、ビームの時間的群遅延が生じる。さらに「645特許に

50

示されているように以下のもののうちの1つまたは複数を変えることができる。すなわち(a)格子120の格子溝密度、格子入射角_iおよび格子出射角_d；または(b)ミラー140が配置されている(上述を参照)角度が光群遅延および位相遅延における変化を生じさせる(‘645特許の図14を参照)。

【0015】

従って図1に示されているように、ミラー140が配置されている角度が迅速に走査される場合、時間依存性の光学群遅延線が得られる。その場合、例えばODL90が(‘645特許で開示され、発明の背景に記載されたような)低コヒーレンス光干渉計の参照経路内に挿入され、高速の光コヒーレンストモグラフィ(‘OCT')が実現される。位相遅延および群遅延は調整可能なので、干渉結像技術において生じる変調周波数をコントロールすることができる。これによって検出用電子回路は簡易化される。これは、検出された光干渉信号の直接電子デジタル化(A/D変換)を含む検出モデルにとって特に重要である。

【0016】

図1でミラー140は、矢印160および170によって示されている方向に沿って回転させられる。ミラー140は回転機構(図示されていない)によって回転させられる。この回転機構は、当該分野の通常の技術を有する者に公知である多数の回転機構のうちの1つに従って構成される。これらは限定ではなく例えば、検流計回転機構(例えばミラーは検流計のシャフトに配置される)、共振スキャナ、回転多角形ミラー(‘645特許の図8を参照)、および圧電ミラースキャナである。

【0017】

上述(ここではミラー140の角度は群遅延における変化を生じさせる)に加えて、ミラー140の回転の中心を、放射ビームのスペクトルの中心波長に関してオフセットすることによって、位相遅延および群遅延を独立して調整するのに位相コントロールデバイスが使用される。さらに格子120およびレンズ130から出力された放射ビームのスペクトルの中心波長が回転ミラー140の中心に入射する場合、位相遅延を変化させることなく群遅延が生じる。その場合、たとえ走査線群遅延が生じても、OCTにおいて変調周波数が局部発振器に加えられない。従って干渉信号はいかなる変調も含まず、自己相関関数の包絡線から成る。これはホモダイン検波を行うOCT結像システムには有利である。独立した位相変調が局部発振器に加えられる場合、このシステムは異なる速度での走査が可能である。しかも復調前にバンドパスフィルターの中心周波数を変化させることはない。位相反転ホモダイン検波システムはこのような場合にOCTに対して有利である。

【0018】

さらに、中心波長が回転軸からオフセットするようにミラー140を変位させることによって、局部発振器に任意の変調周波数を加えることができる。これによって局部発振器の中心周波数を完全にコントロールすることができる。この変調周波数(例えば位相遅延)は、ミラー140をビームの光軸に対して単に垂直に変位させることによって、変化される。得られる中心変調周波数のレンジは、ミラー140のサイズに限度があるのでスペクトル周辺減光によってのみ制限される。

【0019】

上述の近似に関連して、ODLの群-位相遅延の独立性は次の場合に有利である。すなわちミラー140がミラー表面と交差する回転軸を有している場合である。しかしミラー表面が回転軸と離れている場合、群遅延および位相遅延特性はより複雑になってしまう。

【0020】

例えば、多角形走査ミラーによって生じる群遅延における変化は線形であり、位相における変化は時間の関数として二次的である。変調周波数は走査のあいだ線形にシフトするので、多角形走査ミラーを、固定的なバンドパスフィルターを含む復調方法と関連して使用することはできない。しかし可変変調周波数は、適応周波数混合検波等の折一的な復調パターンを使用して克服される。ここでは復調が行われる周波数が変化して、変調周波数における変化が求められる。格子入射角または格子線密度を走査するような折一的な位相コ

10

20

30

40

50

ントロール構成も非線形の位相遅延を生じさせる。結果としてこのような方法は、OCT
結像アプリケーションに対する適応周波数混合復調パターンと関連してのみ使用される。

【0021】

高速の群遅延走査が可能になることに加えて、OCTと関連して使用される上述のODL
の別の利点は、参照経路とサンプル経路とのあいだの分散の不一致を補正することができる
ことである。これは以下のように行われる。すなわちレンズ系130と格子120との
あいだの距離Lが一焦点距離でない場合には常に、付加的な波長依存性位相遅延がパルス
に加えられ、L < 焦点距離に対するポジティブな分散およびL > 焦点距離に対するネガ
ティブな分散を生じさせる。ODLのこの特性によって、レンズと格子の間隔を単に変化
させることによってOCTシステム内の参照経路とサンプル経路とのあいだの分散不均衡
を補償することができる。

【0022】

上述の利点にもかかわらず、アメリカ合衆国特許第6111645号で開示されたODL
90には克服されていない幾つかの問題がある。放射が格子120から4回反射されること
によってODL90の第1の問題が生じる。格子は通常は、SおよびP偏光状態に対して
異なる反射率を有するのでこの問題が生じる。例えばS偏光状態が67%の反射率を有し、
P偏光状態が47%の反射率を有している場合、PおよびS状態の相対的な光効率(optical efficiency)、すなわち(P/S)はODL90に対して(0.47/0.67)⁴ = 0.24になるであろう。

【0023】

これは2つの問題を生じさせる。第1の問題は、光ファイバーによって放射源がODL90
に結合されることから生じる。光ファイバー内のストレスによって、これはODL90
に入射する放射の偏光状態を変化させる波長板として作用するのでこれは問題である。結果
としてODL90の光効率が変化する。例えば光ファイバー内のストレスは典型的に温度
または光ファイバーの動きによって変化するので、ODL90から戻ってくるパワーが
変化する。このような変化によって、ODL90が使用される光学干渉計に含まれている
検出器システムの最適化が困難になる。光干渉計内のサンプル経路から反射された放射の
最適な検出には、参照経路とサンプル経路内の偏光状態が一致していることが必要な
ので第2の問題が生じる。例えば一致していない場合、参照経路からのP偏光された放射の損失
は、サンプル経路からのP偏光された放射の検出を減少させる。従ってPおよびS偏光
された放射の等しい量が3dBカップラーからの出力である場合(発明の背景を参照)、
この有効性は光干渉計のサンプル経路検出効率を約50%低下させる。

【0024】

参照経路の光路長が変化され、これがサンプル経路の光路長と一致していなければなら
ないのでODL90の第2の問題が生じる。これはコリメーターレンズ系110またはミラ
ー150を軸方向に動かすことによって行われる(図1を参照)。しかしこれは実用的で
はない、なぜならこれらのコンポーネントのうちのいずれかの極めて僅かな不整合によ
つて、ODL90における重大な透過損失が生じてしまうからである。

【0025】

アメリカ合衆国特許第6111645号に記載されたODL90の上述した偏光依存性作用
を除去するため、本発明の1つの観点に関連して、格子120の偏光依存性作用を実質
的に除去する偏光依存性光学コンポーネントがODL90に加えられる。有利にはこれによ
って、参照経路(例えば図4に示された低コヒーレンス光学干渉計内の参照経路5)は
、SおよびP偏光状態に対してほぼ等しい光効率を得ることができる。このような光学コン
ポーネントの1つの実施形態は、偏光依存性透過を生じさせる角度で参照経路ビーム内
に配置された光学窓である。

