



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102667551 B

(45) 授权公告日 2016. 08. 10

(21) 申请号 201080052456. 2

代理人 沙永生

(22) 申请日 2010. 11. 19

(51) Int. Cl.

(30) 优先权数据

G02B 6/00(2006. 01)

61/263, 023 2009. 11. 20 US

G02B 6/02(2006. 01)

F21V 8/00(2006. 01)

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012. 05. 18

审查员 王乐妍

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2010/057395 2010. 11. 19

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/063214 EN 2011. 05. 26

(73) 专利权人 康宁股份有限公司

地址 美国纽约州

(72) 发明人 S·R·别克汉姆 D·C·布克宾德

E·J·富克斯 S·L·洛谷诺夫

(74) 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公

司 31100

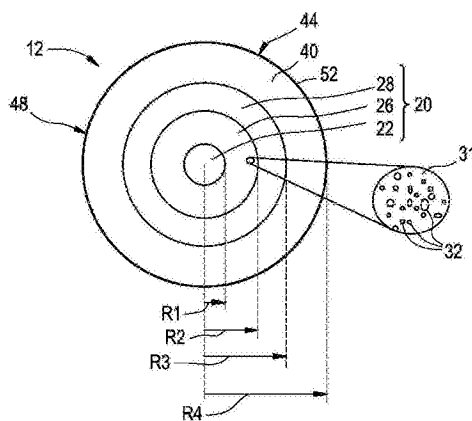
权利要求书3页 说明书15页 附图6页

(54) 发明名称

具有侧面发光的光学光子纤维的照明系统及其制造方法

(57) 摘要

一种发光照明系统,所述照明系统包含在200nm 范围内具有至少一个波长的光源和具有多个纳米尺寸结构(32)(例如孔隙)的光纤(12)。光纤连接到光源上。散光光纤具有纤芯(12)和包覆层(40)。所述多个纳米尺寸结构位于所述纤芯内或纤芯-包覆层边界处。光纤还包含外表面(48)。光纤被构造用来通过纳米尺寸结构将导光从纤芯经外表面散射出去,形成具有一定长度的光源光纤部分,所述光源光纤部分在其长度上发出基本均匀的辐射,所述光纤对200-2000nm 范围内的波长的散射诱导衰减大于50dB/km。



1. 一种照明系统,所述照明系统包含:

光源,所述光源发出在200-2000nm之间具有至少一个波长的光;以及

至少一根散光光纤,所述散光光纤对所述波长的散射诱导衰减大于50dB/km,所述光纤包含含玻璃的纤芯、初级包覆层、外表面、与光源光连接的端部和多个位于所述纤芯内或纤芯-包覆层边界处的具有10nm-1 $\mu$ m横截面尺寸和1mm-5m长度的纳米尺寸结构,所述纳米尺寸结构为充气孔隙,其尺寸和组成经过选择,从而将导光从所述纤芯经所述外表面散射出去,在所述光纤的长度上发出基本均匀的辐射。

2. 一种照明系统,所述照明系统包含:

光源,所述光源发出在200-2000nm之间具有至少一个波长的光;以及

至少一根散光光纤,所述散光光纤对所述波长的散射诱导衰减大于50dB/km,所述光纤包含含玻璃的纤芯、初级包覆层、外表面、与光源光连接的端部和多个位于所述纤芯内或纤芯-包覆层边界处的具有10nm-1 $\mu$ m横截面尺寸的纳米尺寸结构,所述纳米尺寸结构的尺寸和组成经过选择,从而将导光从所述纤芯经所述外表面散射出去,在所述光纤的长度上发出基本均匀的辐射,其中所述光纤辐射基本上是均匀的,使得最小散射照明强度与最大散射照明强度之差小于最大散射照明强度的30%,所述光纤对所述波长的散射诱导衰减是100-20000dB/km,所述光纤的长度L为0.5-100m,所述光纤衰减大于3dB/L。

