

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5273483号
(P5273483)

(45) 発行日 平成25年8月28日(2013.8.28)

(24) 登録日 平成25年5月24日(2013.5.24)

(51) Int.Cl. F I
GO 1 M 11/00 (2006.01) GO 1 M 11/00 R

請求項の数 31 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2009-535796 (P2009-535796)	(73) 特許権者	509092395
(86) (22) 出願日	平成19年11月8日(2007.11.8)		フォテク・ソリューションズ・リミテッド
(65) 公表番号	特表2010-509580 (P2010-509580A)		FOTECH SOLUTIONS LIMITED
(43) 公表日	平成22年3月25日(2010.3.25)		イギリス、イー・シー・4・エム 8・エイ・エル ロンドン、セント・ポールズ・チャーチヤード、10、コンドール・ハウス、フィフス・フロア
(86) 国際出願番号	PCT/GB2007/004253		
(87) 国際公開番号	W02008/056143	(74) 代理人	100064746
(87) 国際公開日	平成20年5月15日(2008.5.15)		弁理士 深見 久郎
審査請求日	平成22年11月5日(2010.11.5)	(74) 代理人	100085132
(31) 優先権主張番号	0622207.9		弁理士 森田 俊雄
(32) 優先日	平成18年11月8日(2006.11.8)	(74) 代理人	100083703
(33) 優先権主張国	英国 (GB)		弁理士 仲村 義平

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光導波路を伝播する光の位相の障害検出

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

光導波路を伝播する光の位相の障害を検出するように配置された位相敏感光時間領域反射率測定装置であって、

前記導波路に沿って連続的な光パルスを送出するための光源と、

それぞれの前記光パルスが前記導波路に沿って進む際に、前記導波路内で後方散乱された光の時間分布スペックルパターン強度を示す信号を生成するための光検出器と、

それぞれの前記光パルスが前記導波路に沿って進む際に、前記導波路内で後方散乱された光の強度差を識別するために、前記信号を比較するためのプロセッサとを備え、

前記導波路に沿って送出される前記光パルスのスペクトル幅は、略 0 . 1 G H z から 1 0 0 G H z のオーダである、装置。

【請求項 2】

前記導波路に沿って送出される前記光パルスのスペクトル幅は、略 1 G H z から 1 0 0 G H z のオーダである、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 3】

前記導波路に沿って送出される前記光パルスのスペクトル幅は、略 7 . 5 G H z である、請求項 1 または 2 に記載の装置。

【請求項 4】

前記光パルスの空間的長さは、略 1 m から 1 0 0 m のオーダである、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の装置。

10

20

【請求項 5】

前記光パルスの空間的長さは、略 1 m から 10 m のオーダーである、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 6】

前記光パルスの空間的長さは、略 1 m である、請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 7】

前記光パルスの出力は、略 0.1 W から 10 W のオーダーである、請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 8】

前記光パルスの出力は、略 2 W である、請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の装置。

10

【請求項 9】

前記光検出器の電子帯域幅は、略 125 MHz である、請求項 1 ~ 8 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 10】

光が前記光検出器に到達する前に、光をフィルタリングする光フィルタをさらに備え、前記光フィルタの光帯域幅は、前記光源のスペクトル幅よりも小さい、請求項 1 ~ 9 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 11】

前記光フィルタの前記光帯域幅は、略 0.1 GHz から 100 GHz のオーダーである、請求項 10 に記載の装置。

20

【請求項 12】

前記光フィルタは、前記後方散乱された光をフィルタリングするために配置される、請求項 10 または 11 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 13】

光導波路を伝播する光の位相の障害を検出する位相敏感光時間領域反射率測定装置であって、

前記導波路に沿って連続的な光パルスを送出するための光源と、

それぞれの前記光パルスが前記導波路に沿って進む際に、前記導波路内で後方散乱された光の時間分布スペックルパターン強度を示す信号を生成するための光検出器と、

30

それぞれの前記光パルスが前記導波路に沿って進む際に、前記導波路内で後方散乱された光の強度差を識別するために、前記信号を比較するためのプロセッサと、

光が前記光検出器に到達する前に、光をフィルタリングする光フィルタとを備え、

前記光フィルタの光帯域幅は、前記光源のスペクトル幅よりも小さく、かつ略 0.1 GHz から 100 GHz のオーダーである、装置。

【請求項 14】

前記光フィルタの前記光帯域幅は、略 1 GHz から 10 GHz のオーダーである、請求項 10 ~ 13 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 15】

前記光フィルタの前記光帯域幅は、略 7.5 GHz である、請求項 10 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の装置。

40

【請求項 16】

位相敏感光時間領域反射率計を用いて光導波路を伝播する光の位相の障害を検出するための方法であって、

前記導波路に沿って連続的な光パルスを光源から送出手続きと、

それぞれの前記光パルスが前記導波路に沿って進む際に、前記導波路内で後方散乱された光の時間分布スペックルパターン強度を示す信号を生成するステップと、

それぞれの前記光パルスが前記導波路に沿って進む際に、前記導波路内で後方散乱された光の強度差を識別するために、前記信号を比較するステップとを備え、

前記導波路に沿って送出手続きされる前記光パルスのスペクトル幅は、略 0.1 GHz から 1

50

00 GHz のオーダである、方法。

【請求項 17】

前記導波路に沿って送出される前記光パルスのスペクトル幅は、略 1 GHz から 100 GHz のオーダである、請求項 16 に記載の方法。

【請求項 18】

前記導波路に沿って送出される前記光パルスのスペクトル幅は、略 7.5 GHz である、請求項 16 または 17 に記載の方法。

【請求項 19】

前記光パルスの空間的長さは、略 1 m から 100 m のオーダである、請求項 16 ~ 18 のいずれか 1 項に記載の方法。

10

【請求項 20】

前記光パルスの空間的長さは、略 1 m から 10 m のオーダである、請求項 16 ~ 19 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 21】

前記光パルスの空間的長さは、略 1 m である、請求項 16 ~ 20 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 22】

前記光パルスの出力は、略 0.1 W から 10 W のオーダである、請求項 16 ~ 21 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 23】

前記光パルスの出力は、略 2 W である、請求項 16 ~ 22 のいずれか 1 項に記載の方法。

20

【請求項 24】

電子帯域幅が略 125 MHz である光検出器によって前記信号が生成される、請求項 16 ~ 23 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 25】

前記信号を生成する前に、光をフィルタリングするステップをさらに備え、
前記フィルタリングの光帯域幅は前記光源のスペクトル幅よりも小さい、請求項 16 ~ 24 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 26】