【0026】

図2には、格子ベース位相コントロール光学遅延線190("ODL190")の概略図
が示されている。ここでこの光学遅延線は図1に示されたODL90と同じであるが、付
加的に窓125を有している。窓125は、偏光を変化させることができるガラス部品等

10

20

30

40

50

の透明な材料から構成されている。さらに当該技術分野の通常の技術を有する者が容易に理解するように、窓 125 はこれを通過する放射ビームに関して様々な角度に配置され、偏光変化作用を変える。例えば偏光透過効率は、角度の関数として S および P 偏光状態に對して異なって変化する。さらに有利な実施形態において窓 125 の表面および裏面は平行から僅かにずれており、ここからの多重反射が ODL 190 に戻って結合されないことを保証する。

【0027】

図 2 では、窓 125 を実現するのに単一部品材料が使用されているが、例えば連続して複数の窓が使用され、2 つの偏光状態間の充分な選別が行われて、格子 120 によって生じる偏光作用の実質的な除去において効果を有することは本発明の範囲内である。有利な実施形態では、窓 125 を設けるのに使用される全ての窓の角度は実質的にブルースター角で配置され、P 偏光状態における損失が最小化される。我々は ODL 90 の偏光依存性作用を、マイクロスコープスライドを実質的にブルースター角で配置することによって除去した。これによって放射ビームはこれを 4 回通過する（回転走査ミラー 140 に向かうビームとこのミラーから戻って来るオフセットビームの両方が交差する）。

【0028】

良く知られているように、OCT システムの感応性を最適化するために、しばしば低コヒーレンス光学干渉計の参照経路内のパワーを減衰させることが必要である。窓 125 が中性光学減衰器を有している場合、本発明のこの観点に相応して、放射ビームの減衰を偏光補償と同時にを行うことができる。このような中性光学減衰器は市販されている多様の材料から得られる。

【0029】

本発明の上述した実施形態では窓 125 が配置されて、ODL 190 内の放射ビームがこの窓を 4 回通過するが、本発明はこれに限定されるものではない。実際に本発明の実施形態は、窓 125 が、ODL 190 のビーム経路にわたって分配されているような実施形態を含む。これによって (a) ある実施形態においてビームは窓 125 を 2 回通過し； (b) ある実施形態において、ビームは窓 125 の分配された形態の一部分を 4 回通過し、窓 125 の分配された形態の他の部分を 2 回通過する；等々 (c) である。

【0030】

上述したように ODL 90 の別の問題は、低コヒーレンス光学干渉計の参照経路とサンプル経路とのあいだの光路長における差を補償するために光路長を調整している間にはアライメントを維持するのが困難であるということである。この問題は本発明の第 2 の観点によって解決される。図 3 には格子ベース位相コントロール ODL 290 の概略図が示されている。ここでこの ODL は、本発明の第 2 の観点に従って構成されている。図 3 に示されているように、ODL 290 は図 2 に示された ODL 190 と同じであるが、ファイバー端部 100、コリメーターレンズ系 110 およびミラー 150 が結合器 185 に取り付けられており、これらはユニットとして軸方向に動かされて経路長が調整される。結合器 185 は移動機構によって動かされる。ここでこの移動機構は、(図示されていない) あらゆる移動機構を用いて構成される。これは当該分野の通常の技術を有する者には公知であり、例えばステップモータおよびスクリュー、リニアモータ等である。このアレンジメントによってアライメントの問題は、格子 120、レンズ系 130 およびミラー 140 がグループで反射器として機能することによって解決される。従ってコリメーターレンズ系 110 を離れ、ミラー 150 に入射する放射ビーム内の光線はよくアライメントされた ODL 290 において常に平行である。従ってミラー 150 がコリメーターレンズ系 110 を離れた放射ビームと直交に保持されている場合、ODL 290 のアライメントは、このビームの位置または角度における変化に比較的影響されない。

【0031】

本発明の光学遅延線は低コヒーレンス干渉計 (OCT)、光コヒーレンストモグラフィ (OCT) または他の干渉計ベースの光学レンジングおよび画像化技術に使用可能である。例えば本発明の光学遅延線は OCT システム内で使用され、ヘテロダイン検波またはホモ

10

20

30

40

50

ダイン検波を用いる高速の参照経路光路長走査を可能にする。このような高速OCT結像は様々に使用される（例えば人体組織内の生体医療結像において）。しかしOCT結像における本発明の光学遅延線の医療使用は、総管束系；胃腸管；尿路；気道；神経系；胚組織；産婦人科系組織；および他の内部人体器官系の生体医療診断結像に限定されるものではない。他の医療使用は、外科的介入を案内する迅速な走査OCTシステムを含む。本発明の光学遅延線は非医療的な使用に対するOCTでも使用される。これは生物学的な試料、材料、混成材料、半導体、半導体デバイスおよびパッケージにおける画像化およびその他の高速な画像化を必要とする使用を含む。

【0032】

当該分野の知識を有する者は、上述の記載は明確にするためにおよび説明するためにのみ存在することを理解するであろう。従ってこれは、本発明を網羅するものでも記載から精密に限定するものでもない。例えば本発明の実施形態は、「645特許」に開示された全ての格子ベースの單一行路または重行路幾何学的装置も含む。これは限定ではなく次のようなものである。すなわち(a)「645特許」の図1Aおよび図1Bにおける單一行路または重行路構造それぞれにおいて示されている格子ベース位相コントロール光学遅延線；(b)「645特許」の図2に示された、音響-光学変調器("AOM")および反射格子を用いて入力ビームを走査する格子ベース位相コントロール光学遅延線(図2においてAOMは入射角_iを走査し、他の実施形態ではAOMと格子とのあいだにテレスコープが使用される；(c)「645特許」の図3において示された、音響-光学変調器および回折格子を用いて入力ビームを走査する格子ベース位相コントロール光学遅延線；(d)「645特許」の図4において示された、走査ミラーを用いて格子入射角を変化させる格子ベース位相コントロール光学遅延線(「645特許」において記載されているように、テレスコープが走査ミラーと格子とのあいだに配置され、格子でビームが出ていくことを阻止する；(e)「645特許」の図5に示された、操縦可能な格子を用いる格子ベース位相コントロール光学遅延線；(f)「645特許」の図6に示された、放射状走査式円形ホログラフィック光学素子を用いる格子ベース位相コントロール光学遅延線；(g)「645特許」の図11に示されたパルス成形用のミラー構造体；(h)「645特許」の図13に示された、複光路構造体における格子ベース位相コントロール光学遅延線；(i)「645特許」の図14に示された、走査群遅延を変化させるために変えられる素子を有する格子ベース位相コントロール光学遅延線；(j)「645特許」の図16に示された、走査格子を用いる格子ベース位相コントロール光学遅延線；(k)「645特許」の図17に示された、走査群遅延を形成する、回転円形ホログラフィック光学素子を用いる走査光学遅延線装置；(l)「645特許」の図18に示された、音響-光学変調器および回折格子を用いる走査光学遅延線装置；(m)「645特許」の図20に示された、光軸からその回転軸がオフセットしている走査ミラーを用いる格子ベース位相コントロール光学遅延線；(n)「645特許」の図21に示された、光軸からその回転軸がオフセットしている多角形ミラーを用いる格子ベース位相コントロール光学遅延線である。

