

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第3657362号

(P3657362)

(45) 発行日 平成17年6月8日(2005.6.8)

(24) 登録日 平成17年3月18日(2005.3.18)

(51) Int.Cl.⁷

G01J 11/00

F I

G01J 11/00

請求項の数 4 (全 10 頁)

(21) 出願番号	特願平8-185235	(73) 特許権者	503360115
(22) 出願日	平成8年7月16日(1996.7.16)		独立行政法人科学技術振興機構
(65) 公開番号	特開平10-30965		埼玉県川口市本町4丁目1番8号
(43) 公開日	平成10年2月3日(1998.2.3)	(73) 特許権者	000004226
審査請求日	平成14年11月11日(2002.11.11)		日本電信電話株式会社
			東京都千代田区大手町二丁目3番1号
		(74) 代理人	100089635
			弁理士 清水 守
		(72) 発明者	町田 進
			東京都武蔵野市緑町2-4-39
		(72) 発明者	蔣 曙東
			東京都武蔵野市八幡町1-4-35 パークヒルズ武蔵野201室

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光パルス特性測定装置およびその測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

(a) 被測定光パルスの入力光を一对の出力光に分岐する光分岐器と、
 (b) 該光分岐器の一对の出力光のうちのどちらか一方の光路長を変調する手段と、
 (c) 前記光分岐器の一对の出力光のうちのどちらか一方の光路長を、前記光分岐器の出力光の他方と比して変化させる手段と、
 (d) 前記一对の出力光を合波する光合波器と、
 (e) 該光合波器の出力光をホモダイン検波する光検波器と、
 (f) 該光検波器から出力する交流信号の振幅を測定する手段とを備えたことを特徴とする光パルス特性測定装置。

【請求項2】

(a) 被測定光パルスの入力光を第1光及び第2光に分岐し、
 (b) 前記第1光及び第2光のうちのどちらか一方の光路長を変調し、
 (c) 前記第1光及び第2光のうちのどちらか一方の光路長を、前記第1光又は第2光の他方と比して変化させ、
 (d) 前記第1光及び第2光を光合波器で合波し、
 (e) 前記光合波器の出力光を光検波器でホモダイン検波し、
 (f) 前記光検波器から出力する交流信号の振幅を測定する工程を含む、入力光の光パルス特性測定方法で、

前記第1光及び第2光のどちらか一方の光路長を変調し、前記第1光と第2光とを前記

光合波器で合波して、該光合波器の出力光を前記光検波器でホモダイン検波し、光路長の変調により発生する交流信号成分を測定することを特徴とする光パルス特性測定方法。

【請求項 3】

- (a) 被測定光パルスの入力光を一对の出力光に分岐する光分岐器と、
- (b) 該光分岐器の一对の出力光のうちのどちらか一方の光路長を変調する手段と、
- (c) 前記光分岐器の一对の出力光のうちのどちらか一方の光路長を、前記光分岐器の出力光の他方と比して変化させる手段と、
- (d) 前記光分岐器の一对の出力光のうちどちらか一方の光を断続する手段と、
- (e) 一对の出力光を合波する光合波器と、
- (f) 該光合波器の出力光をホモダイン検波する光検波器と、
- (g) 前記光検波器から出力した交流信号の振幅を検波する検波手段と、
- (h) 前記光を断続する手段の操作と同期した前記交流信号の検波手段の出力の振幅を同期検出する手段とを備えることを特徴とする光パルス特性測定装置。

10

【請求項 4】

- (a) 被測定光パルスの入力光を第 1 光及び第 2 光に分岐し、
- (b) 前記第 1 光及び第 2 光のうちのどちらか一方の光路長を変調し、
- (c) 前記第 1 光及び第 2 光のうちのどちらか一方の光路長を、前記第 1 光又は第 2 光の他方と比して変化させ、
- (d) 前記第 1 光及び第 2 光のうちのどちらか一方の光を断続し、
- (e) 前記第 1 光及び第 2 光を光合波器で合波し、
- (f) 前記光合波器の出力光を光検波器でホモダイン検波し、
- (g) 前記光検波器の出力交流信号の振幅を検波し、

