

【公報種別】特許法第17条の2の規定による補正の掲載

【部門区分】第1部門第1区分

【発行日】平成24年9月6日(2012.9.6)

【公表番号】特表2011-528904(P2011-528904A)

【公表日】平成23年12月1日(2011.12.1)

【年通号数】公開・登録公報2011-048

【出願番号】特願2011-520037(P2011-520037)

【国際特許分類】

C 12 M 1/00 (2006.01)

A 01 G 7/00 (2006.01)

【F I】

C 12 M 1/00 C

A 01 G 7/00 601A

【手続補正書】

【提出日】平成24年7月20日(2012.7.20)

【手続補正1】

【補正対象書類名】特許請求の範囲

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【特許請求の範囲】

【請求項1】

生物学的材料を収容するように構成された内部を有する生物学的チャンバを有する生物学的成長システムのための照明系であって、

前記生物学的材料にとって感受性の波長を有する光を発生する光源と、

中心軸、外表面、および前記光源に光学的に結合した末端を有する、少なくとも1つのナノ構造光ファイバと、

を備え、

ある長さを有し、その長さにわたって実質的に均一な放射線を放射する光源ファイバ部分を形成するため、導光を前記中心軸から前記外表面を通じて外に散乱するように、前記ファイバが、その中に形成された複数の曲げを有するように構成される、
照明系。

【請求項2】

前記少なくとも1つのナノ構造光ファイバが、支持構造物の周りに逆巻きされることを特徴とする請求項1記載の照明系。

【請求項3】

前記複数の曲げがレイリー散乱を誘起することを特徴とする請求項1記載の照明系。

【請求項4】

前記実質的に均一な放射が、前記光源ファイバ部分にわたり、±10%以内で変化することを特徴とする請求項1記載の照明系。

【請求項5】

第1の末端において前記少なくとも1つのナノ構造光ファイバと光学的に結合し、第2の末端において前記光源と光学的に結合した、少なくとも1つの光ファイバセクションをさらに備えることを特徴とする請求項1記載の照明系。

【請求項6】

(i) 前記光ファイバ外表面上に配置された親水性コーティング；および／または

(ii) 前記光ファイバ外表面上に配置された蛍光および／または紫外線-吸収分子をさらに含むことを特徴とする請求項1記載の照明系。

【請求項 7】

生物学的材料を収容するように構成された内部を有する生物学的チャンバと、前記生物学的材料にとって感受性の波長を有する光を発生する光源と、中心軸、外表面、および前記光源と光学的に結合した末端を有する、少なくとも1つのナノ構造光ファイバと、を備えた生物学的成長システムであって、ある長さを有し、その長さにわたって実質的に均一な放射線を放射する光源ファイバ部分を形成するため、導光を前記中心軸から前記外表面を通じて外に散乱するように、前記ファイバが、その中に形成された複数の曲げを有するように構成された、生物学的成長システム。

【請求項 8】

前記少なくとも1つのナノ構造ファイバが、支持構造物によって支持されることを特徴とする請求項7記載の生物学的成長システム。

【請求項 9】

前記実質的に均一な放射線が、前記光源ファイバ部分にわたり、均一性において±10%以内で変化するように、前記少なくとも1つのナノ構造ファイバが、前記支持構造物の周りに1回以上逆巻きされることを特徴とする請求項7記載の生物学的成長システム。

【請求項 10】

複数のナノ構造光ファイバが、前記支持構造物の周りに、前記支持構造物に沿って順巻きされ、

各光ファイバが、前記光源または1つ以上の光源に光学的に結合されることを特徴とする請求項7記載の生物学的成長システム。

【請求項 11】

生物学的材料を支持するように構成された内部を有する生物学的チャンバに、実質的に均一な照明を提供する方法であって、

中心軸および外表面を有する少なくとも1つのナノ構造光ファイバにおいて、

前記少なくとも1つのファイバにおけるレイリー散乱が実質的に増大するように構成された複数の曲げを形成し、ここで、前記複数の曲げが前記少なくとも1つのファイバの光源ファイバ部分を形成し、

前記生物学的チャンバ内部に前記光源ファイバ部分を配置し、

前記少なくとも1つのファイバ内に光を入射し、前記光の一部を前記中心軸から前記外表面を通じて外にレイリー散乱させ、それによって前記光源ファイバ部分から実質的に均一な放射線を放出させ、ここで、前記実質的に均一な放射線が、前記生物学的材料にとって感受性の波長を含む、

各工程を有してなる、方法。

【請求項 12】

前記実質的に均一な放射線が、前記光源ファイバ部分にわたり、均一性において±10%以内で変化するように、前記少なくとも1つのファイバを1回以上、逆巻きすることを特徴とする請求項11記載の方法。

【請求項 13】

前記生物学的チャンバ内部が表面形状を有し、前記表面形状に対応するように前記光源ファイバ部分を形成することを特徴とする請求項12記載の方法。

【請求項 14】

前記ファイバ外表面上に層を提供する工程をさらに含み、前記層が前記放射光を修正するように構成されることを特徴とする請求項13記載の方法。

【請求項 15】

前記層が、蛍光および/または紫外線-吸収分子を含むことを特徴とする請求項14記載の方法。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】全文

【補正方法】変更

【補正の内容】

【発明の詳細な説明】

【発明の名称】生物学的用途のためのナノ構造光ファイバ照明系および方法

【関連出願の相互参照】

【0001】

本願は、参照することによりその内容全体が信頼され、本明細書に取り込まれる、2008年7月25日出願の米国仮特許出願第61/137,009号の利益および優先権を主張する。

【技術分野】

【0002】

本発明は、一般に、ナノ構造光ファイバに関し、特に、ナノ構造ファイバを生物学的用途に利用する照明系および方法に関する。

【背景技術】

【0003】

光ファイバは、光源から遠隔地へと光を伝達することが必要なさまざまな用途に用いられる。例えば、光学電気通信系は、例えば、いわゆる「ファイバ・トウ・ザ・X」または「FTTX」システムで、光ファイバのネットワークを頼りに本社からシステムの末端利用者へと光を伝達する。ここで、「X」はファイバの最終地点を表す（例えば、「ホーム」の「H」、「縁石（curb）」の「C」など）。

【0004】

電気通信光ファイバは、吸収および散乱に起因して、比較的低レベルの減衰のみが存在する、800nm～1675nmの範囲の近赤外線の波長で動作するように設計される。これにより、ほとんどの光が、ファイバの一端に入力されてファイバの反対端から出力できるようになるとともに、わずかな量のみがファイバの側面を通じて周辺に出射されるようになる。

【0005】

最近になって、従来のファイバよりも曲げに対する感受性が低い光ファイバの必要性が高まってきている。これは、光ファイバが強い曲げを有することを要件とする構成で配置される電気通信システムがますます増えているためである。この必要性により、コア領域を取り囲む、非周期的に配置された、環状の小さい間隙を利用した、いわゆる「ナノ構造」の光ファイバが開発された。送気環体は、曲げに対する非感受性を増大させる役割をする。すなわち、ファイバは、そこを通過する光信号の減衰における著しい変化を被ることなく、より小さい曲げ半径を有することができる。

【0006】

光ファイバは、典型的には、一方の端からもう一方の端へ長距離にわたって光を効率的に伝達するように設計されていることから、光は、典型的なファイバの側面からほんの少ししか漏出しないため、光ファイバは、典型的には、拡張照明光源の形成に使用するのに適しているとは考えられない。さらには、光バイオリアクターなどの遠隔増殖領域に選択量の光が効果的に提供される必要がある、細菌増殖ならびに光バイオエネルギーおよびバイオマス燃料の生成を含めた生物学的用途など、多くの用途が存在する。特に、光エネルギーを内燃エンジンに使用できるように、光エネルギーを、高密度かつきれいに燃焼することが可能な高価値のバイオマス系燃料へと転換する方法は、緊急に開発する必要がある。バイオ燃料の大規模生産は、さらに効率的な反応器および光伝達方法をますます必要とするであろう。これらの必要性は、光を生物学的材料に伝達するための効率的な光源が存在する場合にのみ、満たすことができる。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