【図面の簡単な説明】

【0033】

【図1】アメリカ合衆国特許第6111645号(G. J. Tearneyら)において公開された、格子ベース位相コントロール光学遅延線の概略図である。

【0034】

【図2】本発明の第1の実施形態に従って構成された、格子ベース位相コントロール光学遅延線の概略図である。

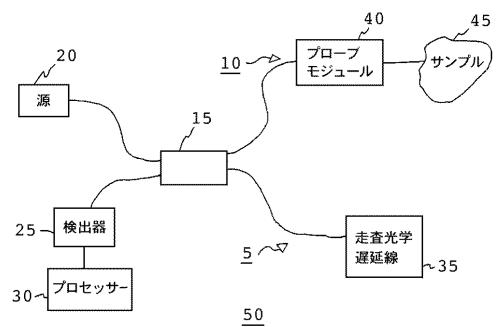
【0035】

【図3】本発明の第2の実施形態に従って構成された、格子ベース位相コントロール光学遅延線の概略図である。

【0036】

【図4】光コヒーレンストモグラフィ(OCT)のブロックダイヤグラムである。

【図4】



【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau(43) International Publication Date
12 September 2002 (12.09.2002)

PCT

(10) International Publication Number
WO 02/071117 A2

(51) International Patent Classification: G02B 6/293 (72) Inventors: EVERETT, Matt, J.; 2566 Regent Road, Livermore, CA 94550 (US); WEI, Jay; 397 Indian Hill Place, Fremont, CA 94539 (US).

(21) International Application Number: PCT/EP02/02231

(22) International Filing Date: 1 March 2002 (01.03.2002) (81) Designated State (national): JP

(25) Filing Language: English

(84) Designated States (regional): European patent (AT, BE, CII, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:

09/797,748 1 March 2001 (01.03.2001) US

(Published:
without international search report and to be republished upon receipt of that report)(71) Applicants (for all designated States except GB): CARL ZEISS [DE/DE]; 89518 Heidenheim (DE). CARL ZEISS OPHTHALMIC SYSTEMS, INC. [US/US]; 5160 Ha-cienda Drive, 94568 Dublin (US).
For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

WO 02/071117 A2

(54) Title: OPTICAL DELAY LINE

(57) Abstract: One embodiment of the present invention is an optical delay line that comprises a plurality of optical elements in optical communication with each other, wherein: (a) at least one of the plurality of optical elements is capable of spatially dispersing a spectrum of an optical signal to provide a spatially dispersed optical signal; (b) at least one of the plurality of optical elements is adjustable to affect one or more of a phase delay and a group delay of an optical signal; and (c) at least one of the plurality of optical elements compensates for polarization introduced into the optical signal by others of the optical elements.

Optical Delay LineTechnical Field of the Invention

[0001] The present invention pertains to optical delay lines. In particular, one embodiment of the present invention relates to a grating-based, phase control optical delay line used, for example and without limitation, in Optical Coherence Tomography ("OCT") and Optical Coherence Domain Reflectometry ("OCDR").

Background of the Invention

[0002] A low coherence, optical interferometer has been used in various apparatuses to study scattering media. FIG. 4 shows a block diagram of an Optical Coherence Tomography ("OCT") system. As shown in FIG. 4, OCT system 50 includes an interferometer with reference path 5, sample path 10, splitter/combiner 15 (one embodiment of splitter/combiner 15 comprises a 50/50 beamsplitter, or a 3dB coupler if the interferometer is embodied using optical fibers), low coherence radiation source 20, detector 25, and processor 30. Scanning optical delay line 35 (ODL 35) is located at an end of reference path 5 of the interferometer. As further shown in FIG. 4, sample path 10 includes probe module 40 to direct radiation to sample 45, and to collect radiation scattered from sample 45. As is still further shown in FIG. 4, detector 25 combines a sample beam reflected from sample 45, and a reference beam reflected by scanning ODL line 35. Then, whenever an optical path length mismatch between sample path 10 and reference path 5 is less than a coherence length of low coherence radiation source 20, interference between the sample beam and the reference beam occurs. As is well known in the art, if the optical path length of the reference beam is known when detector 25 senses the interference signal, the optical path length of the sample beam can be measured within the accuracy of the coherence length of the low coherence radiation source.

WO 02/071117

PCT/EP02/02231

- [0003] Several designs of an optical delay line for use in the reference path have been disclosed in the art. As described in an article entitled "Optical Coherence Tomography" by Huang et al. in Science, Vol. 254, 1991, pp. 1178-1181, a mirror is used to reflect the reference beam back to the detector. In accordance with this article, depth information from the sample medium is acquired by varying the optical path length of the reference path by moving the mirror using a stepper motor. U.S. Patent No. 5,321,501 (Swanson et al.) discloses a change to the design of Huang et al. in which the mirror is replaced by a retroreflector to improve optical alignment stability, and the stepper motor is replaced by a galvanometer to increase the scan speed to a degree where tomographical images of living tissue became feasible.
- [0004] U.S. No. Patent 6,111,645 (Tearney et al.) discloses a change to the design of Swanson et al. in which the moving retroreflector is replaced by a grating-based, phase control, optical delay line. U.S. No. Patent 6,111,645 is incorporated by reference herein. This design change further increases the scanning speed over that disclosed in Swanson et al., and also enables independent control of the phase and group delay of produced by the reference path. However, the grating-based, phase control, optical delay line disclosed by Tearney et al. has been limited thusfar to use in a laboratory environment.
- [0005] In light of the above, there is a need for an optical delay line that can provide high scanning rates, and that is suitable for use in optical interferometers to provide tomographic images of living tissue.