20

前記第 1 光及び第 2 光のうちのどちらか一方の光の断続と同期した前記光検波器の出力交流信号の振幅を同期検出する工程を含む光パルス特性測定方法で、

前記第 1 光及び第 2 光のうちのどちらか一方の光路長を変調し、及び、前記第 1 光及び第 2 光のどちらか一方の光を断続し、前記第 1 光及び第 2 光とを合波して、該光合波器の出力光を前記光検波器でホモダイン検波し、光路長の変調により発生する交流信号成分を振幅検波し、その出力の断続した信号成分を同期検波することを特徴とする光パルス特性測定方法。

【発明の詳細な説明】

30

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光パルスのパルス特性測定装置およびその測定方法に関する。

【0002】

【従来の技術】

特に光パルスのパルス幅がピコ秒、フェムト秒の光パルスのパルス特性測定において、光検波器を用いて直接検波する場合には、光検波器を含めた測定系全体の周波数特性によって測定されたパルス特性は、実際の値よりも大きくなる。このため、現在では 10 ピコ秒程度のパルス特性測定が限度である。また、ストリークカメラ、光サンプリングオシロスコープを用いる方法でも、数百フェムト秒以上である。

40

【0003】

さらに、非線形光学結晶を用いた自己相関法では、0.1 フェムト秒程度と高いが、高次の非線形光学効果を利用するために、測定に必要な光量は大きくなり、微弱な光パルスを測定することができない。また、測定できるパルス幅は結晶の長さ、測定波長は結晶の材質に依存し、それぞれ目的にあった結晶を用意しなければならない。

【0004】

高感度なパルス幅測定法として、ヘテロダイン法（参考文献 戸丸ほか：ヘテロダイン法による光パルス自己相関法、第 43 回応用物理学関連講演会 26 a-A-2、1996）が提案されているが、この方法では、測定用光学系に用いる周波数変調器の 2 次分散によって、実際のパルス幅に対して測定されたパルス幅は広がる。さらに、高次の高調波に

50

よるヘテロダイン成分の光検波が必要になり、光検波器に10GHz以上の広帯域特性が要求される。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】

しかしながら、上記した従来の技術では、光パルスのパルス特性を測定するためには、広帯域特性を持つ光検波器が必要であったり、測定に必要な光量が大きくなり測定感度に問題がある。

【0006】

本発明は、上記問題点を除去し、光検波器に広帯域特性を要求することなく、高感度、かつ、高安定な光パルス特性測定装置およびその測定方法を提供することを目的とする。

10

【0007】

【課題を解決するための手段】

本発明は、上記目的を達成するために、

〔1〕光パルス特性測定装置において、被測定光パルスの入力光を一对の出力光に分岐する光分岐器と、この光分岐器の一对の出力光のうちのどちらか一方の光路長を変調する手段と、前記光分岐器の一对の出力光のうちのどちらか一方の光路長を、前記光分岐器の出力光の他方と比して変化させる手段と、前記一对の出力光を合波する光合波器と、この光合波器の出力光をホモダイン検波する光検波器と、この光検波器から出力する交流信号の振幅を測定する手段とを備えるようにしたものである。

【0008】

20

〔2〕光パルス特性測定装置において、被測定光パルスの入力光を第1光及び第2光に分岐し、前記第1光及び第2光のうちのどちらか一方の光路長を変調し、前記第1光及び第2光のうちのどちらか一方の光路長を、前記第1光又は第2光の他方と比して変化させ、前記第1光及び第2光を光合波器で合波し、前記光合波器の出力光を光検波器でホモダイン検波し、前記光検波器から出力する交流信号の振幅を測定する工程を含む、入力光の光パルス特性測定方法で、前記第1光及び第2光のどちらか一方の光路長を変調し、前記第1光と第2光とを前記光合波器で合波して、この光合波器の出力光を前記光検波器でホモダイン検波し、光路長の変調により発生する交流信号成分を測定するようにしたものである。