よって、拡張光源を形成するようにファイバを適合させることができれば、光ファイバの光を遠隔地に効率的に伝達する能力を利用した照明系および方法を獲得することは有益であろう。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の第1の態様は、生物学的材料を収容するように構成された内部を有する生物学的チャンバを備えた、生物学的成长システムのための照明系である。本システムは、生物学的材料にとって感受性の波長を有する光を発生する光源を備えている。本システムはまた、中心軸、外表面、および光源と光学的に結合した末端を有する、少なくとも1つのナノ構造光ファイバも備えている。ある長さを有し、その長さにわたって実質的に均一な放射線を放射する光源ファイバ部分を形成するため、導光を前記中心軸から前記外表面を通じて外に散乱するように、ファイバは、内部に複数の曲げが形成されるように構成される。

【0009】

本発明の第2の態様は、生物学的成长システムである。本システムは、生物学的材料を収容するように構成された内部を有する、生物学的チャンバを備えている。本システムはまた、生物学的材料にとって感受性の波長を有する光を発生する光源も備えている。本システムは、さらに、中心軸、外表面、および、前記光源と光学的に結合した末端を有する、少なくとも1つのナノ構造光ファイバを備えている。ある長さを有し、その長さにわたって実質的に均一な放射線を放射する光源ファイバ部分を形成するため、導光を前記中心軸から前記外表面を通じて外に散乱させるように、ファイバは、内部に複数の曲げが形成されるように構成される。

【0010】

本発明の第3の態様は、生物学的材料を支持するように構成された内部を有する生物学的チャンバに、実質的に均一な照明を提供する方法である。本方法は、中心軸および外表面を有する少なくとも1つのナノ構造光ファイバにおいて、少なくとも1つのファイバのレイリー散乱を実質的に増大させるように構成された複数の曲げを形成する工程を含み、ここで、前記複数の曲げは、前記少なくとも1つのファイバの光源ファイバ部分を形成する。本方法はまた、生物学的チャンバ内部に光源ファイバ部分を配置する工程、および、少なくとも1つのファイバ内に光を入射し、光の一部を中心軸から外表面を通じて外にレイリー散乱させ、それによって前記光源ファイバ部分から実質的に均一な放射線を放出させる工程も含む。実質的に均一な放射線は、生物学的材料にとって感受性の波長を含む。

【0011】

本発明の追加の特徴および利点は、以下の詳細な説明において記載され、一部には、その説明から当業者にとって容易に明らかとなるか、または以下の詳細な説明、特許請求の範囲、および添付の図面を含めた本明細書に記載の発明を実施することによって認識されるであろう。

【0012】

前述の概要および以下の詳細な説明は、本発明の実施の形態を提案し、特許請求の範囲に記載される本発明の性質および特徴を理解するための外観または枠組みを提供することが意図されていることが理解されるべきである。添付の図面は、本発明のさらなる理解を提供するために含まれ、本明細書に取り込まれ、その一部を構成する。図面は、本発明のさまざまな実施の形態を例証し、その説明と共に、本発明の原理および操作を説明する役割をする。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】ナノ構造光ファイバの形状をした、曲げに非感受性の光ファイバの一例となる実施の形態の一部の概略的な側面図。

【図2】2-2の方向に沿って観察した、図1の光ファイバの概略的な断面図。

【図3A】コアとナノ構造領域の間に内部環状クラッド領域を含む、図2に示す、典型的

な多重モードのナノ構造ファイバのファイバ半径に対する相対屈折率のプロットを示す図。

【図3B】ナノ構造の領域がコアを直接取り囲む、典型的な多重モードのナノ構造ファイバについての図3Aと同様のプロットを示す図。

【図4】照明系を生物学的チャンバと組み合わせて含む、生物学的成長システムの典型的な実施の形態の概略図。

【図5】入力ファイバ部分(12A)が、ナノ構造光ファイバ光結合装置の別のセクションに連結している、図4の照明系に用いた多重モードのナノ構造ファイバの拡大図。

【図6】入力ファイバ部分が、異なるタイプの光ファイバ(例えば、非ナノ構造光ファイバ)で形成され、光源のファイバ部分を構成する多重モードのナノ構造ファイバに光学的に結合された、典型的な実施の形態を例証する、図5と同様の拡大図。

【図7】800nm以上の近赤外線波長と比較して、可視波長範囲における非常に大きい損失を例証する、典型的な電気通信光ファイバの波長(nm)に対する損失(dB/km)のプロット。

【図8】曲げによって生じた曲げ半径R_Bおよび放射光を例証する、ファイバの光源ファイバ部分に形成される、多重モードのナノ構造ファイバにおける曲げの拡大図。

【図9】ファイバに沿った距離の関数としての放射光の量(強度)の減少の仕方、および、ファイバの逆巻きが距離Lにわたり実質的に均一の放射光を発生させる方法を例証する、ファイバ12の長さLに沿った距離D(メートル)の関数としての強度I(正規化単位)のプロットを示す図。

【図10】実質的に均一の放射光を発生するように、多重モードのナノ構造ファイバに4つの逆巻き層を含む、ファイバ照明系の光源ファイバ部分の例となる実施の形態についての距離D(メートル)に対する相対強度のプロットを示す図。

【図11A】2つの逆巻きしたファイバを含む、ファイバの光源ファイバ部分の例となる実施の形態を例証する、図4の照明系の一部の拡大図。

【図11B】同一のファイバを逆巻きした、ファイバの光源ファイバ部分の例となる実施の形態を例証する、図11Aと同様の図。

【図11C】比較的きつく、反対方向に傾斜した、複数の逆巻きの巻線を有するファイバの光源ファイバ部分の例となる実施の形態を例証する、図11Bと同様の図。

【図11D】さらに多くの逆巻きの巻線を有するファイバの光源ファイバ部分の例となる実施の形態を例証する、図11Cと同様の図。

【図12】複数のファイバが、拡張光源を形成するように一連の環状部に配置された、図4の照明系の一部の例となる実施の形態を示す図。

【図13】光源および光結合系が複数のファイバのそれぞれの入力端に光を結合するように構成された、照明系の前方部の例となる実施の形態を示す図。

【図14】フラスコの形態の生物学的チャンバと組み合わせて使用する照明系の例となる実施の形態を示す図。

【図15】照明系の光源ファイバ部分が、長方形の断面をした生物学的チャンバ用に構成された、例となる実施の形態を示す図(上から見た図)。

【図16】照明系の光源ファイバ部分が、円形の断面をした生物学的チャンバ用に構成された、例となる実施の形態を示す図(上から見た図)。

【図17A】図4および図14の本発明の照明系を用いて照射した試験群と、同等の光合成量子束(PPF)の蛍光性のランプを用いて照射した対照群とを含む、シアノバクテリアの植菌増殖日数に対するバイオマス(細胞密度で表す)のプロットを示す図。

【図17B】図4および図14の本発明の照明系を用いて照射した試験群と、同一の光パワーを用いてファイバの先端を通じて照射した対照群とを含む、シアノバクテリアの植菌増殖日数に対するバイオマス(細胞密度で表す)のプロットを示す図。

【図18】典型的なファイバ直径についての直径の曲げに対するファイバ損失のプロットを示す図。

【発明を実施するための形態】

【0014】

本発明の追加の特徴および利点は、以下の詳細な説明に記載され、その説明から当業者には明らかになるか、または、特許請求の範囲および添付の図面とともに以下の説明に記載される本発明を実施することによって認識されよう。

【0015】

添付の図面に実施例が例証されている、本発明の好ましい実施の形態について、これより詳細に説明する。可能な場合はいつでも、同様の部分に言及するために、図面全体を通じて、同様の参照番号が用いられる。本明細書に開示される実施の形態は、単に、それぞれ本発明の特定の利益を取り込んだ例に過ぎないことが理解されるべきである。

【0016】

本発明の範囲内にある次の例には、さまざまな変更および調整をなすことができ、異なる例の態様は、さらなる例を達成するために異なる方法で混合されうる。したがって、本発明の真の範囲は、本開示全体から理解されるべきであり、本明細書に記載の実施の形態が考慮されるが、これらに限定されない。

【0017】

定義

「水平」、「垂直」、「前方」、「後方」などの用語およびデカルト座標の使用は、図面における参照の目的および説明の簡略化のためであって、絶対標定および／または絶対方向に関して、説明または特許請求の範囲の記載に厳密に限定されることは意図されていない。