Summary of the Invention

- [0006] Embodiments of the present invention advantageously satisfy the above-identified need in the art. In particular, one embodiment of the present invention is an optical delay line ("ODL") that is suitable for use in optical interferometers to provide 5 tomographic images of living tissue. Specifically, a first embodiment of the present invention is an optical delay line that comprises a plurality of optical elements in optical communication with each other, wherein: (a) at least one of the plurality of optical elements is capable of spatially dispersing a spectrum of an optical signal to provide a spatially dispersed optical signal; (b) at least one of the plurality of optical elements is 10 adjustable to affect one or more of a phase delay and a group delay of an optical signal; and (c) at least one of the plurality of optical elements compensates for polarization introduced into the optical signal by others of the optical elements. In addition, a second embodiment of the present invention is an optical delay line that comprises: (a) a collimator lens system; 15 (b) a grating disposed to receive radiation output from the collimator lens system; (c) a collector lens system disposed to receive at least a portion of radiation diffracted by the grating; (d) a rotatable mirror disposed substantially at a back focal plane of the collector lens system; and (e) a reflector disposed to reflect at least a portion of radiation diffracted by the grating; wherein the collimator lens system, the reflector, and an output end of an optical fiber are affixed in a unit, which unit is movable by a translation mechanism.
- [0007] Another embodiment of the present invention is an optical interferometric imaging system to be used, for example and without limitation, in a clinical setting. In 20 particular, one embodiment of the present invention is an optical interferometric imaging system for imaging a sample that comprises: (a) an optical source capable of producing an optical signal having an optical spectrum; (b) an interferometer in communication with the optical source; (c) a detector in optical communication with the interferometer; and (d) an optical delay line in optical communication with the interferometer that comprises a 25 plurality of optical elements in optical communication with each other, wherein: (i) at least

WO 02/071117

PCT/EP02/02231

one of the plurality of optical elements is capable of spatially dispersing a spectrum of the optical signal to provide a spatially dispersed optical signal, (ii) at least one of the plurality of optical elements is adjustable to affect one or more of a phase delay and a group delay of the optical signal, and (iii) at least one of the plurality of optical elements compensates for polarization introduced into the optical signal by others of the optical elements.

Brief Description of the Figure

[0008] FIG. 1 shows, in schematic form, a grating-based, phase control, optical delay line disclosed in U.S. Patent No. 6,111,645 (G. J. Tearney et al.);
[0009] FIG. 2 shows, in schematic form, a grating-based, phase control, optical delay line fabricated in accordance with a first embodiment of the present invention;
5 [0010] FIG. 3 shows, in schematic form, a grating-based, phase control, optical delay line fabricated in accordance with a second embodiment of the present invention; and
[0011] FIG. 4 shows a block diagram of an optical coherence tomography ("OCT") system.

10 Detailed Description

[0012] FIG. 1 shows, in schematic form, grating-based, phase control, optical delay line 90 that is one embodiment of an optical delay line ("ODL") disclosed in U.S. Patent No. 6,111,645 (the '645 patent); see FIG. 13 of the '645 patent. As shown in FIG. 1, radiation output from single mode optical fiber 100 is collimated by lens system 110 (although lens system 110 is shown as a single lens, those of ordinary skill in the art readily appreciate that lens system 110 may comprise a multiplicity of lenses), and is directed to impinge upon grating 120 (grating 120 has a predetermined grating groove density) at a grating input angle (for example, an angle θ_i with respect to a normal to grating 120). Grating 120 disperses the beam of radiation that impinges thereon into different spectral frequency or wavelength components that are collected, and focused by lens system 130 (although lens system 130 is shown as a single lens, those of ordinary skill in the art readily appreciate that lens system 130 may comprise a multiplicity of lenses) onto mirror 140. The optical axis of lens system 130 is disposed at a grating output angle (for example, an angle θ_o with respect to a normal to grating 120), and mirror 140 is disposed substantially at the back focal plane of lens 130.

WO 02/071117

PCT/EP02/02231

[0013] As further shown in FIG. 1, mirror 140 directs reflected radiation back through lens system 130 to grating 120, and from there, to double-pass mirror 150. The radiation output from grating 120 is substantially orthogonal to mirror 150, and as a result, it is reflected all the way back through ODL 90 into single mode optical fiber 100.

5 [0014] As described in the '645 patent, the Fourier transform of the spectrally dispersed beam of radiation is present at mirror 140. When the surface of mirror 140 is disposed at an angle (for example, an angle γ with respect to a normal to the optical axis of lens 130), a phase ramp, or linear phase shift, is applied to the spectrum across mirror 140. Then, an inverse Fourier transform of the spectrum is achieved as the beam propagates 10 back through lens system 130 towards grating 120. Since the inverse Fourier transform of a linear phase shift is a time delay, a temporal group delay of the beam is produced.

[0015] As further disclosed in the '645 patent, alteration of one or more of: (a) the grating groove density, the grating input angle θ_i , and the grating output angle θ_o of grating 120; or (b) the angle at which mirror 140 is disposed (see above) produces a change in the 15 optical group delay and phase delay, see FIG. 14 of the '645 patent.

[0016] Thus, if the angle at which mirror 140 is disposed, as shown in FIG. 1, is rapidly scanned, a time dependent, optical group delay line is produced. Then, for example, ODL 90 can be inserted into the reference path of a low coherence optical 20 interferometer (such as that disclosed in the '645 patent and described in the Background of the Invention in conjunction with FIG. 4) to perform high speed optical coherence tomography ("OCT"). Since the phase delay and group delay are adjustable, the modulation frequency which is produced in interferometric imaging techniques can be controlled, thereby simplifying detection electronics. This is especially important for detection scenarios which involve direct electronic digitization (A/D conversion) of a 25 detected optical interference signal.

[0017] Referring to FIG. 1, mirror 140 is rotated along a direction indicated by arrows 160 and 170. Mirror 140 is rotated by a rotation mechanism (not shown). The rotation mechanism can be fabricated in accordance with any one of a number of rotation

mechanisms that are well known to those of ordinary skill in the art such as, for example and without limitation, a galvanometer rotation mechanism (for example, the mirror is placed on a shaft of a galvanometer), a resonant scanner, a rotating polygon mirror (see FIG. 8 of the '645 patent), and a piezoelectric mirror scanner.

5 [0018] In addition to the above (where the angle of mirror 140 produces a change in group delay), by offsetting the center of rotation of mirror 140 with respect to the center wavelength of the spectrum of the beam of radiation, the phase control device can be used to adjust the phase delay and the group delay independently. Moreover, if the center wavelength of the spectrum of the beam of radiation output from grating 120 and lens system 130 is incident on the center of rotation of mirror 140, group delay is produced without changing the phase delay. Then, in an OCT, no modulation frequency is applied to the local oscillator, even though a scanning linear group delay is produced. Thus, the 10 interferometric signal consists of the envelope of the autocorrelation function without any modulation. This can be useful for OCT imaging systems that perform homodyne detection. If an independent phase modulation is applied to the local oscillator, the system would be capable of scanning at different speeds without changing the center frequency of the band pass filter before demodulation. A phase diversity homodyne detection system would be useful for OCT in this instance.

15 [0019] Furthermore, by translating mirror 140 so that the center wavelength is offset from the axis of rotation, an arbitrary modulation frequency can be applied to the local oscillator. This enables complete control over the center frequency of the local oscillator. The modulation frequency (i.e., phase delay) may be varied by simply translating mirror 140 perpendicular to the optical axis of the beam. The range of center 20 modulation frequencies that may be achieved is only limited by spectral vignetting due to the finite size of mirror 140.

25 [0020] In accordance with the above-described approximation, the group-phase delay independence of the ODL is an advantage whenever mirror 140 has an axis of rotation that intersects the mirror surface. When the mirror surface is separated from the

axis of rotation, however, the group-delay and phase-delay properties are more complex. To an approximation, the group-delay is linear in angle but not in phase delay.

