

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5827140号
(P5827140)

(45) 発行日 平成27年12月2日(2015.12.2)

(24) 登録日 平成27年10月23日(2015.10.23)

(51) Int.Cl. F I
G O 1 J 9/02 (2006.01) G O 1 J 9/02

請求項の数 6 (全 14 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2012-12319 (P2012-12319)</p> <p>(22) 出願日 平成24年1月24日 (2012.1.24)</p> <p>(65) 公開番号 特開2013-152118 (P2013-152118A)</p> <p>(43) 公開日 平成25年8月8日 (2013.8.8)</p> <p>審査請求日 平成26年1月8日 (2014.1.8)</p> <p>前置審査</p>	<p>(73) 特許権者 000004226 日本電信電話株式会社 東京都千代田区大手町一丁目5番1号</p> <p>(74) 代理人 100127535 弁理士 豊田 義元</p> <p>(74) 代理人 100159190 弁理士 渡部 比呂志</p> <p>(72) 発明者 伊藤 文彦 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内</p> <p>(72) 発明者 井上 雅晶 東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内</p>
--	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザ光特性測定方法及び測定装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

遅延時間 τ の関数である被測定レーザ光のコヒーレンス度 $C(\tau)$ を測定するレーザ光特性測定方法であって、

被測定レーザ光の周波数を線形に掃引し、

前記周波数掃引されたレーザ光を2系統に分岐し、

分岐された一方のレーザ光を光ファイバに入射して当該光ファイバで生じたレイリー散乱光を取り込み、

前記レイリー散乱光と前記分岐された他方のレーザ光とを合波し、

前記合波によって生じる光電流を検出し、

前記検出された光電流の電流値をフーリエ変換してその周波数スペクトル $I_{\sim q}(\omega_i)$ を算出し、

同様に、連続して光電流を検出すると共に、その周波数スペクトルの位相共役 $I_{\sim s}^*(\omega_k)$ を算出し、

偏角 $[\omega_q - \omega_s]$ を測定 q 回目と s 回目の中心周波数の差と遅延時間の積としたとき、次式

【数 2 4】

$$\frac{\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle}{\left[\langle |\tilde{I}_q(\tau_i)|^2 \rangle \cdot \langle |\tilde{I}_s^*(\tau_k)|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}}} = |\gamma(\tau)|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$$

が成り立つことを利用して、

$|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau_i\}$ の絶対値の平方根を算出することにより前記コヒーレンス度の絶対値 $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|$ を求めることを特徴とするレーザ光特性測定方法。

【請求項 2】

前記被測定レーザ光のコヒーレンス度の絶対値が $1/e$ になる τ_i をもってコヒーレンス時間を求めることを特徴とする請求項 1 記載のレーザ光特性測定方法。

【請求項 3】

遅延時間 τ の関数である被測定レーザ光のレーザ中心周波数変化を測定するレーザ光特性測定方法であって、

被測定レーザ光の周波数を線形に掃引し、

前記周波数掃引されたレーザ光を 2 系統に分岐し、

分岐された一方のレーザ光を光ファイバに入射して当該光ファイバで生じたレイリー散乱光を取り込み、

前記レイリー散乱光と前記分岐された他方のレーザ光とを合波し、

前記合波によって生じる光電流を検出し、

前記検出された光電流の電流値をフーリエ変換してその周波数スペクトル $I_{\sim q}(\tau_i)$ を算出し、

同様に、連続して光電流を検出すると共に、その周波数スペクトルの位相共役 $I_{\sim s}^*(\tau_k)$ を算出し、

偏角 $[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau_i$ を測定 q 回目と s 回目の中心周波数の差と遅延時間の積としたとき、次式

【数 2 5】

$$\frac{\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle}{\left[\langle |\tilde{I}_q(\tau_i)|^2 \rangle \cdot \langle |\tilde{I}_s^*(\tau_k)|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}}} = |\gamma(\tau)|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$$

が成り立つことを利用して、

$|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau_i\}$ の偏角が、遅延時間 τ における 2 回の測定の間に変化したレーザ中心周波数差に比例することを利用してレーザ中心周波数変化を求めることを特徴とするレーザ光特性測定方法。

【請求項 4】

遅延時間 τ の関数である被測定レーザ光の特性コヒーレンス度 $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|$ を測定するレーザ光特性測定装置であって、

被測定レーザ光の周波数を線形に掃引する掃引手段と、

前記周波数掃引されたレーザ光を 2 系統に分岐する分岐手段と、

分岐された一方のレーザ光を光ファイバに入射して当該光ファイバで生じたレイリー散乱光を取り込む取り込み手段と、

前記レイリー散乱光と前記分岐された他方のレーザ光とを合波する合波手段と、

前記合波によって生じる光電流を検出手段と、

前記検出された光電流の電流値をフーリエ変換してその周波数スペクトル $I_{\sim q}(\tau_i)$ を算出し、同様に、連続して光電流を検出すると共に、その周波数スペクトルの位相共役 $I_{\sim s}^*(\tau_k)$ を算出する算出手段と、