【0018】

以下の本発明の説明において、次の用語および表現は、ナノ構造光ファイバに関連して用いられる。

【0019】

「屈折率プロファイル」は、屈折率または相対屈折率と、導波路（ファイバ）の半径との関係である。

【0020】

「相対屈折率パーセント」は、

$$(r) \% = 100 \times [n(r)^2 - n_{REF}^2] / 2n(r)^2$$

として定義され、他に特に規定されない限り、 $n(r)$ は半径 r における屈折率である。相対屈折率パーセントは、他に特に規定されない限り、850 nmで測定される。1つの態様では、指標となる屈折率 n_{REF} は、コア／クラッド接触面における屈折率である。別の態様では、 n_{REF} は、クラッディングの外側の環状部分の平均屈折率であり、これは、例えば、クラッディングの外側の環状部分における「N」屈折率の測定値 (n_{c1} 、 n_{c2} 、 $\dots n_{cN}$) を取り、式：

【数1】

$$n_c = (1/N) \sum_{i=1}^N n_{ci}$$

【0021】

によって平均屈折率を計算することによって、計算することができる。

【0022】

本明細書では、相対屈折率は % で表され、他に特に規定されない限り、その値は「%」単位で与えられる。ある領域の屈折率が指標となる屈折率 n_{REF} 未満の場合には、相対屈折率パーセントは負の値であり、低下した領域または低下した屈折率を有すると表され、最小相対屈折率は、他に特に規定されない限り、相対屈折率が最も負である点で計算される。ある領域の屈折率が指標となる屈折率 n_{REF} より大きい場合には、相対屈折率パーセントは正の値であり、領域は上昇する、または正の屈折率を有するといえる。

【0023】

「アップ・ドーパント」とは、ここでは、純粋なドープされていないSiO₂に対し屈折率を上昇させる傾向を有するドーパントであるとみなされる。「ダウン・ドーパント」は、ここでは、純粋なドープされていないSiO₂に対し屈折率を低下させる傾向を有するドーパントであるとみなされる。アップ・ドーパントではない1つ以上の他のドーパントを添加する場合、アップ・ドーパントは、負の相対屈折率を有する光ファイバの領域に存在しうる。同様に、アップ・ドーパントではない1つ以上の他のドーパントが正の相対屈折率を有する光ファイバの領域に存在しててもよい。ダウン・ドーパントではない1つ以上の他のドーパントを添加する場合、ダウン・ドーパントは、正の相対屈折率を有する光ファイバの領域に存在しうる。同様に、ダウン・ドーパントではない1つ以上の他のドーパントが負の相対屈折率を有する光ファイバの領域に存在しててもよい。

【0024】

「-プロファイル」または「アルファプロファイル」という用語は、「%」を単位とする(r)に関して表された、相対屈折率プロファイルのことをいい、ここで、rは半径であり、これは次の式：

$$(r) = (r_0) (1 - [|r - r_0| / (r_1 - r_0)])$$

に従い、ここで、r₀は(r)が最大になる点であり、r₁は(r)%がゼロの点であり、rはr₁ < r < r_fの範囲にあり、ここで、rは上に定義したとおりであり、r₁は-プロファイルの初期点であり、r_fは-プロファイルの終点であり、rは実数の指数である。

【0025】

したがって、本明細書では「放物線」という用語は、コアの1つ以上の点において、2.0の値からわずかに変化しうる、実質的に放物線状の形状をした屈折率プロファイル、ならびに、わずかな変化および/または中心線のへこみを有するプロファイルを含む。

【0026】

ここで考慮されるナノ構造ファイバのマクロベンド性能は、TIA/EIA-455-62-A FOTP-62 (IEC-60793-1-47) に従って、直径10mmまたは20mmのマンドレル（「1×10mm直径のマクロベンド損失」または「1×20mm直径のマクロベンド損失」）の周りに1回巻き、全モード励振状態 (overfilled launch condition) を使用した、曲げに起因した減衰の増大を測定することによって、決定した。バンド幅は、TIA/EIA-455-204 FOTP-204 に従い、全モード励振で測定した。

【0027】

曲げに対し非感受性の光ファイバ

本明細書に記載する本発明の実施の形態の望ましい特性は、ファイバ固定具の長さに沿って均一な照明である。光ファイバは柔軟であることから、さまざまな形状を展開することが可能になる。しかしながら、ファイバの曲げ点に輝点を有しないことが好ましい（曲げ損失の増大の理由から）。波長が700から400nmに減少するにつれて、シリカ系の導波管におけるレイリー散乱に起因した内部減衰は、約2~3×10⁻⁴dB/cmから増大する。幾つかの実施の形態では、動作波長における1×40mm（直径40mmのループの周りを1回転）の曲げ損失は、動作波長におけるファイバの内部減衰未満である。

他の好ましい実施の形態では、動作波長における1×45mm（直径45mmのループの周りを1回転）の曲げ損失は、動作波長におけるファイバからの固有の散乱損失未満である。他の好ましい実施の形態では、動作波長における1×50mm（直径50mmのループの周りを1回転）の曲げ損失は、動作波長におけるファイバからの固有の散乱損失未満である。動作波長は700nm未満が好ましく、600nm未満がさらに好ましく、例えば、400nm~700nmである。つまり、曲げ損失は、直線ファイバのコアからの固有の散乱損失以下であることが好ましい。固有の散乱は、ファイバの不完全性（例えば、コア/クラッド接触面）におけるレイリー散乱および/または散乱損失に起因する。よって、少なくとも曲げに非感受性の光ファイバの実施の形態によれば、曲げ損失は、ファ

イバの固有の散乱を上回らない。本発明の例となる実施の形態は、いわゆる「ナノ構造の」または「穴のある」光ファイバの形状のものなど、曲げに非感受性または曲げに抵抗性のファイバを利用する。本発明の他の実施の形態は、曲げに非感受性または曲げに抵抗性のファイバを利用し、クラッディングのすべてまたは一部が、フッ素をドープしたシリカで構成される。

【0028】

図1は、中心軸（「中心線」）16を有する多重モードのナノ構造光ファイバ（以後「ファイバ」）12の形状をした、曲げに非感受性のファイバの一例となる実施の形態のセクションの概略的な側面図である。図2は、図1における2-2の方向に沿って観察した、ナノ構造ファイバ12の概略的な断面図である。ファイバ12は、例えば、いわゆる「穴のある」ファイバ、または上記コーニング社のナノ構造ファイバ特許および特許出願に記載されるものなど、さまざまな種類のナノ構造光ファイバのいずれか1つでありうる。本発明の目的では、「曲げに非感受性のファイバ」は、周期的または非周期的なナノ構造または間隙を利用するナノ構造ファイバを含む。一例となる実施の形態では、ファイバ12は、コア領域（「コア」）20、内部環状クラッド領域26、前記内部環状クラッド領域を取り囲む環状のナノ構造領域30、および前記環状のナノ構造領域を取り囲む外側の環状のクラッド領域40（「クラッディング」）を備えている。内側のクラッド領域26、ナノ構造領域30および外側のクラッド領域40は、外表面52を有する「クラッディング構造」50を構成する。

【0029】

随意的な層44は、外側のクラッド領域40を取り囲む。一例となる実施の形態では、層44は、低弾性の第1のコーティングと高弾性の第2のコーティングを含む、コーティングである。一部の実施の形態では、層44は、アクリレート系のポリマーなどのポリマー-コーティングを含む。一部の実施の形態では、コーティングは、ファイバの長さに沿って一定の直径を有する。

【0030】

以下に記載する他の例となる実施の形態では、層44は、コア20からクラッド構造50を通過する「放射光」の分布および/または性質を増強するように設計される。外側のクラッド領域40（または随意的な層44）は、下記のように、ファイバを通る光が散乱を通じて放出される、ファイバ12の「側面」48を表す。