【0009】

30

〔3〕光パルス特性測定装置において、被測定光パルスの入力光を一对の出力光に分岐する光分岐器と、この光分岐器の一对の出力光のうちのどちらか一方の光路長を変調する手段と、前記光分岐器の一对の出力光のうちのどちらか一方の光路長を、前記光分岐器の出力光の他方と比して変化させる手段と、前記光分岐器の一对の出力光のうちのどちらか一方の光を断続する手段と、一对の出力光を合波する光合波器と、この光合波器の出力光をホモダイン検波する光検波器と、前記光検波器から出力した交流信号の振幅を検波する検波手段と、前記光を断続する手段の操作と同期した前記交流信号の検波手段の出力の振幅を同期検出する手段とを備えるようにしたものである。

【0010】

〔4〕光パルス特性測定装置において、被測定光パルスの入力光を第1光及び第2光に分岐し、前記第1光及び第2光のうちのどちらか一方の光路長を変調し、前記第1光及び第2光のうちのどちらか一方の光路長を、前記第1光又は第2光の他方と比して変化させ、前記第1光及び第2光のうちのどちらか一方の光を断続し、前記第1光及び第2光を光合波器で合波し、前記光合波器の出力光を光検波器で検波し、前記光検波器の出力交流信号の振幅をホモダイン検波し、前記第1光及び第2光のうちのどちらか一方の光の断続と同期した前記光検波器の出力交流信号の振幅を同期検出する工程を含む光パルス特性測定方法で、前記第1光及び第2光のうちのどちらか一方の光路長を変調し、及び、前記第1光及び第2光のどちらか一方の光を断続し、前記第1光及び第2光とを合波して、この光合波器の出力光を前記光検波器でホモダイン検波し、光路長の変調により発生する交流信号成分を振幅検波し、その出力の断続した信号成分を同期検波するようにしたものである

40

50

。

【0011】

上記のように構成したので、

光パルス特性、特に、光パルス幅測定および光パルス検出は、ホモダイン自己相関法によって、ホモダイン干渉計を安定化せず、干渉計の光路差を変調することによって発生する安定な交流信号の振幅を測定することができる。

【0012】

ホモダイン干渉計の光路差の変動は直接出力信号の変化となり、一般的には干渉計を安定化する必要がある。この安定化には負帰還制御が通常用いられる。

【0013】

10

しかし、自己相関法で光パルスのパルス幅を測定する時には、光パルスの重なりのない状態、すなわち、干渉計出力のない状態から測定を開始する。

【0014】

したがって、この状態では安定化のための制御信号が得られず、安定化は不可能である。さらに、相関長を求めるために、干渉計の一方の光路を変化させる。このとき、干渉計が安定化のための制御をしていると、制御信号がこの光路の変化にも追従するので、制御信号と測定信号の分離が困難である。

【0015】

いま、干渉計を安定化させずに、一方の光路長を時間的に変調すると、その変調速度と振幅にしたがって干渉縞が変化し交流信号が発生する。この交流信号の振幅は干渉計の可視度に一致しているので、干渉計の光路差を変えながらこの交流信号の振幅を測定すれば、光路差に対する自己相関波形を求めることができる。ここで、干渉計が安定化されていないために生じる不安定性は、この交流信号の位相および周波数変化に変換されるので、振幅の変動は非常に小さくなる。

20

【0016】

この干渉計はホモダイン検波方式であるから、一方の光路を局部発振光として十分な光量を用いれば、他方の光路の信号光の強度は非常に小さくすることが可能であり、高感度な光パルスの検出ができる。さらに、ここで用いる光検波器は、光路差を変調したときに発生する交流信号を検波するのに必要な帯域幅で十分である。一例として、光路の変調波形を三角波で行い、その周期を100Hz、振幅を光波長の10倍とすると、発生する交流信号の周波数は2kHzとなり、通常的光検波器で十分である。