偏角 $[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau_i$ を測定 q 回目と s 回目の中心周波数の差と遅延時間の積とした

10

20

30

40

50

とき、次式

【数 2 6】

$$\frac{\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle}{\left[\langle |\tilde{I}_q(\tau_i)|^2 \rangle \cdot \langle |\tilde{I}_s^*(\tau_k)|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}}} = |\gamma(\tau)|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$$

が成り立つことを利用して、

$|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle| \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$ の絶対値の平方根を算出することにより前記コヒーレンス度の絶対値 $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|$ を求める解析手段と

10

を具備することを特徴とするレーザ光特性測定装置。

【請求項 5】

前記解析手段は、前記被測定レーザ光のコヒーレンス度の絶対値が $1/e$ になる τ をもってコヒーレンス時間を求めることを特徴とする請求項 4 記載のレーザ光特性測定装置。

【請求項 6】

遅延時間 τ の関数である被測定レーザ光のレーザ中心周波数変化を測定するレーザ光特性測定装置であって、

被測定レーザ光の周波数を線形に掃引する掃引手段と、

前記周波数掃引されたレーザ光を 2 系統に分岐する分岐手段と、

分岐された一方のレーザ光を光ファイバに入射して当該光ファイバで生じたレイリー散乱光を取り込む取り込み手段と、

20

前記レイリー散乱光と前記分岐された他方のレーザ光とを合波する合波手段と、

前記合波によって生じる光電流を検出する検出手段と、

前記検出された光電流の電流値をフーリエ変換してその周波数スペクトル $I_q(\omega_i)$ を算出し、同様に、連続して光電流を検出すると共に、その周波数スペクトルの位相共役 $I_s^*(\omega_k)$ を算出する算出手段と、

偏角 $[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau$ を測定 q 回目と s 回目の中心周波数の差と遅延時間の積とした

とき、次式

【数 2 7】

$$\frac{\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle}{\left[\langle |\tilde{I}_q(\tau_i)|^2 \rangle \cdot \langle |\tilde{I}_s^*(\tau_k)|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}}} = |\gamma(\tau)|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$$

30

が成り立つことを利用して、

$|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle| \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$ の偏角が、遅延時間 τ における 2 回の測定の間に変化したレーザ中心周波数差に比例することを利用してレーザ中心周波数変化を求める解析手段と

を具備することを特徴とするレーザ光特性測定装置。

【発明の詳細な説明】

40

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザ光のコヒーレンス度、レーザ中心周波数変化を測定するレーザ光特性測定方法及び測定装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来のレーザ光特性測定方法としては、非特許文献 1 に記載のレーザ光のスペクトル測定法が知られている。この方法は、被測定レーザを 2 分岐し、一方を用意した十分な長さの光ファイバに伝送させ、もう一方を音響光学素子などに通して周波数を一定量だけシフトさせる。その後、両者を合波し、受光素子により受光して、その受光信号のビートスペ

50

クトル幅を測定するものである。

【0003】

このビートスペクトル幅の $1/2$ が、レーザ光の発振スペクトル線幅（以下、レーザ光スペクトル線幅）であることが知られており、測定したビートスペクトル幅からレーザ光スペクトル線幅を測定することができる。尚、このレーザ光スペクトル線幅を Δf とすると、レーザ光のコヒーレンス時間は $1/\Delta f$ となる。また、このコヒーレンス時間に光速度定数を乗算すればコヒーレンス長が得られる。

【0004】

但し、上記の方法では、分岐されたレーザ光の一方を十分に長い光ファイバに通して十分な時間遅延を与えてからもう一方と合波する必要があり、被測定レーザ光のコヒーレンス長よりも十分に長い遅延が要求される。このため、測定時には不明であるレーザ光のコヒーレンス長よりも長い遅延が得られていることを前提条件となっている。したがって、測定結果は、レーザ光スペクトル線幅の一定の推測を可能にするものの、その測定結果は不確実性を含んだものにならざるを得なかった。この懸念は、特にスペクトル線幅が狭い（コヒーレンス時間が長い）レーザ光を測定する場合に顕著であり、近年においてファイバレーザなどの数KHz程度のスペクトル線幅を有するレーザが商用化されている状況では、その測定のあいまいさが問題となっている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】T. Okoshi, K. Kikuchi, and A. Nakayama, "Novel method for high resolution measurement of laser output spectrum," Electronics Letters, Vol. 16, No. 16, pp. 630-631, 1980

【非特許文献2】Y. Koshikiya, X. Fan, and F. Ito, "Long range and cm-level spatial resolution measurement using coherent optical frequency domain reflectometry with SSB-SC modulator and narrow linewidth fiber laser", IEEE/OSA J. Lightwave Technol. Vol. 26, No. 18, pp. 3287-3294, 2008