[0021] For example, while the change in group delay produced by a polygon scanning mirror is linear, the change in phase is quadratic as a function of time. Since the 5 modulation frequency shifts linearly over the scan, a polygon scanning mirror cannot be used in conjunction with a demodulation method that incorporates a fixed band pass filter. The varying modulation frequency can be overcome, however, by using an alternative demodulation scheme, such as adaptive frequency mixing detection, where the frequency at which the demodulation is performed is varied to track the variation in the modulation 10 frequency. Alternative phase control configurations, such as scanning the grating angle of incidence or the grating ruling density, also produce a nonlinear phase delay. As a result, these methods can only be used in conjunction with an adaptive frequency mixing demodulation scheme for OCT imaging applications.

[0022] In addition to enabling high speed group delay scanning, another advantage 15 of the above described ODL for use in conjunction with OCT is the capability to compensate dispersion mismatch between the reference path and the sample path. This occurs as follows: whenever the distance L between lens system 130 and grating 120 is not one focal length, an additional wavelength dependent phase delay is added to a pulse, creating positive dispersion for $L <$ focal length and negative dispersion for $L >$ focal 20 length. This property of the ODL enables compensation of a dispersion imbalance between the reference path and sample path in the OCT system by simply changing the lens-grating separation.

[0023] Despite the advantages discussed above, we have uncovered several 25 problems with ODL 90 disclosed in U.S. Patent No. 6,111,645. A first problem with ODL 90 arises because radiation is reflected four (4) times from grating 120. This problem arises because gratings typically have different reflectivities for S and P polarization states. For example, for a case where an S polarization state has a reflectivity of 67%, and where a

WO 02/071117

PCT/EP02/02231

P polarization state has a reflectivity of 47%, the relative optical efficiency of the P and S states, i.e., (P/S), for ODL 90 would be $(0.47/0.67)^4 = 0.24$.

[0024] This raises two issues. The first issue arises from the fact that a source of radiation may be coupled to ODL 90 through fiber optics. This is an issue because stress in fiber optics causes them to act as waveplates that modify the polarization state of radiation entering ODL 90. As a result, the optical efficiency of ODL 90 will change. For example, since stress in an optical fiber typically varies with temperature or movement of the optical fiber, power returning from ODL 90 will vary. Such a variation will make optimization of a detector system included in an optical interferometer in which ODL 90 is used difficult. The second issue arises because optimal detection of radiation reflected from a sample path in an optical interferometer requires that a polarization state in a reference path and a sample path be matched. For example, if there is no matching, a loss of P polarized radiation from the reference path will decrease detection of P polarized radiation from the sample path. Thus, if equal amounts of P and S polarized radiation are output from a 3dB coupler (see the Background of the Invention), this effectively drops the sample path detection efficiency of the optical interferometer by 50%.

[0025] A second problem with ODL 90 arises because the optical path length of the reference path needs to be varied to match it to the optical path length of the sample path. This can be accomplished (referring to FIG. 1) by moving either collimator lens system 110 or mirror 150 in an axial direction. However, this is not practical because the slightest misalignment of either of these components causes significant transmission loss in ODL 90.

[0026] To eliminate the above-identified polarization dependent effects of ODL 90 disclosed in U.S. Patent No. 6,111,645, and in accordance with one aspect of the present invention, a polarization dependent optical component is added to ODL 90 that substantially eliminates the polarization dependent effects of grating 120. Advantageously, this will enable a reference path (for example, reference path 5 in the low coherence optical interferometer shown in FIG. 4) to have approximately equal optical efficiency for S and P

WO 02/071117

PCT/EP02/02231

polarized states. One embodiment of such an optical component is an optical window that is placed in a reference path beam, at angle, to produce polarization dependent transmission.

[0027] FIG. 2 shows, in schematic form, grating-based, phase control, optical delay line 190 ("ODL 190") that is the same as ODL 90 shown in FIG. 1 with the addition of window 125. Window 125 may be fabricated from any transparent material such as a piece of glass, that can alter polarization. Further, as one of ordinary skill in the art can readily appreciate, window 125 may be disposed at various angles with respect to the beam of radiation passing therethrough to vary the polarization alteration effect. For example, the polarization transmission efficiency may vary as a function of angle differently for the S and P polarization states. Still further, in a preferred embodiment, front and back surfaces of window 125 may be slightly off from parallel to ensure that multiple reflections therefrom do not couple back into ODL 190.

[0028] Although FIG. 2 shows the use of a single piece of material to embody window 125, it is within the scope of the present invention that multiple windows may be used, for example, in series, to achieve sufficient discrimination between the two polarization states to be effective in substantially eliminating the polarization effect caused by grating 120. In a preferred embodiment, the angle of all windows used to provide window 125 may be disposed substantially at Brewster's angle to minimize loss in the P polarization state. We have demonstrated elimination of polarization dependent effects of ODL 90 by placing a microscope slide at near Brewster's angle such that the beam of radiation passes through it four (4) times (intersecting both the beam going to rotatable scanning mirror 140 and the offset beam returning therefrom).

[0029] As is well known, it is often necessary to attenuate power in the reference path of a low coherence optical interferometer to optimize sensitivity of the OCT system. In accordance with this aspect of the present invention, attenuation of the beam of radiation can be achieved simultaneously with polarization compensation if window 125 includes a

neutral density optical attenuator, such neutral density optical attenuators are available from a wide variety of commercial sources.

[0030] Although the above-described embodiment of the present invention indicates that window 125 is placed so that a beam of radiation in ODL 190 passes therethrough four (4) times, the present invention is not so limited. In fact, embodiments of the present invention include embodiments where window 125 is distributed throughout beam paths of ODL 190 so that: (a) in some embodiments, a beam passes through window 125 two (2) times; (b) in some embodiments, a beam passes through one portion of a distributed embodiment of window 125 four (4) times, and another portion of a distributed embodiment of window 125 two (2) times; and (c) so forth.

[0031] As was described above, another problem with ODL 90 is a difficulty in maintaining alignment while adjusting the optical path length to compensate for differences in optical path length between a reference path and a sample path of a low coherence optical interferometer. This problem is solved in accordance with a second aspect of the present invention. FIG. 3 shows, in schematic form, grating-based, phase control, ODL 290 that is fabricated in accordance with the second aspect of the present invention. As shown in FIG. 3, ODL 290 is the same as ODL 190 shown in FIG. 2 with the addition that the tip of fiber 100, collimator lens system 110, and mirror 150 are mounted in fixture 185 so that they are moved as a unit in the axial direction to adjust path length. Fixture 185 can be moved by a translation mechanism, which translation mechanism can be fabricated using any translation mechanism (not shown) that is well known to those of ordinary skill in the art such as a stepper motor and a screw, a linear motor, and the like. This arrangement solves the alignment problem because of the following. Grating 120, lens system 130, and mirror 140, as a group, act as a retro-reflector. Thus, rays in the beam of radiation that leave collimator lens system 110 and hit mirror 150 are always parallel in a well aligned ODL 290. Hence, if mirror 150 is kept orthogonal to the beam of radiation leaving collimator lens 110, alignment of ODL 290 will be relatively insensitive to changes in the position or angle of this beam.