30

【0017】

被測定光パルスのパルス幅は、光路差を変えながら自己相関波形を測定して求める。いま、自己相関波形の半値幅を ΔL (m) とすると、パルス幅 $\Delta \tau$ は、

$$\Delta \tau = \Delta L / K \text{ (sec)} \quad \dots (1)$$

となる。

【0018】

ここで、被測定光パルス波形をガウス形とすると、 $K = 4.24 \times 10^8$ となる。

【0019】

また、 Sech^2 形とすると、 $K = 4.65 \times 10^8$ になる。

40

【0020】

光路差を強制的に変調しているために、パルス幅測定の分解能が制限される。変調振幅を被測定光パルスの半波長にすると、往復の振幅変化によって、交流信号は1周期分が発生し、交流信号の振幅の測定が可能となる。

【0021】

従って、半波長分がパルス位置の分解能に相当する。いま、光波長を1 μm 、光パルス波形を Sech^2 形とすると、分解能は、上記(1)式より、約2.5 フェムト秒 になり、非常に高分解能である。

【0022】

【発明の実施の形態】

50

以下、本発明の実施の形態について図面を参照して詳細に説明する。

【0023】

まず、本発明の第1実施例について説明する。

【0024】

図1は本発明の第1実施例を示す光パルス特性測定装置の構成図である。

【0025】

この図に示すように、光パルス特性測定装置は、光分岐器1、ミラー2、光路差調整用遅延器3、光路差変調用信号発生器4、光路差変調用ミラー5、相関長測定用遅延器6、光合波器7、光検波器8、9、差動増幅器10、帯域通過ろ波器11、交流電圧計12により構成されている。

10

【0026】

ここで、光路差変調用信号発生器4、光路差変調用ミラー5は光路長を変調する手段に、相関長測定用遅延器6は光路長を変化させる手段に、差動増幅器10、帯域通過ろ波器11、交流電圧計12は交流信号の振幅を測定する手段にそれぞれ対応する。

【0027】

光分岐器1は被測定光パルスを分岐するものであり、光合波器7は二つの光を合波するもので、ハーフミラー、無偏光ビームスプリッタ、光方向性結合器などが使用可能である。

【0028】

光路差変調用ミラー5は光波長の数倍の振動が得られれば十分であり、 piezo素子にミラーを張り付けたものが使用可能である。さらに、この作用は、光の位相を連続的に変化させるもので、同等の位相変化が得られるものならばどんなものでも良い。

20

【0029】

相関長測定用遅延器6はパルス幅を測定するときに用いるもので、その遅延距離は被測定光パルスのパルス幅に依存する。光路差調整用遅延器3は光分岐器1と光合波器7との間の二つの光路長を等しくするために設ける。これらの遅延器の一つに光路差変調用ミラー5を設けることも可能である。

【0030】

光合波器7の出力の光検波として、1個の光検波器を用いる方法もあるが、この実施例に示すように、2個の光検波器8、9と差動増幅器10を用いる構成の方が、入力光の持つ振幅雑音が抑圧され、雑音がショット雑音レベルになるので、S/N比が改善されることは明らかである。

30

【0031】

図1において、被測定光パルスは、入射端から入射され、光分岐器1で分岐され、一方はホモダイン検波の局部発振光として、ミラー2で反射され、光路差調整用遅延器3で光路長が他方と一致するように調整されて、光合波器7に導かれる。光分岐器1で分岐されたもう一方は信号光として、光路差変調用信号発生器4の信号で動作する光路差変調用ミラー5、相関長測定用遅延器6で反射されて、光合波器7に導かれる。

【0032】

光合波器7で合波された二つの光信号は光検波器8、9で検波され、差動増幅器10で光路差の変調によって生じた交流信号成分を測定可能な電圧まで増幅する。帯域通過ろ波器11は光路差の変調によって生じた交流信号成分のみを通過させて、S/N比を改善する。相関長測定用遅延器6の遅延量に対する交流信号成分を交流電圧計12で測定すれば、自己相関波形が得られる。

