

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公表特許公報(A)

(11)公表番号
特表2025-506457
(P2025-506457A)

(43)公表日 令和7年3月11日(2025.3.11)

(51)国際特許分類	F I	テーマコード (参考)
G 0 1 M 11/00 (2006.01)	G 0 1 M 11/00 R	2 G 0 8 6
G 0 2 B 6/032(2006.01)	G 0 2 B 6/032 Z	2 H 2 5 0
G 0 2 B 6/02 (2006.01)	G 0 2 B 6/02 4 5 1	

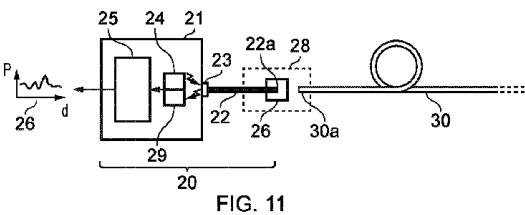
審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全29頁)

(21)出願番号	特願2024-547112(P2024-547112)	(71)出願人	304032273 ユニバーシティ・オブ・サザンプトン イギリス国ハンプシャー エスオー 17 1 ビージェイ, サザンプトン, ハイフィ ールド, ユニバーシティ・ロード
(86)(22)出願日	令和5年2月2日(2023.2.2)	(74)代理人	100118902 弁理士 山本 修
(85)翻訳文提出日	令和6年10月7日(2024.10.7)	(74)代理人	100106208 弁理士 宮前 徹
(86)国際出願番号	PCT/GB2023/050231	(74)代理人	100196508 弁理士 松尾 淳一
(87)国際公開番号	WO2023/152468	(74)代理人	100138759 弁理士 大房 直樹
(87)国際公開日	令和5年8月17日(2023.8.17)	(74)代理人	100201743 弁理士 井上 和真
(31)優先権主張番号	2201785.9		
(32)優先日	令和4年2月11日(2022.2.11)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	英国(GB)		
(81)指定国・地域	AP(BW,CV,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ ,NA,RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW), EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,AT,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES, FI,FR,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV 最終頁に続く		最終頁に続く

(54)【発明の名称】 中空コア光ファイバのための光時間領域反射測定

(57)【要約】

中空コア光ファイバを備える光学システムを評価する方法は、光時間領域反射測定システムを提供するステップであって、光時間領域反射測定システムは、波長λを有する光パルスを発生させるように構成された光源と、波長λの光を検出するように構成された光検出器と、光源からの光パルスを受信して光を光検出器に送達するために近位端で光結合されたソリッドコア光ファイバを含み、その遠位端に処理が施された端ファセットを有する入力／出力ファイバであって、当該端ファセットが、ソリッドコア光ファイバのコアを形成するガラスと端ファセットにおける空気との界面で引き起こされる波長λの光の後方反射を抑制するように構成された、入力／出力ファイバとを備える、ステップと、入力／出力ファイバと中空コア内に存在するガスを有する中空コア光ファイバとの間の光伝送のために、入力／出力ファイバの遠位端と、中空コア光ファイバの近位端とを整合させるステップと、入力／出力ファイバに沿った中空コアファイバの中への伝播のために、光パルスを発生させるように光源を動作させるステップと、中空コアファイバの中空コ



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

中空コア光ファイバを備える光学システムを評価する方法であって、前記方法は、
光時間領域反射測定システムを提供するステップであって、
前記光時間領域反射測定システムが、
波長 λ を有する光パルスが発生させるように構成された光源と、
波長 λ の光を検出するように構成された光検出器と、
前記光源からの光パルスを受信して光を前記光検出器に送達するために近位端で光結合されたソリッドコア光ファイバを含み、その遠位端に処理が施された端ファセットを有する入力／出力ファイバであって、前記端ファセットが、前記ソリッドコア光ファイバの
10 コアを形成するガラスと前記端ファセットにおける空気との界面で引き起こされる波長 λ の光の後方反射を抑制するように構成された、入力／出力ファイバとを備える、ステップと、

前記入力／出力ファイバと中空コア内に存在するガスを有する中空コア光ファイバとの間の光伝送のために、前記入力／出力ファイバの前記遠位端と、前記中空コア光ファイバの近位端とを整合させるステップと、

前記入力／出力ファイバに沿った前記中空コアファイバの中への伝播のために、光パルスが発生させるように前記光源を動作させるステップと、

前記中空コアファイバの前記中空コア内の前記ガスから前記光パルスのレイリー散乱によって生成された後方散乱光を受信し、検出信号が発生させるために前記光検出器を用いて前記後方散乱光を検出するステップと、
20

前記中空コア光ファイバの長さに沿った後方散乱光パワーの分布を含む光時間領域反射測定プロファイルを作成するために、前記検出信号を処理するステップとを含む、方法。

【請求項 2】

前記端ファセットにおける当該施された処理は、前記入力／出力ファイバの伝播光学モードから離れるように前記波長 λ の後方散乱光を方向付ける前記入力／出力ファイバの長軸に対する角度での、前記端ファセットにおける角度付けされた劈開を含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記端ファセットにおける当該施された処理は、前記端ファセットに入射する前記波長 λ の光の反射を低減するように構成された前記端ファセット上の反射防止コーティングを含む、請求項 1 または請求項 2 に記載の方法。
30

【請求項 4】

前記端ファセットにおける当該施された処理は、前記端ファセットに入射する前記波長 λ の光の反射を低減するように構成された前記端ファセット上に形成された反射防止微細構造面を含む、請求項 1 または請求項 2 に記載の方法。

【請求項 5】

前記端ファセットにおける当該施された処理はさらに、前記施された処理の追加構成の欠如の際に生じるであろう光伝送損失の量から、前記入力／出力ファイバと前記中空コアファイバとの間の光伝送損失を低減するように構成された、請求項 1 から 4 のいずれか一
40 項に記載の方法。

【請求項 6】

前記端ファセットにおける当該施された処理は、前記入力／出力ファイバの前記端ファセットを提供する前記入力／出力ファイバの前記遠位端でモードフィールドアダプタを提供することによって光伝送損失を低減するように構成され、前記モードフィールドアダプタは、前記入力／出力ファイバのモードフィールド直径と、前記中空コアファイバのモードフィールド直径との間で伝播光のモードフィールド直径を適合させるように構成された、請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

前記光パルスは、30 ns から 1000 ns の範囲内の持続時間を有する、請求項 1 か
50

ら 6 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 8】

前記光検出器は光子計数検出器を含む、請求項 1 から 7 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 9】

前記入力／出力ファイバの前記遠位端と前記中空コア光ファイバの前記近位端とを整合させるステップは、整合ステージ上で前記遠位端および前記近位端のそれぞれを支持するステップであって、前記整合ステージは、合わせて 5 本の整合軸を有する、ステップと、前記整合ステージを使用して、前記入力／出力ファイバと前記中空コア光ファイバとの間の光伝送を達成するために、前記遠位端と前記近位端との相対位置を調整するステップとを含む、請求項 1 から 8 のいずれか一項に記載の方法。

10

【請求項 10】

前記中空コア光ファイバは、反共振効果によって、前記波長 λ の光を誘導するように構成された反共振中空コア光ファイバを含む、請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 11】

前記中空コア光ファイバは、フォトリックバンドギャップ効果によって前記波長 λ の光を誘導するように構成されたフォトリックバンドギャップ中空コア光ファイバを含む、請求項 1 から 9 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 12】

前記光時間領域反射測定プロファイル内の異なる長さ値での後方散乱光パワーの値から、前記中空コア光ファイバの減衰を決定するステップをさらに含む、請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の方法。

20

【請求項 13】

前記光時間領域反射測定プロファイル内の後方散乱光パワーの任意のピークを見つけるステップと、ピークが位置する長さ値を前記中空コア光ファイバにおける欠陥または損傷のロケーションとして特定するステップとをさらに含む、請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 14】

前記中空コア光ファイバが、光データの伝送のために通信ネットワーク内に設置されている、または以前から設置されている、請求項 13 に記載の方法。

30

【請求項 15】

前記光時間領域反射測定プロファイル内の後方散乱光パワーの値から、前記中空コア光ファイバのコアサイズに関する情報を抽出するステップをさらに含む、請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 16】

前記方法は、前記中空コア光ファイバの製作中に実行され、前記製作は、前記光時間領域反射測定プロファイルに応じて調整される、かつ／または、前記中空コア光ファイバの品質評価は、前記光時間領域反射測定プロファイルに応じて行われる、請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 17】

前記中空コア光ファイバは、ガスセル光センサとして構成され、前記方法はさらに、前記光時間領域反射測定プロファイルから対象のパラメータを決定するステップまたはモニタするステップを含む、請求項 1 から 11 のいずれか一項に記載の方法。

40

【請求項 18】

波長 λ を有する光パルスを発生させるように構成された光源と、

波長 λ の光を検出するように構成された光検出器と、

前記光源からの光パルスを受信して光を前記光検出器に送達するために近位端で光結合されたソリッドコア光ファイバを含み、その遠位端に処理が施された端ファセットを有する入力／出力ファイバであって、前記端ファセットが、前記ソリッドコア光ファイバのコアを形成するガラスと前記端ファセットにおける空気との界面で引き起こされる波長 λ の

50

光の後方反射を抑制するように構成された、入力／出力ファイバと、

前記入力／出力ファイバと中空コア内に存在するガスを有する中空コア光ファイバとの間の光伝送のために、前記入力／出力ファイバの前記遠位端と、前記中空コア光ファイバの近位端とを整合させるための整合装置と、

前記中空コア光ファイバの前記中空コア内の前記ガスにおける前記光源からの光パルスのレイリー散乱によって生成された、受信された後方散乱光から、前記光検出器によって発生した検出信号を受信し、前記中空コア光ファイバの長さに沿った後方散乱光パワーの分布を含む光時間領域反射測定プロファイルを作成するために、前記検出信号を処理するプロセッサと

を備える光時間領域反射測定システム。

10

【請求項 19】

前記端ファセットにおける当該施された処理は、前記入力／出力ファイバの伝播光学モードから離れるように前記波長 λ の後方散乱光を方向付ける前記入力／出力ファイバの長軸に対する角度での、前記端ファセットにおける角度付けされた劈開を含む、請求項 18 に記載の光時間領域反射測定システム。

【請求項 20】

前記端ファセットにおける当該施された処理は、前記端ファセットに入射する前記波長 λ の光の反射を低減するように構成された前記端ファセット上の反射防止コーティングを含む、請求項 18 または請求項 19 に記載の光時間領域反射測定システム。

【請求項 21】

20

前記端ファセットにおける当該施された処理は、前記端ファセットに入射する前記波長 λ の光の反射を低減するように構成された前記端ファセット上に形成された反射防止微細構造面を含む、請求項 18 または請求項 19 に記載の光時間領域反射測定システム。

【請求項 22】

前記端ファセットにおける当該施された処理はさらに、当該施された処理の追加構成の欠如の際に生じるであろう光伝送損失の量から、前記入力／出力ファイバと前記中空コアファイバとの間の光伝送損失を低減するように構成された、請求項 18 から 21 のいずれか一項に記載の光時間領域反射測定システム。

【請求項 23】

前記端ファセットにおける当該施された処理は、前記入力／出力ファイバの前記端ファセットを提供する前記入力／出力ファイバの前記近位端でモードフィールドアダプタを提供することによって光伝送損失を低減するように構成され、前記モードフィールドアダプタは、前記入力／出力ファイバのモードフィールド直径と、前記中空コアファイバのモードフィールド直径との間で伝播光のモードフィールド直径を適合させるように構成された、請求項 22 に記載の光時間領域反射測定システム。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、中空コア光ファイバを用いた光時間領域反射測定を実行するための方法およびシステムに関する。

40

【背景技術】

【0002】

光時間領域反射測定 (OTDR: Optical time domain reflectometry) は、光ファイバの連続的なかつ局所的なパラメータを空間的に分解および測定するための確立した技法である。OTDRは、製作されたファイバ、ファイバケーブル、ならびに、通信リンクおよびネットワークなどの設置された光ファイバシステム上での測定のために、日常的に使用される。

【0003】

OTDRは、光のパルスを光ファイバの長さの端の中に照射することによって実行される。パルスは、ファイバに沿って伝播するにつれて、ファイバを形成する材料からの散乱

50

を受け、そのうちの一部は、照射端に向かって後方散乱され、そこで検出され得る。ファイバに沿った既知の光の伝播速度と組み合わせた既知の持続時間の離散パルスの使用により、ファイバに沿った距離に関する、検出された光の空間的原点を決定することができ、ファイバ長にわたる反射光レベルまたはパワーのプロファイルが得られる。ファイバ内またはその外部の特定の特質および状況が、後方散乱の量を修正することになり、散乱の発生源ロケーションが、パルス長に依存する空間分解能によって、正確に位置特定され得る。これにより、構造における局所的な欠陥および変化などのファイバ特質が特定されるだけでなく、温度および圧力などのファイバ特性を修正する外部パラメータの検出も可能になる。したがって、ファイバは、テストされ、もしくは、特質評価され得、または分散型センサとして使用され得る。複数のファイバセグメントを含む設置された光ファイバシステムでは、異なるセグメント間のスプライスおよびコネクタなどの接合部が特定され、特質評価され得、ファイバ破損などの障害が位置特定され得る。