前記フィルタリングするステップの前記光帯域幅は、略 0.1 GHz から 100 GHz のオーダである、請求項 25 に記載の方法。

30

【請求項 27】

前記フィルタリングは、前記後方散乱された光に対して行なわれる、請求項 25 または 26 に記載の方法。

【請求項 28】

位相敏感光時間領域反射率計を用いて光導波路を伝播する光の位相の障害を検出するための方法であって、

光検出器を用いて前記導波路に沿って連続的な光パルスを光源から送出するステップと

40

それぞれの前記光パルスが前記導波路に沿って進む際に、前記導波路内で後方散乱された光の時間分布スペクトルパターン強度を示す信号を生成するステップと、

それぞれの前記光パルスが前記導波路に沿って進む際に、前記導波路内で後方散乱された光の強度差を識別するために、前記信号を比較するステップと、

光が前記光検出器に到達する前に、後方散乱された光をフィルタリングするステップとを備え、

前記フィルタリングの光帯域幅は前記光源のスペクトル幅よりも小さく、かつ略 0.1 GHz から 100 GHz のオーダである、方法。

【請求項 29】

前記フィルタリングするステップの前記光帯域幅は、略 1 GHz から 10 GHz のオー

50

ダである、請求項 25 ~ 28 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 30】

前記フィルタリングするステップの前記光帯域幅は、略 7.5 GHz である、請求項 25 ~ 29 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 31】

請求項 16 ~ 19 のいずれか 1 項に記載の方法を用いる音波検出装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

発明の分野

本発明は、光導波路を伝播する光の位相の障害を検出するための装置および方法に関する。より特定的には、ただし限定的ではなく、本発明は、単一モード光ファイバを伝播する光の位相に含まれる、時間的に変化する外部起因の障害を検出するための、位相敏感光時間領域反射率測定法 (Optical Time-Domain Reflectometry: OTDR) を改善する技術に関する。

【背景技術】

【0002】

発明の背景

OTDRは、光ファイバ内の光の伝播を解析するための確立した技術である。通信産業界において、光ファイバの損傷を検出するとともに、その損傷箇所を特定するために、この技術は広く使用されている。光パルスが光ファイバに沿って進む際に、光ファイバ内のレイリー後方散乱光の量は、その光パルスが伝達される光ファイバの端部に配置された光検出器によって検出することができる。光検出器によって生成された、検出された後方散乱光を示す信号を、経時的に解析することによって、光ファイバに沿った異なった位置における後方散乱光の量の空間分布を決定することができる。損傷などがある箇所においては、より多くの光が吸収または後方散乱されるので、これらの損傷箇所は、上記の決定された空間分布から特定することができる。

【0003】

関連した技術としては、位相敏感OTDRが知られており、光パルスがコヒーレントであって単一モード光ファイバを伝播する場合に、その光パルスからのレイリー後方散乱光の成分が互いに干渉し合い、光検出器において、いわゆる時間的スペックルパターン (temporal speckle pattern) を生成する。いずれの時点における時間的スペックルパターンの強度も、その時点において光検出器に到達する異なるレイリー後方散乱光の成分間の位相差によって決まる。これらの成分は、光パルスが光ファイバ内の対応する空間位置にあるときに、当該光パルスから後方散乱されたものである。したがって、時間的スペックルパターンの瞬間強度は、その位置において光パルスの空間的範囲に渡って光の位相に影響を及ぼしている状態、たとえばファイバの局所的な屈折率によって決まる。連続する光パルス間のこれらの状態の局部変化は、当該位置に対応するそれぞれの光パルスの時間的スペックルパターンの瞬間強度の差としてもたさらされることになる。すなわち、ファイバに沿って連続的に伝達されるコヒーレントな光パルスについて、光検出器で生成された信号を比較することによって、たとえばファイバに外部から歪が与えられるような外的影響によって引き起こされる局所的な屈折率の変化を検出すること、およびその位置を特定することが可能となる。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

従来のOTDRにおいては、光パルスのすべてのコヒーレントな成分によって生成された時間的スペックルパターンが、光検出器によって検出された所望の信号中のノイズを構成することがよく知られている。この光検出器の信号は、光ファイバに損傷等がない場合には、理想的には後方散乱光について平滑な空間分布を示す。したがって、一般的には、

10

20

30

40

50

従来のOTDRに使用される光パルスはかなりインコヒーレントであり、500GHz周辺より大きいスペクトル幅を有する。このことは、光検出器で受光される後方散乱光強度に対する、時間的スペックルパターンの相対的な寄与を減少させる。

【0005】

一方、位相敏感OTDRにおいては、コヒーレントな光パルスのどのようなインコヒーレント成分からの後方散乱光も、時間的スペックルパターンには寄与しないので、連続的な光パルスに対する光検出器の信号間の所望の比較においては、得られた信号のレベルは減少する。この比較または「信号偏差」は、理想的には、それぞれの光パルスの伝送の間に発生する外的影響の変化によって引き起こされて、ファイバに沿った異なる位置において光パルスの空間的範囲に渡って光の位相に影響を及ぼす状態の変化を表わすものである。インコヒーレント光の後方散乱の変化によるこの信号偏差の存在は、好ましくないものである。

10

【0006】

米国特許5,194,847号に記載された位相敏感OTDRの実施例、およびフアン・シー・フアレスら(Juan C. Juarez et al)による文献「位相敏感光時間領域干渉測定侵入センサシステムにおける偏光識別(Polarisation Discrimination in a Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometer Intrusion-Sensor System)」,オプティクス・レターズ(Optics Letters),Vol.30,No24,15 December 2005によって改良された位相敏感OTDRの実施例においては、光パルスは、非常にコヒーレントでなくてはならないことが規定されている。より具体的には、米国特許5,194,847号では、光源のスペクトル幅は10kHzのオーダーとすべきことが記載されており、より最近の文献では、光源のスペクトル幅は3kHz未満とすべきことが記載されている。この狭いスペクトル幅は、各光パルスのインコヒーレント成分からの後方散乱光によって光検出器で生成される信号に対する寄与を減少させることを意図されたものである。