40

【0033】

この第1実施例では、光路差の変調によって発生した交流信号成分を測定するときには、帯域通過ろ波器11を用いればS/N比が改善できる。

【0034】

次に、第1実施例を用いて、微弱な光パルスを検出する方法について述べる。当然、帯域通過ろ波器11は光路差の変調によって生じた交流信号成分が通過するように調整する

50

。

【0035】

(1) 入力側光分岐器1の分岐比を調整して、必要かつ十分な局部発振光側の光量を設定する。

【0036】

(2) 信号光側に設置した被測定試料からの透過光、反射光または発光光の光路長を光路差調整用遅延器3で局部発振光側と一致させる。

【0037】

(3) 光路差調整用遅延器3、相関長測定用遅延器6を用いて、光路長を変調して発生する交流信号成分が最大になるように調整する。

10

【0038】

(4) 既知の信号光側の光強度の交流信号の振幅と比較して、被測定パルスの強度を求める。

【0039】

さらに、第1実施例を用いて、光パルスの位相特性を測定する方法について述べる。

【0040】

本実施例の出力交流信号の位相は、局部発振光と信号光との位相差を示している。

【0041】

したがって、この出力交流信号の位相を測定すれば光パルスの位相特性を測定することが可能である。位相測定には位相の基準となる交流信号が必要であるが、本実施例では、それが得られない。そこで、本実施例の出力交流信号と周波数がほぼ等しい基準交流信号を別に用意して、この基準信号と出力交流信号との位相差を位相検波器で測定する。しかし、位相検波器の出力には、基準信号と出力交流信号との定常的な位相差が加わる。ここで短時間の測定ならば、この定常位相差はほぼ直線になり、測定結果からこの直線成分を差し引くことによって、光パルスの位相特性を求めることができる。

20

【0042】

一方、光走査トンネル顕微鏡の検出手段に用いることにより、被測定試料の局所時間分光、局所コヒーレント発光を高感度に測定できる。

【0043】

次に、本発明の第2実施例について説明する。

30

【0044】

図2は本発明の第2実施例を示す光パルス特性測定装置の構成図である。なお、第1実施例と同じ部分には同じ符号を付してその説明は省略する。

【0045】

この実施例の特徴は、第1実施例の構成に、光チョッパ13、検波回路14、同期検出器15を加えた点である。光チョッパ13は光を断続する手段に、検波回路14は光路差の変調によって生じた交流信号を検波する手段に、同期検出器15は光を断続させる手段と同期して、交流信号検波器の出力の振幅を測定する同期検出手段にそれぞれ対応する。

【0046】

この実施例では、交流信号の検波後に、通常のRC形の平滑回路が使用できるが、カットオフ特性の急峻な低域通過ろ波器、帯域通過ろ波器を用いれば、高効率な同期信号成分とのSN比の改善が可能である。同期検出の手段としては通常のロックインアンプが使用できる。

40

【0047】

また、一般に、同期検出を行えばさらに高感度になる。しかし、光路差の変調で発生した交流信号を用いて同期検出を行うことは、参照信号が得られず不可能である。そこで、一方の光路に光チョッパを設けて光を断続すれば、光路差の変調によって生じた交流信号が断続される。この断続交流信号成分を検波すれば、光チョッパに同期した信号が得られ、同期検出を行うことが可能になる。

【0048】

50

ここで、第2実施例による実験結果について説明する。

【0049】

第2実施例の実験結果である受動モード同期チタンサファイア・パルスレーザの自己相関波形を測定した結果を図3に示す。この図において、横軸は相関長測定用遅延器6の移動距離による光路差を、縦軸は同期検出器15の出力振幅を示す。

【0050】

光分岐後の局部発振光側の光強度は、5 mW、信号光側の光強度は15 fWである。この結果、自己相関波形の半値幅の光路差は93.57 μmであり、前記(1)式を用いて求めたパルス幅は201.2 fsとなり、非線形光学結晶を用いた測定値とよく一致している。