10

【 0 0 0 4 】

このように後方散乱を使用するために、光ファイバが、検出のために後方散乱を生成することができることは、きわめて重要である。特に、OTDRは、照射された光パルスの、ファイバ材料からの弾性散乱であるレイリー散乱を検出する。レイリー散乱は、光ファイバが形成されるガラスの非結晶構造に起因する、ファイバにおける微視的密度変動によって引き起こされる。したがって、OTDRは、ソリッドコア光ファイバ (SCF: solid core optical fibre) を評価するための、実証された有用な技法である。SCFは、より低い屈折率のクラッドで取り囲まれた第1の屈折率の長手方向コアを含み、コアとクラッドとの両方はガラスを含む。伝播光は、屈折率限界での全内部反射によって、ファイバに沿って誘導される。

20

【 0 0 0 5 】

しかしながら、他のタイプの光ファイバに対する問題が生じる。中空コア、すなわち、画定された構造内に配置されたガラス境界を含む複数の長手方向毛細管によって形成されたクラッドによって取り囲まれた、長手方向空隙によって画定されたコアを有する光ファイバのクラスが十分に開発されつつある。光は、SCFにおける全内部反射とは異なる機構を介して誘導される。中空コアファイバ (HCF: hollow core fibre) と称され得るこれらのファイバは、SCFにおいて吸収および減衰を引き起こす、コアからのガラスの欠如のおかげで、有利に低い光伝播損失を立証することができる。したがって、HCFは、通信および遠隔感知を含む、多くの用途にとって大きな関心があるものであり、数千キロメートルにわたってデータを伝送することができることが示されてきている。しかしながら、HCF自体の魅力的な低損失特質をもたらすガラスコアの欠如によりさらに、レイリー散乱を生成する密度変動の大部分が除去され、HCFを用いた緻密なOTDRは明らかに実現できなくなる。ファイバの近位端および遠位端におけるガラス境界から大きな反射が検出され得るので、ファイバ長の測定を含む簡単な測定結果が取得され得るが、反射光から抽出され得るのは、最大の欠陥に関する情報のみである (参考文献 [1])。

30

【 0 0 0 6 】

HCFの分散測定および特質評価のために代替的な方法が提案されている。一例は、フォトリックバンドギャップ中空コアファイバとして知られるタイプの11 km長の中空コアファイバで報告されている光学側散乱放射測定 (参考文献 [2]) であり、著者らは、「その特質評価要件は、標準的な光学反射尺度器具の能力をはるかに超えている」ことに注目した。

40

【 0 0 0 7 】

さらなる例が米国第10,845,268号 (参考文献 [3]) において与えられ、それは、HCFおよびSCFの長さを交互に入れ替え、SCF区分からOTDRを介して後方散乱を取得することを提案している。これにより、SCFロケーションでのファイバの局所的な特質評価のみが可能になるが、SCFの導入により、低損失、低遅延、高パワー処理、および低い非線形性などのHCFの利益が無効になる。

50

【 0 0 0 8 】

したがって、H C F の真の O T D R を有効化する手法が対象となる。

【 発 明 の 概 要 】

【 0 0 0 9 】

態様および実施形態が、添付の特許請求の範囲に詳述される。

【 0 0 1 0 】

本明細書に記述されたある特定の実施形態の第 1 の態様によると、中空コア光ファイバを備える光学システムを評価する方法が提供されており、方法は、光時間領域反射測定システムを提供するステップであって、光時間領域反射測定システムが、波長 λ を有する光パルスを発生させるように構成された光源と、波長 λ の光を検出するように構成された光検出器と、光源からの光パルスを受信して光を光検出器に送達するために近位端で光結合されたソリッドコア光ファイバを含み、その遠位端に処理が施された端ファセットを有する入力 / 出力ファイバであって、当該端ファセットが、ソリッドコア光ファイバのコアを形成するガラスと端ファセットにおける空気との界面で引き起こされる波長 λ の光の後方反射を抑制するように構成された、入力 / 出力ファイバとを備える、ステップと、入力 / 出力ファイバと中空コア内に存在するガスとを有する中空コア光ファイバとの間の光伝送のために、入力 / 出力ファイバの遠位端と、中空コア光ファイバの近位端とを整合（アライメント）させるステップと、入力 / 出力ファイバに沿った中空コアファイバの中への伝播のために、光パルスを発生させるように光源を動作させるステップと、中空コアファイバの中空コア内のガスから光パルスのレイリー散乱によって生成された後方散乱光を受信し、検出信号を発生させるために光検出器を用いて後方散乱光を検出するステップと、中空コア光ファイバの長さに沿った後方散乱光パワーの分布を含む光時間領域反射測定プロファイルを作成するために、検出信号を処理するステップとを含む。

【 0 0 1 1 】

本明細書に記述されたある特定の実施形態の第 2 の態様によると、光時間領域反射測定システムが提供されており、光時間領域反射測定システムは、波長 λ を有する光パルスを発生させるように構成された光源と、波長 λ の光を検出するように構成された光検出器と、光源からの光パルスを受信して光を光検出器に送達するために近位端で光結合されたソリッドコア光ファイバを含み、その遠位端に処理が施された端ファセットを有する入力 / 出力ファイバであって、当該端ファセットが、ソリッドコア光ファイバのコアを形成するガラスと端ファセットにおける空気との界面で引き起こされる波長 λ の光の後方反射を抑制するように構成された、入力 / 出力ファイバと、入力 / 出力ファイバと中空コア内に存在するガスとを有する中空コア光ファイバとの間の光伝送のために、入力 / 出力ファイバの遠位端と、中空コア光ファイバの近位端とを整合（アライメント）させるための整合（アライメント）装置と、中空コア光ファイバの中空コア内のガスにおける光源からの光パルスのレイリー散乱によって生成された、受信された後方散乱光から、光検出器によって発生した検出信号を受信し、中空コア光ファイバの長さに沿った後方散乱光パワーの分布を含む光時間領域反射測定プロファイルを作成するために、検出信号を処理するプロセスとを備える。

【 0 0 1 2 】

特定の実施形態のこれらの態様およびさらなる態様が、添付の独立請求項および従属請求項において詳述される。従属請求項の特徴が、互いに、かつ、特許請求の範囲に明確に詳述された以外の組合せで独立請求項の特徴と、組み合わせられ得ることが理解されるであろう。さらに、本明細書に記述された手法は、下記に詳述されたような特定の実施形態に限定されるものではなく、本明細書に提示された特徴の任意の適正な組合せを含み、企図するものである。例えば、適宜下記に記述された様々な特徴のいずれか 1 つまたは複数を含む本明細書に記述された手法による方法およびシステムが提供されてもよい。

【 0 0 1 3 】

本発明のより良好な理解のため、かつ本発明がどのように実行に移され得るのかを示すため、次に、例として、添付図面への参照を行う。

10

20

30

40

50

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 4 】

【図 1】本発明の態様が適用可能なフォトリックバンドギャップ中空コア光ファイバの一例の横断面図を示す図である。

【図 2】本発明の態様が適用可能な第 1 の例の反共振中空コア光ファイバの横断面図を示す図である。

【図 3】本発明の態様が適用可能な第 2 の例の反共振中空コア光ファイバの横断面図を示す図である。

【図 4】反共振中空コアファイバにおける後方散乱の成分の波長の関数としてのシミュレーションの結果のグラフを示す図である。

10

【図 5】反共振中空コアファイバにおける後方散乱の成分のファイバのコア直径の関数としてのシミュレーションの結果のグラフを示す図である。

【図 6】反共振中空コアファイバの第 1 のサンプルから実験的に得られたファイバ距離にわたって分布した後方散乱パワーの光時間領域反射測定プロファイルを示す図である。

【図 7】異なる光パルス幅または持続時間での、反共振中空コアファイバの第 1 のサンプルから実験的に得られたファイバ距離にわたって分布した後方散乱パワーの光時間領域反射測定プロファイルを示す図である。

【図 8】ファイバ長で正規化された図 6 の光時間領域反射測定プロファイルを示す図である。

【図 9】反共振中空コアファイバの第 2 のサンプルから実験的に得られたファイバ距離にわたって分布した後方散乱パワーの光時間領域反射測定プロファイルを示す図である。

20

【図 10】異なる光パルス幅または持続時間での、反共振中空コアファイバの第 2 のサンプルから実験的に得られたファイバ距離にわたって分布した後方散乱パワーの光時間領域反射測定プロファイルを示す図である。

【図 11】本発明の例による光時間領域反射測定システムの概略図を示す図である。

【図 12】第 1 の例による低減された後方反射のための遠位端処理を施した光時間領域反射測定システムの入力 / 出力ファイバの簡略化した長手方向断面図を示す図である。

【図 13】第 2 の例による低減された後方反射のための遠位端処理を施した光時間領域反射測定システムの入力 / 出力ファイバの簡略化した長手方向断面図を示す図である。

【図 14】低い結合損失のための例示の遠位端処理を施した光時間領域反射測定システムの入力 / 出力ファイバの簡略化した長手方向断面図を示す図である。

30

【図 15】実施形態による光時間領域反射測定システムのための例示の整合（アライメント）装置の概略図を示す図である。

【図 16】実施形態による例示の方法のフローチャートを示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 5 】

ある特定の例および実施形態の態様および特徴が本明細書で論じられ / 記述される。特定の例および実施形態のいくつかの態様および特徴は、従来 방식으로実施されてもよく、これらは、簡略化の目的で詳細には論じ / 記述されない。したがって、詳細に記述されない、本明細書で論じられるシステムおよび方法の態様および特徴は、そのような態様および特徴を実施するための従来技法によって実施され得ることが理解されるであろう。

40

【 0 0 1 6 】

中空コア光ファイバ（HCF）は、長手方向軸に平行なファイバの長さに沿って延び、ガラスなどの材料内で画定される、ファイバ材料内の孔、毛細管、またはルーメンのアレイまたは構成体を含む構造を有する。孔の構成体は微細構造と呼ばれてもよく、典型的には、微細構造は、ファイバのクラッドの少なくとも一部を形成し、空気または別のガスが充填され得る、光誘導コアを実現する中央の中空空隙または領域を取り囲む。微細構造の毛細管は、典型的には、ガラスで作られたより大きな外側クラッドチューブ内に支持される。ソリッドガラスコアの欠如によって可能になる空気内の光の伝播により、ソリッドコアファイバと比較して、ガラス内を伝播する誘導された光学波の割合が低減され、増大し

50

た伝搬速度、吸収と散乱との両方からの低減された損失、および低減された非線形相互作用などの利益がもたらされる。したがって、中空コアファイバは、通信を含む用途にとって非常に魅力的であり、真空においてほとんど光速で、より高い光パワーで、より広範な光帯域幅にわたって、データ伝送を可能にし、ソリッドファイバ内を移動する光に影響を与え得る非線形効果および熱光学効果などの問題からは比較的解放される。

【0017】

中空コアファイバは、それらの光学誘導機構に応じて2つの主要なクラスまたはタイプ、すなわち、中空コアフォトリックバンドギャップファイバ(HCPBF: hollow core photonic bandgap fibre)、代替的に、中空コアフォトリック結晶ファイバ(HPCF: hollow core photonic crystal fibre)とも呼ばれる(参照文献[4])、および、反共振中空コアファイバ(AR-HCF: antiresonant hollow core fibre)または(ARF: antiresonant hollow core fibre)(参照文献[5])に分類され得、それらには、クラッド毛細管の幾何学構造を特徴とする様々なサブカテゴリがある。本開示は、これらの2つの主なクラス、およびそれらの関連するサブタイプに加えて他の中空コア設計を含む、すべてのタイプの中空コアファイバに適用可能である。当技術分野において、様々なクラスのファイバに対していくつかの重複する専門用語の使用があることに留意されたい。本開示において、「中空コアファイバ」および「中空コア微細構造ファイバ」という用語は、上記の中空コアを有するすべてのタイプのこれらのファイバをカバーすることを意図するものである。「HCPBF」および「HPCF」という用語は、フォトリックバンドギャップ効果によって導波を実現する構造を有する中空コアファイバを指すために使用される(下記でより詳細に説明される)。「ARF」および「反共振中空コアファイバ」という用語は、反共振効果によって導波を実現する構造を有する中空コアファイバを指すために使用される(やはり、下記でより詳細に説明される)。