【0031】

保護カバーまたは覆い（図示せず）は、随意的に、外側のクラッディング40を覆う。一例となる実施の形態では、ナノ構造領域30は、図2の拡大挿入図に詳細に示される、例となる間隙などの非周期的に配置された穴（「間隙」または「ナノ構造」ともいう）32が内部に形成された、ガラス基質（「ガラス」）31を含む。別の例となる実施の形態では、間隙32は、フォトニック結晶光ファイバなどに周期的に配置されて差し支えなく、ここで、間隙は、典型的には約 $1 \times 10^{-6} \text{m} \sim 1 \times 10^{-5} \text{m}$ の直径を有する。間隙32は、非周期的または無作為に配置されてもよい。一例となる実施の形態では、ガラス31は、フッ素をドープされるが、別の例となる実施の形態では、ガラスはドープされていない純粋なシリカである。「非周期的配置」または「非周期的分布」とは、ファイバの断面（図2に示すものなど）を取る場合に、間隙32が、ファイバの一部分に、無作為に、または非周期的に分散されることを意味する。ファイバの長さに沿った異なる箇所で取った同様の断面は、異なる断面の穴のパターンを示すであろう。すなわち、さまざまな断面は、穴の分布および穴の大きさが一致しない、異なる穴のパターンを有するであろう。つまり、穴は非周期的である、すなわち、穴はファイバ構造内に周期的には配置されない。これらの穴は、光ファイバの長さに沿って（すなわち縦軸と平行に）伸びる（引き伸ばされる）が、典型的な長さの伝送ファイバでは、ファイバ全体の全長までは伸びない。理論に縛られることは望まないが、穴は、ファイバの長さに沿って、数メートル未満、ほとんどの場合には1メートル未満しか伸びないと考えられる。

【0032】

本明細書では、以下に論じる照明系におけるファイバ12は、かなりの量の気体が圧密したガラスプランクに捕捉され、圧密したガラスの光ファイバプリフォームに穴の形成を生じさせるのに効果的なプリフォームの圧密条件を使用する方法によって、作ることができる。これらの穴を除去するための措置を講じるよりはむしろ、結果的に得られるプリフォームを使用して、内部に送気管またはナノ構造を伴った光ファイバを形成する。

【0033】

本明細書では、穴の直径は、光ファイバをファイバの縦軸を横断する垂直な断面で見た場合に、終点が穴を画成するシリカの内部表面上に配置される最も長い線分である。穴を有する光ファイバなどの製造方法は、参照することによって本明細書に援用される、米国特許出願第11/583,098号明細書に記載されている。

【0034】

ファイバ12の一部の実施の形態では、コア20は、ゲルマニウムをドープしたシリカ、すなわち、酸化ゲルマニウムをドープしたシリカを含む。所望の屈折率および密度を得るために、光ファイバのコア、特に、中心線16またはその近くに、ゲルマニウム以外のドーパントを個別にまたは組み合わせて用いてもよい。一部の実施の形態では、本明細書に開示される光ファイバの屈折率プロファイルは、コアの中心線から外半径に至るまで非負である。一部の実施の形態では、光ファイバは、コア内に、屈折率が低下するドーパントを含まない。

【0035】

ファイバ12は、フッ素化されたクラッド構造50を含みうるが、これは、ファイバが短い光導体として用いられる場合には必要ではない。純粋なシリカのコア20は、ファイバ12の所望の特性の1つであるが、ファイバの好ましい特質は、生物学的材料が感受性である所望のスペクトル領域において、光をファイバの外に散乱する能力である。散乱を通じた損失の量は、ファイバにおけるガラスの特性を変化させることによって増大させることができる。

【0036】

本明細書におけるファイバ12の一部の例では、コア20は、グレーデッド・インデックス・コアであり、コアの屈折率プロファイルは、放物線（または実質的に放物線）の形状を有することが好ましく；例えば、一部の実施の形態では、コア20の屈折率プロファイルは、850nmで測定して、約2、好ましくは1.8~2.3の値を有する、I型の形状を有し；一部の実施の形態では、コアの屈折率は中心線のへこみを有していてもよく、ここで、コアの最大屈折率および光ファイバ全体の最大屈折率は、中心線16から短い距離だけ離れた位置にあるが、他の実施の形態では、コアの屈折率は中心線のへこみを有さず、コアの最大屈折率および光ファイバ全体の最大屈折率は、中心線に位置する。

【0037】

クラッド構造50の1つ以上の部分は、例えばレイダウン工程の間に、堆積したクラッディング材料を含んでもよく、あるいは、ロッドインチューブの光プリフォーム配置のチューブなどを被覆した形態、または堆積材料と被覆物の組合せの形態で提供される。

【0038】

一例となる実施の形態では、ファイバ12は、シリカ系のコアおよびクラッディングを有する。一部の実施の形態では、クラッディングは、R_{max}の2倍の外径、例えば、約125μmの外径を有する。クラッディングの外径は、ファイバ12の長さに沿って一定の直径を有することが好ましい。一部の実施の形態では、ファイバ12の屈折率は放射対称を有する。コア20の外径（2R1）は、ファイバの長さに沿って一定の直径を有することが好ましい。

【0039】

図3Aは、図2に示すように、一例となるファイバ12のファイバ半径に対する相対屈折率のプロットである。コア20は、中心線からコア外半径R1まで半径方向外側に延在し、最大相対屈折率パーセント_{1MAX}を有する相対屈折率プロファイル_{1(r)}を有する。最初の態様では、指標となる屈折率n_{REF}は、コアノクラッド接触面、すなわち半

径 R_1 における屈折率である。内部環状クラッド領域 2 6 は、最大相対屈折率 2_{MAX} および最小相対屈折率 2_{MIN} を有する屈折率プロファイル $2(r)$ を有し、ここで、一部の実施の形態では $2_{MAX} = 2_{MIN}$ である。ナノ構造領域 3 0 は、最小相対屈折率 3_{MIN} を有する屈折率プロファイル $3(r)$ を有する。外側の環状のクラッド領域 4 0 は、最大相対屈折率 4_{MAX} および最小相対屈折率 4_{MIN} を有する屈折率プロファイル $4(r)$ を有し、ここで、一部の実施の形態では $4_{MAX} = 4_{MIN}$ である。また、 $1_{MAX} > 2_{MAX} > 2_{MIN} > 3_{MIN}$ かつ、 $1_{MAX} > 4_{MAX} > 4_{MIN} > 3_{MIN}$ である。

【0 0 4 0】

一部の実施の形態では、内部環状クラッド領域 2 6 は、一定の $2(r)$ を有する、図 3 A に示すように、実質的に一定の屈折率プロファイルを有する。これらの実施の形態の一部では、 $2(r) = 0\%$ である。一部の実施の形態では、外側の環状のクラッド領域 4 0 は、図 3 A に示すように、一定の $4(r)$ を有する、実質的に一定の屈折率プロファイルを有する。これらの実施の形態の一部では、 $4(r) = 0\%$ である。コア 2 0 は、全体に正の屈折率プロファイルを有し、ここで、 $1(r) > 0\%$ である。一部の実施の形態では、内部環状クラッド領域 2 6 は、 0.05% 未満の絶対等級および $2_{MAX} < 0.05\%$ および $2_{MIN} > -0.05\%$ を有する、相対屈折率プロファイル $2(r)$ を有し、ナノ構造領域 3 0 は、クラッディングの相対屈折率が -0.05% 未満の値に最初に到達するところから始まり、中心線から半径方向外側の方向へ進む。

【0 0 4 1】

一部の実施の形態では、外側の環状のクラッド領域 4 0 は、 0.05% 未満の絶対等級および $4_{MAX} < 0.05\%$ および $4_{MIN} > -0.05\%$ を有する相対屈折率プロファイル $4(r)$ を有し、ナノ構造領域 3 0 は、クラッディングの相対屈折率が -0.05% より大きい値に最初に到達したところで終わり、 3_{MIN} が見られる半径から半径方向外側の方向へ進む。一部の実施の形態では、内部環状部分 3 0 は、純粋なシリカを含む。

【0 0 4 2】

一部の実施の形態では、外側の環状のクラッディング 4 0 は、純粋なシリカを含む。一部の実施の形態では、ナノ構造領域 3 0 は、複数の穴 3 2 を含む純粋なシリカを含む。好ましくは、穴の存在を考慮するなど、ナノ構造領域 3 0 の最小相対屈折率または平均有效相対屈折率は、 -0.1% 未満であることが好ましい。穴 3 2 は、アルゴン、窒素、または酸素などの 1 つ以上の気体を含むことができ、あるいは、穴は、実質的に気体を含まず、真空を含むことができる；任意の気体の存在または不存在にかかわらず、ナノ構造領域 3 0 の屈折率は、穴 3 2 の存在に起因して低下する。穴 3 2 は、ナノ構造領域 3 0 に無作為にまたは非周期的に配置されて差し支えなく、他の実施の形態では、穴は、その中に周期的に配置される。