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

以上述べたように、従来のレーザ光特性測定技術では、レーザ光のコヒーレンス長よりも長い遅延が得られていることが前提条件となっているため、レーザ光スペクトル幅の推測は可能であるものの、その測定結果に不確実性が含まれている。

本発明は、上記の事情を鑑みてなされたもので、レーザ光のスペクトル線幅が狭く、コヒーレンス時間が長いレーザ光のコヒーレンス度、コヒーレンス時間、レーザ中心周波数変化をより正確に測定可能とするレーザ光特性測定方法及び測定装置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】

【0007】

本発明に係るレーザ光特性測定方法は、以下のような態様の構成とする。

(1) 遅延時間 τ の関数である被測定レーザ光のコヒーレンス度 $C(\tau)$ を測定するレーザ光特性測定方法であって、被測定レーザ光の周波数を線形に掃引し、前記周波数掃引されたレーザ光を2系統に分岐し、分岐された一方のレーザ光を光ファイバに入射して当該光ファイバで生じたレイリー散乱光を取り込み、前記レイリー散乱光と前記分岐された他方のレーザ光とを合波し、前記合波によって生じる光電流を検出し、前記検出された光電流の電流値をフーリエ変換してその周波数スペクトル $I_q(\omega_i)$ を算出し、同様に、連続して光電流を検出すると共に、その周波数スペクトルの位相共役 $I_s^*(\omega_k)$ を算出し、偏角 $[\omega_q - \omega_s]$ を測定 q 回目と s 回目の中心周波数の差と遅延時間の積としたとき、

【0008】

10

20

30

40

50

【数 1】

$$\frac{\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle}{\left[\langle |\tilde{I}_q(\tau_i)|^2 \rangle \cdot \langle |\tilde{I}_s^*(\tau_k)|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}}} = |\gamma(\tau)|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$$

が成り立つことを利用して、 $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$ の絶対値の平方根を算出することにより前記コヒーレンス度の絶対値 $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|$ を求める態様とする。

(2)(1)において、前記被測定レーザ光のコヒーレンス度の絶対値が1/eになるをもってコヒーレンス時間を求める態様とする。

10

【0009】

(3)遅延時間の関数である被測定レーザ光のレーザ中心周波数変化を測定するレーザ光特性測定方法であって、被測定レーザ光の周波数を線形に掃引し、前記周波数掃引されたレーザ光を2系統に分岐し、分岐された一方のレーザ光を光ファイバに入射して当該光ファイバで生じたレイリー散乱光を取り込み、前記レイリー散乱光と前記分岐された他方のレーザ光とを合波し、前記合波によって生じる光電流を検出し、前記検出された光電流の電流値をフーリエ変換してその周波数スペクトル $I_{\sim q}(\omega_i)$ を算出し、同様に、連続して光電流を検出すると共に、その周波数スペクトルの位相共役 $I_{\sim s}^*(\omega_k)$ を算出し、偏角 $[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau_i$ を測定q回目とs回目の中心周波数の差と遅延時間の積としたとき、
次式

20

【0010】

【数 2】

$$\frac{\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle}{\left[\langle |\tilde{I}_q(\tau_i)|^2 \rangle \cdot \langle |\tilde{I}_s^*(\tau_k)|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}}} = |\gamma(\tau)|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$$

が成り立つことを利用して、 $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$ の偏角が、遅延時間における2回の測定の間に変化したレーザ中心周波数差に比例することを利用してレーザ中心周波数変化を求める態様とする。

30

本発明に係るレーザ光特性測定装置は、以下のような態様の構成とする。

【0011】

(4)遅延時間の関数である被測定レーザ光の特性コヒーレンス度 $\gamma(\tau)$ を測定するレーザ光特性測定装置であって、被測定レーザ光の周波数を線形に掃引する掃引手段と、前記周波数掃引されたレーザ光を2系統に分岐する分岐手段と、分岐された一方のレーザ光を光ファイバに入射して当該光ファイバで生じたレイリー散乱光を取り込む取り込み手段と、前記レイリー散乱光と前記分岐された他方のレーザ光とを合波する合波手段と、前記合波によって生じる光電流を検出手段と、前記検出された光電流の電流値をフーリエ変換してその周波数スペクトル $I_{\sim q}(\omega_i)$ を算出し、同様に、連続して光電流を検出すると共に、その周波数スペクトルの位相共役 $I_{\sim s}^*(\omega_k)$ を算出する算出手段と、偏角 $[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau_i$ を測定q回目とs回目の中心周波数の差と遅延時間の積としたとき、
次式

40

【0012】

【数 3】

$$\frac{\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle}{\left[\langle |\tilde{I}_q(\tau_i)|^2 \rangle \cdot \langle |\tilde{I}_s^*(\tau_k)|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}}} = |\gamma(\tau)|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$$

が成り立つことを利用して、 $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s] \tau\}$ の絶対値の平方根を算出することにより前記コヒーレンス度の絶対値 $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|$ を求める解析手段とを具備する態様とす