【0018】

図1は、例示のHCPBF10の断面図を示す。このファイバタイプでは、構造化された内側クラッド1は、多くの小さいガラス毛細管の規則的な近接してぎっしり詰まったアレイを含み、そのアレイから、中央グループが排除されて、実質的に円形の中空コア2を画定する。クラッド毛細管は、コア2の周りの複数の環内に配置される。クラッド構造1の周期性により、実質的に周期的に構造化された屈折率が、したがって、コア2に向かって伝播する光学波を閉じ込めるフォトリックバンドギャップ効果がもたらされる。これらのファイバは、コア2を作るために排除されるクラッド毛細管または「セル」の数で記述され得る。図1の例では、アレイからの中央の19個のセルが、コア領域内には欠如しており、それにより、19セルコアHCPBFになっている。構造化クラッド1は、コア2を取り囲むセルの6つの環、それに加えて、構造化クラッド1の外面の丸さを改善するために7番目の環のいくつかのセルから形成される。他の例では、クラッド1を画定するために異なる個数の環が使用されてもよい。外側クラッド3は、構造化クラッド1を取り囲んでおり、これは、構造化クラッド1の毛細管を支持するチューブである。

【0019】

HCPBFとは対照的に、反共振中空コアファイバは、反共振光学誘導効果によって光を誘導する。ARFの構造化クラッドは、フォトリックバンドギャップ効果が重要でないように、高度の周期性がない構造を与えるために、HCPBFよりもはるかに低い個数のより大きなガラス毛細管またはチューブを含む、より単純な構成を有しているが、チューブが均等に配設される(スペースの有無にかかわらず)ので、より大きな規模で、いくらかの回転周期性を有する。クラッド毛細管は、コアの周りに単一環の毛細管のみを含み、さらなるより小さな毛細管が、一次の単一環の毛細管の内部に含まれてもよい。構造は、クラッド毛細管の壁厚と共振しない伝播波長の、換言すると、クラッド毛細管壁厚によって規定される反共振窓内の波長の反共振が実現されることを意味する。クラッド毛細管は、ファイバの中空コアを提供する中央の空隙または空洞を取り囲んでおり、それは、反共

振誘導型光学モードに対応することができる。構造化クラッドはさらに、主に、毛細管の内部で、毛細管壁のガラス内で、または、クラッド毛細管とファイバの外側クラッドとの間のスペースもしくは隙間内で伝播することができるクラッドモードに対応することができる。これらのさらなる非コア誘導型モードの損失は、一般的に、コア誘導型モードの損失よりも非常に高い。基本となるコア誘導型モードは、典型的には、コア誘導型モードの中でも格段に最も低い損失を有する。伝播光の波長と反共振の状態にある毛細管壁厚によって実現される反共振は、光がコアにとどめられ、極低損失で伝播することができるように、基本となるコアモードといずれかのクラッドモードとの間の結合を阻止するように働く。

【0020】

10

図2は、例示の単純な反共振中空コアファイバの横断面図を示す。ファイバ10は、外側管状クラッド3を有する。構造化された内側クラッド1は、単一環の外側クラッド3の内部に配置されている複数の管状クラッド毛細管4を、この例では、同じ断面サイズおよび形状の7つの毛細管を含み、その結果、各クラッド毛細管4の長軸と外側クラッド3の長軸とは実質的に平行である。クラッド毛細管4が、外側クラッド3の内周の周りで均等に間隔が空けられ、さらに、互いに間隔を空けて配置されて、隣接する毛細管が接触しないように、各クラッド毛細管4はロケーション5で外側クラッド3の内面と接触して（に接着されて）いる。ARFのいくつかの設計では、クラッドチューブ4は、互いに接触した状態で位置付けられ（換言すると、図2におけるように、間隔を空けて配置されるのではなく）てもよいが、この接触を解消するように間隔を空けることにより、ファイバの光学的性能を改善することができる。間隔を空けることにより、隣接するチューブ間の接触ポイントで生じ、高い損失を招く望ましくない共振を引き起こす傾向がある、ノードが除去される。したがって、間隔を空けて配置されたクラッド毛細管を含むファイバは、「ノードレス反共振中空コアファイバ」と称される場合がある。

20

【0021】

管状外側クラッド3の内側の周りの環内のクラッド毛細管4の構成体は、外側クラッド3および毛細管4の長軸と平行な長軸をさらに有する、ファイバの中空コア2である中央スペース、空洞、または空隙をファイバ10内に作成する。コア2は、クラッド毛細管4の外面の内側に面する部分によって境界が定められる。これはコア境界であり、この境界を作り上げる毛細管壁の材料（例えば、ガラスまたはポリマー）は、必要とされる反共振光学誘導効果または機構をもたらす。毛細管4は、コア境界において、ARF内で反共振光学誘導が生じる波長を規定する厚さを有する。

30

【0022】

図3は、第2の例示のARFの横断面図を示す。ARF10は、管状外側クラッド3の内面の周りに均等に間隔を空けて配置され、中空コア2を取り囲む単一の一次環を形成する、6つのクラッド毛細管4を含む構造化内側クラッド1を有する。各クラッド毛細管4は、その内部で入れ子にされた二次の、クラッド毛細管4の内面に接着された、より小さい毛細管6を、この例では、一次毛細管4と外側クラッド3との間の接着のポイントと同じ方位角ロケーション5において有する。これらのさらなるより小さい毛細管6は、光学的損失を低減することができる。またさらにより小さい三次毛細管が、二次毛細管6の内部に入れ子にされてもよい。二次毛細管および任意選択でより小さいさらなる毛細管を含むこのタイプのARF設計は、「入れ子型反共振ノードレスファイバ」、すなわちNANF (nested antiresonant nodeless fibres) と称されてもよい（参照文献[6]）。他のNANF設計では、1つまたは複数のさらなる二次毛細管が、一次毛細管内で入れ子にされ得る。ARFの構造化クラッドのための多くの他の毛細管構成が実現可能であるが、本開示は、上述の例に限定されるものではない。例えば、毛細管は、円形断面のものである必要はなく、かつ/あるいは、すべて同じサイズおよび/もしくは形状であってもまたはなくてもよい。一次環内のコアを取り囲む毛細管の数は、例えば、4、5、6、7、8、9、10、またはそれ以上であってもよい。

40

【0023】

50

中空コア光ファイバは、特にシリカのソリッドコアファイバの製作で知られるガラスベースの材料のいずれかから作られてもよい。ガラスのタイプには、「ケイ酸塩ガラス」、または、化学合成シリカ（二酸化ケイ素、もしくは石英）に基づく「シリカベースのガラス」があり、それには多くの例がある。光ファイバに適した他のガラスには、限定はしないが、ドーパされたシリカガラスがある。材料は、吸収もしくは伝送を修正するなど、ファイバの光学特性を調整するために、あるいは、ファイバ製造を容易にする、信頼性を改善する、または特定の末端使用を可能にするもしくは高めるためなど、材料の特性を調整するために1つまたは複数のドーパントを含んでもよい。ファイバはさらに、ポリマー材料から作られてもよい。

【0024】

10

本明細書では、中空コア光ファイバ、中空コアファイバ、中空コア導波管、中空コア光学導波管、中空コア微細構造ファイバ、中空コア微細構造導波管を含む用語、および類似用語は、上記の例および類似構造のいずれかによって構成された光学導波構造をカバーすることを意図しており、ここでは、光は、複数の長手方向毛細管を含む構造化（微細構造化）クラッドによって取り囲まれた中空の細長い空隙またはコア内のいくつかの誘導機構（フォトリックバンドギャップ誘導、反共振誘導、および/もしくは阻止された結合誘導）のいずれかによって誘導される。これらの様々な用語は、本開示において交換可能なように使用されてもよい。

【0025】

20

すべての中空コアファイバについて、共通の特質は、ガラスコアの欠如、したがって、さらに、従来、光時間領域反射測定で検出されるレイリー散乱を生み出す微視的ガラス密度変動の欠如である。もはやHCFは、高度に開発され、実用的であるにもかかわらず、極低損失または減衰レベル（報告されているところによると、 0.22 dB/km ）で複数キロメートル長の製造が可能であり、数千キロメートルにわたってデータを伝送することができ（再循環ループ実験において立証された）、さらに、ライブデータ通信量を担うためにダクト内にケーブル配線され、設置され始めている。さらに製造改善を推進するため、かつ、ラボ内および現場においてHCFケーブルのテストを可能にするため、確立された分散式特質評価技法を利用してファイバ障害、製造不備、またはファイバ長に沿った不規則性を特定することができることが有用であろう。これらの機能は、ソリッドコアファイバシステムのためにOTDRを使用することによって遂行されるが、従来の理解では、これは、極低レベルの後方散乱のために、HCFに有用に適用され得ないことが示唆される。

30

【0026】

OTDRにおいて検出されるレイリー後方散乱は、弱い光効果である。（標準の単一モードファイバ（SMF: standard single-mode fibre）などの）シリカガラスから形成された現在の従来型ソリッドコア光ファイバは、典型的には、照射されたパワーを下回る約 72 dB である1メートル長のファイバからの後方散乱信号を生成することができる（ -72 dB/m の後方散乱係数）。市販のOTDR器具では、このレベルの後方散乱は、最大約 $160 \sim 400 \text{ km}$ の長さを有するファイバの正常な特質に適合する（例えば、EXFO、CanadaからのFTB 7600モデル、または、Luciol、SwitzerlandからのLOR-200モデルを用いて）。対照的に、これまで報告された最低損失データ伝送であるHCFは、NANF設計（参照文献[7]）であり、ファイバ構造内のガラス表面からの、はるかにより低いレベルの後方散乱を有し、報告によると、 -118 dB/m と同等の低さであり、典型的なSMFにおける後方散乱信号よりも 45 dB を超えて低い。1mよりも優れた空間分解能で -140 dB/m と同等の弱さの後方散乱信号を測定することができる特注のOTDR反射計が、この測定を行うために必要であった（参照文献[8]）。しかしながら、そのような器材は市販されていないため、特に現場での、HCFの広範なテストおよび評価は現在実行することができない。

40

【0027】

50

しかしながら、本開示は、光時間領域反射測定を中空コア光ファイバの用途に適合させるための手法を提案する。

【0028】

反共振中空コアファイバ（ARF）からの後方散乱が研究されてきた（参照文献[9]）。3つの後方散乱誘因が分析された。これらの（相対的な）大きさを比較するために、ここでは $35\mu\text{m}$ のコア直径を有するファイバに対して 1550nm で与えられた計算値が検討される。微細構造（すなわち、クラッド毛細管を形成する）のガラス塊からのレイリー後方散乱が非常に低い（ -150dB/m ）ことが判明したが、このことは、ガラスを通して伝播する誘導光が非常に小さい割合である（光エネルギーの 0.01% 未満である）ことを考慮すると、理解することができる。他の2つの誘因は、ガラス微細構造面の表面粗さ（ -115dB/m ）によって引き起こされる後方散乱、および、HCFの中空領域を満たし得るガス（大気圧の空気で -100dB/m ）からのレイリー後方散乱として特定される。これらの低レベルの後方散乱は、標準のOTDR装置の検出能力を超えている。他の知られている光学反射尺度技法の検討により、そのような低レベルの後方散乱を測定するための光学的周波数領域反射光測定（OFDR: optical frequency domain reflectometry）または位相OTDRなどの位相感応測定技法の使用が示唆され得る。しかしながら、これらの技法を用いるとき、室温におけるガス分子の熱運動が考慮されなければならない。これにより、受信された光信号のドップラー広がり引き起こされ、それにより、有用な信号が「ぼやける」。結果として、ガスからの後方散乱された信号は検出され得ず、ガラス面上の静止した散乱体から散乱されたより弱い信号のみが測定される。ガスからの散乱によって運搬された情報が失われる。

【0029】

本開示は、一般的な理解に反して、HCFの空隙内のガスからの低レベルの後方散乱が、実際、典型的な特注でないOTDR器材によって有効に検出され得るという認識に基づくものである。HCFの内部からの後方散乱を測定するため、高感度のOTDRの使用が提案されており、その標準の実装形態は位相感応でなく、したがって、運動ガスにおけるドップラー広がりに対して無感応である。上述のように、反共振HCFの内部のガス（典型的には空気）からのレイリー後方散乱が、約 15dB だけ表面散乱よりも強力であると予測されており、本発明者らは、現在の最高品質のOTDRの感度は、その検出にとって十分であろうと推定した。ファイバ特質評価の観点から、これは、より強力な信号（表面散乱ではなく空気散乱）を測定するため、感応性がより少ない方法（OFDRではなくOTDR）を用いることを表しており、結果として、信号対雑音比の全体損失が低くまたはなくなる。それはさらに、市販測器の使用を可能にする。さらなる利点は、位相感応方法と比較して、大抵のOTDRが偏波無感応性であることであり、それにより、定常のファイバ特質評価およびテストにおいて対象となる情報である、全散乱パワーの測定結果が直接もたらされる。