【0 0 4 3】

一部の実施の形態では、複数の穴 3 2 は、複数の非周期的に配置された穴および複数の周期的に配置された穴を含む。代替として、または加えて、環状部分 5 0 における屈折率の低下は、ナノ構造領域 3 0 をダウンドープする（フッ素を用いるなど）か、またはクラッディングおよび / またはコアの 1 つ以上の部分をアップドープすることによっても提供することができ、ここで、ナノ構造領域 3 0 は、例えば、純粋なシリカ、または内部環状部分 3 0 のように重くドープされていない、シリカである。

【0 0 4 4】

1 つの実施の形態では、ファイバ 1 2 は、図 2 に示すように、勾配屈折率、好ましくは放物線（実質的に放物線）の勾配屈折率、ガラスコア 2 0、およびガラスクラッド構造 5 0 を含み、ここで、コア 2 0 は半径 R_1 で終わり、これがグレーデッド・インデックス・コアまたは放物形の終わりを示す。コア 2 0 は、実質的に一定の屈折率プロファイル $2(r)$ を有する、内部環状クラッディング 2 6 に取り囲まれて直接接触する。内部環状クラッディング 2 6 はナノ構造領域 3 0 に取り囲まれて直接接触し、この領域もまた、実質的に一定の屈折率プロファイル $4(r)$ を有する外側の環状のクラッディング 4 0 に取り囲まれて直接接触する。

【0045】

例となる実施の形態では、コア20は酸化ゲルマニウムをドープしたシリカを含み、内部環状領域26は純粋なシリカを含み、外側の環状の領域40は純粋なシリカを含む；これらの実施の形態の一部では、ナノ構造領域30は純粋なシリカ内に複数の穴32を含み；これらの実施の形態のさらに他の実施の形態では、ナノ構造領域30はフッ素をドープしたシリカ内に複数の穴32を含む。

【0046】

内部環状クラッディング26が純粋なシリカを含み、ナノ構造領域30が複数の穴32を有する純粋なシリカを含む実施の形態では、ナノ構造領域は、最も内側の穴の最も内側の半径から始まる。外側の環状のクラッディング40が純粋なシリカを含み、ナノ構造領域30が複数の穴32を有する純粋なシリカを含む実施の形態では、ナノ構造領域は最も外側の穴の最も外側の半径で終了する。

【0047】

一例となる実施の形態では、内部環状クラッディング26は、 $0.5 \mu m$ を超える $5 \mu m$ 未満の径方向幅W2を有する。一部の実施の形態では、ナノ構造領域30の最小相対屈折率 3_{MIN} は-0.2%未満であり；他の実施の形態では、 3_{MIN} は-0.3%未満であり；さらに他の実施の形態では、 3_{MIN} は-0.4%未満であり；さらに他の実施の形態では、 3_{MIN} は-0.6%未満である。

【0048】

1_{MAX} は2.2%以下が好ましく、1.2%以下がさらに好ましい。

【0049】

ファイバ12の開口数(NA)は、光をファイバ内に導く光源(例えば、以下に紹介し論述する光源150など)のNAより大きいことが好ましい。

【0050】

一部の実施の形態では、コア外半径R1は、 $24 \mu m$ 以上かつ $50 \mu m$ 以下、すなわち、コア直径が約48~100 μm であることが好ましい。他の実施の形態では、 $R1 > 24 \mu m$ であり；さらに他の実施の形態では $R1 > 30 \mu m$ であり；さらに他の実施の形態では、 $R1 > 40 \mu m$ である。

【0051】

一部の実施の形態では、環状の内側部分26の径方向幅の50%より多くについて、 $|2(r)| < 0.025\%$ であり、他の実施の形態では、領域26の径方向幅の50%より多くについて、 $|2(r)| < 0.01\%$ である。低屈折率環状部分30は、クラッディングの相対屈折率が-0.05%未満の値に達するところで開始し、中心線から半径方向外側へと進む。一部の実施の形態では、外側の環状部分40は、0.05%未満の絶対等級、および $4_{MAX} < 0.05\%$ および $4_{MIN} > -0.05\%$ を有する相対屈折率プロファイル $4(r)$ を有し、低屈折率環状部分30は、クラッディングの相対屈折率が-0.05%より大きい値に最初に達したところで終わり、 3_{MIN} が見られる半径から半径方向外側へと進む。

【0052】

ナノ構造の領域30の幅W3は、 $R3 - R2$ であり、その中間点 R_{3MIN} は、 $(R2 \pm R3)/2$ である。一部の実施の形態では、W3は $1 \mu m$ より大きく $20 \mu m$ 未満である。他の実施の形態では、W3は $2 \mu m$ より大きく $20 \mu m$ 未満である。他の実施の形態では、W3は $2 \mu m$ より大きく $12 \mu m$ 未満である。

【0053】

クラッド構造40は、光ファイバのガラス部分の最外周部でもある、半径R4にまで及ぶ。一部の実施の形態では $R4 > 50 \mu m$ であり；他の実施の形態では $R4 > 60 \mu m$ であり、一部の実施の形態では $R4 > 70 \mu m$ である。

【0054】

一部の実施の形態では、 3_{MIN} は-0.2%未満(すなわち-0.2%よりも負の値)である。他の実施の形態では、 3_{MIN} は-0.4%未満である。他の実施の形態では、

n_{3MIN} は-0.2%未満であり、かつ-3.0%より大きい。

【0055】

図3Bは、図3Aと同様のプロットであり、内側のクラッド領域26は存在しないがコア20に直接隣接してナノ構造領域30が残るよう、 $R2=0$ である、一例となる実施の形態を示す。第2の態様では、 n_{REF} は、外側の環状のクラッディング40の平均屈折率である。

【0056】

図18は、本発明の4つのファイバの実施の形態の曲げ直径の関数として、530nmで測定したマクロベンド損失を示している。最小曲げ直径は、直径が動作波長におけるファイバの散乱損失に等しい、1回の曲げ損失の曲げ直径として定義される。一部の好ましい実施の形態では、動作波長における1×40mmの曲げ損失は、動作波長におけるファイバからの固有の散乱損失未満である。他の好ましい実施の形態では、動作波長における1×45mmの曲げ損失は、動作波長におけるファイバからの固有の散乱損失未満である。他の好ましい実施の形態では、動作波長における1×50mmの曲げ損失は、動作波長におけるファイバからの固有の散乱損失未満である。動作波長は、700nm未満であることが好ましく、600nm未満がさらに好ましく、400~700nmがさらになお好ましい。よって、我々は、ファイバの固有の損失以下になるように、ファイバの最小曲げ直径を決定する。

【0057】

照明系

図4は、照明系100を生物学的チャンバ110と組み合わせて含む、生物学的成长システム98の一例となる実施の形態の概略図である。照明系100は、上述のように、少なくとも1つのファイバ12を採用する。一例となる実施の形態では、少なくとも1つのファイバ12（論述を簡略化するために、以下、単に「ファイバ12」と称する）は、随意的な第1の部分12Aを含むように構成され、ここで、ファイバの光学的損失（「損失」）は実質的でない。ファイバ部分12Aは、光を運ぶ目的で用いられ、よって「入力ファイバ部分」と称される。ファイバ12はまた、入力ファイバ部分と光学的に結合された第2の部分12Bを有するように構成され、ここで、第2の部分の損失は、導光が「側面」48の外（すなわち、クラッディング外表面52の外）に散乱することに起因する。よって、ファイバ部分12Bは、長さLの拡張光源を構成し、「光源ファイバ部分」と称される。

【0058】

一例となる実施の形態では、入力ファイバ部分12Aは、直線であるか、または直線部分を有するか、または、実質的に散乱を誘起しない、なだらかな曲げを含む。別の例となる実施の形態では、入力ファイバ部分12Aが存在せず、光は光源ファイバ部分12Bに直接入射する。

【0059】

さらに別の例となる実施の形態では、光源ファイバ部分12Bは、光が側面48の外に散乱するように、相当量のレイリー散乱を誘起する、少なくとも1つ、好ましくは複数の曲げ130を有するらせん状のセクションを含む。一例となる実施の形態では、少なくとも1つの曲げは、コイルなどに関係する「連続的な」曲げである。他の例となる実施の形態では、曲げは、一連の別個のループによって構成される。

【0060】

ファイバ12は、図4に示すように、入力ファイバ部分12Aの末端に入力端12Iを備える。入力端12Iは、入力ファイバ部分12Aが存在しない場合には、光源ファイバ部分12Bの末端に存在してもよい。