20

【0007】

この実施例における1つの問題は、非常にコヒーレントな安価な光源を容易に手に入れることができないことである。米国特許5,194,847号および上記の文献、たとえば、キョー・ナム・チョイら(Kyoo Nam Choi et al)による文献「スペクトル的に安定なエルビウム光ファイバレーザの位相敏感光時間領域干渉測定への応用(Spectrally Stable Er-Fibre Laser for Application in Phase Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry)」,IEEEフォトニクス・テクノロジー・レターズ(IEEE Photonics Technology Letters),Vol.15,No.3,March 2003に記載されたように、コヒーレントの要求に合うような特注の光源を設計することはできるが、これらは非常に高価となってしまふ。さらに、これらは周波数ドリフトが発生しやすい。もし、周波数ドリフトが、連続的な光パルス間で光源の周波数を大きく変動させてしまう場合には、光検出器によって連続的に発生される信号間に誤った信号偏差が生じてしまう。このことは、当然に当該技術の効果を制限することになる。

30

【0008】

その他の問題としては、コヒーレントな光源から光ファイバに送出可能な光パルスの出力が、さまざまな現象、特にいわゆる「非線形効果」と呼ばれる現象によって制限されることである。注目すべきことは、ブリルアン散乱は、光に対して非弾性的な後方散乱(たとえば、光パルスとは異なった波長の光を後方に伝播するように変換された後方散乱)を引き起こす。その結果として、光パルスが光ファイバに沿って進むにつれて光パルスが減衰してしまう。ブリルアン散乱は、どのような光パルス出力においても発生するが、所定の出力しきい値を超えると、急激に増加する。重要なことは、この出力しきい値は、光パルスのスペクトル幅によって決まるということである。10kmの石英ガラス(シリカ)製のシングルモード光ファイバを進む、スペクトル幅がおよそ17MHzより小さく、波長がおよそ1550nmである光パルスにおいては、この出力しきい値はおよそ5mWである。したがって、これにより米国特許5,194,847号および上記の文献に記載された実施例で使用される光パルスの出力は制限される。しかしながら、光検出器において

40

50

は、有効な信号を生成するために、できるだけ多くの後方散乱光を受けることが必要となってくるであろう。そのため、米国特許 5,194,847号および上記の文献に記載された実施例においては、光パルスの出力の代わりに、光パルスの持続時間を増加させることによって、この要求に合致するようにしている。実際、米国特許 5,194,847号においては、光パルスは約 100 ns の持続時間と記載されており、上記の文献に記載された改良版においては、光パルスは 2 μm の持続時間と記載されている。

【0009】

ある時点における時間的スペックルパターンは、関連する時点における各光パルスの空間的位置からの後方散乱光の合成干渉によって構成されるので、光ファイバ内の光の伝播に対する障害の位置は、光ファイバ内の光パルスの空間的範囲 (spatial extent) によってのみ決まることがわかるだろう。したがって、光パルスの空間的範囲は、本技術の最大可能空間分解能を定義することになる。2 μm の持続時間を持つ光パルスの空間的範囲はおよそ 200 m であり、これは上記文献に記載された技術の最大可能空間分解能が 200 m であることを意味する。これは、理想にはほど遠い。

【0010】

光パルスの出力を増加させないで空間分解能を改善するための 1 つの方法としては、より持続時間の短い光パルスを使用することであるが、より強力な信号を生成するために多くの光パルスからの後方散乱光により生成された光検出器の信号を平均化し、その平均化された連続的な信号を用いて比較処理を実行することが必要となる。しかしながら、この平均化によって時間的分解能は低下する。言い換えれば、時間的スペックルパターンの変化、すなわち光ファイバの外的影響の変化の認識に、長い時間を要することになる。さらに、平均化時間の持続時間よりも速い変化に対応することが不可能になる。したがって、音波などの検出への応用は実現できない。

【0011】

本発明はこれらの問題を解決することを目的としている。

【課題を解決するための手段】

【0012】

発明の要約

本発明の第 1 の局面によれば、光導波路を伝播する光の位相の障害を検出するための装置であって、障害検出装置は、導波路に沿って連続的な光パルスを送出するための光源と、それぞれの光パルスが導波路に沿って進む際に、導波路内で後方散乱される光の時間分布強度を示す信号を生成するための光検出器と、それぞれの光パルスが導波路に沿って進む際に導波路内で後方散乱された光の強度差を識別するために、信号を比較するためのプロセッサとを備え、導波路に沿って伝達される光パルスのスペクトル幅は、およそ 0.1 GHz から 100 GHz のオーダである。

【0013】

本発明の第 2 の局面によれば、光導波路を伝播する光の位相の障害を検出するための方法であって、導波路に沿って連続的な光パルスを光源から送出するステップと、それぞれの光パルスが導波路に沿って進む際に、導波路内で後方散乱された光の時間分布強度を示す信号を生成するステップと、それぞれの光パルスが導波路に沿って進む際に、導波路内で後方散乱された光の強度差を識別するために、信号を比較するステップとを備え、導波路に沿って伝達される光パルスのスペクトル幅は、およそ 0.1 GHz から 100 GHz のオーダである。

【0014】

本発明によれば、非常にコヒーレントな光パルスよりも部分コヒーレントな光パルスを使用することで、位相敏感 OTDR をさらに効率的に実行することができる。部分コヒーレントな光パルスからの後方散乱光強度を示す信号を比較することにより、連続する光パルス間に導波路にそって進む光について、その光の位相変化率の変化の可視性を向上することができる。そして、重要なことは、検出信号の S/N 比 (SNR) を改善することができるので、非常にコヒーレントな光パルスを使用する場合に比べて、より良好な空間分

10

20

30

40

50

解能およびより高速な応答性を実現することができる。

【0015】

さらに、本発明によって定められた光パルスのスペクトル幅は、先行技術で使用されたより狭いスペクトル幅の光パルスと比較して、ブリルアン散乱の潜在的影響を著しく減少させることを意味している。理想的には、光パルスのスペクトル幅は、光導波路のブリルアンゲイン幅よりも大きいものであるべきであり、石英光ファイバの場合には、スペクトル幅はおよそ17MHzである。実際に、導波路に沿って送出される光パルスでは、好ましくは、スペクトル幅はおよそ1GHzから10GHzのオーダーであり、より理想的には、導波路に沿って送出される光パルスのスペクトル幅はおよそ7.5GHzである。このことは、先行技術における光パルスを使用した場合よりも、光パルスの出力を大きくする
10
ことができる。典型的には、光パルスの出力はおよそ0.1Wから10Wのオーダーであり、より理想的にはおよそ2Wである。また、光パルスの持続時間も短くすることができ、たとえば空間的長さはおよそ1mから100mのオーダーである。好ましくは、空間的長さはおよそ1mから10mのオーダーであり、より理想的にはおよそ1mである。