- [0032] The inventive optical delay line can be incorporated into Low Coherence Interferometry (LCI), Optical Coherence Tomography (OCT), or other interferometric based optical ranging and imaging techniques. For example, the inventive optical delay line is used in OCT systems to enable high speed reference path optical path length scanning using heterodyne or homodyne detection. Such high speed OCT imaging can be used in a variety of applications (e.g., *in vivo* medical imaging in human tissue). Medical applications of the inventive optical delay line in OCT imaging include but are not limited to *in vivo* medical diagnostic imaging of the vascular system; gastrointestinal tract; urinary tract; respiratory tract; nervous system; embryonic tissue; OB/GYN tissue; and any other internal human organ systems. Other medical applications include a rapid scanning OCT system for performing guiding surgical intervention. The inventive optical delay line may be also used in OCT imaging for non-medical applications including imaging in biological specimens, materials, composite materials, semiconductors, semiconductor devices and packages, and other applications requiring high speed imaging.
- [0033] Those skilled in the art will recognize that the foregoing description has been presented for the sake of illustration and description only. As such, it is not intended to be exhaustive or to limit the invention to the precise form disclosed. For example, embodiments of the present invention also include all of the grating-based, single or double-pass geometry apparatus disclosed in the '645 patent such as, without limitation: (a) the grating-based, phase control, optical delay line shown in a single pass configuration and a double-pass configuration, respectively, in FIGS. 1A and 1B of the '645 patent; (b) the grating-based, phase control, optical delay line using an acousto-optic modulator ("AOM") and a reflection grating to scan an input beam shown in FIG. 2 of the '645 patent (in FIG. 2, the AOM scans an incident angle θ_i , and in another embodiment, a telescope is used between the AOM and the grating); (c) the grating-based, phase control, optical delay line using an acousto-optic modulator and a diffraction grating to scan an input beam shown in FIG. 3 of the '645 patent; (d) the grating-based, phase control, optical delay line using a scanning mirror to change the grating input angle shown FIG. 4 of the '645 patent

(as described in the '645 patent, a telescope is disposed between the scanning mirror and the grating to prevent beam walk-off at the grating); (e) the grating-based, phase control, optical delay line using a steerable grating shown in FIG. 5 of the '645 patent; (f) the grating-based, phase control, optical delay line using a radially scanned, circular, 5 holographic, optical element shown in FIG. 6 of the '645 patent; (g) the mirror configuration for pulse shaping shown in FIG. 11 of the '645 patent; (h) the grating-based, phase control, optical delay line in a double-pass configuration shown in FIG. 13 of the '645 patent; (i) the grating-based, phase control, optical delay line with elements that can be modified to change the scanning group delay shown in FIG. 14 of the '645 patent; (j) 10 the grating-based, phase control, optical delay line using a scanning grating shown in FIG. 16 of the '645 patent; (k) the scanning, optical delay line apparatus using a rotating, circular, holographic, optical element to produce a scanning group delay shown in FIG. 17 of the '645 patent; (l) the scanning optical delay line apparatus using an acousto-optic modulator and a diffraction grating shown in FIG. 18 of the '645 patent; (m) the grating-based, phase control, optical delay line using a scanning mirror with its axis of rotation 15 offset from the optical axis shown in FIG. 20 of the '645 patent; and (n) the grating-based, phase control, optical delay line using a polygon mirror with its axis of rotation offset from the optical axis shown in FIG. 21 of the '645 patent.

What is claimed is:

1. An optical delay line which comprises:
a plurality of optical elements in optical communication with each other,
wherein:
 - 5 at least one of the plurality of optical elements is capable of spatially dispersing a spectrum of an optical signal to provide a spatially dispersed optical signal;
 - at least one of the plurality of optical elements is adjustable to affect one or more of a phase delay and a group delay of an optical signal; and
 - 10 at least one of the plurality of optical elements compensates for polarization introduced into the optical signal by others of the optical elements.
2. The optical delay line of claim 1, wherein at least one adjustable optical element repeatedly scans to produce a change of optical group delay and a time varying optical phase delay.
3. The optical delay line of claim 1 wherein the spatially dispersing element comprises a diffractive element.
- 15 4. The optical delay line of claim 1 wherein the adjustable optical element comprises a mirror.
5. The optical delay line of claim 4 wherein the mirror is rotated by a rotation mechanism.
- 20 6. The optical delay line of claim 5 wherein the rotation mechanism comprises a galvanometer.
7. The optical delay line of claim 1 wherein the adjustable optical element comprises a rotating polygonal mirror.
- 25 8. The optical delay line of claim 4 wherein at least one of the plurality of optical elements is a double-pass mirror.
9. An optical delay line which comprises:
a collimator lens system;

WO 02/071117

PCT/EP02/02231

- a grating disposed to receive radiation output from the collimator lens system;
- 5 a collector lens system disposed to receive at least a portion of radiation diffracted by the grating;
- 10 a rotatable mirror disposed substantially at a back focal plane of the collector lens system;
- a reflector disposed to reflect at least a portion of radiation diffracted by the grating; and
- 15 a polarization compensation window disposed in a path of radiation passing through the optical delay line.
10. The optical delay line of claim 9 wherein:
- the collimator lens system, the reflector, and an output end of an optical fiber are affixed in a unit, which unit is movable by a translation mechanism.
11. An optical delay line which comprises:
- 15 a collimator lens system;
- a grating disposed to receive radiation output from the collimator lens system;
- a collector lens system disposed to receive at least a portion of radiation diffracted by the grating;
- 20 a rotatable mirror disposed substantially at a back focal plane of the collector lens system; and
- a reflector disposed to reflect at least a portion of radiation diffracted by the grating;
- 25 wherein the collimator lens system, the reflector, and an output end of an optical fiber are affixed in a unit, which unit is movable by a translation mechanism.
12. An imaging system for imaging a sample comprising:
- an optical source capable of producing an optical signal having an optical spectrum;

WO 02/071117

PCT/EP02/02231

an interferometer in communication with the optical source;
a detector in optical communication with the interferometer; and
an optical delay line in optical communication with the interferometer that
comprises a plurality of optical elements in optical communication with each other,
5 wherein: (i) at least one of the plurality of optical elements is capable of spatially
dispersing a spectrum of the optical signal to provide a spatially dispersed optical signal,
(ii) at least one of the plurality of optical elements is adjustable to affect one or more of a
phase delay and a group delay of the optical signal, and (iii) at least one of the plurality of
optical elements compensates for polarization introduced into the optical signal by others
10 of the optical elements.

13. The imaging system of claim 12, wherein at least one adjustable
optical element repeatedly scans to produce a change of optical group delay and a time
varying optical phase delay.

14. The system of claim 13, further comprising a signal processing unit
15 in electrical communication with the detector and wherein the adjustable optical element is
repetitively scanned, and the signal processing unit compensates any for non-uniform rate
of change of phase delay.