50

る。

(5)(4)の構成において、前記解析手段は、前記被測定レーザ光のコヒーレンス度の絶対値が1/eになるをもってコヒーレンス時間を求める態様とする。

【0013】

(6)遅延時間の関数である被測定レーザ光のレーザ中心周波数変化を測定するレーザ光特性測定装置であって、被測定レーザ光の周波数を線形に掃引する掃引手段と、前記周波数掃引されたレーザ光を2系統に分岐する分岐手段と、分岐された一方のレーザ光を光ファイバに入射して当該光ファイバで生じたレイリー散乱光を取り込む取り込み手段と、前記レイリー散乱光と前記分岐された他方のレーザ光とを合波する合波手段と、前記合波によって生じる光電流を検出する検出手段と、前記検出された光電流の電流値をフーリエ変換してその周波数スペクトル $I_q(\tau_i)$ を算出し、同様に、連続して光電流を検出すると共に、その周波数スペクトルの位相共役 $I_s^*(\tau_k)$ を算出する算出手段と、偏角 $[\omega_q - \omega_s]$ を測定q回目とs回目の中心周波数の差と遅延時間の積としたとき、次式

10

【0014】

【数4】

$$\frac{\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle}{\left[\langle |\tilde{I}_q(\tau_i)|^2 \rangle \cdot \langle |\tilde{I}_s^*(\tau_k)|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}}} = |\gamma(\tau)|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s]\tau\}$$

20

が成り立つことを利用して、 $|\gamma(\tau)|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s]\tau\}$ の偏角が、遅延時間における2回の測定の間に変化したレーザ中心周波数差に比例することを利用してレーザ中心周波数変化を求める解析手段とを具備する態様とする。

【発明の効果】

【0015】

以上のように、本発明は、測定値に対して統計処理を行うことにより、従来法の測定条件のあいまいさを取り除き、測定の信頼性を向上させることを特徴とする。具体的には、遅延時間の付近でのコヒーレンス度を計測し、遅延0の近傍の光電流のコヒーレンス度を解析することで、例えば $|\gamma(\tau)| = 1/e$ に減少するときのからコヒーレント時間を求めるものである。

30

【0016】

本発明によれば、用意した光ファイバの全長の光の往復時間よりもが小さい場合であっても、コヒーレンス度を精度良く求めることが可能となる。

したがって、本発明によれば、レーザ光のスペクトル線幅が狭く、コヒーレンス時間が長いレーザ光のコヒーレンス度、コヒーレンス時間、レーザ中心周波数変化をより正確に測定可能とするレーザ光特性測定方法及び測定装置を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】本実施形態に係るレーザ光特性測定方法を適用した測定装置の構成を示すブロック図である。

40

【図2】図1に示す測定装置の周波数掃引装置によって与えられる周波数変調の波形を表す図である。

【発明を実施するための形態】

【0018】

添付の図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。以下に説明する実施の形態は本発明の構成の例であり、本発明は、以下の実施の形態に制限されるものではない。

図1は本実施形態のレーザ光特性測定装置の構成を示すブロック図である。図1において、1は被測定レーザ光源であり、ここで発生された被測定レーザ光は周波数掃引装置2により、図2に示すように所定の期間内で規定幅の周波数掃引を受けた後、光分岐器3-1によって2系統に分岐される。分岐された一方の系統の伝送光は光サーキュレータ4に

50

よって光ファイバ5に導かれ、他方の系統の伝送光は光合波器3-2に導かれる。続いて、上記光ファイバ5内でレイリー散乱を受けた反射光は光サーキュレータ4を経て光合波器3-2に導かれ、他方の伝送光と合波された後、バランス型受光素子6に受光される。

【0019】

上記バランス型受光素子6で得られた受光信号はデータ取得装置7によって所定のサンプリング周期でデータ化された後、周波数スペクトル解析装置8によってビートスペクトル幅が解析されて順次メモリ装置9に蓄積される。レーザ光特性解析装置10は、所定の周期でメモリ装置9に蓄積されたビートスペクトル幅のデータを読み込んで被測定レーザ光のコヒーレンス度を解析し、その解析結果からレーザ光のコヒーレンス長を求める。上記周波数掃引装置2の掃引期間及びデータ取得装置7のデータ取得期間は、いずれも制御装置11から出される指示に従って決定される。

10

【0020】

上記構成において、以下にその測定方法とその手順について説明する。

まず、被測定レーザ光源1が発する時間長Tのレーザ光の電界振幅 $E'_i(t)$ を以下のように表すこととする。

【0021】

【数5】

$$E'_i(t) = A \exp\{j[\bar{\omega}_i t + \theta_i(t)]\} = A \exp[j\bar{\omega}_i t] E_i(t) \quad (1)$$