【0016】

実用的には、光パルスのスペクトル幅は、光源から出力された光をフィルタリングすることによって定められる。より具体的には、本装置は、光検出器に光が到達する前に、その光をフィルタリングするための光フィルタをさらに備えてもよく、その光フィルタの光帯域幅は光源のスペクトル幅よりも小さい。同様に、本方法は、光検出器に光が到達する前に、フィルタを用いてその光をフィルタリングするステップをさらに備えてもよく、その光フィルタの光帯域幅は光源のスペクトル幅よりも小さい。このフィルタリングは、自然放出などのように、そのスペクトルが光源から照射された光の主スペクトルの外側となる光を排除する点で、従来のフィルタリングと区別されるべきである。ここで重要なことは、光源から照射された光の主スペクトルが狭められることである。すなわち、光の線幅が減少される。
20

【0017】

これはそれ自体が新規であると考えられるが、本発明の第3の局面によると、光導波路を伝播する光の位相の障害を検出するための装置であって、導波路に沿って連続的な光パルスを送出するための光源と、それぞれの光パルスが導波路に沿って進む際に、導波路内で後方散乱された光の時間分布強度を示す信号を生成するための光検出器と、それぞれの光パルスが導波路に沿って進む際に、導波路内で後方散乱された光の強度差を識別するために、信号を比較するためのプロセッサと、光が光検出器に到達する前に光をフィルタリングする光フィルタとを備え、光フィルタの光帯域幅は、光源のスペクトル幅よりも小さい。
30

【0018】

また、本発明の第4の局面によれば、光導波路を伝播する光の位相の障害を検出するための方法であって、導波路に沿って連続的な光パルスを光源から送出するステップと、それぞれの光パルスが導波路に沿って進む際に、導波路内で後方散乱された光の時間分散強度を示す信号を生成するステップと、それぞれの光パルスが導波路に沿って進む際に、導波路内で後方散乱された後方散乱光の強度差を識別するために、信号を比較するステップと、光が光検出器に到達する前に光をフィルタリングするステップとを備え、フィルタリングの光帯域幅は光源のスペクトル幅よりも小さい。
40

【0019】

好ましくは、光フィルタは、後方散乱光をフィルタリングするために配置される。このことは、光導波路内を進む光のスペクトル幅が、検出された後方散乱光のスペクトル幅より大きくできる点で有利である。スペクトル幅はコヒーレンスと関連するので、このフィルタリングは、検出された光が、時間的スペックルパターンが検出できるくらいに十分にコヒーレントであることを保証することができる。それと同時に、導波路内を進む光は、比較的広範なスペクトル範囲を有するので、ブリルアン散乱のような光導波路の非線形効果を減少させることができる。
50

【 0 0 2 0 】

以下、一例として、本発明の好ましい実施の形態を図面を参照して説明する。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 2 1 】

図面の簡単な説明

【 図 1 】 本発明の第 1 の好ましい実施の形態における、部分コヒーレント光時間領域反射率測定 (O T D R) 装置の概要図である。

【 図 2 A 】 図 1 の O T D R 装置において、他の光フィルタを通過した光の波長帯域を示すグラフである。

【 図 2 B 】 図 1 の O T D R 装置において、ファイバブラッググレーティング光フィルタを通過した光の波長帯域を示すグラフである。

【 図 3 】 部分コヒーレント O T D R 装置において、時間に対する、 D F B レーザダイオードにより出力された光パルスの波長帯域を示すグラフである。

【 図 4 】 図 1 の O T D R 装置において光ファイバに沿って 1 k m を進んだ後の光パルスの波長と比較した、ファイバグレーティング光フィルタを通過した光の波長帯域を示すグラフである。

【 図 5 】 異なったコヒーレンスの度合を有する光パルスに対する、図 1 に示される O T D R 装置の光検出器によって検出される光の強度を示すグラフである。

【 図 6 】 異なった出力を有する光パルスに対する、図 1 に示される O T D R 装置の光検出器から出力される信号の S / N 比 (S N R) を示すグラフである。

【 図 7 】 本発明の第 2 の好ましい実施の形態における、部分コヒーレント光時間領域反射率測定 (O T D R) 装置の概要図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 2 2 】

好ましい実施の形態の詳細な説明

図 1 を参照して、本発明の第 1 の実施の形態による部分コヒーレント光時間領域反射率測定 (O T D R) 装置は、単一モード光ファイバ 3 に沿って光パルスを伝達するための、直接変調分布帰還型 (Distributed FeedBack : D F B) 半導体レーザダイオード 2 を含む光源を備える。 D F B レーザダイオードは、波長分割多重方式 (Wavelength Division Multiplexed : W D M) 光通信ネットワークシステムにおいて一般的であり、本実施の

形態では、 D F B レーザダイオード 2 は、 2 . 5 G b p s W D M 通信において典型的に使用されるタイプのものである。ペルチェ素子 4 を含む温度安定装置は、 D F B レーザダイオード 2 の温度を制御するために配置される。 D F B レーザダイオード 2 の温度が変化するにつれて、伝送される光パルスの波長も変化する。ペルチェ素子 4 は、およそ 1 ~ 2 n m の範囲で正確に波長を制御することができるので、光パルスの波長は調節され得る。典型的には、光パルスの波長は、たとえば、標準化された国際電気通信連合 (International telecommunication Union : I T U) の波長グリッドによって定義され、または、本実施の形態においてはおよそ 1 5 5 0 n m に設定される、単一モード光ファイバ 3 の設計値である。

【 0 0 2 3 】

遅延線 5 は、上述の単一モード光ファイバ 3 と同様の、 2 0 m の長さの単一モード光ファイバであり、 D F B レーザダイオード 2 の出力端に接続される。遅延線 5 は、 D F B レーザダイオード 2 からの各光パルスの出力間隔において、コネクタなどからの反射によって引き起こされる光が、 D F B レーザダイオード 2 のレーザ共振器内へフィードバックされるのを防止する。遅延線 5 の出力端は、第 1 の光増幅器 6 に接続される。第 1 の光増幅器 6 は、ブースタとしても知られるが、エルビウムドープファイバ増幅器 (Erbium-Doped Fibre Amplifier : E D F A) であり、およそ 2 0 ~ 2 5 d b の一般的な光学ゲインによって光パルスを増幅する。第 1 の光増幅器 6 の出力端は、第 1 の光フィルタ 7 に接続される。本実施の形態においては、第 1 の光フィルタ 7 は、 W D M バンドパスフィルタであり、そのスペクトル幅は図 2 A に示すように、およそ 7 5 G H z (0 . 6 n m) である