15. The imaging system of claim 13, wherein the spatially dispersive
element comprises a diffractive element.

16. The imaging system of claim 13 which further comprises an
acousto-optic modulator in optical communication with the optical delay line.

17. The imaging system of claim 13 which further comprises an electro-
optic beam deflector in optical communication with the optical delay line.

18. The imaging system of claim 13 wherein the adjustable optical
25 element comprises a polygon scanning mirror.

19. The imaging system of claim 13 wherein the spatially dispersive
element has a periodic optical structure with an adjustable period, the spatially dispersive
element angularly dispersing the optical signal.

20. The imaging system of claim 13 wherein at least one of the plurality of optical elements is a double-pass mirror.
21. A scanning optical coherence tomography imaging system comprising:
- 5 an optical source capable of producing an optical signal having an optical spectrum;
- an interferometer in communication with the optical source;
- a detector in optical communication with the interferometer;
- 10 a signal processor in electrical communication with the detector;
- an optical delay line comprised of optical elements that is in optical communication with the interferometer, wherein (i) at least one of the optical elements is capable of spatially dispersing the optical signal, and (ii) at least one optical element to compensate for polarization introduced into the optical signal by others of the optical elements, and the optical delay line further comprises a scanning device capable of
- 15 adjusting at least one of the optical elements to control an optical group delay; and
- wherein: (i) the interferometer interferometrically combines the delayed optical signal with a portion of the optical signal scattered by a sample, (ii) the detector detects the interferometrically combined signal to produce one or more of a substantially zero frequency heterodyne signal and a substantially non-zero frequency heterodyne signal
- 20 in response thereto, and (c) the signal processor produces images of the sample in response to the zero frequency heterodyne signal or non-zero frequency heterodyne signal, respectively.
22. An imaging system for imaging a sample comprising:
- an optical source capable of producing an optical signal having an optical
- 25 spectrum;
- an interferometer in communication with the optical source;
- a detector in optical communication with the interferometer; and

WO 02/071117

PCT/EP02/02231

an optical delay line which comprises: (i) a collimator lens system; (ii) a grating disposed to receive radiation output from the collimator lens system; (iii) a collector lens system disposed to receive at least a portion of radiation diffracted by the grating; (iv) a rotatable mirror disposed substantially at a back focal plane of the collector lens system; and (v) a reflector disposed to reflect at least a portion of radiation diffracted by the grating; wherein the collimator lens system, the reflector, and an output end of an optical fiber are affixed in a unit, which unit is movable by a translation mechanism.

WO 02/071117

1/2

PCT/EP02/02231

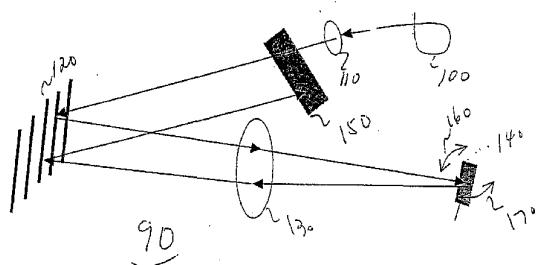


FIG. 1

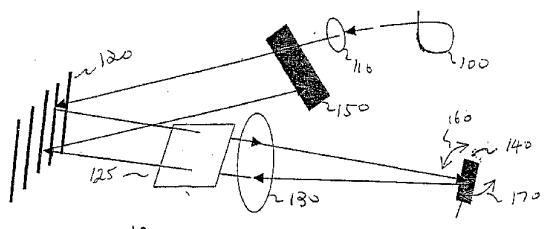


FIG. 2

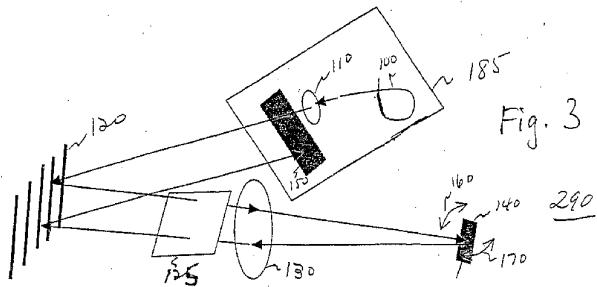


Fig. 3

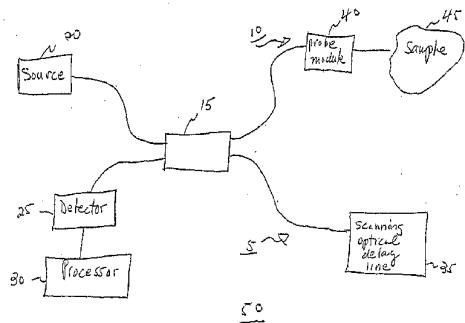


FIG. 4

【国際公開パンフレット（コレクトバージョン）】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization
International Bureau(43) International Publication Date
12 September 2002 (12.09.2002)

PCT

(10) International Publication Number
WO 02/071117 A3

(51) International Patent Classification: G02B 6/293, 6/34, G01N 21/45

(21) International Application Number: PCT/EP02/02231

(22) International Filing Date: 1 March 2002 (01.03.2002)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data: 09/797,748 1 March 2001 (01.03.2001) US

(71) Applicants (for all designated States except GB): CARL ZEISS (DUL/DL); 89518 Heidenheim (DL); CARL ZEISS OPHTHALMIC SYSTEMS, INC. [US/US]; 5160 Hacienda Drive, 94568 Dublin (US).

(72) Inventors: EVERETT, Matt, J.; 2566 Regent Road, Livermore, CA 94550 (US); WEI, Jay; 397 Indian Hill Place, Fremont, CA 94539 (US).

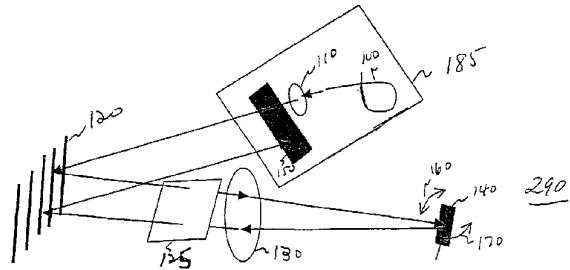
(81) Designated State (national): JP.

(84) Designated States (regional): European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE; TR).

(85) Published:
with international search report(88) Date of publication of the international search report:
28 August 2003

(54) Title: OPTICAL DELAY LINE

WO 02/071117 A3



(57) Abstract: One embodiment of the present invention is an optical delay line that comprises a plurality of optical elements in optical communication with each other, wherein: (a) at least one of the plurality of optical elements is capable of spatially dispersing a spectrum of an optical signal to provide a spatially dispersed optical signal; (b) at least one of the plurality of optical elements is adjustable to affect one or more of a phase delay and a group delay of an optical signal; and (c) at least one of the plurality of optical elements compensates for polarization introduced into the optical signal by others of the optical elements.