【0030】

ガス充填HCFから利用できると予測される後方散乱の量を考慮して、発明者らは、HCFの正常なOTDR測定結果が、（但し必要であれば、HCF内に照射される利用できる光の量を最大化するため）HCFに結合される光パルスの結合損失と、光が、OTDR機器または装置からかつOTDR機器または装置に、それによって結合されるSMFの部分と、テスト中のHCFの入力ファセットとの間のガラス-空気界面で生じる強力な後方反射との注意深い取り扱いによって達成され得ることを、提案する。市販のOTDR機器は、ソリッドコアファイバ（SCF）とともに使用するように設計されるので、テスト中にファイバとの接続のための機器の一部を形成する出力/入力ファイバは、典型的にはSMFであるソリッドコアファイバの一部分である。よく知られているように、光の 4% の反射がガラス-空気界面で生じ、そのような界面は、HCFの中空コアが空気充填またはガス充填であるので、HCFがOTDR機器のSCF入力/出力に結合されたときに生み出される。この 4% 反射を効率的に抑制しないと、OTDR機器の中に戻るように方向付

けられることになり、OTDR測定は、器具の感度によってではなく、界面からの強力な初期反射ピークに起因する飽和状態によって制限され、後方散乱は検出できなくなりやすい。したがって、HCF内のガスからの低レベルの後方散乱が測定され得るように、OTDR機器の最高感度を利用するため、この後方反射を除去するまたは低減することが提案される。

【0031】

HCF内で生じることが特定される後方散乱寄与のシミュレーション（コンピュータモデル化）は、HCF内の空気またはガスからのレイリー散乱に基づくOTDRの概念を裏付けるために遂行されている。反共振HCFにおける後方散乱のより詳細なシミュレーションは他で提示されており（参考文献[9]）、示されるところによると、全後方散乱係数は、主に、ファイバのコアの半径Rおよび伝播パルスの波長 λ に依存し、反共振HCF微細構造に対して比較的無感応である。表面散乱に起因する後方散乱寄与度は、 λ^3 / R^6 に比例することが判明したが、中空コアの内部のガスからの寄与度は $1 / (\lambda R)^2$ に従う。

10

【0032】

図4は、ファイバ内の空気とガラス表面との両方に関して、シミュレーションによって決定された、後方散乱係数と波長との変動のグラフを示している。シミュレーションで用いられたファイバは、（後述する実験で用いられるファイバに類似した）NANFタイプの中空コアファイバであり、大気圧の空気が充填されていると想定された。実際の製造されたファイバはこれとは異なる圧力またはガス組成を有することができるが、本発明は、この様式に限定されるものではなく、一般に、ガス充填されたコアを含むHCFに適用でき、ここで、ガスは空気または特定のガスもしくはガス組成であってもよく、いずれも、ファイバ製作工程から存在してもよく、または後で加えられてもよいことに留意されたい。ファイバコアの直径は、 $36 \mu\text{m}$ で固定された。空気からの後方散乱は実線として示され、ガラス表面からの後方散乱は破線で示される。見てわかるように、ファイバの内部の大気中空気からのレイリー後方散乱は、すべてのモデル化された波長、 $1300 \text{ nm} \sim 2000 \text{ nm}$ 間の予測された表面散乱よりも十分に上にある。波長が増加するにつれて両方の予期される減少が観測される。

20

【0033】

図5は、ファイバ内の空気（実線）とガラス表面（破線）との両方に関して、シミュレーションによって決定された、後方散乱係数とコア直径との変動のグラフを示している。ファイバは、図4のシミュレーションの場合と同じNANF設計を有し、やはり大気中空気が充填されていたが、コア直径は $24 \mu\text{m}$ から $40 \mu\text{m}$ で変動し、OTDRパルスの波長は 1550 nm で固定された。やはり、ファイバの内部の大気中空気からのレイリー後方散乱は、すべてのコア直径について、予測される表面散乱よりも十分に上にある。コア直径が増加するにつれて両方の予期される減少が観測される。

30

【0034】

知られているOTDR技術の検出能力内にある中空コアファイバ内の空気またはガスからのレイリー後方散乱のレベルのこの特定は、驚くべき結果であり、これまで報告された観測結果から予想外であり、下記の特定の装置適合と組み合わせたとき、本明細書で開示された提案されたOTDR方法を可能にする。提案された方法は、光学システムと、単独または他の光ファイバタイプと組み合わせた中空コア光ファイバ、および導波コンポーネントを備えるまたは含む光ファイバシステムとの評価（テスト、分析、調査）のために利用され得る。

40

【0035】

これらのシミュレーションから、空気からの散乱は、広いスペクトル範囲全体にわたって、かつコア直径のすべての実用上の範囲について、実質的により重要であると結論付けることができる。シミュレーションは、 1550 nm における -100 dB/m のレベルでの、かつ $36 \mu\text{m}$ のコア直径での空気支配レイリー後方散乱を示唆する。コア直径にとりまう後方散乱レベルの変化に関して、図5は、コア直径約 $36 \mu\text{m}$ において $\pm 1 \mu\text{m}$ の

50

寸法誤差で、後方散乱係数が、 ± 0.35 dB の変化が预期されることを示している。したがって、HCF からの空気起源のレイリー後方散乱の検出を増大または最大化させるように構成された OTDR 機器が提案される。信号対雑音比およびダイナミックレンジを高めるために、HCF が、OTDR 機器との光通信のために SCG に結合されたガラス - 空気界面での 4 % 反射を低減または抑制し、SCF と HCF との間の低損失結合を可能にすることによるステップがとられる。

【0036】

この手法に従って達成され得る OTDR 結果を立証するために実験が行われた。高感度光子計数検出に基づく市販の OTDR (Luciol, Switzerland からの LOR-200) が使用された。これは、 $1 \mu s$ 持続時間 (約 300 m の HCF の空間分解能に対応する) の光パルスに対して最先端のダイナミックレンジを提供する。約 10 mW ピークパワーのパルスが発生するが、提案された OTDR 方法では、より高いパルスパワーが使用され得、SCF よりもはるかに低い光学的非線形を有する HCF によって許容されるのに加えて、より十分な結果がもたらされ得る。NANF 設計の HCF がテストされた。特に、4 km を超える長さの長いファイバが、調査された。これは、より長いパルスの使用を可能にするため、OTDR 分散プロファイルに対して空間分解能はより低くなるが、パルスあたりの全パワーがより大きいため、より優れた信号対雑音比を提供する。商業上の OTDR 機器は、典型的には、パルス持続時間を変更することを可能にするが、ピークパルスパワーは同じままであるため、パルスが長くなると全体パワーはより大きくなることに留意されたい。SCF および HCF を接合するため、低後方反射手法および低損失結合手法が使用されたが、そのことはさらに下記に記述される。シミュレーションを合致させるため、 1550 nm のパルス波長で、コア直径が $36 \mu m$ 近傍の HCF が使用された。見てわかるように、実験は、測定データから -102 dB/m の推定される後方散乱係数をもたらし、これは、上述の -100 dB/m の予測値に非常に近接している。点在するファイバ不備によって引き起こされ得るようなファイバに沿った点在する散乱事象を特定する能力が、 10 m の空間分解能まで下げて特定できることが立証された。

【0037】

実験で使用される OTDR 機器は、大気圧で空気が充填された NANF・HCF からの後方散乱が測定可能であると期待された十分な感度を提供する高感度光子計数光検出器を使用する現場配置可能な機器である。OTDR は、最も長い ($1 \mu s$) パルスが使用されるとき、 1550 nm で SMF に対して 57 dB ($1.3 \mu m$ で 60 dB) の後方散乱ダイナミックレンジを有するように設計される。その結果、 $1 \mu s$ のパルス (HCF において 300 m の空間分解能に対応する) で、ノイズフロア (SMF に対して約 30 dB 低い) より 27 dB 高い、大気圧の空気が充填された NANF からの後方散乱信号を測定すると预期される。より高い分解能に必要とされるより短いパルスは、より小さいパワー、したがって、より低い信号対雑音比を含むので、 10 倍の分解能 (30 m) での測定では、ノイズフロアより最大で 17 dB 高い信号が発生するはずである。

【0038】

OTDR 測定におけるさらなる制限因子は、測定され得る最も強い信号と最も弱い信号との間の最大差であり、それは、OTDR 器具および測定設定に依存して、典型的には、 $30 \sim 50$ dB である。したがって、HCF を測定するとき、OTDR 入力/出力 SMF と HCF との間の空気 - ガラス境界で通常生じる 4 % 反射を注意深く管理することが適切である。何故なら、これは、利用可能な測定範囲の大きな割合である、 -14 dB に対応するからである。 $1 \mu s$ パルスでは、 -14 dB における後方反射ピークは、SMF 後方散乱レベル (-49 dB) よりも 35 dB 高く、NANF・HCF の预期される後方散乱レベル (-79 dB) よりも 65 dB 高いので、NANF 後方散乱レベルの測定はできなくなる。この後方反射を抑制するため、角度研磨式ソリッドコアファイバ、換言すると、ファイバの光軸に対して非直角で劈開されたまたは研磨された端ファセットを有するファイバが使用されて、HCF に結合した。これにより、OTDR への入力での後方反射が -60 dB を下回るまで抑制された。さらに、挿入損失を低減するため (0.15 dB だ

け)、単純な四層反射防止 (AR) コーティングが、角度付き SCF に施された。いかなる AR コーティングもない - 49 dB 後方反射を有する角度付き劈開ファイバもまた使用され、後方散乱データの収集には十分であることが判明した。角度付きファセットおよび/または AR コーティングは、HCF との低反射界面を実現し、光学システムにおいて後方散乱を受けていない光で、検出信号を飽和させることを回避するために、OTDR 機器に反射されて戻る光パルスパワーの量を最小限に抑えるように意図するものである。角度付き劈開は、入力/出力 SMF・SCF にスプライス接続された短片の屈折率分布型マルチモードファイバの遠位端上に設けられた。それは、SMF と HCF との間の結合損失を低減するため、および、HCF 内に照射される光パルスパワーの量を最大限にするため、それによって、信号対雑音比を最大化し、後方散乱光の検出能力を増大させるため、モードフィールド直径 (MFD: mode field diameter) を、SMF の 10 μm MFD から拡張して、NANF・HCF の 24 μm MFD に合わせるために、モードフィールドアダプタとして役立った。したがって、モードフィールドアダプタは、低損失の光学結合を実現するのに役立つ。MFD がより良好に合わせられる (等しくまたはほぼ等しく) 場合、モードフィールドアダプションは省略されてもよく、角度付きファセットおよび/または AR コーティングが、OTDR 入力-出力ファイバ (または、中間 SCF のどこかの部分) 上に直接設けられる。角度付きファセット、AR コーティング、およびモードフィールドアダプタは、以下でより詳細に記述される。

10

【0039】

さらに HCF への低損失結合を確実にするため、(取り付けられた角度研磨されたかつ AR コーティングされたモードフィールドアダプタを含む) NANF・HCF および入力/出力 SMF・SCF が、それぞれの上にファイバが装着された、全部で 5 軸の整合 (アライメント) を有する一対の整合 (アライメント) ステージを用いて突き合わせ結合された。5 軸整合 (アライメント) は、3 つの直交する直線方向に加えてピッチおよびヨーの調整を可能にし、特に角度付きファセットが関与するとき、3 軸 (または x y z) 整合 (アライメント) よりもファイバコアのより優れた整合 (アライメント) を可能にする。

20

【0040】

幾何学的に同様である、2 つの NANF・HCF サンプルがテストされた。NANF 1 は、4.3 km の長さ、および、その開始部/端で 35.4 / 37.0 μm のコア直径を有し (但し、開始端または近位端は OTDR 機器に結合された)、NANF 2 は、3.4 km の長さ、および、35.3 / 35.8 μm のコア直径を有した。さらに、1 km の SMF が、NANF サンプルの前に挿入されて、SMF および NANF からの後方散乱の視覚的な比較を可能にした。

30

【0041】

図 6 は、従来の OTDR 方式で 1 μs パルスを用いた分散測定を行うためにファイバに沿った距離にわたって分解された、サンプル NANF 1、加えて前述の SMF からの、測定された、検出された後方散乱パワーのグラフを示す。水平軸上に示される距離は、典型的な SMF (1.46) および NANF (1.003) のグループ屈折率を考慮して調整されている (このことは、後の図にも当てはまる)。相対感度 (5.5 ~ 6.0 km で、すなわち、NANF の端を超えて見えるノイズレベル) は -106 dB であった。これは、テスト中にファイバを通じて送られたパルスとパルスとの間の時間を増大する (すなわち、パルス反復レートを低減する) ことによって最大でさらに 4 dB だけ低くされている可能性があるが、これは、それに応じて測定時間を増大させる。代わりに、ここで提示された測定結果全体を通して、パルスとパルスとの間の最小の実現可能時間が使用された (テスト中にファイバを通るパルス往復時間によって制限される)。1 km の挿入された SMF から検出されたはるかにより高い後方散乱が、プロファイルの始まりで見ることができ。しかしながら、NANF からの後方散乱レベルは、はるかにより低い、騒音レベルよりもまだ明らかに高いので、有用に検出可能であり、HCF での OTDR が達成可能であることを示している。(OTDR 機器から遠隔の) NANF 1 サンプルの遠位端からの後方散乱信号が、その開始端または近位端におけるよりも 4.6 dB 低かったことがわ