10

【0051】

図4に示す(A)は、第2実施例の結果、つまり受動モード同期チタンサファイア・パルスレーザの自己相関波形を測定した結果(図3)をdB表示したものであり、SN比が25 dB以上確保されていることがわかる。なお、ここでは、同期検出器としてロックインアンプを用い、その積分時間を1秒に設定した。図4に示す(B)は第1実施例による実験結果である。この結果より、SN比を比べると、第2実施例の場合では、10 dB以上良く、高感度であることを示している。ホモダイン検波の信号出力は、局部発振光と信号光の積の平方根に比例するので、もしこの測定条件で、入力側光分岐器1の分岐比を1:1にすると、入力光量約8.6 nWの光パルスのパルス幅測定が、SN比25 dB以上で可能であり、非常に高感度であることを示している。

20

【0052】

なお、第1実施例及び第2実施例ではマッハツェンダー形干渉計での構成を示したが、マイケルソン形干渉計などの構成でも同様の動作を行わせることができる。さらに、構成部品も光ファイバを用いた部品の使用も可能である。

【0053】

なお、本発明は上記実施例に限定されるものではなく、本発明の趣旨に基づいて種々の変形が可能であり、これらを本発明の範囲から排除するものではない。

【0054】

【発明の効果】

以上、詳細に説明したように、本発明によれば、以下に示すような効果を奏することができる。

30

【0055】

(1) ホモダイン自己相関法を用いるために、非常に高感度である。

【0056】

(2) さらに、干渉計を安定化する必要もなく、単に光路差を変調して発生する交流信号成分を測定するために、非常に安定であり、光検波器の周波数特性も広帯域特性を必要とせず、構成も簡単である。