20

ここで、式(1)の $E_i(t)$ は

【0022】

【数6】

$$E_i(t) = \exp[j\theta_i(t)] \quad (2)$$

と表され、Aは一定値を持つ振幅、 $\bar{\omega}_i$ は中心周波数、 i は事象(アンサンプル)の番号を表す。すなわち、式(1)はレーザ光から取り出される電界振幅の*i*番目のアンサンプルを意味している。また、 $\theta_i(t)$ は、レーザの位相雑音を表す確率変数である。

【0023】

本実施形態において測定されるレーザ光のコヒーレンス関数()は、

30

【0024】

【数7】

$$\gamma(\tau) = \left\langle E_i(t) E_i^*(t-\tau) \right\rangle \quad (3)$$

で与えられる量である。かっこ記号の $\langle \rangle$ はアンサンプル平均を意味し、多くのアンサンプル*i*に対する平均を表す。尚、*は位相共役を意味する。

ここで、式(2)で表される量が持つ意味を考察しておく。もともとのレーザ光の電界は式(1)で表わされるが、これは中心周波数 $\bar{\omega}_i$ を中心として位相揺らぎ $\theta_i(t)$ を持っている。しかるに、式(2)においては、中心周波数 $\bar{\omega}_i$ は現われておらず、位相揺らぎ $\theta_i(t)$ のみに関係する量であることがわかる。よって本実施形態で測量される値は、レーザ光が一定時間Tだけ発振した時の位相もしくは周波数の揺らぎ幅を意味しており、これはレーザ光のスペクトルの広がり进行评估の際には極めて有用な尺度になると考えられる。

40

【0025】

被測定レーザ光源1から発せられた光は、周波数掃引装置2によって、図2に示すように、その周波数が時間に対してT秒間線形に掃引される。周波数掃引幅をFで表す。周波数掃引装置2としては、例えば非特許文献2に記載の単一側波帯変調器を用いることにより実現することができる。すなわち、周波数掃引装置2により周波数掃引された光波の電界振幅(アンサンプル) $E''_i(t)$ は、式(4)で表される。

50

【 0 0 2 6 】

【 数 8 】

$$E_i''(t) = A \exp \left\{ j \left[\bar{\omega}_i t + \theta_i(t) + \frac{g t^2}{2} \right] \right\} \quad (4)$$

ここで、 g は周波数掃引速度 (Hz/s) である。

周波数掃引されたレーザ光は、光分岐器 3 - 1 により 2 分岐され、一方は光サーキュレータ 4 を介して光ファイバに入射される。光ファイバ 5 内ではレイリー散乱と呼ばれる光散乱が生じ、その散乱光は光ファイバを逆方向に伝搬してサーキュレータ 4 に戻り、光合波器 3 - 2 に向かって進行する。分岐されたもう一方のレーザ光は、そのまま光合波器 3 - 2 に向かって進行する。光合波器 3 - 2 ではこれらのレーザ光が合波される。

10

【 0 0 2 7 】

本構成は、同じく非特許文献 2 に説明されているコヒーレント光周波数領域反射計 (Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry: 以下 C-OFDR) と呼ばれる反射分布測定装置の構成を応用したものであり、光ファイバ内の 1 つの反射点 z_m までの光の往復時間を τ_m とすると、 i 番目の光電界のアンサンブル $E_i''(t)$ がこの反射点からの散乱されることによってバランス受光素子 6 に生じる光電流 $I_{i,m}(t)$ は、式 (5) により表される。

【 0 0 2 8 】

【 数 9 】

$$\begin{aligned} I_{i,m}(t) &= r_m E_i''(t) E_i''^*(t - \tau_m) \\ &= A^2 r_m \exp \left\{ j \left[g \tau_m t + \theta_i(t) - \theta_i(t - \tau_m) + \bar{\omega}_i \tau_m \right] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで複素数 r_m は反射点 z_m のレイリー反射係数であり、ランダムな値をとる確率変数である。

式 (2) より、

30

【 0 0 2 9 】

【 数 1 0 】

$$I_{i,m}(t) = A^2 r_m \exp \left\{ j \left[g \tau_m t + \bar{\omega}_i \tau_m \right] \right\} E_i(t) E_i^*(t - \tau_m) \quad (6)$$

ここで、複素数 r_m は反射点 z_m のレイリー反射係数であり、ランダムな値をとる確率変数である。実際の光電流は反射点 z_m の近傍の多数の反射点からの散乱光の和によって生じるから、観測される光電流の大きさ $I_{i,total}(t)$ は、

【 0 0 3 0 】

【 数 1 1 】

40

$$I_{i,total}(t) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_m A^2 r_m \exp \left\{ j \left[g \tau_m t + \bar{\omega}_i \tau_m \right] \right\} E_i(t) E_i^*(t - \tau_m) \quad (7)$$