3. 如权利要求1所述的照明系统,其特征在于,所述光纤对所述波长的散射诱导衰减是100-20000dB/km。

4. 如权利要求3所述的照明系统,其特征在于,

(i)所述光纤的长度为0.5-100m,所述光纤对所述波长的散射诱导衰减是300-6000dB/km;或

(ii)所述光纤的长度L为0.5-100m,所述光纤衰减大于3dB/L。

5. 如权利要求1所述的照明系统,所述照明系统包含多根散光光纤,每根散光光纤具有纤芯、包覆层和多个位于所述纤芯内或纤芯-包覆层边界处的纳米尺寸结构,每根所述光纤还包含外表面和光连接到光源的端部,

其中每根所述散光光纤被构造成通过所述纳米尺寸结构将导光从纤芯经外表面散射出去,形成具有一定长度的光源光纤部分,该部分在其长度上发出基本上均匀的辐射,所述散光光纤对所述波长具有大于50dB/km的散射诱导衰减。

6. 如权利要求5所述的照明系统,其特征在于:(i)每根散光光纤与光源或多个光源光连接,(ii)所述多根散光光纤被捆扎成以下至少一种形式:带、带堆或圆束。

7. 如权利要求1所述的照明系统,其特征在于,所述光纤是多模光纤,所述纤芯的(i)直径大于50 $\mu$ m且小于500 $\mu$ m;且/或(ii)NA>0.2。

8. 如权利要求1所述的照明系统,其特征在于,整个纤芯包含纳米尺寸结构。

9. 如权利要求1所述的照明系统,其特征在于,所述纳米尺寸结构位于纤芯中,且所述纤芯具有外径 $R_c$ ,所述纤芯包含:

(i)具有外径 $R_1$ 的实心内芯部分,使得 $0.05R_c < R_1 < 0.9R_c$ ;

(ii)具有宽度 $W_2$ 的纳米结构区,其中 $0.05R_c < W_2 < 0.9R_c$ ;以及

(iii)宽度在 $0.1R_c < W_s < 0.9R_c$ 之间的外实心芯区,其中所述纤芯的每个部分包含二氧化硅玻璃。

10. 如权利要求1所述的照明系统,其特征在于,所述多个纳米尺寸结构位于纤芯-包覆层边界处,并且包含所述纳米尺寸结构的纳米结构区的宽度至少为 $7\mu\text{m}$ ;所述包覆层的直径至少为 $125\mu\text{m}$ 。

11. 一种制备散光光纤以控制沿着光纤长度的照明均匀性的方法,所述散光光纤对处于 $200\text{--}2000\text{nm}$ 波长范围内的至少一个工作波长的散射诱导衰减大于 $50\text{dB/km}$ ,所述方法包括:

(i)形成具有多个位于纤芯内或纤芯-包覆层边界处的纳米尺寸结构的光纤;

(ii)拉制所述光纤,同时在拉制过程中控制光纤拉力,以产生最小散射照明强度不小于最大散射照明强度的 $0.7$ 倍的散光光纤。

12. 如权利要求1所述的照明系统,所述照明系统还包含设置在散光光纤涂层中的荧光和/或散射物质,以提供基本均匀的散射强度。

13. 如权利要求12所述的照明系统,其特征在于,所述光源发出 $200\text{--}500\text{nm}$ 波长范围内的光,所述涂层中的荧光材料产生白光、绿光、红光或NIR(近红外)光。

14. 如权利要求1-10和12-13中任一项所述的照明系统,其特征在于,所述光纤具有至少部分填充了用来散射光的纳米结构的玻璃纤芯,所述纤芯被聚合物或玻璃包覆层包围,还具有至少一个包围所述包覆层的涂层。

15. 如权利要求14所述的照明系统,其特征在于,所述聚合物或玻璃包覆层被以下任意一个包围:(i)初级涂层;(ii)初级涂层和次级涂层;(iii)油墨层;(iv)初级涂层和油墨层;(v)初级涂层、次级涂层和油墨层。