40

50

かる。このことから、N A N F の減衰が決定され得るが、上記のように、後方散乱はコア半径にともない変動するので、N A N F 1 の遠位端における (1 . 6 μ m だけ) わずかに大きなコア直径を考慮に入れる必要がある。図 5 のデータの考察においてこれまでに言及した - 0 . 3 5 d B / μ m のレートを考慮すると、約 0 . 5 5 d B の後方散乱係数の減少が、ファイバのこの区分において予期される。これにより、ファイバ減衰は (4 . 6 - 0 . 5 5) / 2 = 2 . 0 d B となり、それは、N A N F 1 に対する伝送損失測定結果 2 . 0 d B と一致する。これらの両方の測定結果から、平均 N A N F 1 減衰は 0 . 4 7 d B / k m となる。

【 0 0 4 2 】

図 7 は、O T D R 機器からファイバの中に照射された異なる幅の光パルスに関して、従来の O T D R 方式で分散測定を行うためにファイバに沿った距離にわたって分解された、サンプル N A N F 1、それに加えて前述の S M F から測定された、検出された後方散乱パワーのさらなるグラフを示す。示されるように、1 0 0、3 0 0、および 1 0 0 0 n s (1 μ s) のパルス幅が使用された。パルスが 1 0 倍短いと (したがって、照射光パワーが 1 0 分の 1 に減少すると)、測定されるパワーが 1 0 d B だけ減少することが予期されることは、1 0 0 n s および 1 0 0 0 n s に対するプロファイルと比較することによって明白であり、一方、ノイズレベルは、異なるパルス長に対して不変である。N A N F の開始端、近位端からの後方散乱は、減少するパルス長に対して、それぞれノイズフロアより約 2 0、1 5、および 1 0 d B 高く、これにより、これらの 3 つのパルス持続時間では、0 . 5 d B / k m の減衰で最大 2 0、1 5、および 1 0 k m のファイバが推定される測定範囲となる。1 μ s のパルスでは、上述のように 2 7 d B の最大ダイナミックレンジが予測されたが、それは実験的に達成されるよりも約 7 d B 高い。しかしながら、予測値は、上記で論じたように、パルス反復レートを低減することによって獲得され得る 4 d B を含んでいたが、S M F - N A N F 界面における 0 . 6 d B の帰還損失も、S M F ・ S C F 入力 / 出力ファイバと O T D R 機器との間のコネクタ化界面での推定される 1 ~ 2 d B の帰還損失も考慮に入れていない。したがって、2 0 d B の実際に取得された値は、機器の告知された性能からの期待値と十分一致している。0 . 2 2 d B / k m の損失を有する最新式 N A N F を考慮すると、これは、3 0 0 m の分解能で 4 5 k m のファイバの測定を可能にするはずである。両端から測定すると、これは、最大 9 0 k m のファイバの特質評価を可能にすることになる。より高いパルスパワーで O T D R 機器を用いると、より長いファイバ長が期待され得る。

【 0 0 4 3 】

図 8 は、図 6 からのデータが、パルス長、挿入損失、および機器較正值を含む因子を考慮した長さ正規化された後方散乱値に変換されたグラフを示す。S M F からの後方散乱は - 7 2 d B / m にあり、そのようなソリッドコアファイバの期待値に適合し、一方、N A N F では、後方散乱は - 1 0 2 d B / m にあり、シミュレーションから予期される - 1 0 0 d B / m とほぼ一致することがわかる。

【 0 0 4 4 】

N A N F 1 サンプルで取得されたすべての測定データは、約 0 . 7 d B の振幅で、2 . 7 5 k m と 2 . 9 5 k m との間の小さな隆起部を示す。図 5 に示されるシミュレーションに基づいて、そのポイントにおける後方散乱の上昇は、論じられた 0 . 3 5 d B / μ m のレートを考慮すると、コアサイズが約 2 μ m 小さくなったことによって説明され得る。上記で論じたように、H C F コア半径の後方散乱レベルの従属性を考慮すると、コアサイズを評価、測定、またはモニタするために、O T D R 測定結果が使用され得ることが提案される。これは、ファイバ製作中に実行されてもよく、一貫したコアサイズを保証するためにファイバの線引き中に品質管理のためのモニタリングが実施され、一定の後方散乱レベルを維持するため、したがって、一定のコアサイズを維持するため、または、必要とされるコアサイズ変動を達成するために線引きに対する修正が実行される。そうでなければ、完成したファイバは、コアサイズが測定され、特質評価され得るように、テストされてもよい。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 5 】

図 9 は、N A N F 2 サンプル、加えて前述と同様に先行 1 k m の S M F から測定された距離にわたる、かつ図 8 グラフと同じように正規化された、後方散乱パワーのグラフを示す。N A N F 2 サンプルは、その長さに沿って小さな製造不備を呈した。したがって、空間分解能を増大させるために、かつ、これらの欠陥を測定結果における個別の特徴として分解することができるようにするために、データは、3 0 0 n s の持続時間のより短いパルスを用いて取得された。N A N F 2 サンプルの最初の 4 0 0 m は、N A N F 1 と同様の挙動を示し、後方散乱係数は - 1 0 2 d B / m で N A N F 1 で測定された値と同一である。全往復損失は、9 d B (ファイバの両端における値間の差から決定された)であったが、4 . 5 d B の片道損失を示している。これは、1 . 3 d B / k m の平均 N A N F 2 損失 10
に対応しており、直接的な伝送損失を介して測定された減衰と十分に一致する。長さに沿って、いくつかのピークが特定され得るが、それらのすべては、S M F の後方散乱レベルを十分下回る、したがって、非常に小さい後方散乱事象を表す後方散乱レベルを生成する。

【 0 0 4 6 】

図 1 0 は、異なるパルス長に関して、N A N F 2 から取得された、距離にわたる測定された後方散乱パワーのグラフを示す。これらの測定結果は、空間分解能を増大させるためにパルス持続時間を減少させることによって、局部的な散乱事象をさらに調査するために取得された。1 0 0 n s および 3 0 n s のパルスが用いられたが、それらは、図 9 からの 3 0 0 n s の結果、およびさらに、 μ s パルスを用いた測定結果と一緒に示されている。 20
測定結果は、1 . 5 ~ 2 . 1 k m のファイバに沿った距離の範囲に限定され、その範囲は、図 9 のデータから決定されたように高濃度の欠陥を有する。3 0 n s パルスの場合、- 1 0 m 分離と同等に近接した散乱特徴が分解され得ることがわかる。3 0 n s パルスの場合、信号は、ノイズフロアの測定結果に近接しているが、散乱ピークはノイズフロアよりも十分高く上昇しており、- 1 0 m の精度で、それらの長手方向ロケーションの決定が可能になることに留意されたい。さらに、散乱事象は、はるかに低い 1 μ s パルスの分解能の下でも見えるので、最速かつ最高ダイナミックレンジの測定結果からでも、欠陥、および他の散乱源の特定が可能になる。

【 0 0 4 7 】

N A N F 2 サンプルによって提示された多数の後方散乱事象はすべて、S M F のものを 30
下回る後方散乱レベルを示している。これらの事象のそれぞれの各側における後方散乱レベルから判断して、それらのうちで、有意な減衰を加えるものはないようである。これは、かなりの減衰をファイバに加える、設置中または設置後に引き起こされる製造欠陥または損傷などの任意の散乱ポイントが、測定された O T D R トレースにおいて見えるであろうことを示唆しており、O T D R 測定結果がファイバ特質評価および損失ポイントの特定に有用であり得ることを裏付ける。

【 0 0 4 8 】

全体的に、O T D R が、S M F および他の S C F の特質評価をするために使用されるのと同じように H C F の特質評価のために使用され得、ファイバ上で連続 (分散) データが生成できることが提案されている。実験結果が、N A N F の形態の反共振 H C F に集中して 40
いるが、原理は他の反共振 H C F 設計に、実際、フォトリックバンドギャップ中空コアファイバなどのすべての種類の H C F ファイバに適用可能である。すべての中空コアファイバは、製造から存在する、または計画的に導入される、中空コア内にガス充填を有することができ、O T D R 装置の適正な処理によって、ガラスからの後方散乱の代わりに使用され得る、ガスからの検出可能レベルのレイリー後方散乱を検出できることが示されており、その結果、中空コアファイバは、O T D R を用いて S C F と同等に評価され得る。そのような評価は、さらにこれまでに論じられたようなファイバ特質評価に限定されるものではない。同じ技法が、代替的に、ファイバに作用し、温度または圧力などのガス充填の後方散乱特性を変化させる、外部パラメータを検出するために、ファイバ長に沿った分散感知のために使用されてもよい。同様に、O T D R は、特に、H C F に沿ったガス圧また 50

は濃度の変動を感知するために使用されてもよい。この測定は、ファイバ長に沿った内部ガス圧を分解するために使用され得、多数の感知用途のための有用な診断技法である。

【 0 0 4 9 】

このように、ファイバの中空コアの内部の空気／ガスによって発生した後方散乱信号を利用することで、HCFにおける減衰の特質評価および測定のために市販のOTDR機器を用いることの実現可能性が提案され、立証された。使用される現場配置可能なOTDR機器が市販で入手可能であることを考慮すると、提案された測定手法は、HCFがますます商業的に設置され始めるにつれて広範な使用を見出す可能性がある。技法は、HCFの特質評価のためのSCFに対する従来のOTDRテストの、きわめて有用な長さ分解能情報を活用するための手段を提供する。これは、ケーブル配線され設置されたファイバのテ

10

【 0 0 5 0 】

図11は、本発明の実施形態によるHCFに対してOTDRを実行するための装置の簡略化された概略図を示す。装置は、OTDRシステムまたは装置20を含む。OTDRシステムはOTDR機器21を含み、OTDR機器21は、機器のハウジングから延びる入力／出力光ファイバ22を有する。入力／出力ファイバ22は、ハウジングに恒久的に光結合されてもよく、または、ハウジング上に設けられたファイバカップラ23によって接続可能かつ接続解除可能であってもよい。光結合により、ハウジング内の光源24によって発生した光のパルスを入力／出力ファイバ22内に結合させることができ、後方伝播を介して入力／出力ファイバ22に沿って戻る光、特に、受信光信号を形成する、調査中の光ファイバからの対象となる後方散乱を入力／出力ファイバ22からハウジング内の光検出器29に送達させることができるようになる。光源24は、波長 λ で（場合によっては調整可能であり得る）光パルスが発生させ、そのパルス長は、上記で論じたように、OTDR測定結果の空間分解能を選択するために通常調整可能である。波長 λ は1550nmであってもよく、それは通信のための標準の波長であり、したがって、OTDRのための対象の光ファイバは、しばしば、この波長を伝播するように構成される。しかしながら、他の波長であっても送達可能であり得る。光検出器29は、説明されたように、光ファイバから低パワーレベルのみを生成する弱い光効果のレイリー後方散乱を検出するため、高い感度を有する。重要なことには、検出器感度は、ソリッドコア光ファイバによって生み出されたレイリー後方散乱のレベルの捕捉に十分なように設計され得るが、中空コアファイバの空気またはガス充填コアから取得されたより低いレベルのレイリー後方散乱を対象にした特別にまたは著しく高感度な設計のものである必要はない。換言すると、OTDR機器は、SMFなどのソリッドコアファイバとともに使用されるように設計された標準の市販の在庫製品を含んでもよい。しかしながら、特注機器もまた使用されてもよい。例として、光検出器29は、個々の入射光子を検出または計数することができる光子計数光子検出器を含んでもよい。光検出器29は、通常的方式で受信光信号を示す電気出力信号を発生させ、電気出力信号はプロセッサまたはコントローラ25に提供され、プロセッサまたはコントローラ25は、通常の様式で電気信号を処理し、OTDR出力トレースまたはプロファイル26に変換するように構成されており、検出された光パワーレベルPを、調査されたファイバに沿った距離dの関数として示す。プロファイル26はデータ出力として提供されてもよく、または、例えば、OTDR機器ハウジング上のディスプレイ上に視覚的に示されてもよい。任意のディスプレイ、およびさらにプロセッサ25は、OTDR機器の一部として含まれてもよく、またはシステム上で要素を分離してもよい。

20

30

40

【 0 0 5 1 】

しかしながら、全体的に、本発明は、OTDR機器の実装形態に詳細に関わるものではなく、OTDR機器は、いずれかの知られている方式で、ソリッドコア光ファイバからOTDR測定結果を取得するように構成された「ブラックボックス」と考えられ得る。