【0061】

図5は、照明系100の一例となる実施の形態を例証する、ファイバ12の拡大図であり、ここで、入力ファイバ部分12Aは、光源ファイバ部分12Bを構成するナノ構造光ファイバの別のセクションに光学的に結合された、ナノ構造ファイバの第1のセクション

を構成する。ファイバセクション間の連結は、光結合装置 116 を介して達成される。

【0062】

図6は、照明系100の一例となる実施の形態を例証する、図5と同様の別の拡大図であり、ここで、入力ファイバ部分12Aは、光結合装置116を通じて光源ファイバ部分12Bに光学的に結合された、異なるタイプの光ファイバ（例えば、非ナノ構造光ファイバ）118によって形成される。光結合装置は、例えば、接合（例えば、溶融または機械的）、または図6に示すような個別の光コネクタ116Aおよび116Bでありうる。

【0063】

再び図4を参照すると、一例となる実施の形態では、照明系100は、1つ以上の曲げ130を形成するように、周囲に光源ファイバ部分12を屈曲させた（例えば、図に示すように、らせん状に巻いた）支持構造物120を備えている。一例となる実施の形態では、支持構造物120は、図に示すように、ロッドである。一例となる実施の形態では、支持構造物120は複数のセクションを備えている。

【0064】

図4に示すものなど、一例となる支持構造物120は、外表面122および第1および第2の末端124および126を備えている。一例となる実施の形態では、支持構造物120は、重量を軽減するために中空になっており、さらに例となる実施の形態では、プラスチック、T Y L O NまたはP V C管など、軽量の不活性物質でできている。中空の支持構造物120は内部127を画成する。一例となる実施の形態では、支持構造物が、光源ファイバ部分から放射される光の量を実質的に妨げないか、あるいは別の方法で実質的に低下させないように、支持構造物120は、光源ファイバ部分12Bによって導かれる光の波長には透明である。別の例となる実施の形態では、支持構造物が光源ファイバ部分によって周辺に放射される光の量を増強するように、支持構造物120は、光源ファイバ部分12Bによって導かれる光の波長を反射する。

【0065】

一例となる実施の形態では、光源ファイバ部分12Bが多くの異なる形状（例えば、曲線状、円状、らせん状など）で形成されるように、支持構造物120は柔軟であり、曲げることができる。多くの支持構造物素子を、下記のように、格子、十字、正方形、長方形など、広範なさまざまな支持構造物の表面形状を形成するように組み合わせることもでき、支持構造物120は、使用する生物学的チャンバ110の特定の構成での使用に適するように構成されることが好ましい。

【0066】

一例となる実施の形態では、光源ファイバ部分12Bは、支持構造物の表面122の周囲にファイバ12を巻く（例えば、らせん状に巻く）ことによって形成される。しかしながら、他の例となる実施の形態では、支持構造物120は使用されないか、または最終的な照明系100の一部ではない。むしろ、曲げ130が最初に形成され（例えば、支持構造物120を使用）、次に、曲げ130が維持されるようにファイバ12を処理する。例えば、曲げ130は、支持構造物120の周囲に光源ファイバ部分12Bを曲げ、次に、接着剤またはエポキシ樹脂を使用して曲げ130を適所に固定し、次いで、支持構造物を取り除くことによって形成されて差し支えない。別の例となる実施の形態では、ファイバ12は、中空の、透明な支持構造物120の内部の周りに巻き付き、光源ファイバ部分12Bを形成する。

【0067】

続いて図4を参照すると、照明系100は、さらに、ファイバ12の入力端12Iに光学的に結合された光源150を備えている。光源150は光152を放射する。光源150からの光152は、照射される生物学的材料にとって感受性である、少なくとも1つの波長を含む。

【0068】

一例となる実施の形態では、光結合は、光源150とファイバ入力端12Iの間に配置された1つ以上の光学素子162で構成されうるものなど、光結合系160を使用して達

成される。例となる実施の形態では、光源150はレーザ、1つ以上の発光ダイオード、電球を含むか、または、太陽であり、この場合、光結合系160は1つ以上の太陽光収集素子（例えば、1つ以上の鏡）を光学素子162として含む。

【0069】

続いて図4を参照すると、生物学的チャンバ110は、内部172を画成する1つ以上の壁170を備える。一例となる実施の形態では、内部172は、藻類（例えば、藻類コロニー、藻類ブルーム）または細菌（例えば、シアノバクテリア）などの光感受性の生物学的材料180を含む。一例となる実施の形態では、生物学的材料180は、水などの支持培地184に懸濁してもよい。光源ファイバ部分12Bの少なくとも一部は、チャンバ内部172に配置され、チャンバ内部およびその中に含まれる生物学的材料180を照らす。一例となる実施の形態では、ファイバ12は、開口部190を通じてチャンバ内部172に供給され、一例となる実施の形態では、この開口部は、チャンバ110からの生物学的材料180および/または支持培地184の望ましくない放出を妨げるために、封止できるように構成される。

【0070】

照明系100の動作では、光152を発生するように、光源150が活性化される。光152は、入力端12Iにおいて光結合系160を介してファイバ12に連結する。上述のように、光152は、生物学的材料180にとって感受性の波長を含み、特定の例となる実施の形態では、波長は生物学的材料を成長させる波長である。

【0071】

一例となる実施の形態では、光源150に由来する光152は、光阻害を回避することによって、ある種の生物学的材料180の細胞増殖の効率を改善するような方法で発生させた光パルスを含む。

【0072】

光152は入力ファイバ部分12Aを流下し、その中に実質的に含まれ、入力光のほとんどが光源ファイバ部分12Bに伝達される。中心軸16から光源ファイバ部分12Bの外表面52の外への光の散乱は、光源ファイバ部分の長さにわたり、実質的に均一な照明を生じる。すなわち、光源ファイバ部分は、放出される放射線152'の形状をした実質的に均一な照明を提供する、拡張光源としての役割をする。一例となる実施の形態では、光源ファイバ部分12Bにおける主な光散乱メカニズムはレイリー散乱である。一例となる実施の形態では、放出される放射線152'の一部は、下記のように、曲げ損失に由来する。

【0073】

実質的に均一な放射線の形成

ファイバ12は、典型的には、電気通信用途のための意図する近赤外線波長範囲における散乱に由来する、比較的低い減衰を有するが、散乱に由来する減衰は、生物学的材料180が最も感受性である、より短い可視波長では、はるかに高くなる。

【0074】

図7は、800nm以上の近赤外線波長と比較して、可視波長範囲における非常に大きい損失を例証する、典型的な電気通信の光ファイバについての、波長(nm)に対するdB/kmで表す減衰(損失)のプロットである。

【0075】

注目されるのは、より短い可視波長においても、ファイバ12は、曲げ130に由来する曲げ損失に起因して「ホットスポット」が生じないように、実質的に曲げに非感受性のままであることである。一例となる実施の形態では、「曲げ非感受性」は、これらの波長において小さい曲げ損失を有するファイバ12とは対照的に、可視波長における一様損失として表される。よって、一部の例では、放出される放射線152'の一部は曲げ損失によるが、放出される放射線の別の部分（例えば、残りの部分）は散乱損失に起因する。ここで重要な点は、曲げ損失は、必ずしも小さい必要はないが、実質的に均一のままであることである。このような均一の曲げ損失は、さもなければファイバが曲げに感受性である

場合に生じる「ホットスポット」の発生を和らげ、これは、放出される放射線 152' に実質的な非均一性を発生させる、ファイバにおける曲げ依存性の損失につながる。

【0076】

また図 8 を参照すると、光源ファイバ部分 12B における曲げ 130 は、光 152 の散乱が実質的に増強され、可視波長において約 10 ~ 20 dB/km になるような、曲げ半径 R_B を有する。よって、光 152 が光源ファイバ部分 12B およびその内部の曲げ 130 に達する際に、散乱により、ファイバの長さに沿って、放射光 152' としてファイバの外に散乱される一部の光を生じる。次に、放射光 152' の一部は、生物学的材料 180 に吸収され、それによって生物学的材料の増殖速度を高める。

【0077】

上述のように、一例となる実施の形態では、ファイバ 12 のナノ構造領域 30 は、直径約 200 nm ~ 500 nm の穴 32 を有する。穴 32 の直径は、ファイバ 12 を形成する際に、圧密およびドロー工程において調節することができる。前述の穴 32 の寸法は、曲げにより誘起されるレイリー散乱によって光 152' が効率的に放射されるように、光合成に所望される波長範囲に相当する。