16. 如权利要求15所述的照明系统,其特征在于,(i)所述油墨层包含:颜料或磷光体、荧光材料、UV吸收材料、亲水材料、调光材料或其组合;且/或(ii)所述包覆层和/或初级涂层和/或次级涂层包含下面至少一种材料:颜料、磷光体、荧光材料、UV吸收材料、亲水材料、调光材料或其组合。

17. 一种在照明波长处具有大于 $50\text{dB/km}$ 的散射诱导衰减的散光光纤,所述散光光纤包含:

包含玻璃的纤芯、包覆层、外表面、至少一个涂层和多个位于所述纤芯内的具有 $10\text{nm}\text{--}1\mu\text{m}$ 横截面尺寸的纳米尺寸结构,所述纳米尺寸结构的尺寸和组成经过选择,从而将导光从所述纤芯经所述外表面散射出去,所述包覆层或所述至少一个涂层包含磷光体或颜料。

18. 如权利要求17所述的散光光纤,其特征在于,整个纤芯包含纳米尺寸结构。

19. 一种在照明波长处具有大于 $50\text{dB/km}$ 的散射诱导衰减的散光光纤,所述散光光纤包含:

包含玻璃的纤芯、外表面和多个位于所述纤芯内的纳米尺寸结构,使得整个纤芯包含纳米尺寸结构,所述纳米尺寸结构的尺寸和组成经过选择,从而将导光从所述纤芯经所述外表面散射出去,所述纳米尺寸结构具有 $10\text{nm}\text{--}1\mu\text{m}$ 的横截面尺寸。

20. 如权利要求19所述的散光光纤,其特征在于,所述光纤不包含包覆层。

21. 一种散光光纤,所述散光光纤对通过光纤的光的照明波长的散射诱导衰减大于 $50\text{dB/km}$ ,所述光纤包含纤芯、初级包覆层、外表面、与光源光连接的端部和多个位于所述纤芯内或纤芯-包覆层边界处的纳米尺寸充气孔隙,所述纳米尺寸充气孔隙的尺寸和组成经过选择,从而将导光从所述纤芯经所述外表面散射出去,在所述光纤的长度上发出基本均

匀的辐射,所述纳米尺寸充气孔隙具有10nm-1 $\mu$ m的横截面尺寸和1mm至小于10m的长度。

22.如权利要求21所述的散光光纤,其特征在于,(i)所述散光光纤的横截面包含至少50个充气孔隙;且/或(ii)所述纳米尺寸充气孔隙的组成包含SO<sub>2</sub>、Kr、Ar、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>或其混合物。

23.如权利要求17-22中任一项所述的散光光纤,其特征在于,所述光纤辐射基本上是均匀的,使得最小散射照明强度与最大散射照明强度之差小于最大散射照明强度的30%。

24.如权利要求17-22中任一项所述的散光光纤,其特征在于,所述光纤的长度为0.5-100m,所述光纤对所述波长的散射诱导衰减是300-6000dB/km。

25.如权利要求23所述的散光光纤,其特征在于,所述光纤的长度为0.5-100m,所述光纤对所述波长的散射诱导衰减是300-6000dB/km。

26.如权利要求17-22中任一项所述的散光光纤,其特征在于,所述光纤是多模光纤,所述纤芯的(i)直径大于50 $\mu$ m且小于500 $\mu$ m;且/或(ii)NA>0.2。

## 具有侧面发光的光学光子纤维的照明系统及其制造方法

[0001] 背景

[0002] 本申请根据35U.S.C.§119(e)要求2009年11月20日提交的美国临时申请系列第61/263023号的优先权。

### 技术领域

[0003] 本发明一般涉及具有含纳米尺寸结构的区域的散光光纤(light diffusing optical fiber),具体涉及采用这种光纤的照明系统和方法,用于不同的应用,包括生物反应器、标志和特殊光照应用。