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/EP 02/02231
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
IPC 7 G02B6/293 G02B6/34 G01N21/45		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)		
IPC 7 G02B G01N G01B		
Documentation searched other than minimum documentation (to the extent that such documents are included in the fields searched)		
Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used)		
EPO-Internal, WPI Data, INSPEC, COMPENDEX, IBM-TDB		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	SILVA K K M B D ET AL: "Extended range, rapid scanning optical delay line for biomedical interferometric imaging" ELECTRONICS LETTERS, IEE STEVENAGE, GB, vol. 35, no. 17, 19 August 1999 (1999-08-19), pages 1404-1406, XP006012570 ISSN: 0013-5194 the whole document	1-6, 8, 12-15, 20, 21
Y	US 6 111 645 A (TERNEY GUILLERMO ET AL) 29 August 2000 (2000-08-29) cited in the application column 1, line 44 -column 9, line 27; figures 1-13	7, 16-19
A	---	7, 16-19
	---	1-6, 8-15, 22
	---	-/-
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C.		<input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.
* Special categories of cited documents :		
A document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance		
B earlier document but published on or after the International filing date		
C document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other specific event (as specified in the text)		
D document relating to an oral disclosure, use, exhibition or other means		
E document published later than the International filing date but later than the priority date claimed		
F later document published after the International filing date of the application and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention		
G document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone		
H document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken in combination with one or more other documents, such combination being obvious to a person skilled in this art		
I document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the International search	Data of mailing of the International search report	
7 February 2003	18/02/2003	
Name and mailing address of the ISA	Authorized officer	
European Patent Office, P.O. 8318 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel: (+31-70) 340-2040, Tx: 31 651 epc nl, Fax: (+31-70) 340-3916	Wolf, S	

Form PCT/ISA210 (second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/EP 02/02231
C(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	TEARNEY J ET AL: "HIGH-SPEED PHASE- AND GROUP-DELAY SCANNING WITH A GRATING-BASED PHASE CONTROL DELAY LINE" OPTICS LETTERS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, US, vol. 22, no. 23, 1 December 1997 (1997-12-01), pages 1811-1813, XP000736869 ISSN: 0146-9592 the whole document -----	1-6
A	ROLLINS A M ET AL: "IN VIVO VIDEO RATE OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY" OPTICS EXPRESS, OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, WASHINGTON, DC, US, vol. 3, no. 6, 14 September 1998 (1998-09-14), pages 219-229, XP001041324 ISSN: 1094-4087 the whole document -----	1-22
A	DELACHENAL N ET AL: "Robust and rapid optical low-coherence reflectometer using a polygon mirror" OPTICS COMMUNICATIONS, NORTH-HOLLAND PUBLISHING CO, AMSTERDAM, NL, vol. 162, no. 4-6, 15 April 1999 (1999-04-15), pages 195-199, XP004165455 ISSN: 0030-4018 paragraph '0002!; figure 1 -----	1,12,21
A	US 5 892 583 A (LI MING-CHIANG) 6 April 1999 (1999-04-06) column 12, line 26 -column 13, line 19; figure 11 -----	11,22

Form PCT/ISA210 (continuation of second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT					
International application No. PCT/EP 02/02231					
Box I Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 1 of first sheet)					
<p>This International Search Report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <input type="checkbox"/> Claims Nos.: because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely: 2. <input type="checkbox"/> Claims Nos.: because they relate to parts of the International Application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful International Search can be carried out, specifically: 3. <input type="checkbox"/> Claims Nos.: because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a). 					
Box II Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 2 of first sheet)					
<p>This International Searching Authority found multiple Inventions in this international application, as follows:</p> <p style="text-align: center;">see additional sheet</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <input type="checkbox"/> As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this International Search Report covers all searchable claims. 2. <input checked="" type="checkbox"/> As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee. 3. <input type="checkbox"/> As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this International Search Report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.: 4. <input type="checkbox"/> No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this International Search Report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.: 					
<p>Remark on Protest</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 15%; text-align: right; padding-right: 5px;"><input type="checkbox"/></td> <td>The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%; text-align: right; padding-right: 5px;"><input type="checkbox"/></td> <td>No protest accompanied the payment of additional search fees.</td> </tr> </table>		<input type="checkbox"/>	The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.	<input type="checkbox"/>	No protest accompanied the payment of additional search fees.
<input type="checkbox"/>	The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.				
<input type="checkbox"/>	No protest accompanied the payment of additional search fees.				

Form PCT/ISA210 (continuation of first sheet (1)) (July 1998)

International Application No. PCT/EP 02 02231

FURTHER INFORMATION CONTINUED FROM PCT/ISA/ 210

This International Searching Authority found multiple (groups of) inventions in this international application, as follows:

1. Claims: 1-10,12-21

Dispersive optical delay line with compensation of difference in grating reflectivity for different polarizations, imaging system using the delay line

2. Claims: 11,22

Optical delay line with input fiber, collimation lens and double-pass mirror on one translation stage

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP 02/02231

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 6111645	A	29-08-2000	US 6134003 A US 5748598 A US 5784352 A US 5459570 A US 6282011 B1 US 2001036002 A1 AU 1977597 A EP 0883793 A1 JP 2000503237 T JP 2002214127 A US 6485413 B1 WO 9732182 A1 US 6160826 A US 6501551 B1 US 5956355 A WO 9723870 A1 WO 9533970 A1 DE 69227902 D1 DE 69227902 T2 EP 0581871 A1 JP 6511312 T WO 9219930 A1 US 5465147 A US 5321501 A EP 0981733 A1 JP 2001527659 T WO 9852021 A1	17-10-2000 05-05-1998 21-07-1998 17-10-1995 28-08-2001 01-11-2001 16-09-1997 16-12-1998 21-03-2000 31-07-2002 26-11-2002 04-09-1997 12-12-2000 31-12-2002 21-09-1999 03-07-1997 14-12-1995 28-01-1999 17-06-1999 09-02-1994 15-12-1994 12-11-1992 07-11-1995 14-06-1994 01-03-2000 25-12-2001 19-11-1998
US 5892583	A	06-04-1999	NONE	

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 1992)

フロントページの続き

(51) Int.Cl. ⁷	F I	テーマコード(参考)
G 02 B 26/10	G 02 F 1/11 505	2 H 079
G 02 F 1/11	G 01 B 11/24	D

(74)代理人 100094798

弁理士 山崎 利臣

(74)代理人 100099483

弁理士 久野 琢也

(74)代理人 100114890

弁理士 アインゼル・フェリックス=ラインハルト

(72)発明者 マット ジェー エヴェレット

アメリカ合衆国 カリフォルニア リヴァモア リージェント ロード 2566

(72)発明者 ジェイ ウェイ

アメリカ合衆国 カリフォルニア フリーモント インディアン ヒル プレイス 397

F ターム(参考) 2F064 AA09 GG00 GG02 GG12 GG44 GG49 GG51 JJ03 JJ05

2F065 AA51 FF51 LL00 LL02 LL04 LL12 LL14 LL42 LL62 MM16

2G059 BB12 EE02 EE09 FF02 JJ17 JJ19 LL01

2H041 AA11 AA23 AB14 AZ05

2H045 AB00 BA02 DA31

2H079 AA04 BA03 CA24 KA08 KA20