【0057】

(3) また、非常に微弱な光パルスの検出も可能である。

【0058】

(4) 光パルスの位相も測定可能である。

40

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の第1実施例を示す光パルス特性測定装置の構成図である。

【図2】 本発明の第2実施例を示す光パルス特性測定装置の構成図である。

【図3】 第2実施例の実験結果である受動モード同期チタンサファイア・パルスレーザの自己相関波形を測定した結果を示す図である。

【図4】 第2実施例及び第1実施例の実験結果である受動モード同期チタンサファイア・パルスレーザの自己相関波形を測定した結果を示す図である。

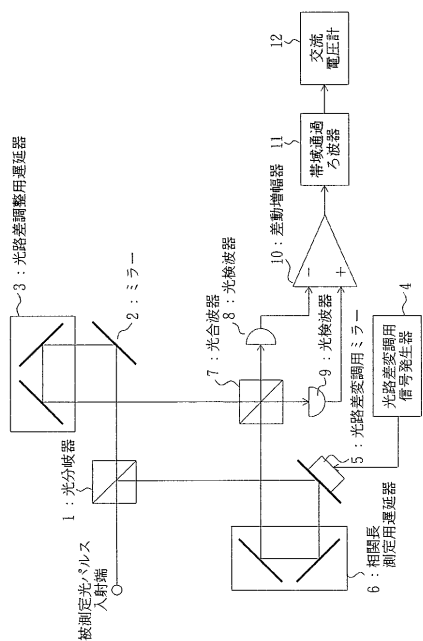
【符号の説明】

1 光分岐器

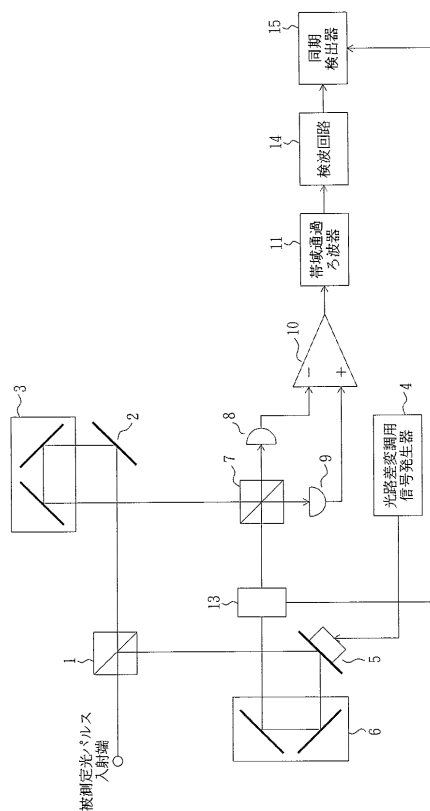
50

- 2 ミラー
- 3 光路差調整用遅延器
- 4 光路差変調用信号発生器
- 5 光路差変調用ミラー
- 6 相関長測定用遅延器
- 7 光合波器
- 8, 9 光検波器
- 10 差動増幅器
- 11 帯域通過ろ波器
- 12 交流電圧計
- 13 光チョッパ
- 14 検波回路
- 15 同期検出器

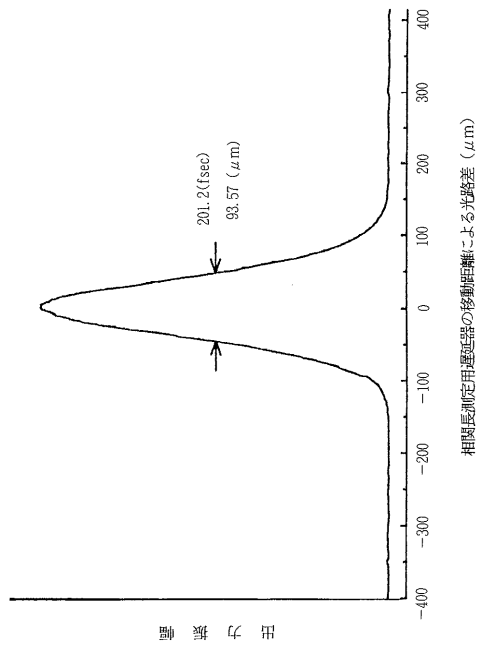
【図 1】



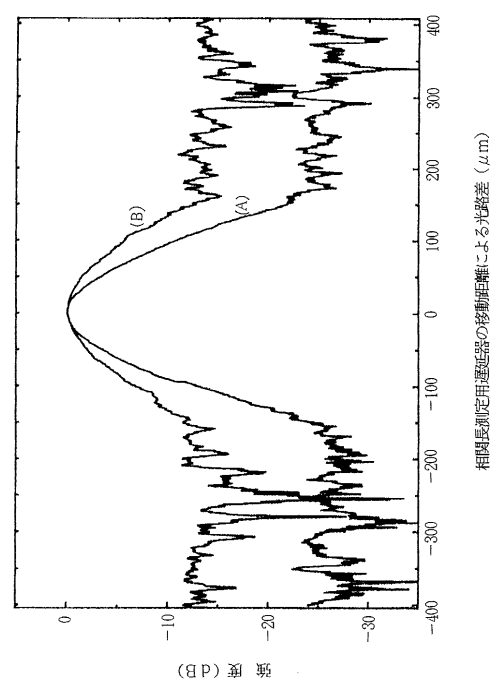
【図 2】



【図 3】



【図 4】



フロントページの続き

(72)発明者 山本 喜久

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 スタンフォード ライアンコート 8

審査官 平田 佳規

(56)参考文献 特開昭59-023225 (JP, A)

特開平04-331334 (JP, A)

実開平07-043939 (JP, U)

Measurement Science & Technology, 英国, 1993年, Vol.4 No.8, p.850~853

Review of Scientific Instruments , 米国, 1993年, Vol.64 No.9, p.2706~2707

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, DB名)

G01J 11/00

G01J 1/00- 1/02

G01J 1/42- 1/44

G01J 9/02

G01B 9/02

H01S 3/00

H04B 10/06- 10/08