【0078】

図 9 は、ファイバ 12 の長さ L_F に沿った、距離 D (メートル) の関数としての強度 I のプロットである。プロットは、各長さ L_F についてのファイバに沿った距離の関数として、放射光 152' の量 (強度) の減少の仕方を例証している。図 9 のプロットは、強度 I が、ファイバを通る各通路 P の長さ L_F にわたり、直線的に 5 % 下降することを示している。

【0079】

しかしながら、ファイバ 12 を 6 回折り重ねる (すなわち、ファイバを「逆巻きする」) ことによって (それによって 6 つのファイバ層または「巻き」を形成し)、光源ファイバ部分 12B の長さ L が形成されることに留意されたい。こうして、光 152 は、放射光 152' を放射すると同時に、同一の (折り畳まれた) 長さ L にわたり、6 つの通路を効果的に作り出す。

【0080】

例えば、ファイバの長さ L にわたり 2 つの通路が存在するような、2 つの逆巻きの巻線を有するファイバ 12 の事例を考える。全強度 I は、各通路についての 2 つの強度曲線の合計である。入力端 ($D = 0$) では、強度 I の合計は $100 \pm 90 = 190$ である。反対端 $D = L$ では、強度 I の合計は $95 \pm 95 = 190$ である。 $D = L/2$ における中間では、強度 I の合計は $92.5 \pm 07.5 = 190$ である。よって、ファイバ 12 の逆巻きは、各通路についてのファイバの長さに沿って生じる放射光 152' の減少量を相殺し、光源ファイバ部分 12B から、比較的均一の (すなわち、実質的に一定の強度) 拡張照明光源を生じる。

【0081】

図 10 は、光源ファイバ部分の長さに沿って実質的に均一の放射光 152' を発生するファイバ 12 の光源ファイバ部分 12B において、4 つの逆巻き層の合計を含む、長さ L の光源ファイバ部分 12B の一例となる実施の形態についての距離 D に対する相対強度 I のプロットである。長さ $L = 250$ メートルにわたり、放出される放射線 152' の強度 I は、0.5 % 未満しか低下しないことは注目に値する。

【0082】

ファイバ 12 は、可視波長帯においても曲げに非感受性であることから、散乱を増強する比較的強い曲げ 130 の形成は、曲げ損失の理由から、長さに沿った放射線の均一性を乱さないであろう。

【0083】

照明系 100B から均一に拡張した照明を生じさせるために、本システムの例となる実施の形態は、12 を反対方向に逆巻きすることによって、高損失セクション 12B を形成することを含む。必要とされるファイバの長さは、曲げ 130 の減衰および寸法に応じて

決定することができる。

【0084】

一例となる実施の形態では、光源ファイバ部分12Bは、好ましくは、強度が、光源ファイバ部分の長さに沿って、±10%以内で変化する、さらに好ましくは±5%、さらに好ましくは±2.5%、さらにお好ましくは±1%以内で変化する、放射光152'を放射する。

【0085】

図11Aは、支持構造物120の周囲に巻いた、逆巻きの2つのファイバ12(12-1および12-2として識別される)を含む一例となる実施の形態を例証する、照明系100の光源ファイバ部分12の拡大図である。この実施の形態は、各ファイバ12の長さに沿った放射光の量の減少の影響に対抗することにより、放射光152'を均一化する役割をする。他の例となる実施の形態では、複数のファイバ12は、図11Aに示すように、放射光152'を均一化するために、多くの構成において支持構造物の周りに巻かれている。

【0086】

図11Bは、同一のファイバ12が+Xの方向および-Xの方向に逆巻きされることを除き、図11Aと同様である。ファイバ12は、何回も逆巻きすることができ、正確な回数は、主に、ファイバの全長および生物学的チャンバ内部172の大きさによって制限される。ファイバ12の逆巻きは、図10に例証するように、ファイバの長さLに沿った放射光の量の減少を補うことによって、放射光152'を均一化する役割をする。

【0087】

図11Cは、図11Bと同様であり、複数の逆巻きの巻線を示すファイバ12の光源ファイバ部分12Bの一例となる実施の形態を例証しており、ここで、逆巻きの巻線は比較的きつく、「クロス巻き」した逆巻きの巻線、すなわち、+X方向に巻いた巻線は、-X方向の逆巻きの巻線のものとは反対の方向に傾斜する。このような「クロス巻き」は、放射光152'の均一性をさらに改善する役割をする。

【0088】

図11Dは図11Cと同様であり、さらに多くの逆巻きの巻線を有する、ファイバ12の光源ファイバ部分12Bの一例となる実施の形態を例証する。放射線152'の放射パターンは、図11A～11Dに示す光源ファイバ部分12Bの表面形状が放射対称性であることに留意されたい。

【0089】

一例となる実施の形態では、図11Bに従った照明系100の光源ファイバ部分12Bは、直径1cmのTYLONチューブの形態で支持構造物120の周囲に巻いた全長約100mの多重モード125μm(半径)ナノ構造ファイバの形態のファイバ12を使用して形成される。この種のファイバの曲げ損失は、比較的なだらかであり、レイリー散乱損失よりも少し高いが、均一の逆巻きの巻線は実質的に均一な照明を生じる。

【0090】

図12は、複数のファイバの順次的な巻き(例えば、ファイバ12-1、12-2、12-3、12-4および12-5)から形成される、照明系100の光源ファイバ部分12Bの一例となる実施の形態を例証する。ファイバ12は、個別の入力端12Iにおいてファイバ・バンドル212に配置され、拡張光源を形成するように、支持構造物120の長さに沿って順次的な巻きセクションS(S1～S5)を形成するように構成される。ファイバ12の順次的な巻線構成は、実質的に均一の放射光152'を提供する拡張光源としての機能を果たす各セクションSによって、放射光152'の均一性を増大する。各セクションSの軸長は、図9のプロットに例証されるように、軸長の関数としての放射光152'の量が入力端12Iにおける入射光のある特定の閾値(例えば、~95%)を下回らないように選択される。

【0091】

その後のセクションSは、例えば、ファイバ12-nを、内部ファイバである次のファ

イバ12-(n+1)と交換することによって形成される。

【0092】

例えば、支持構造物120によって支持された100本のファイバ12が束になって存在し、拡張光源の所望の長さが10mの場合、ファイバ12-1はセクションS1において第1の0.1m、ファイバ12-2はセクションS2において第2の0.1mなど、ファイバ12-100がセクションS100において最後の0.1mだけ、束の周囲に巻き付くまで、束の周囲に巻き付ける。一例となる実施の形態では、光源ファイバ部分12Bにおける異なるファイバ12の順次的な巻きは、光ファイバのより線に使用されるものと同様の自動工程を使用して達成される。一例となる実施の形態では、1つ以上のセクションSは、1つ以上のセクションに由来する放射光152の均一性を増大させる逆巻きのファイバ12を含む。順次的な巻きの使用により、長尺の拡張光源ファイバ部分12Bの形成が可能となる。

【0093】

図13は、照明系70の前方部（すなわち、光を発生および集光する部分）の一例となる実施の形態を例証しており、ここで、光源150および光結合系は、光源からの光152が、例えば、図示するように、ファイバ・バンドル212に配置される、複数のファイバ12のそれぞれの入力端12I内に結合するように構成される。ファイバ・バンドル212は、集光した太陽光をチャンバ内部172に伝えるための便利な方法である。このような方法で、数百ワットの太陽エネルギーをチャンバ内部172に伝えることができる。代替となる実施の形態では、図13に示すものと同様に、さまざまなファイバ12は、単一の光源ではなく、1つ以上の光源150と光学的に結合される。

【0094】

コーティング

一例となる実施の形態では、光源ファイバ部分12Bにおけるファイバ12は、上述の図2に関連するように、層44を有しうる。一例となる実施の形態では、層44は、改善された湿潤付着性を提供する、UV硬化性アクリレートコーティングなどの親水性コーティングを含む。親水性コーティング44は、細胞増殖培地およびファイバ12の保護カバーとして機能する。このように、細胞死が生じないことを確実にするために、化学修飾または原材料置換が必要な場合がある。