但し、 n は z_m 近傍の反射点の数

と表される。データ取得装置 7 は、式 (7) で表される光電流 $I_{i,total}(t)$ を数値化して取得し、データとして格納する。

50

C-OFDRでは、光ファイバの距離 z からの散乱光の強度は、式(7)で表現される光電流により算出される。C-OFDRの距離分解能は、遅延時間 τ_m に換算して $1/F$ であり、典型値として例えば $F=10\text{GHz}$ と仮定すると、距離分解能に相当する遅延時間差は 100ps となる。これは今考えているレーザのコヒーレンス時間(典型的には $1\mu\text{s}$ またはそれ以上)と比べて非常に小さいものである。C-OFDRが観測する距離 z_m における散乱光強度は、式(7)において、この距離分解能に相当する遅延時間差 $1/F$ にわたる範囲で、 m について和を取ったものである。

【0031】

周波数スペクトル解析装置8は、上記光電流 $I_{i,\text{total}}(t)$ のパワースペクトルを算出する。すなわち、パワースペクトルを $I_{i,\text{total}}(\tau_m)$ とすると、 10

【0033】

【数13】

$$\tilde{I}_{i,\text{total}}(\tau_m) = \int I_{i,\text{total}}(t) \exp[-jg\tau_m t] dt = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_m A^2 r_m \exp[j\bar{\omega}_i \tau_m] \int E_i(t) E_i^*(t - \tau_m) dt \quad (9)$$

と表される。 20

タイミング制御装置11により、上記の一連の測定を2回連続して行う。この2回の連続測定 q, s により得られるパワースペクトル $I_{i,\text{total}}(\tau_m)$ をそれぞれ $I_q(\tau_i)$ 、 $I_s(\tau_k)$ とする。但し、 q と s の測定間隔は T_m 以上開ける。なお、上記(9)式の $E_i(t)E_i^*(t - \tau_m)dt$ の項において、連続測定した1回目の当該部分を $I_q(\tau_i)$ 、2回目を $I_s(\tau_k)$ とそれぞれおく。

上記 $I_q(\tau_i)$ と $I_s(\tau_k)$ との相互相関として、式(10)が求まる。

【0034】

【数14】 30

$$\tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) = \frac{A^4}{n} \sum_i \exp[j\bar{\omega}_q \tau_i] r_i I_q(\tau_i) \cdot \sum_k \exp[-j\bar{\omega}_s \tau_k] r_k^* I_s^*(\tau_k) \quad (10)$$

ここで、上記において求められた光電流の相互相関と、本実施形態で測定される光源のコヒーレンス度との関係を考察する。

まず式(8)より、 $I_i(\tau_m)$ は $E_i(t)E_i^*(t - \tau_m)$ の時間平均であることがわかる。よって、それらのアンサンブル平均は、適当な比例係数を除きお互いに等しいから、式(11)のように表される。 40

【0035】

【数15】

$$\langle I_i(\tau_m) \rangle = K \langle E_i(t) E_i^*(t - \tau_m) \rangle \equiv K \gamma(\tau_m) \quad (11)$$

ここで、 $\gamma(\tau_m)$ は求めるべきコヒーレンス度である。

K は適当な比例係数であるが、以下の説明には影響しないため、以後 $K=1$ とおくことにする。このことより、 $I_q(\tau_i)$ および $I_s^*(\tau_k)$ は、式(12)のように表すことができる。

【0036】 50

【数 1 6】

$$I_q(\tau_i) = \gamma(\tau_i) + n_{i,q}, \quad I_s^*(\tau_k) = \gamma^*(\tau_k) + n_{k,s}^* \quad (12)$$

ここで、 $n_{i,q}$ 、 $n_{k,s}^*$ は、そのアンサンプル平均（ i および k についての平均）が0であるような、相関をもたない複素数である。すなわち、

【0 0 3 7】

【数 1 7】

$$\langle n_{i,q} \rangle = \langle n_{k,s}^* \rangle = 0 \quad (13) \quad 10$$

である。

一方、 $\gamma(\tau_i)$ 、 $\gamma^*(\tau_k)$ は q や s に依存しない、すなわち繰り返し測定の間で一定の値をとる複素数である。 m の範囲ではコヒーレント度はほとんど変化しないとすると、

【0 0 3 8】

【数 1 8】

$$\gamma(\tau_i) = \gamma(\tau), \quad \gamma^*(\tau_k) = \gamma^*(\tau) \quad (14)$$

である。

20

式(12)および式(14)を式(10)に代入し、 A の値は何であっても以下の議論に影響しないので、 $A = 1$ とおくと、式(15)が求まる。

【0 0 3 9】

【数 1 9】

$$\begin{aligned} \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) &= \frac{1}{n} \sum_i \exp[j\bar{\omega}_q \tau_i] r_i I_q(\tau_i) \cdot \sum_k \exp[-j\bar{\omega}_s \tau_k] r_k^* I_s^*(\tau_k) \\ &= \frac{1}{n} \sum_i \exp[j\bar{\omega}_q \tau_i] r_i (\gamma(\tau_i) + n_{i,q}) \sum_k \exp[-j\bar{\omega}_s \tau_k] r_k^* (\gamma^*(\tau_k) + n_{k,s}^*) \\ &= \frac{1}{n} \sum_i \sum_k \exp\{j[\bar{\omega}_q \tau_i - \bar{\omega}_s \tau_k]\} \left(|\gamma(\tau)|^2 + \gamma(\tau) n_{k,s}^* + \gamma^*(\tau) n_{i,q} + n_{i,q} n_{k,s}^* \right) r_i r_k^* \quad (15) \end{aligned} \quad 30$$