10

20

30

40

50

。第1の光フィルタ7は、第1の光増幅器6からの、増幅された広範な自然放出を減少させる。この自然放出は、一般的には、DFBレーザダイオード2によって出力された光パルスの主スペクトルの範囲よりも上または下の波長の光が含まれる。第1の光フィルタ7の出力は光カプラ8に接続されており、第1の光フィルタ7から出力される、増幅されかつフィルタリングされた光パルスを光ファイバ3に出力する。本実施の形態においては、光カプラ8は、50 : 50の3dB溶融ファイバカプラであるが、他の実施の形態においては、光カプラに代えて3ポートサーキュレータを用いることもできる。この場合、各ポートあたりの損失が3dBからおよそ1dBに低下できるという利点がある。

【0024】

また、光カプラ8は、光パルスが光ファイバ3に沿って進む際に光パルスからレイリー後方散乱された光を、光パルスの増幅段へと伝送されるファイバ3の終端から出力されるように構成される。増幅段は、第2の増幅器9と、第2の光フィルタ10と、第3の光増幅器11とを含み、それぞれ直列に接続される。第2の光増幅器9および第3の光増幅器11は、プリアンプとして知られるが、前述の第1の光増幅器6と同様のEDFAである。これらの増幅器は、およそ20dBから25dBの光学ゲインによって、それぞれ光ファイバ3から受けるレイリー後方散乱光を増幅する。しかし、これらの増幅器は、第1の光増幅器6よりも低いノイズを有している。第2の光フィルタ10は、第1の光フィルタ7と同様である。すなわち、第2の光フィルタ10は、WDMバンドパスフィルタであり、そのスペクトル幅はおよそ75GHz(0.6nm)である。

【0025】

増幅段は、3ポートサーキュレータ13を経由してファイバブラッググレーティング(Fibre Bragg Grating: FBG)フィルタ12と接続され、フィルタリングされかつ増幅された後方散乱光をFBGフィルタ12に出力する。FBGフィルタ12は、図2Bに示されるように、およそ7.5GHz(0.06nm)のスペクトル幅を有する。FBGフィルタ12の温度感受性はおよそ0.0005nm/°Cである。そのため、FBGフィルタ12は、たとえば絶縁筐体で覆われるように、温度的にパッケージ化される。これにより、FBGフィルタ12の温度、すなわち通過する光の波長帯域が、できるだけ一定に保たれる。以下、詳細について説明するように、DFBレーザダイオード2によって出力された光パルスの選択された波長レンジが、FBGフィルタ12を通過した光の波長帯域と一致するように、上述のようにペルチェ素子4によってDFBレーザダイオード2の温度が調節される。

【0026】

FBGフィルタ12によって出力された光は、3ポートサーキュレータを経由して、光検出器14に向けられる。本実施の形態においては、光検出器14は、インジウム・ガリウム・砒素(InGaAs)PIN型光検出器であり、およそ125MHzの電子的検出帯域幅とおよそ1400のトランスインピーダンス増幅器を有する。光検出器14は、FBGフィルタ12からの光を受けると、受光した光の強度を示すアナログ電子信号を生成する。光検出器14はデジタル変換カード15に接続され、このアナログ電子信号をデジタル変換カード15へ出力する。このデジタル変換カード15は、光検出器14と同様のアナログ電子帯域幅を有する。デジタル変換カード15は、アナログ信号をデジタル信号に変換する。また、デジタル変換カード15は、コンピュータ16により制御されて、必要に応じて、所定数の連続的な光パルスについてのアナログ信号を平均化する。そして、デジタル変換カード15は、変換したデジタル信号をコンピュータ16に出力する。

【0027】

コンピュータ16は、デジタル変換カード15から受けたデジタル信号間の差を決定するためのプロセッサ(図示せず)と、表示するための表示装置17とを含む。このデジタル信号は、連続的な光パルスからの光ファイバ3内におけるレイリー後方散乱の結果として表わされる、光検出器14からの(平均化された)光の強度を示している。表示装置は、この差の情報を、光ファイバ3に沿った距離に対する振幅の差として、グラフ表示する。この情報は、また、コンピュータ16の適当な記憶装置(図示せず)に記憶される。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 8 】

コンピュータ 16 は、制御装置 19 と通信するための入出力カード 18 をさらに含む。この制御装置 19 は、DFB レーザダイオード 2 に電源を供給する電源装置 20 を制御しており、これにより DFB レーザダイオード 2 を直接変調することができる。コンピュータ 16 は、要求に応じて制御装置 19 が DFB レーザダイオード 2 の出力を制御するように、制御装置 19 に対して指令を与える。典型的な場合としては、制御装置 19 は、DFB レーザダイオード 2 から出力される光パルスの持続時間が、およそ 1 ns からおよそ 100 ns の間になるように、DFB レーザダイオード 2 の電源装置 20 を変調する。本実施の形態においては、光パルスの持続時間はおよそ 10 ns であり、これは空間的パルス長さとしてはおよそ 1 m に対応する。DFB レーザダイオード 2 が光パルスを繰り返し出力するように、コンピュータが DFB レーザダイオード 2 を制御する周波数（たとえば、システムのパルス繰り返し周波数または変調周波数）は、光パルスが光ファイバ 3 の遠方端まで伝達され、光パルスからレイリー後方散乱された光が遠方端から戻ってくるまでの時間（たとえば、ファイバ 3 の長さの光往復時間）によって決定される。すなわち、理想的には、その次の光パルスがファイバ 3 に沿って伝達される前に、各パルスから後方散乱された光が、光検出器 14 によって受光されるべきである。本実施の形態においては、光ファイバ 3 の長さはおよそ 10 km である。したがって、対応するパルス繰り返し周波数はおよそ 10 kHz となる。この周波数は、コンピュータ 16 が差の情報を認識して表示することができる最大速度（たとえば、本装置 1 の最大測定周波数）を決定する。デジタル変換カード 15 によって行なわれるどのような平均化処理も、この測定周波数を低下させる。そして、この測定周波数は、デジタル変換カード 15 によって平均化されるアナログ信号の光パルス数に反比例する。全体として、本装置 1 の測定周波数は、十分に音波を検出することができる値である。すなわち、本装置は、受振器、水中聴音器、加速度計や地震計などに用いることができる。