### 背景技术

[0004] 光纤用于需要将光从光源传送到远处的许多应用。例如,光通信系统依靠光纤网络将光从服务提供者发送给系统的终端用户。

[0005] 通信光纤被设计成在800-1675nm的近红外波长范围内工作,在此波长范围内仅有较低的吸收和散射衰减。这使注入光纤一端的光大部分从光纤另一端出来,仅有少量光在光纤两端之间沿周向离开。

[0006] 近来,人们越来越需要拥有对弯曲的敏感性比常规光纤更低的光纤。这是因为越来越多的通信系统被布置在需要将光纤弯曲得很厉害的装置中。这种需求带动具有以下特征的光纤的发展:所述光纤在芯区周围采用非周期性排列的小孔隙环结构。这种包含孔隙的环结构所起的作用是增大对弯曲的非敏感性——也就是说,光纤可具有更小的弯曲半径,而通过它的光学信号的衰减不会发生明显改变。在这些光纤中,包含孔隙的环区位于光纤包覆层中,离纤芯有一些距离,以便最大程度减少光经包含孔隙的环区传播的量,因为这种传播会增大光学损耗。

[0007] 因为光纤通常是设计用来将光从光纤一端经过长距离有效传递到光纤另一端,从典型光纤侧面散失的光非常少,因此人们认为光纤不是很适合用来形成延长的照明源。但是,许多应用如特殊光照、标志或生物应用,包括细菌生长以及光-生物能和生物质燃料的生产,都需要以有效的方式将选定量的光提供给指定区域。对于生物质生长,需要开发将光能转化为生物质基燃料的方法。对于特殊光照,光源需要薄而柔韧,易于变成各种不同的形状。

### 发明内容

[0008] 根据一些实施方式,本发明的第一方面是一种照明系统,所述照明系统产生具有200-2000nm范围内的至少一种波长( $\lambda$ )的光。所述系统包含光源和至少一根散光光纤。所述散光光纤具有纤芯和包覆层。多个纳米尺寸结构位于所述纤芯内或者纤芯-包覆层边界处。光纤还包含外表面和与光源光连接的端部。光纤被构造成通过所述纳米尺寸结构将导光(guided light)从纤芯经外表面散射出去,形成具有一定长度的光源光纤部分,该部分在其长度上发出基本上均匀的辐射,所述光纤对所述波长具有大于50dB/km的散射诱导衰减。

根据一些实施方式,与光纤连接的光源发出200–500nm波长范围内的光,光纤涂层内的荧光材料产生白光、绿光、红光或NIR(近红外)光。

[0009] 根据一些实施方式,所述照明系统包含单根散光光纤。根据其他实施方式,照明系统包含多根散光光纤。这些散光光纤可用于直形装置,或者可以弯曲。

[0010] 根据一些示范性实施方式,所述照明系统可用于生物生长系统,并可进一步包含生物室,所述生物室的内部被构造用来容纳生物材料。在这些实施方式中,光源产生一定波长的光,生物材料对该波长的光敏感。光纤可具有多个在它里面形成的弯曲部,以便将导光从中心轴散射出纤芯,经外表面形成具有一定长度的光源光纤部分,所述部分在其长度上发出基本上均匀的辐射。

[0011] 在以下的详细描述中给出了本发明的其他特征和优点,其中的部分特征和优点对本领域的技术人员而言,根据所作描述就容易看出,或者通过实施包括以下详细描述、权利要求书以及附图在内的本文所述的本发明而被认识。