ここで、 $n_{i,q}$ のランダム性から $\langle n_{i,q} \rangle = 0$ と想定し、 $n_{i,q}$ と $n_{k,s}^*$ ($q \neq s$) および r_i と r_k^* ($i \neq k$) は統計的に互いに独立と仮定すると、クロネッカーのデルタ関数を用いて式(16)、式(17)が成り立つ。

40

【0 0 4 0】

【数 2 0】

$$\langle n_{a,i} n_{b,i}^* \rangle \cong \delta_{ab} \langle n^2 \rangle \quad (16)$$

$$\langle r_a r_b^* \rangle = \delta_{ab} \langle r^2 \rangle \quad (17)$$

$$\text{但し、} \delta_{ab} = \begin{cases} 1 & (a=b) \\ 0 & (a \neq b) \end{cases}$$

上記式を用いて、近傍における () は同一とみなし、近傍の光電流の相互相関のアンサンブル平均を求めると、式 (18) となる。 10

【0041】

【数 2 1】

$$\begin{aligned} & \langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle \\ &= \left\langle \frac{1}{n} \sum_i \sum_k \exp \left\{ j \left[\bar{\omega}_q \tau_i - \bar{\omega}_s \tau_k \right] \right\} \left[|\gamma(\tau)|^2 + \gamma(\tau) n_{k,s}^* + \gamma^*(\tau) n_{i,q} + n_{i,q} n_{k,s}^* \right] r_i r_k^* \right\rangle \\ &= \frac{1}{n} \sum_i \exp \left\{ j \left[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s \right] \tau_i \right\} \gamma(\tau)^2 \langle |r_i|^2 \rangle \quad (18) \\ &= \exp \left\{ j \left[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s \right] \tau_i \right\} \gamma(\tau)^2 \langle |r_i|^2 \rangle \end{aligned}$$

20

$$\text{但し、} \tau_i = \tau_k = \tau$$

よって、事象のサンプル数が大きければ大きいほど精度よくアンサンブル平均を求めることがわかるが、現実的には測定回数には限度があり、許容される測定時間等の制約から決定されるものである。 30

また、

【0042】

【数 2 2】

$$\begin{aligned} & \left\langle \left[\langle |\tilde{I}_q(\tau_i)|^2 \rangle \cdot \langle |\tilde{I}_s^*(\tau_k)|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}} \right\rangle = \left\langle \left[\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \tilde{I}_q^*(\tau_j) \rangle \cdot \langle \tilde{I}_s(\tau_k) \tilde{I}_s^*(\tau_l) \rangle \right]^{\frac{1}{2}} \right\rangle \\ &= \left\langle \left[\frac{1}{n} \sum_i \left(|\gamma(\tau)|^2 + |n_{i,q}|^2 \right) \langle |r_i|^2 \rangle \cdot \frac{1}{n} \sum_k \left(|\gamma(\tau)|^2 + |n_{k,s}|^2 \right) \langle |r_k|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}} \right\rangle \quad 40 \\ &= \langle |r_i|^2 \rangle \end{aligned}$$

$$\text{但し、エネルギー保存則より、} |\gamma(\tau)|^2 + |n_{i,q}|^2 = |\gamma(\tau)|^2 + |n_{k,s}|^2 = 1$$

と表わされるので、光電流の相互相関とコヒーレンス度には、式 (19) の関係があることがわかる。 50

【 0 0 4 3 】

【 数 2 3 】

$$\frac{\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle}{\left[\langle |\tilde{I}_q(\tau_i)|^2 \rangle \cdot \langle |\tilde{I}_s^*(\tau_k)|^2 \rangle \right]^{\frac{1}{2}}} = |\gamma(\tau)|^2 \exp\{j[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s]\tau\} \quad (19)$$

10

ここで、複素数の絶対値 $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|^2$ は、遅延時間 τ ごとにコヒーレンス度の 2 乗を示す。また、偏角 $[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s]\tau$ は、測定 q 回目と s 回目の中心周波数の差と遅延時間の積を示している。

以上から、レーザ光特性解析装置 10 は、遅延時間 τ の付近でのコヒーレンス度を計測し、遅延 0 の近傍の光電流のコヒーレンス度と解析することで、例えば $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle| = 1/e$ に減少する時の τ からコヒーレンス時間を求めることができる。