【 0 0 2 9 】

DFB レーザダイオード 2 が連続出力する場合には、そのスペクトル幅はおよそ 1 MHz である。これは、DFB レーザダイオード 2 が、時間的コヒーレンスがおよそ 1 μ s である光を出力できることを意味する。しかしながら、本装置のように、DFB レーザダイオード 2 が直接変調される場合は、光パルスのスペクトル幅がかなり大きくなり、放出された光パルスの時間的コヒーレンスはかなり小さくなる。そのため、継続時間 T の光パルスは、スペクトル幅を $1/T$ より小さくすることはできず、また時間的コヒーレンスを T より大きくすることはできないという基本的な制限が与えられる。したがって、本実施の形態で使用される 10 ns の光パルスにおいては、理論最小スペクトル幅は 0.1 GHz (1 pm) であり、理論最大時間コヒーレンスは 10 ns となる。さらに、DFB レーザダイオード 2 に供給される電流を変調させることは、結果として DFB レーザダイオード 2 のレーザ共振器内の電子密度を変調させることになる。このことは、DFB レーザダイオード 2 のレーザ共振器を形成する材料の屈折率変動の原因となり、光パルス出力の周波数チャープングが引き起こされる。図 3 を参照して、DFB レーザダイオード 2 によって出力された 1 μ m の光パルスの波長が、その継続時間において大きく変化していることがわかる。光パルスの初期においては、図 3 中の下方勾配 21 に示されるように、およそ 0.1 ns の時間まで、波長が長い状態から短い状態に変化するいわゆるブルーシフトと呼ばれる現象が発生している。また、図 3 中の上方勾配 22 のように、光パルスの終了方向に向かっておよそ 10 ~ 100 ns にわたって、波長が短い状態から長い状態に変化するいわゆるレッドシフトと呼ばれる現象が発生している。周波数チャープングの全レンジは、およそ 20 ~ 50 GHz となる。この周波数チャープングは、光パルスのスペクトル幅を定め、光の波長ではおよそ 0.16 ~ 0.4 nm、時間的コヒーレンスではおよそ 20 ~ 50 ps の範囲となる。より一般的には、DFB レーザダイオード 2 の直接変調によって生成される、持続時間が 1 ~ 100 ns の光パルスの時間的コヒーレンスは、持続時間よりも 2 ~ 3 桁ほど小さくなる。

【 0 0 3 0 】

しかしながら、光フィルタ7, 10およびFBGフィルタ12は、光検出器14において受光される光のスペクトル幅を減少させる。FBGフィルタ12はその中でもスペクトル幅が最も狭いので、スペクトル幅の減少割合は、一次的にはFBGフィルタ12に支配される。確かに、他の光フィルタ7, 10は、上述のように、単に第1の増幅器6および第2の増幅器9からの自然放出を減少させることを意図しているだけである。図4を参照して、図中の線23で示される、FBGフィルタ12を通過した光の波長の帯域は、図中の線24で示される、光ファイバ3に沿って光パルスが進む際に、光パルス内に現れる光の波長の全レンジよりは、ずっと狭いものとなっている。確かに、本実施の形態においては、FBGフィルタ12のスペクトル幅は、光ファイバ3に沿っておよそ1km伝播した後の光パルス(すなわち、DFBレーザダイオード12と光ファイバ3のレイリー後方散乱光とによって放出された光パルスと同じもの)のスペクトル幅のおよそ1/5であることがわかる。

10

【0031】

さらに詳細には、図3は、図中のハッチング部25に示されるように、FBGフィルタ12を通過した光の波長の帯域と、DFBレーザダイオード2によって放出された光パルスの波長のレンジとの間の最適な関係を示している。FBGフィルタ12を通過した光の波長の帯域幅は、DFBレーザダイオード2によって放出された光パルスの波長のレンジと理想的に関連しており、パルス持続時間のクリッピング歪が最小化されている。すなわち、それらは、パルス持続時間内で比較的波長が一定となるとときに重なりあう。これはパルス持続時間の中間の付近のときであり、このとき光パルスは最大出力を有する傾向がある。

20

【0032】

光検出器14で受光される光のスペクトル幅が減少する結果として、FBGフィルタ12もまた、光の時間的コヒーレンスを増加させる。本実施の形態においては、FBGフィルタ12のスペクトル幅は7.5GHz(0.06nm)であるので、光検出器14で受光される光の時間的コヒーレンスはおよそ100psとなる。これは、光パルスが光ファイバ3に沿って進む際の時間的コヒーレンスよりもずっと長くなる。重要なことは、光ファイバ3に沿って進む光よりもむしろ、光検出器14に到達する光のコヒーレンスが、検出光量を決定することである。この検出光量は、コヒーレントとの相関がなくそのために時間的スペックルパターンの可視性を低下させてしまうような検出光量と比べて、コヒーレントの相関があり、かつ時間的スペックルパターンに寄与する。これらの光量の割合は、可視パラメータ V_I として定義することができる。この可視パラメータ V_I は、シミズら(Shimizu et al)による文献「光ファイバおよび構成機器についてのレイリー後方散乱測定におけるコヒーレント・フェーディング・ノイズの特性と低減(Caracteristics and Reduction of Coherent Fading Noise in Rayleigh Backscattering Measurement for Optical Fibres and Components)」, ジャーナル・オブ・ライトウェーブ・テクノロジー(Journal of Lightwave Technology), Vol.10, No.7, p.982(1992)において、統計的に解析されている。完全にコヒーレントな光では、可視パラメータ V_I は1であることが容易にわかる。本実施の形態において、検出器14で受光される光については、可視パラメータ V_I はおよそ0.133である。より一般的には、他の実施の形態においては、可視パラメータ V_I は、およそ0.04~0.26の間の値となる。

30

40

【0033】

検出器14で受光される光の強度の確率密度関数 $P(I)$ は、(レイリー後方散乱の影響により)、可視パラメータ V_I を用いて以下のような式で表わされる。

【0034】

【数 1】

$$P(I) = \left[\frac{1}{V_I^2 \langle I \rangle} \right]^{\frac{1}{V_I^2}} \frac{1}{\left(\frac{1}{V_I^2} - 1 \right)!} I^{\left(\frac{1}{V_I^2} - 1 \right)} \exp \left[- \frac{I}{V_I^2 \langle I \rangle} \right]$$