[0012] 因此,本发明的至少一些实施方式的一个有利特征是:所述照明系统和方法利用了光纤将光有效传递到远处的能力,并且这种光纤即使为了满足应用需要而被布置成不同形状(例如弯曲、盘绕或直形),也能较均匀地散射光。此外,本发明的一些实施方式的一个有利特征是:本发明的至少一些示范性实施方式中的散光光纤能够提供对波长依赖性较弱的照明,其中200–2000nm波长范围内的散射损耗 $L_s$ 与 $\lambda^{-p}$ 成正比,其中 $p$ 为大于或等于0至小于2,优选小于1,更优选小于0.5,甚至更优选小于0.3。本发明的至少一些实施方式的另一个有利特征是沿其长度具有基本上均匀的散射能力(例如相对于最大值的变化小于50%,更优选小于30%),并且在离开光纤轴的角度空间具有基本上均匀的散射能力,使得向前、90度方向上(相对于光纤轴)和向后的散射强度几乎相同(例如彼此相差30%以内,优选彼此相差20%以内)。

[0013] 在至少一些实施方式中,对于光纤的目标长度,在照明波长上从光纤侧面出来的积分光强度变化(即扩散光或散射光的强度变化)小于30%。

[0014] 在至少一些实施方式中,光纤的平均散射损耗大于50dB/km,散射损耗在任何给定的长0.2m的光纤段上的变化不超过30%(即散射损耗在平均散射损耗的 $\pm 30\%$ 以内)。根据至少一些实施方式,光纤的平均散射损耗大于50dB/km,散射损耗在长度小于0.05m的光纤段上的变化不超过30%。根据至少一些实施方式,光纤的平均散射损耗大于50dB/km,散射损耗在长0.01m的光纤段上的变化不超过30%(即 $\pm 30\%$ )。

[0015] 本发明的一些实施方式中的光纤和采用这种光纤的照明系统的一个有利特征是:光纤起光源的作用,通过使光均匀地经光纤侧面散射出去而不是从光纤端部传递局域化强光束来照亮所需介质。此外,在一些实施方式中,光纤的使用有利地使通过电驱动的光源能够保持远离光传递点。在电学部件位于离开导电或反应性环境的安全距离处的水性或潜在爆炸性环境中,此事实是最有益的。

[0016] 应理解,前面的一般性描述和以下的详细描述都提出了本发明的实施方式,用来提供理解要求保护的本发明的性质和特性的总体评述或框架。包括的附图提供了对本发明的进一步的理解,附图被结合在本说明书中并构成说明书的一部分。附图举例说明了本发明的各种实施方式,并与描述一起用来解释本发明的原理和操作。

## 附图说明

- [0017] 图1是散光光纤的一个示例性实施方式的一部分的侧面示意图；
- [0018] 图2是图1所示光纤沿方向2-2观察时的横截面示意图；
- [0019] 图3A是散光光纤的一个示例性实施方式的相对折射率-光纤半径曲线示意图；
- [0020] 图3B是散光光纤的另一个示例性实施方式的相对折射率-光纤半径曲线示意图；
- [0021] 图3C呈现了散光光纤的另一个示例性实施方式；
- [0022] 图4A和4B显示了光纤衰减(损耗)(dB/m)和波长(nm)的关系；
- [0023] 图5呈现了在单根光纤内采用双光程的光纤布置方式；
- [0024] 图6A呈现了使光纤具有均匀拉力(实施例A)和可变拉力(实施例B)时沿光纤的强度分布曲线；
- [0025] 图6B呈现了使用白油墨和不用油墨时的散射分布曲线；
- [0026] 图7呈现了图5所示光纤(光纤后端连有反射镜)和涂层中使用白油墨的光纤的散射情况；
- [0027] 图8A呈现了照明系统的一个示例性实施方式；
- [0028] 图8B呈现了与烧瓶式生物室联用的照明系统的一个示例性实施方式；
- [0029] 在以下的详细描述中提出了本发明的附加特征和优点,其中的部分特征和优点对本领域的技术人员而言由所述内容就容易理解,或按下面的描述和权利要求书以及附图所述实施本发明而被认识。