【 0 0 5 2 】

入力／出力ファイバ22は、OTDR機器21に結合された近位端から遠隔の遠位端2

50

2 aを有する。この遠位端 2 2 aは、O T D Rを介した調査または分析を必要とする、入力／出力ファイバ 2 2からの光パルスの、中空コアファイバ 3 0の近位端 3 0 aへの低反射結合を実現するために、本発明の実施形態に従って処理または構成されている。遠位端 2 2 aの処理は、さらに下記で論じられる様々な構成を含んでもよい。したがって、図 1 1では、遠位端 2 2 aに施される処理は、単にボックス 2 6によって示される。さらに、必要である場合、処理はさらに、入力／出力ファイバ 2 2と中空コアファイバ 3 0との間の低光損失結合を可能にするように構成されてもよい。O T D R測定を遂行するため、入力／出力ファイバ 2 2および中空コアファイバ 3 0は、一方のコアからもう一方のコアへの最大または高い光パワー伝送をできるようにするため、互いに非恒久的に整合（アライメント）される。これは、ファイバ端 2 2 a、3 0 aの相対的な空間調整を可能にするように構成された整合（アライメント）装置 2 8によって可能になり得、その結果、ファイバ端 2 2 a、3 0 aは、互いに相対的に適正に位置付けられ得る。これはさらに下記で論じられる。代替的に、入力／出力ファイバ 2 2および中空コアファイバ 3 0は、一方のコアからもう一方のコアへの最大または高い光パワー伝送を可能にするため、互いに恒久的に整合（アライメント）されてもよく、中空コアファイバ 3 0は、テストするように所望される中空コアファイバのさらなる長さ恒久的にまたは非恒久的に光接続されてもよい。O T D R測定が実行された後、中空コアファイバ 3 0は入力／出力ファイバ 2 2から結合解除されてもよく、O T D Rシステムは、取り外されて、どこか他で利用されてもよい。

10

【 0 0 5 3 】

20

入力／出力ファイバ 2 2は、ソリッドコア光ファイバの長さまたは一部分であり、通常は、単一モードの光ファイバであるが、これは必須ではない。さらに、同じまたは異なるタイプのソリッドコア光ファイバの 1つまたは複数のさらなる長さが、入力／出力ファイバ 2 2がO T D R機器と一緒に製造者によって提供され得るときに、入力／出力ファイバ 2 2の遠位端にスプライス接続または結合されてもよい。これは、例えば、入力／出力ファイバの長さを増大させるため、または何らかの光効果を提供するために行われてもよい。本開示によると、いかなるそのような追加も入力／出力光ファイバ 2 2の一部と考えられ、遠位端 2 2 aの処理は、入力／出力ファイバに追加されたファイバの任意のさらなる部分の端の処理である。換言すると、処理は、中空コアファイバに結合されたソリッドコアファイバ端ファセットに関係し、ソリッドコアファイバ端ファセットは、2つのファイバタイプ間の空気／ガラス境界のガラス部を提供する。

30

【 0 0 5 4 】

図 1 2は、長手方向断面として示された、第 1の例による遠位端処理を含むソリッドコア入力／出力ファイバの簡略図を示している。入力／出力ファイバ 2 2は、知られている方式でソリッドガラスクラッド 3 4によって取り囲まれたソリッドガラスコア 3 2を含む。遠位端 2 2は、ある角度で劈開された端ファセットまたは端面 3 3を有することによって処理され、その結果ファセット 3 3の面はファイバ 2 2の長軸に対して垂直ではない。劈開されたファセット 3 3は、垂直面に対して角度 θ をなしている。角度付き劈開ファセット 3 3は、反射光が、伝播してO T D R検出器に戻れないように、ファイバ 2 2の長軸から離れるようにその反射光を方向付けることによって、遠位端 2 2 aを離れる光が受ける、ガラス／空気境界での 4 %後方反射を低減または除去するように働く。これを達成するために必要とされる角度 θ は、光パルスの波長、および、コア 3 2と、コア - クラッド境界での全内部反射を可能にすることによって光誘導に対応するクラッド 3 4との間の屈折率差に依存することになる。ファセット 3 3からの反射光は、全内部反射には対応するようにならない角度で、後方にクラッド 3 4に向けて方向付けられる必要がある。典型的には、小さな角度で十分であり、例えば、 $1^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 、または $2^{\circ} \sim 8^{\circ}$ もしくは $2^{\circ} \sim 6^{\circ}$ の範囲内にあり、この範囲は、入力／出力ファイバ遠位端ファセットからの後方反射を抑制または除去するために、現在の状況では潜在的に有用であると考えられる。しかしながら、より小さいまたはより大きい角度が適宜使用されてもよい。

40

【 0 0 5 5 】

50

図 1 3 は、長手方向断面として示された、第 2 の例による遠位端処理を含むソリッドコア入力 / 出力ファイバの簡略図を示している。前述のように、入力 / 出力ファイバ 2 2 は、知られている方式でソリッドガラスクラッド 3 4 によって取り囲まれたソリッドガラスコア 3 2 を含む。この例では、ファイバ 2 2 の遠位端ファセット 3 3 におけるガラス対空気境界からの後方反射は、端ファセット 3 3 の表面上に施される反射防止コーティング 3 5 によって低減される。反射防止コーティングは、典型的には、スタック状に配置された複数の光学的に薄い層を含み、破壊的干渉を生じる、したがって、反射光からパワーを除去する複数の反射面を実現する。光学的に薄い層は、特定の波長または波長範囲での、例えば、通信用ソリッドコアファイバのテストを意図した O T D R 機器において、光パルス向けに使用され得る 1 5 5 0 n m または 1 6 2 5 n m の動作のために構成される。後者の波長は、テストを、従来の通信波長の 1 5 5 0 n m でファイバ内のライブデータ伝送と同時に遂行させることを可能にする O T D R 機器の特徴であり得る。上記で報告された実験において、四層反射防止コーティングが使用されたが（参照文献 [1 0] ）、さらに多いまたはさらに少ない層が使用されてもよい。

10

【 0 0 5 6 】

低反射動作を達成するために施され得るソリッドコア入力 / 出力ファイバ向けの遠位端処理の第 3 の例は、反射防止微細構造 / ナノ構造面（参照文献 [1 1] ）である。角度付き劈開を含むまたは含まない、ファイバの端ファセットは、深さおよびプロファイルを変動させ、深さが幅よりも大きく、サブ波長寸法を有する、ランダムに分散した表面特徴またはピラーを含むざらつきのある構造を作成するように処理される。特徴は、入射光の反射を抑制するように働く。このタイプの反射防止微細構造面は、「蛾眼」面と称され得る。

20

【 0 0 5 7 】

中空コアファイバに結合されるとき、低いまたは低減された反射界面を実現するために、角度付き劈開もしくは反射防止コーティングまたは微細構造面のいずれかが、低いまたは低減された後方反射能力を有する入力 / 出力ファイバを実現するために使用されてもよい。他の例では、これらの処理の組合せが使用されてもよい。角度付き端ファセットは、反射防止コーティングが自身に施される、または、反射防止微細構造面が自身の上に形成されてもよい（図示されず）。

【 0 0 5 8 】

入力 / 出力ファイバの遠位端は、ソリッドコアファイバから中空コアファイバへの光結合を改善し、それによって低い結合損失を実現するために、さらに処理されてもよい。典型的には、O T D R 機器の入力 / 出力ファイバとして提供または使用される単一モードファイバなどのソリッドコアファイバは、対応する伝播光学モードの光学モードフィールドサイズまたは直径が、通信用光ファイバなどの、O T D R 機器とともにテストされる可能性が高いソリッドコアファイバタイプのもものと合致するように構成されることとなる。他方、中空コアファイバは、典型的には、より大きなモードフィールド直径を有し、1 5 5 0 n m などの同じ波長を伝播するために、より大きなコアサイズが必要となる。したがって、入力 / 出力ファイバと中空コアファイバとの間のモードフィールド直径には不一致があり得、2 つが一体に結合されたとき、伝送される光パワーの損失につながり得る。これに対処するため、モードフィールドアダプタの使用による低損失結合を実現することが提案される。

30

40

【 0 0 5 9 】

図 1 4 は、長手方向断面として示された、第 3 の例による遠位端処理を含むソリッドコア入力 / 出力ファイバの簡略図を示している。前述のように、入力 / 出力ファイバ 2 2 は、知られている方式でソリッドガラスクラッド 3 4 によって取り囲まれたソリッドガラスコア 3 2 を含む。この例では、ファイバ 2 2 の遠位端 2 2 a の処理は、ファイバ 2 2 の端ファセットにスプライス接続されるか、または別様に光接合される、モードフィールドアダプタ 3 6 の追加を含む。モードフィールドアダプタ 3 6 は、ファイバ 2 2 から受信する光のモードフィールド直径を、O T D R 機器を用いてテストされる中空コアファイバの予

50

想光伝播モードのモードフィールド直径に拡大するように働く。モードフィールドアダプタ36は、入力/出力ファイバ22の遠位端に接合される近位端と、拡大されたモードフィールドを送出する遠位端とを有する。遠位端での端ファセット37は、OTDRを実行するために、中空コアファイバに結合され、ソリッドコアと中空コアとの間のガラス対空気界面を画定する。したがって、モードフィールドアダプタ36は、入力/出力ファイバ32に追加されるファイバの一部分と考えられることができ、上述のように、その一部を形成するので、低反射処理が、モードフィールドアダプタの端ファセット37に施される。他の例においては、モードフィールドアダプタ36は、ファイバの別個の部分を含むのではなく、入力/出力ファイバ22の端部から直接形成されてもよい。上記で論じたように、低反射処理は、角度付きファセットおよび反射防止コーティング（いずれも図14に示されていない）の一方または両方を含んでもよい。モードフィールドアダプタ36は、任意の使いやすい形態をとってもよい。図14は、モードフィールドアダプタ36を、近位端から遠位端まで直径が拡張するテーパ付きコアを有するソリッドコアファイバの短い部分として示しているが、他の構成が、屈折率分布型光ファイバ、屈折率分布型光ファイバに加えて大きなモード領域のソリッドコアファイバ、および、熱膨張によって拡大されたコアを含むソリッドコアファイバなどのモードフィールド拡大を達成するために使用されてもよい。ソリッドコアファイバと中空コアファイバとの間の低損失光結合を達成するのに適した、したがって、現在の状況における使用にふさわしい、モードフィールドアダプタのさらなる詳細が、WO2020/070487（参照文献[12]）において見出され得る。

10

20

【0060】

モードフィールドアダプタの目的は、ソリッドコア入力/出力ファイバから中空コアファイバへの低損失光結合を実施して、できるだけ多くのパルスパワーを中空コアファイバ内に照射し、中空コアファイバからソリッドコアファイバに戻して、OTDR機器による検出のためにできるだけ多くの後方散乱パワーを維持することである。低損失結合は、低損失結合がない場合に生じるであろう光パワー損失の量と比較して、ファイバ間の結合損失を低減するように動作する任意の構成体として理解されてもよい。好ましい場合、モードフィールドアダプタ以外の構成が使用されてもよい。達成可能な最小量の損失の実現が望ましくかつ有用であるが、この界面におけるいくつかの損失は許容され得、または不可避であり得る。したがって、低損失結合の目的は、中空コアファイバへの伝播のためにOTDR機器から出力される光パルスのパワーの少なくとも90%を伝送もしくは維持すること、または損失がそのパワーの最大でも約0.5dBであることである。

30

【0061】

しかしながら、場合によっては、モードフィールドアダプタまたは他の低損失結合手段は省略されてもよい。例えば、モードフィールド直径の不一致は、ソリッドコアから中空コア界面全体にわたる許容できないパワー損失レベルを引き起こすには、不十分であり得る。ソリッドコア入力/出力ファイバは、中空コアファイバのモードフィールド直径に合致またはほぼ合致することを特に意図する大きなモード領域ファイバとして構成されてもよい。

【0062】

図15は、ソリッドコアのコアと中空コアファイバのコアとの間の光整合（アライメント）を可能にするための整合（アライメント）装置の例の簡略された概略平面図描写を示している。この例では、整合（アライメント）装置28は、5つの調整軸をととも有する一対の整合（アライメント）ステージを含む。第1のステージ36aは、その上に装着された入力/出力ファイバ22の遠位端を有し、第2のステージ36bは、その上に装着された中空コアファイバ30の近位端を有する。2つのステージ36a、36bは、物理的に別個の物品であってもよく、代替的に、共通支持体上に保持されるなどの単一ユニットとして構成されてもよい。このようにして、入力/出力ファイバ22は、そのステージ36a上に装着されて保持されてもよく、第2のステージ36bは、調査または分析のために中空コアファイバ30を受け入れる準備が整った、OTDRシステムの一体部として利