【0095】

層44の親水性コーティングの例は、表面への細胞粘着および増殖の改善に通常使用されるものであり、カルボン酸官能性およびアミン官能性（例えば、アクリル酸またはアクリルアミドを含む処方）が挙げられる。加えて、層44の親水性コーティングは、生物学的材料180の増殖に必須の栄養素の容器としての役割をすることによっても改善されうる。

【0096】

一例となる実施の形態では、層44は、市販の「育成用照明」により得られるものと同様の光を発生する、放射光152'を改質する作用をする、蛍光または紫外線吸収分子を含む。

【0097】

ナノ構造光ファイバなどの光ファイバは、ポリマー、金属、またはガラスの被覆（またはコーティング）内に封入されて差し支えなく、ここで、前記被覆は、250μmより大きい最小外のり寸法（例えば直径）を有する。ファイバが金属コーティングを有する場合、熱コーティングは、放射状の空間に（半径方向に）またはファイバの長さに沿った放射の修正のため、セクションを開放しうる。

【0098】

上述のように、光ファイバは、光ファイバ外表面に配置された親水性コーティングを含みうる。あるいは、親水性コーティングは、ファイバリボンの外表面に配置されてもよい。また、蛍光種（例えば、紫外線-吸収材料）は、光ファイバコーティングに配置されうる。

【0099】

さらには、追加のコーティング層をファイバ外表面上に提供してもよく、この層は、放射光を修正するように構成される。追加のコーティングは、放射状の空間における光の分布を修正するため、 TiO_2 などの分散する粒子を有しうる。コーティングは、光の放出波長を修正するために傾向種を含んで差し支えなく、あるいは、放出した光スペクトルを追加的に修正するため、インクなどの吸収種を有しうる。

【0100】

例となる照明系の構成

図14は、生物学的成長システム98および生物学的成長システムに用いられる照明系100の一例となる実施の形態を例証しており、ここで、生物学的チャンバ170はフラスコの形状をしている。図14の実施の形態では、光源ファイバ部分12Bは、図11Bに示すものと同様の単一の逆巻きファイバでできている。図14の照明系100は、後述する生物学的成長実験を行うのに使用した。

【0101】

図15は、生物学的成長システム98および生物学的成長システムに用いられる照明系100の一例となる実施の形態（上から見た図）を例証するものであり、ここで、照明系100の光源ファイバ部分12Bは、図に示すように、長方形の断面をした生物学的チャンバ110に使用するのに適した方形構造を有する。

【0102】

図16は、生物学的成長システム98および生物学的成長システムに用いられる照明系100の一例となる実施の形態（上から見た図）を例証しており、ここで、照明系100は、図示するように、円形の断面をした生物学的チャンバ110に使用するための円形の形状に構成された光源ファイバ部分12Bを有する。図16の照明系100の一例となる実施の形態は、図のように、環状の支持構造物120を使用する。図16は、円形の光源ファイバ部分12Bを形成するように、支持構造物120の周りに時計回りに巻いた工程におけるファイバ12を示している。

【0103】

照明系100の光源ファイバ部分12Bのための他の形状および表面形状は、本発明に包含され、用途の特定の必要性、特に生物学的チャンバ110の表面形状の関数である。一例となる実施の形態では、光源ファイバ部分12Bは、生物学的チャンバ110の表面形状によって画成される。例えば、光源ファイバ部分12Bの設計は、チャンバのすべての部分にわたり、実質的に均一の曝露を提供する必要性によって規定されうる。

【0104】

光拡散ファイバの追加の利点は、ファイバを、リボンとして知られるマルチファイバ束に束ねるという疑う余地のない能力である。典型的なリボン構造は、2~36本のファイバの範囲である。リボン構造に由来する別の利点は、リボンは、波状、らせん状、または渦巻状などの他の曲げ構造を形成するように製造することができ、それによって光を散乱させうことから、ファイバの巻きの必要性がもはや必要ではないことである。さらには、マルチファイバリボンの使用は、大量のリボンを積み重ねする可能性を与える。このようなリボンの積み重ねは、より集中質量の導光を可能にするだけでなく、赤色レーザ、日光、発光ダイオード、または点光源の誘導など、さまざまな抗原の使用の可能性を開くであろう。例えば、1つの実施の形態によれば、複数のナノ構造光ファイバを、支持構造の周囲に巻いて差し支えなく、各ナノ構造光ファイバは、光源または複数の光源に光結合しうるが、ナノ構造光ファイバは、リボン、積層リボン、または円形の束のうちの少なくとも1つにまとめて束ねられる。

【0105】

実験結果

図14に例証する形態の光源ファイバ部分12Bを有する照明系100を用いて、シアノバクテリア（*Synechocystis* sp. PCC 6803）の形態の生物学的材料の増殖をサポートする実験を行った。実験には、照明系100を使用せず、代わりに照明系100と同

量の光を与える蛍光性の光源を用いた対照群を含めた。

【0106】

図17Aは、照射されたシアノバクテリア（「試験群」T）および対照群Cの両方についての植菌の増殖日数に対するバイオマス（細胞密度として表す）のプロットである。プロットは、現行の実験設定下では、対照群と比較して試験群では増殖速度が早いことが示されている。試験群および対照群の両方を、フラスコ（振とう器）の形態をした生物学的チャンバ110内に入れた。照明系100を除き、対照群および試験群の両方で、増殖条件は同一、すなわち：30、105rpmの曝気速度、および約0.03%のCO₂（周囲空気）であった。

【0107】

対照群では、照明は、チャンバ内の光強度が50μmol/m²/秒になるように、増殖チャンバの上の蛍光ランプによって提供された。試験群では、530nmの光を発生するレーザ-光源を使用した。

【0108】

光源ファイバ部分12Bを培地（すなわち、生物学的材料）内に置き、フラスコをアルミ箔で覆った。光源ファイバ部分12Bから放出される放射線152'の強度は、対照群と同一の強度となるように調整した。光源ファイバ部分12Bはシアノバクテリアの増殖をサポートする非常に良好な生体適合性を実証し、実験は、照明系100が他の種類の生物学的用途および異なる生物学的チャンバ表面形状に非常に良く適合するであろうという立場を支持している。

【0109】

シアノバクテリア（*Synechocystis* sp. PCC 6803）の形態の生物学的材料の増殖をサポートするために、図14に例証する形態の光源ファイバ部分12Bを有する照明系100を用いた、追加の実験を行った。実験には、照明系100を使用せず、代わりに照明系100と同量の光を与えるファイバチップ（点光源）を通じて光を伝達する光源を用いた対照群を含めた。典型的な光源は、レーザ、発光ダイオード、日光、または蛍光の光源でありうる。

【0110】

図17Bは、照射されたシアノバクテリア（「試験群」）および対照群の両方についての植菌の増殖日数に対するバイオマス（細胞密度として表す）のプロットである。プロットは、現行の実験設定下では、対照群と比較して試験群では増殖速度が早いことが示されている。試験群および対照群の両方を、フラスコ（振とう器）の形態をした生物学的チャンバ110内に入れた。照明系100を除き、対照群および試験群の両方で、増殖条件は同一、すなわち：30、105rpmの曝気速度、および約0.03%のCO₂（周囲空気）であった。対照群および試験群の両方で、530nmの光を発生するレーザ光源を用いた。

光源ファイバ部分12Bを培地（すなわち、生物学的材料）内に置き、フラスコをアルミ箔で覆った。光源ファイバ部分12Bから放出される放射線152'の強度は、対照群と同一の強度となるように調整した。光源ファイバ部分12Bはシアノバクテリアの増殖をサポートする非常に良好な生体適合性を実証し、実験は、照明系100が他の種類の生物学的用途および異なる生物学的チャンバ表面形状に非常に良く適合するであろうという立場を支持している。

【0111】

前述の説明は、単に本発明の典型例であって、特許請求の範囲に定義される本発明の性質および特徴を理解するための概観を提供することが意図されていることが理解されるべきである。添付の図面は、本発明のさらなる理解を提供するために含まれ、本明細書に取り込まれ、本発明の一部を構成する。図面は、本発明のさまざまな特性および実施の形態を例証し、その説明と共に、本発明の原理および動作を説明する役割をする。添付の特許請求の範囲に定義される本発明の精神または範囲から逸脱することなく、本明細書に記載される本発明の好ましい実施の形態には、さまざまな変更をなしうることが、当業者にと

って明らかになるであろう。