## 具体实施方式

[0030] 下面将详细说明本发明的优选实施方式,这些实施方式的例子在附图中示出。只要有可能,在所有附图中使用相同或类似的附图标记来表示相同或类似的部分。应当理解,本发明所揭示的实施方式仅仅是示例,各自结合本发明的某些优点。

[0031] 可以在本发明范围之内,对以下示例作出各种改进和变化,可以将不同示例的各个方面以不同的方式组合,以获得另外的示例。因此,本发明的真实范围应当从整个说明书来理解,可以参考本文所述的实施方式,但不受其限制。

[0032] 定义

[0033] 出于在附图中指明方向以及方便描述的需要,使用了诸如“水平”、“垂直”、“前”、“后”等词语以及笛卡尔坐标,但其目的并不是在说明书或权利要求书中将它们严格地限制于绝对的取向和/或方向。

[0034] 在下面对本发明的描述中,以下术语和词汇用于具有纳米尺寸结构的散光光纤。

[0035] “折射率分布曲线”是折射率或相对折射率与波导(光纤)半径之间的关系。

[0036] “相对折射率百分数”定义为

$$[0037] \Delta(r)\% = 100 \times [n(r)^2 - n_{\text{参比}}^2] / 2n(r)^2,$$

[0038] 其中,除非另有说明, $n(r)$ 是在半径 $r$ 处的折射率。除非另有说明,相对折射率百分数限定在850nm处。一方面,参比折射率 $n_{\text{参比}}$ 是二氧化硅玻璃在850nm处的折射率1.452498,另一方面,它是包覆玻璃在850nm处的最大折射率。除非另有说明,本文所用的相对折射率用 $\Delta$ 表示,其数值以“%”为单位。在一个区域的折射率小于参比折射率 $n_{\text{参比}}$ 的情况下,相对

折射率是负数,称作具有低陷区域或者低陷折射率(depressed-index),并且除非另有说明,最小相对折射率在相对折射率为最大负值时计算得到。在一个区域的折射率大于参比折射率 $n_{\text{参比}}$ 的情况下,相对折射率是正数,该区域可称为凸起或者具有正折射率。

[0039] 在本文中,“正掺杂剂”(updopant)视为相对于未掺杂的纯 $\text{SiO}_2$ 倾向于提高折射率的掺杂剂。在本文中,“负掺杂剂”(downdopant)视为相对于未掺杂的纯 $\text{SiO}_2$ 倾向于降低折射率的掺杂剂。正掺杂剂可存在于光纤中具有负相对折射率的区域,同时伴有一种或多种不是正掺杂剂的其他掺杂剂。类似地,一种或多种不是正掺杂剂的其他掺杂剂可存在于光纤中具有正相对折射率的区域。负掺杂剂可存在于光纤中具有正相对折射率的区域,同时伴有一种或多种不是负掺杂剂的其他掺杂剂。

[0040] 类似地,一种或多种不是负掺杂剂的其他掺杂剂可存在于光纤中具有负相对折射率的区域。

[0041] 术语“ $\alpha$ -分布曲线”或者“阿尔法分布曲线”表示记作 $\Delta(r)$ (单位为“%”)的相对折射率分布曲线,其中 $r$ 为半径,该参数用以下方程式表示,

$$[0042] \quad \Delta(r) = \Delta(r_0)(1 - [|r - r_0| / (r_1 - r_0)]^\alpha),$$

[0043] 式中 $r_0$ 表示 $\Delta(r)$ 为最大值的点, $r_1$ 表示 $\Delta(r)\%$ 为零的点, $r$ 的范围是 $r_i \leq r \leq r_f$ ,其中 $\Delta$ 如上文所定义, $r_i$ 是 $\alpha$ -分布曲线的起点, $r_f$ 是 $\alpha$ -分布曲线的终点, $\alpha$ 是指数,为实数。