【0035】

この式は、様々な可視パラメータ V_I の値について図5に図式的に示されている。可視パラメータ V_I が1の場合には、図中の勾配26に示されるように、正規化された強度がゼロのところでは確立密度関数 $P(I)$ は最大値となり、正規化された強度がゼロから大きく増加するにしたがって確立密度関数 $P(I)$ は減少する。可視パラメータ V_I が0.707, 0.5, 0.316, 0.133と逐次低下していくと、図中の勾配27, 28, 29, 30にそれぞれ示されるように、確率密度関数 $P(I)$ は、徐々に正規分布の形に近づいていく。可視パラメータ V_I の値が0.5, 0.316, 0.133のときの大きさと等価な場合の理想的な曲線が、図中の破線31, 32, 33にそれぞれ示される。重要なことは、本実施の形態で示した可視パラメータ V_I に関して、光検出器14で受光される光の強度の変動幅は正規分布に制約され、かつ光が完全にコヒーレントな場合の変動幅と比べると小さくなる、ということである。

【0036】

時間的スペックルパターンをうまく検出するために、すなわち連続的な光パルスによって生成される時間的スペックルパターン同士の差をうまく検出するために、光検出器14で受光された、時間的スペックルパターンに起因して発生した光の強度の変動幅が、光検出器14によって出力される信号内のノイズよりも大きくなることが重要である。これは、本装置1のS/N比(SNR)が、可視パラメータ V_I の逆数より大きいことと等価であり、たとえば、次式で表わされる。

【0037】

【数2】

$$SNR > \frac{1}{V_I}$$

【0038】

ノイズは、光学増幅器6, 9, 11などによって生成される光学ノイズと、光検出器14によって生成される電気ノイズとの両方によって発生する。より具体的には、光検出器14による後方散乱光検出後のSNRは、以下の式のように表わされる。

【0039】

【数3】

$$SNR = \frac{1}{\Delta f} \frac{\langle R(GP_s) \rangle^2}{\left[R^2 (NEP)^2 + 2(q\eta G)^2 F_n P_s / h\nu + (q\eta GF_n)^2 \Delta v_{opt} \right]}$$

【0040】

ここで、

【0041】

【数4】

$$G = G_1 G_2 \text{ and } F_n = F_{n1} + \frac{F_{n2}}{G_1}$$

10

20

30

40

50

【 0 0 4 2 】

上式において、 f は、光検出器 1 4 の電子的検出帯域幅（本実施の形態においては 1 2 5 M H z）、 R は光検出器 1 4 の応答性パラメータ、 G は増幅段の 2 つの光増幅器 9, 1 1（それぞれゲイン G_1, G_2 を有する）の合成ゲイン、 P_s は光検出器 1 4 に到達した全信号の出力（パワー）、 NEP （Noise Equivalent Power）は光検出器 1 4 のノイズ等価パワー、 q は電荷、 η は光検出器 1 4 の量子効率、 F_n は増幅段の 2 つの光増幅器 9, 1 1（それぞれ F_{n1}, F_{n2} を有する）の等価雑音指数（effective noise figure）、 h は量子定数（プランク定数）、 ν は光検出器 1 4 によって受光される光の周波数、および $\Delta\nu_{opt}$ は光検出器 1 4 によって受ける光のスペクトル幅である。

【 0 0 4 3 】

図 6 には、いくつかの異なったパルス放出出力（pulse launch powers）（すなわち、第 1 の増幅器 6 またはブースタによって増幅された光のパワー）についての、パルス持続時間に対する SNR をグラフとして示した図である。より具体的には、パルス出力が 0.1 W, 0.5 W, 1 W, 2 W の場合の SNR が、図中の曲線 3 4, 3 5, 3 6, 3 7 にそれぞれ示される。これより、パルス放出出力とともに SNR が増加しているのがわかる。図中の曲線は、光カプラ 8 の 3 d B 損失を含んでおり、増幅段における増幅器 9, 1 0 の各々の雑音指数を 5.5 d B と想定している。増幅器 9, 1 0 のゲインは、光検出器 1 4 からの出力電圧レベルを、デジタル変換カード 1 5 の最大入力電圧範囲（0.5 V）の付近に保つために、異なるパルス放出出力ごとに調整される。要求される合成ゲインは、いずれの計算された曲線においても最大値である 3 8 d B を超えていない。単一光パルスを考慮して、信号の平均化は行なっていない。

【 0 0 4 4 】

図 6 より、放出出力が 1 W の場合には、 SNR がおよそ 1 5 d B が達成できていることがわかる。可視パラメータ V_I の逆数の対数値は、信号レベルが 9 d B の場合と等価であり、これは、デジタル変換カード 1 5 によって出力されるデジタル信号の SNR がおよそ 6 d B 大きく、時間的スペckルパターンが予測ノイズから容易に区別可能であることを示している。

【 0 0 4 5 】

比較的高い可視パラメータ V_I を維持している間、 SNR を向上するために、高出力の光パルスを使用する自由度は、概して、主に FBG フィルタ 1 2 の適切な配置によって決まる。より具体的には、光ファイバ 3 に沿って進む光パルスは、比較的広範なスペクトル範囲を有しており、このことは、同じパルス出力でスペクトル範囲がより狭い光パルスの場合よりも、ブリルアン散乱の影響がずっと小さいことを意味している。それと同時に、光検出器 1 4 に到達する後方散乱光の時間的コヒーレンスは FBG フィルタ 1 2 によって増加されるので、比較的高い可視パラメータ V_I を維持することができる。

【 0 0 4 6 】

さらに、光ファイバ 3 を進む光パルスおよび光検出器 1 4 に到達する後方散乱光の、スペクトル幅と時間的コヒーレントとが実質的に同じとなるような、効果的な装置を設計することも可能である。図 7 を参照して、本発明の第 2 の実施の形態における部分コヒーレント $OTDR$ 装置 3 8 は、第 1 の実施の形態における部分コヒーレント $OTDR$ 装置 1 と同様の構成機器を多く含んでいる。同じ構成機器については同じ参照番号が付されている。しかしながら、第 2 の実施の形態においては、サーキュレータ 1 3 および FBG フィルタ 1 2 が、第 1 の実施の形態の第 1 の光フィルタ 7 の位置に配置される。すなわち、 FBG フィルタ 1 2 は DFB レーザダイオード 2 の出力と光ファイバ 3 との間に配置される。これは、 FBG フィルタ 1 2 が光ファイバ 3 を進む光パルスのスペクトル幅に影響することを意味しており、したがって、そのスペクトル幅はおよそ 7.5 GHz になる。このスペクトル幅は、光ファイバ 3 についてのブリルアン・ゲイン帯域幅よりもずっと大きい。ブリルアン・ゲイン帯域幅は、およそ 1 7 M H z である。さらに、光検出器 1 4 に後方散乱光が到達する前に、後方散乱光を増幅するための増幅器がないので、光検出器 1 4 において有効な信号生成するために各光パルスから十分な光が後方散乱されるように、理想的