40

50

用可能である。5つの調整軸を有する1つの整合（アライメント）ステージまたは複数の整合（アライメント）ステージは、5つの移動度を提供する。これらのうちの3つは、直交方向であり、1つは、ファイバの端部の長軸に対応するファイバの光軸に平行であり、平面内の2つの方向は光軸に直交する。第4の移動度はピッチであり、光軸に直交する平面内で水平軸の周りに光軸方向を傾動させることができるようにする。第5の方向はヨーであり、光軸に直交する平面内で縦軸の周りにファイバを回転させることができるようにする。この調整能力の範囲および量により、コア間の高い光伝送のためにファイバ端を整合（アライメント）させ、ファイバ間の低損失結合の達成を助けることができるようになる。これは、ガラス-空気界面における屈折により、光軸に対する角度でファイバ22から光パルスを放射させるので、入力/出力ファイバ22が角度付き端ファセットを有する場合、特に重要である。ファイバ端同士は、直接当接され、互いに接触して配置されてもよく、またはいくらか間隔を空けて配置されてもよく、やはり、これは、真の当接がより扱いにくい場合に、角度付き端ファセットにとって重要である。

10

【0063】

ファイバ間の光結合を最大化するため、ファイバ端の整合（アライメント）を達成するための他の構成体が代替的に使用されてもよい。

【0064】

前述のように、OTDR機器は、OTDRプロファイルの空間分解能が選択されるために、典型的には、調整可能なパルス持続時間を有する。より長いパルスは低減された分解能に対応するが、より短いパルスはより高い分解能を与える。現在の状況では、パルスあたりのパワーがより高くなり、それに応じて検出されるべき後方散乱の量が多くなり、信号対雑音比がより大きくなるため、より長いパルス長が好まれてもよく、または実際必要とされてもよい。実験結果によって示されるように、より長いパルスでも、有用な分解能を与えることができ、より短いパルスでも、ノイズフロアとはより識別しにくくなるが、検出可能な量の後方散乱を提供することができる。したがって、中空コアファイバに対するOTDRに特に有用なパルス持続時間の範囲は、30 nsから1000 nsであることが提案される。しかしながら、より短いまたはより長いパルスは排除されない。

20

【0065】

上記で論じられた実験結果は、45 kmの長さおよび0.22 dB/kmの減衰を有する中空コアファイバが、記述されたOTDR方法を用いて有用に分析されることができると予期されることを示している。パルスを中空コアファイバの両端内に照射することによって、90 kmの全ファイバ長が観測され得る。しかしながら、より低損失の中空コアファイバを用いて、増大されたパルスパワー、最適化された低反射、および低い結合管理によって、より大きな後方散乱パワーが達成される場合があり、それは、システムのノイズフロアまで減衰される前にさらに伝播され得る。したがって、方法は、両端から調査される場合、最大で少なくとも200 kmまたは400 kmの中空コアファイバ長に適用可能であると考えられる。

30

【0066】

図16は、本発明の態様による、中空コア光ファイバを評価、分析、テスト、または測定するための例示の方法におけるステップのフローチャートを示す。第1のステップS1は、低減された後方反射、および、任意選択で、低減された結合損失のための入力/出力ファイバの端ファセットにおける処理を含む光時間領域反射測定システムを提供することを含む。これは、例えば、波長 λ を有する光パルスを発生させるように構成された光源と、波長 λ の光を検出するように構成された光検出器と、光源からの光パルスを受信して光を光検出器に送達するために近位端で光結合されたソリッドコア光ファイバを含み、その遠位端に処理が施された端ファセットを有する入力/出力ファイバであって、当該端ファセットが、ソリッドコア光ファイバのコアを形成するガラスと端ファセットにおける空気との界面で引き起こされる波長 λ の光の後方反射を抑制するように構成された、入力/出力ファイバとを備える学的時間領域反射光測定システムを提供することを含むことができる。

40

50

【 0 0 6 7 】

第2のステップS2では、方法は、入力／出力ファイバと中空コア内に存在するガスを有する中空コア光ファイバとの間の光伝送のために、入力／出力ファイバの遠位端と、中空コア光ファイバの近位端とを整合（アライメント）させることなどによって、入力／出力ファイバを、ガス充填コアを有する中空コア光ファイバと整合（アライメント）させることに進む。

【 0 0 6 8 】

方法の第3のステップS3は、光パルスを中空コアファイバの中に照射し、コア内のガスからの後方散乱を検出することを含む。これは、例えば、入力／出力ファイバに沿った中空コアファイバの中への伝播のために、光パルスを発生させるように光源を動作させ、中空コアファイバの中空コア内のガスから光パルスのレイリー散乱によって生成された後方散乱光を受信し、検出信号を発生させるために光検出器を用いて後方散乱光を検出することによって達成され得る。

10

【 0 0 6 9 】

最後に、方法はステップS4で終わり、ステップS4は、検出された後方散乱を処理して光時間領域反射測定プロファイルを提供することを含む。これは、中空コア光ファイバの長さに沿った後方散乱光パワーの分布を含む光時間領域反射測定プロファイルを作成するために、検出信号を処理することを含んでもよい。他の例では、方法はさらに、その減衰を決定すること、欠陥もしくは損傷から生じるような、プロファイル内のピークを特定すること、またはコアサイズに関する情報を決定することなど、ファイバに関するさらなる情報を決定するためにプロファイルを用いたステップを含んでもよい。方法は、通信ネットワークにおけるファイバを含む、任意の中空コア光ファイバタイプに適用されてもよく、方法は、設置中に、もしくは、設置後の保守のために、または、製作中のファイバに対する、ファイバ特質評価のモニタリングのためおよび品質管理のための欠陥同定のために、ファイバを評価することができる。中空コアファイバは、光感知のためのガス充填セルであってもよく、方法は、後方散乱光パワーに影響をおよぼす、したがって、モニタされ、測定され、または、後方散乱の量から特定され得る、対象のパラメータを分析することを含む。

20

【 0 0 7 0 】

任意のガスは、必要とされるレイリー後方散乱を生成することができるので、中空コアファイバの空隙内で、とりわけコア内で使用されてもよい。ガスは、ファイバの製作中または製作後にコアに入ってもよい大気中空気を含む空気を含んでもよい。代替的に、特定のガスまたはガス混合物もしくは組成物が、感知目的で中空コアファイバガスセルを提供するなどのために、ファイバに導入されてもよい。アルゴンが、通常、ガスセルに対する充填物として使用されるが、他のガスは排除されない。要約すれば、中空コアファイバは、単に、非真空コアを有する。

30

【 0 0 7 1 】

本明細書に記述された様々な実施形態は、特許請求された特徴の理解および教示を支援するためだけに提示されている。これらの実施形態は、実施形態の単なる代表的なサンプルとして提供されており、網羅的かつ／または排他的ではない。本明細書に記述された利点、実施形態、例、機能、特徴、構造、および／または他の態様は、特許請求の範囲によって規定された本発明の範囲に対する限定、または特許請求の範囲の均等物に対する限定と考えられるべきではなく、他の実施形態が利用されてもよく、特許請求された発明の範囲から逸脱することなく、変更がなされてもよいことを理解されたい。本発明の様々な実施形態は、本明細書に具体的に記述されたもの以外の開示された要素、構成要素、特徴、部品、ステップ、手段などの適正な組合せを適切に備える、それらからなる、または本質的にそれらからなってもよい。加えて、本開示は、現在特許請求されていないが将来的に特許請求され得る他の発明を含んでもよい。

40

【 0 0 7 2 】

参考文献

50

[1] G.T. Jasion et al, "Hollow core NANF with 0.28 dB/km attenuation in the C and L bands, paper Th4B.4, 2020 Optical Fiber Communications Conference, March 2020

[2] S.R. Sandoghchi et al, "Optical side scattering radiometry for high resolution, wide dynamic range longitudinal assessment of optical fibres", Opt. Express, vol. 23, 27960-27974, 2015

[3] 米国特許第 10,845,268 号

[4] 米国特許第 9,904,008 号

[5] WO 2015/185761

10

[6] F. Poletti, "Nested antiresonant nodeless hollow core fiber," Opt. Express, vol. 22, 23807-23828, 2014

[7] H. Sakr et al, "Hollow core NANFs with five nested tubes and record low loss at 850, 1060, 1300 and 1625 nm," in 2021 Optical Fiber Communications Conference (OFC2021), paper F3A.4, 2021

[8] V. Michaud-Belleau et al, "Backscattering in antiresonant hollow-core fibers: over 40 dB lower than in standard optical fibers," Optica, vol. 8, no 2, pp. 216-219, Feb 2021

[9] E. Numkam Fokoua, "Theoretical analysis of backscattering in hollow-core antiresonant fibers," APL Photonics, vol. 6, 096106, Sept. 2021

20

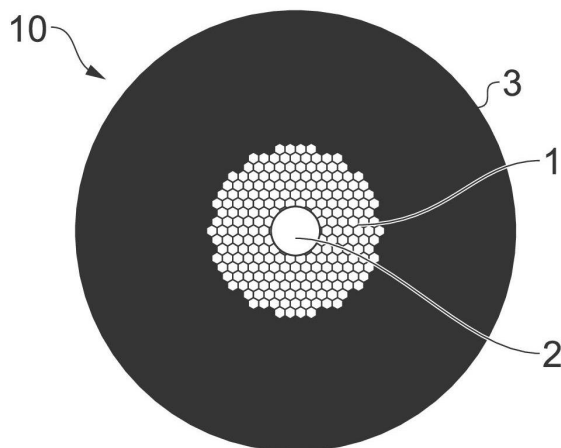
[10] D. Suslov et al, "Angled interconnection between standard single-mode fiber and nested nodeless antiresonant fibers", paper Stu1Q.5, 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics, May 2021