[0044] 因此,本文所用的术语“抛物线”包括基本上呈抛物线形的折射率分布曲线,它在纤芯中的一个或多个点上可稍微偏离 $\alpha$ 值为2.0的情况;“抛物线”还包括有少量变化和/或中心线下沉的分布曲线。在一些示例性实施方式中,在850nm处测量的 $\alpha$ 大于1.5而小于2.5,更优选大于1.7和2.3,甚至更优选在1.8-2.3之间。在其他实施方式中,折射率分布曲线上的一段或多段具有基本上呈阶梯的折射率形状,其中在850nm处测量的 $\alpha$ 值大于8,更优选大于10,甚至更优选大于20。

[0045] 术语“纳米结构光纤区”描述的是光纤具有这样的区域或区间,即该区域或区间具有大量的(多于50个)充气孔隙或其他纳米尺寸结构,例如光纤横截面中的孔隙超过50个、超过100个或者超过200个。充气孔隙可包含例如 $\text{SO}_2$ 、Kr、Ar、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 或其混合物。本文所述的纳米尺寸结构(例如孔隙)的横截面尺寸(例如直径)可在10nm-1 $\mu\text{m}$ 之间变化(例如50-500nm),长度可在1mm-50m之间变化(例如2mm-5m,或者5mm-1m范围)。

[0046] 在标准单模或多模光纤中,在小于1300nm的波长处的损耗主要取决于瑞利(Rayleigh)散射。这些瑞利散射损耗 $L_s$ 由材料性质决定,对于可见光波长(400-700nm)通常约为20dB/km。瑞利散射损耗还对波长具有强依赖性(即 $L_s \propto 1/\lambda^4$ ,参见图4B中比较光纤A),这意味着至少需要约1-2km的光纤才能消散超过95%的输入光。这种光纤若更短,将导致照明效率降低,而使用长光纤(1-2km或者更长)会增大成本,并且可能难于控制。用于生物反应器或其他照明系统时,长光纤安装起来可能比较麻烦。

[0047] 在光照应用的一些装置中适宜采用长度更短的光纤,例如1-100m。这要求增大光纤的散射损耗,同时能够保持良好的角散射性质(光从光纤轴均匀地消散)和良好的弯曲性能,以免在光纤弯曲部形成亮斑。如本文所述,本发明的至少一些实施方式的一个有利特性是沿光纤照明器长度方向的均匀的高照度。因为光纤具有柔韧性,所以可将它布置成许多照明形状。优选在光纤弯曲点没有亮斑(由于弯曲损耗升高),使得光纤提供的照度的变化不超过30%,优选小于20%,更优选小于10%。例如,在至少一些实施方式中,光纤的平均散

射损耗大于50dB/km,散射损耗在任何给定的长0.2m的光纤段上的变化不超过30%(即散射损耗在平均散射损耗的 $\pm 30\%$ 以内)。根据至少一些实施方式,光纤的平均散射损耗大于50dB/km,散射损耗在长度小于0.05m的光纤段上的变化不超过30%。根据至少一些实施方式,光纤的平均散射损耗大于50dB/km,散射损耗在长0.01m的光纤段上的变化不超过30%(即 $\pm 30\%$ )。根据至少一些实施方式,光纤的平均散射损耗大于50dB/km,散射损耗在长0.01m的光纤段上的变化不超过20%(即 $\pm 20\%$ ),优选不超过10%(即 $\pm 10\%$ )。

[0048] 在至少一些实施方式中,对于光纤的目标长度,在照明波长上从光纤侧面出来的积分(扩散)光强度变化小于30%,其中所述光纤的目标长度可以是例如0.02-100m。应当指出,通过在包覆层或涂层中加入荧光材料,可以改变指定在照明波长处通过光纤侧面的积分光强度。荧光材料的光散射波长不同于光纤中传播的光的波长。