10

20

30

40

50

には、光パルスはより長い持続時間とされるべきである。確かに、第2の実施の形態において、平均化を行なわない場合には、典型的には光パルスはおよそ50～100mの空間持続時間を有する。このことは、本装置38の空間分解能を制限することになる。

【0047】

第2の実施の形態の一例としては、光検出器14は、ニュー・フォーカス社(New Focus)製のmodel2053のような、三段階のトランスインピーダンス増幅器を有するインジウム・ガリウム・ヒ素(InGaAs)PIN型光検出器であり、電子帯域幅は700kHz、電圧応答性は 1.89×10^6 V/W、そしてNEPは0.34 pW/rtHzである。持続時間500ns(50m)の光パルスを、出力500mWで光ファイバ3内へ照射した場合、予測SNRはおよそ35dBとなる。可視パラメータ V_I の逆数の対数値は信号レベルと等価であり、およそ18dBとなる。したがって、SNRはおよそ17dB高く、時間的スペckルパターンを予測ノイズから容易に区別可能である。

10

【0048】

第2の実施の形態の他の例としては、光検出器14は、パーキン・エルマー社(Perkin Elmer)製のmodel30662Eのような、集積型ハイブリッドプリアンプを搭載したインジウム・ガリウム・ヒ素(InGaAs)アバランシェ・フォトダイオードであり、電子帯域幅は50MHz、電圧応答性は 3.4×10^5 V/W、そしてNEPは0.13 pW/rtHzである。もし、電子帯域幅がローパスフィルタによって700kHzに制限される場合は、予測SNRはおよそ40dBになる。また、可視パラメータ V_I の逆数の対数は信号レベルと等価であり、およそ18dBであるので、SNRはおよそ22dB高くなり、時間的スペckルパターンを予測ノイズから容易に区別可能である。

20

【0049】

今回開示された本発明の実施の形態は、本発明をどのように実施するかを示した例に過ぎない。開示された実施の形態の修正、変化および変更は、適切な技術および知識を有する当業者が思いつくことができるであろう。これらの修正、変化および変更は、特許請求の範囲とその均等物によって定められる本発明の精神と範囲から逸脱することなく実施されるであろう。

【 図 5 】

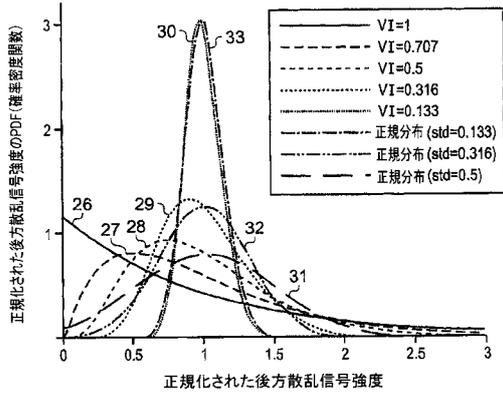


FIG. 5

【 図 6 】

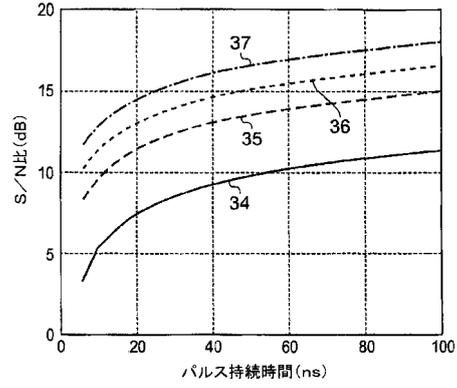


FIG. 6

【 図 7 】

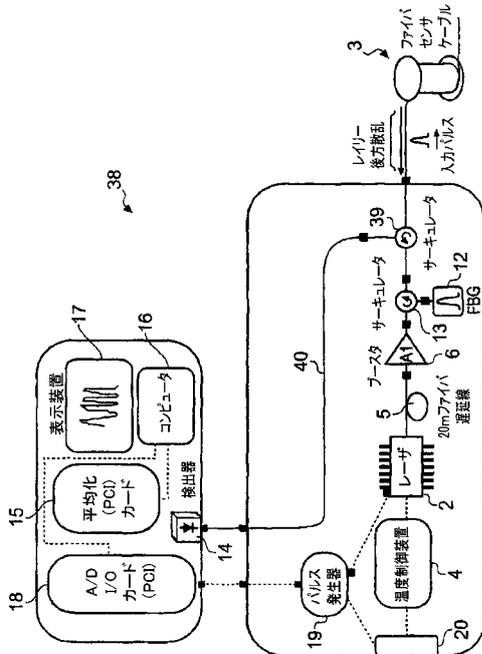


FIG. 7

フロントページの続き

- (74)代理人 100096781
弁理士 堀井 豊
- (74)代理人 100109162
弁理士 酒井 将行
- (74)代理人 100111246
弁理士 荒川 伸夫
- (74)代理人 100124523
弁理士 佐々木 真人
- (72)発明者 シャタリン, サージー・ブラディミール
ロシア、119296 モスクワ、モロディーズハイア・ストリート、3-348
- (72)発明者 カネロパウロス, ソティリス・エミル
イギリス、エヌ・ダブリュ・3 2・キュー・ティールンドン、フリート・ロード、88

審査官 田中 洋介

- (56)参考文献 特開2005-345376(JP,A)
米国特許第5194847(US,A)
特開平09-036470(JP,A)
特開平10-056433(JP,A)
特開平07-218352(JP,A)
特開昭61-073051(JP,A)
特開平03-033633(JP,A)
特開平09-184788(JP,A)
特公平06-103857(JP,B2)
特表2002-533672(JP,A)
Kyoo Nam Choi et al., Spectrally Stable Er-Fiber Laser for Application in Phase-Sensitive Optical Time-Domain Reflectometry, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2003年, Vol.15 No.3, pp.386-388
Juan C.Juarez et al., Polarization discrimination in a phase-sensitive optical time-domain reflectometer intrusion-sensor system, OPTICS LETTERS, 2005年, Vol.30 No.24, pp.3284-3286

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01M 11/00 - 11/08
JSTPlus(JDreamIII)
JST7580(JDreamIII)