[11] 米国特許第 8,187,481 号

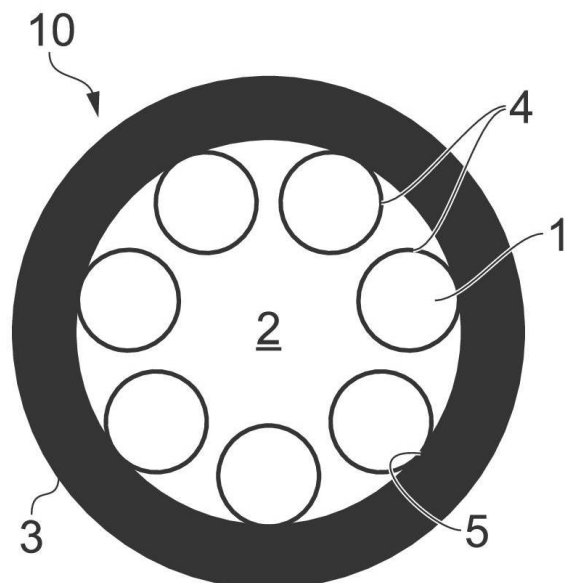
[12] WO 2020/070487

【図面】

【図 1】



【図 2】

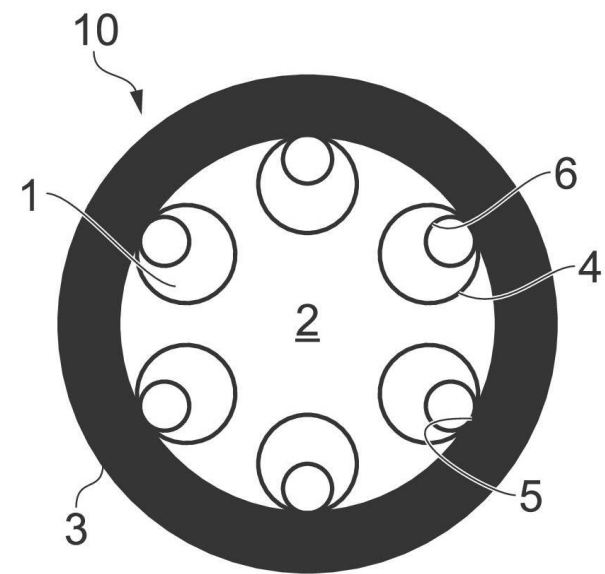


30

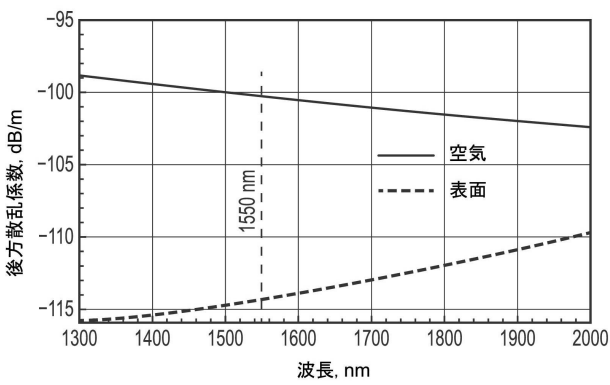
40

50

【図 3】

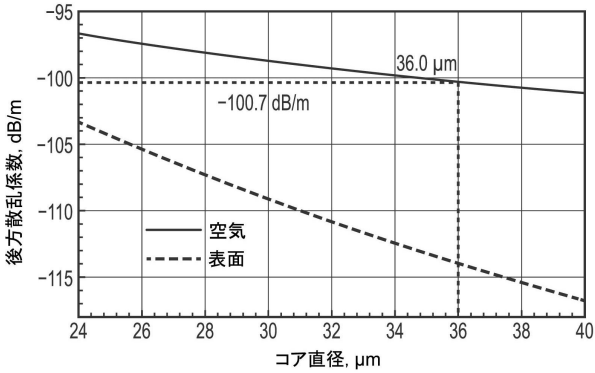


【図 4】

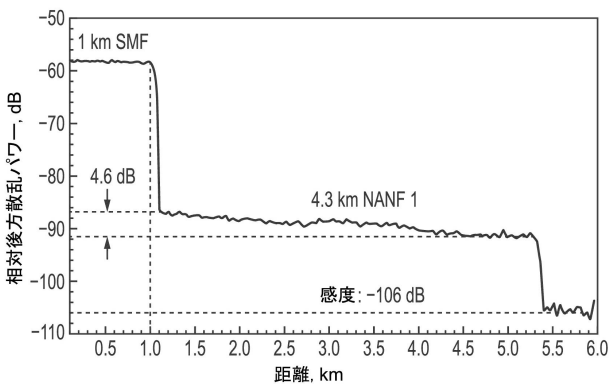


10

【図 5】



【図 6】



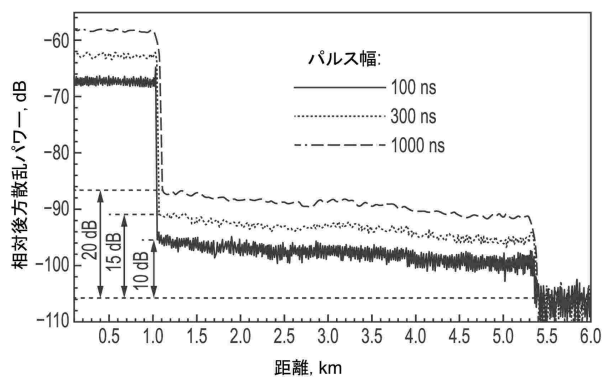
20

30

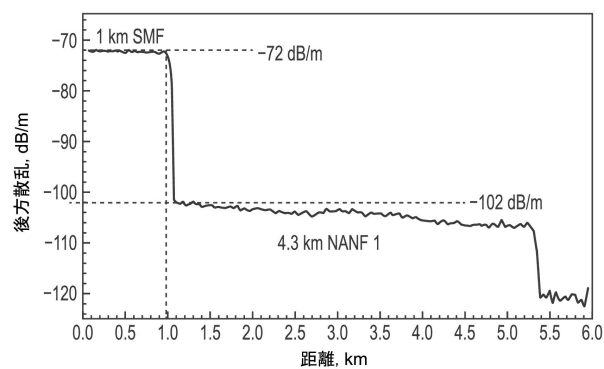
40

50

【圖 7】

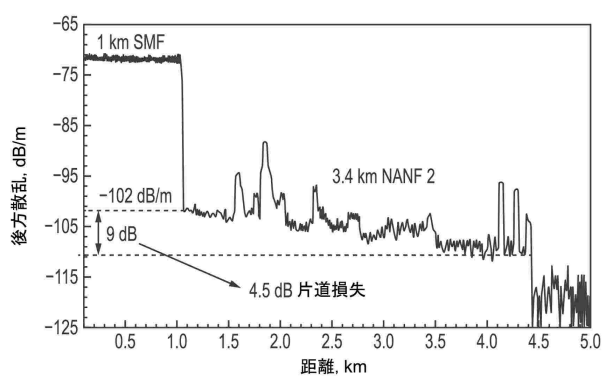


【 図 8 】

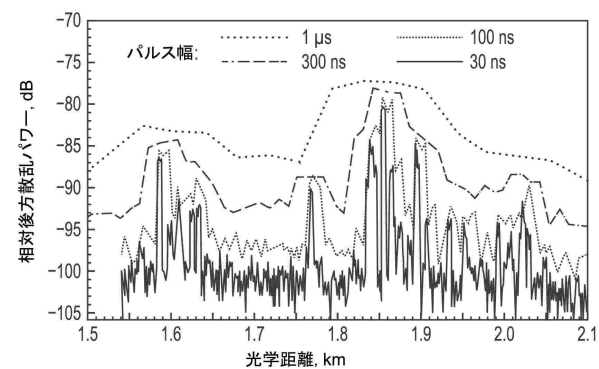


10

【 図 9 】

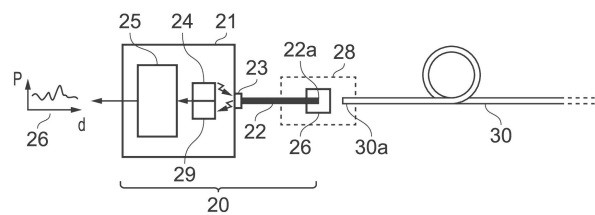


【 図 1 0 】

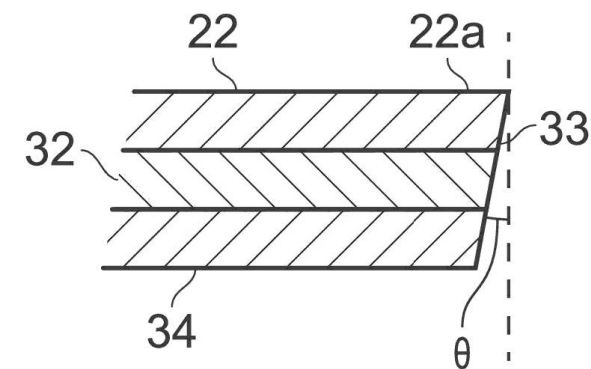


20

【 図 1 1 】



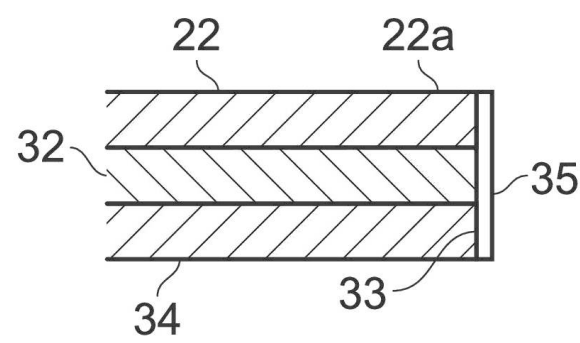
【 図 1 2 】



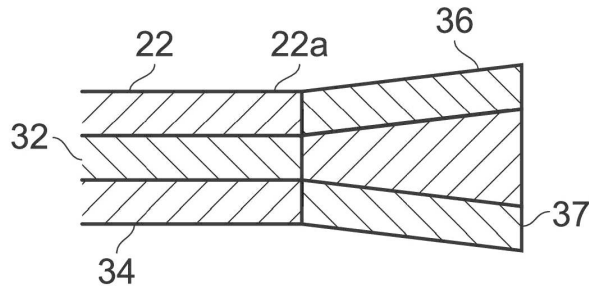
30

40

【図 1 3】

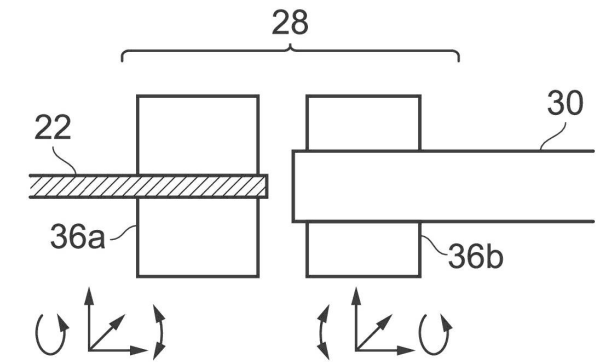


【図 1 4】

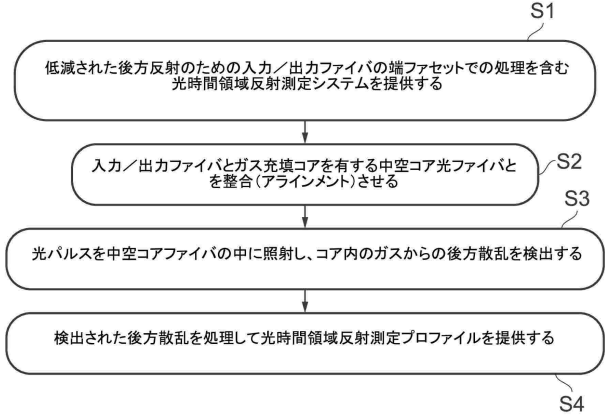


10

【図 1 5】



【図 1 6】



20

30

40

50

【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/GB2023/050231

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. G01M11/00
ADD.

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)
G01M

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 practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 02/063350 A2 (OMNIGUIDE COMM [US]; SHURGALIN MAX [US] ET AL.) 15 August 2002 (2002-08-15) page 7, paragraph 2 - page 8, paragraph 1; claim 1; figure 1 page 8, paragraph 4 - page 9, paragraph 1 page 11, paragraph 2 page 15, paragraph 2-3 page 17, paragraph 3 - page 18, paragraph 1 -----	1-23
Y	WO 2009/049393 A1 (GALLE MICHAEL [CA]; MOHAMMED WALEED [CA]; QIAN LI [CA]) 23 April 2009 (2009-04-23) claim 12 page 16, last paragraph - page 17, paragraph 1 -----	1-23

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

29 March 2023

Date of mailing of the international search report

06/04/2023

Name and mailing address of the ISA/
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Cilissen, Marcel

INTERNATIONAL SEARCH REPORT						International application No PCT/GB2023/050231	
Information on patent family members							
Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)			Publication date	
WO 02063350	A2	15-08-2002	AU	2002240314	A1	19-08-2002	
			US	2003030786	A1	13-02-2003	
			WO	02063350	A2	15-08-2002	

WO 2009049393	A1	23-04-2009	AU	2007360414	A1	23-04-2009	
			CA	2709779	A1	23-04-2009	
			EP	2201348	A1	30-06-2010	
			JP	2011501137	A	06-01-2011	
			US	2010296102	A1	25-11-2010	
			WO	2009049393	A1	23-04-2009	

フロントページの続き

,MC,ME,MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,NE,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,CV,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IQ,IR,IS,IT,JM,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,MG,MK,MN,MW,MX,MY,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,ST,SV,SY,TH,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,WS,ZA,ZM,ZW

(72)発明者 スラビク, ラダン

イギリス国ハンプシャー エスオー 17 1 ビージェイ, サザンプトン, ユニバーシティ・ロード, ハイフィールド・キャンパス, ビルディング 28, ルーム 2045, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン リサーチ・アンド・イノベーション・サービス

(72)発明者 リチャードソン, デビッド・ジョン

イギリス国ハンプシャー エスオー 17 1 ビージェイ, サザンプトン, ユニバーシティ・ロード, ハイフィールド・キャンパス, ビルディング 28, ルーム 2045, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン リサーチ・アンド・イノベーション・サービス

(72)発明者 ボレッティ, フランチェスコ

イギリス国ハンプシャー エスオー 17 1 ビージェイ, サザンプトン, ユニバーシティ・ロード, ハイフィールド・キャンパス, ビルディング 28, ルーム 2045, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン リサーチ・アンド・イノベーション・サービス

(72)発明者 ブラッドリー, トーマス・デビッド

イギリス国ハンプシャー エスオー 17 1 ビージェイ, サザンプトン, ユニバーシティ・ロード, ハイフィールド・キャンパス, ビルディング 28, ルーム 2045, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン リサーチ・アンド・イノベーション・サービス

(72)発明者 タランタ, オースティン

イギリス国ハンプシャー エスオー 17 1 ビージェイ, サザンプトン, ユニバーシティ・ロード, ハイフィールド・キャンパス, ビルディング 28, ルーム 2045, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン リサーチ・アンド・イノベーション・サービス

(72)発明者 ヌムカム・フォコウア, エリック

イギリス国ハンプシャー エスオー 17 1 ビージェイ, サザンプトン, ユニバーシティ・ロード, ハイフィールド・キャンパス, ビルディング 28, ルーム 2045, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン, ユニバーシティ・オブ・サザンプトン リサーチ・アンド・イノベーション・サービス

F ターム (参考) 2G086 CC02 CC05

2H250 AB02 AC51 AC53 AF04 AF23 AF28 AF53 AH14

【要約の続き】

ア内のガスから光パルスのレイリー散乱によって生成された後方散乱光を受信し、検出信号を発生させるために光検出器を用いて後方散乱光を検出するステップと、中空コア光ファイバの長さに沿った後方散乱光パワーの分布を含む光時間領域反射測定プロファイルを作成するために、検出信号を処理するステップとを含む。