20

【 0 0 4 4 】

また、測定間隔 T の偏角 $[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s]\tau$ を解析することで、レーザの中心周波数変化 (ドリフト) も計測することが可能になる。これは、 $[\bar{\omega}_q - \bar{\omega}_s]\tau$ が 2π 変化する遅延時間が $50 \mu s$ の場合、その遅延時間の逆数が、つまりレーザ中心周波数の変化を表わしており、当該レーザの中心周波数は 20kHz/s ドリフトすることがわかる。これより、式 (19) を用いて、任意の遅延時間 τ におけるコヒーレンス度の絶対値 $|\langle \tilde{I}_q(\tau_i) \cdot \tilde{I}_s^*(\tau_k) \rangle|$ およびレーザ中心周波数変化 (ドリフト) を定量的に求めることができる。

【 0 0 4 5 】

以上のように、本実施形態によるレーザ光特性測定方法は、従来 of 技術に対して以下の優位性を持つ。

30

第 1 に、本実施形態は、コヒーレンス時間と同程度の光ファイバ長により測定が可能で、仮にコヒーレンス時間がそれよりもはるかに長かった場合には、そのこと自体が測定により明らかにされるので、より長い光ファイバに置き換えて測定をやり直すなどの処置を取ることが可能となる。よって、本実施形態によれば、従来よりも信頼性に優れた測定結果を得ることが可能となる。

【 0 0 4 6 】

第 2 に、本実施形態によれば、単にコヒーレンス時間が測定されるだけでなく、そのコヒーレンス度の絶対値の全容が遅延時間 τ の関数として掌握される。これにより、レーザ光の性質をより詳しく調査することが可能となる。

第 3 に、本実施形態によれば、2 つの異なる光電流からコヒーレンス度を決定することが可能になる。したがって、リアルタイムに測定結果を得ることが可能となる。

40

【 0 0 4 7 】

第 4 に、本実施形態によれば、2 回の測定の間に変化したレーザ中心周波数の差を遅延時間 τ の関数として評価することが可能になる。これにより、レーザの中心周波数変化 (ドリフト) を定量的に計測することが可能となる。

尚、本発明は上記実施の形態そのままに限定されるものではなく、実施段階ではその要旨を逸脱しない範囲で構成要素を変形して具体化できる。また、上記実施の形態に開示されている複数の構成要素の適宜な組み合わせにより、種々の発明を形成できる。例えば、実施形態に示される全構成要素から幾つかの構成を削除してもよい。さらに、異なる実施形態例に亘る構成要素を適宜組み合わせてもよい。

50

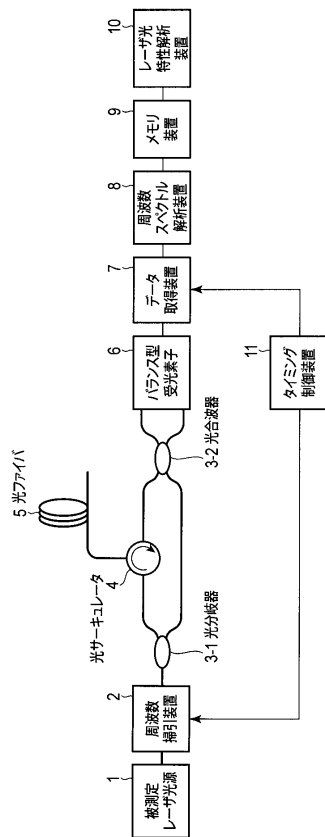
【符号の説明】

【0048】

1 ... 被測定レーザ光源、2 ... 周波数掃引装置、3 - 1 ... 光分岐器、3 - 2 ... 光合波器、4 ... 光サーキュレータ、5 ... 光ファイバ、6 ... バランス型受光素子、7 ... データ取得装置、8 ... 周波数スペクトル解析装置、9 ... メモリ装置、10 ... レーザ光特性解析装置、11 ... タイミング制御装置。

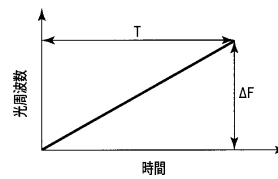
【図1】

図1



【図2】

図2



フロントページの続き

- (72)発明者 古敷谷 優介
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 ファン・シンユウ
東京都千代田区大手町二丁目3番1号 日本電信電話株式会社内

審査官 塚本 丈二

- (56)参考文献 特開2013-007571(JP,A)
特開2012-229949(JP,A)
特開2012-112657(JP,A)
特開2006-242634(JP,A)
KOSHIKIYA,Y. 他, “Long Range and cm-Level Spatial Resolution Measurement Using Coherent Optical Frequency Domain Ref”, Journal of Lightwave Technology, 2008年9月15日, Volume 26, Issue 18, Pages 3287-3294
井上雅晶 他, “スペckル統計解析を用いた狭線幅レーザのコヒーレンス度評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, 光ファイバ応用技術[OFT], 2011年11月10日, Volume 111, Number 298, Pages 1-4
- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01J 9/00-11/00