[0049] 在下面一些示例性实施方式中,我们将描述具有纳米结构光纤区(具有纳米尺寸结构的区域)的光纤设计,所述纳米结构光纤区位于芯区,或者非常靠近纤芯。一些光纤实施方式的散射损耗超过50dB/km(例如大于100dB/km,大于200dB/km,大于500dB/km,大于1000dB/km,大于3000dB/km,大于5000dB/km),散射损耗(因而这些光纤辐射的照度或光)在角度空间是均匀的。

[0050] 为了减少或消除光纤弯曲部的亮斑,当弯曲直径小于50mm时,光纤中90°弯曲部的衰减增幅宜小于5dB/弯(例如小于3dB/弯,小于2dB/弯,小于1dB/弯)。在示例性实施方式中,这些低弯曲损耗在更小的弯曲直径上得以实现,所述弯曲直径是例如小于20mm,小于10mm,甚至小于5mm。较佳的是,弯曲半径为5mm时,衰减总增幅小于1dB/90°弯。

[0051] 较佳的是,根据一些实施方式,弯曲损耗等于或小于自直光纤纤芯发生的本征散射损耗。本征散射的主要原因是来自纳米尺寸结构的散射。因此,至少根据光纤的弯曲非敏感实施方式,弯曲损耗不超过光纤的本征散射。但是,因为散射水平是弯曲直径的函数,所以光纤的弯曲布置取决于其散射水平。例如,在一些实施方式中,光纤的弯曲损耗小于3dB/弯,优选小于2dB/弯,并且光纤可弯曲成半径小至5mm的弧而不会形成亮斑。

[0052] 图1是散光光纤的示例性实施方式的一部分的侧面示意图,在该具有中心轴(“中心线”)16的散光光纤(以下称“光纤”)12的纤芯中有许多孔隙。图2是沿着图1中方向2-2观察的散光光纤12的横截面示意图。散光光纤12可以是例如各类具有纳米结构光纤区的光纤中的任何一种光纤,所述纳米结构光纤区具有周期性或非周期性纳米尺寸结构32(例如孔隙)。在示例性实施方式中,光纤12包含分成三个部分或区域的纤芯20。这些芯区是:实心中心部分22、纳米结构环形部分(内环芯区)26和围绕所述内环芯区26的外实心部分28。包覆区40(“包覆层”)围绕环芯20并具有外表面。包覆层40可具有低折射率,提供高数值孔径(NA)。包覆层40可以是例如低折射率聚合物,如可UV固化或热固化的含氟丙烯酸酯或硅树脂。

[0053] 任选涂层44围绕包覆层40。涂层44可包含低模量初级涂层和高模量次级涂层。在至少一些实施方式中,涂层44包含聚合物涂料,如基于丙烯酸酯或基于硅树脂的聚合物。在至少一些实施方式中,涂层沿光纤长度具有恒定直径。

[0054] 在下文所述的其他示例性实施方式中,涂层44设计用来改进从纤芯20传到包覆层40的“辐射光”的分布和/或性质。包覆层40的外表面或者任选涂层44的外层代表光纤12的“侧面”,如本文所述,在光纤中行进的光通过散射离开所述侧面。

[0055] 任选用保护罩或包皮(未示出)覆盖包覆层40。光纤12可包含氟化包覆层40,但若将光纤用于长度较短的应用,其中漏损不损害照明性质,则不需要氟化包覆层。

[0056] 在一些示例性实施方式中,散光光纤12的芯区26包含玻璃基体(“玻璃”)31,其中有许多非周期性设置的纳米尺寸结构(例如“孔隙”)32,如图2中放大插图所详细显示的示例性孔隙。在另一个示例性实施方式中,孔隙32可周期性设置,如设置在光子晶体光纤中,其中孔隙的典型直径在约 $1 \times 10^{-6}$ - $1 \times 10^{-5}$ m之间。孔隙32也可非周期性或随机设置。在一些示例性实施方式中,区域26中的玻璃31是掺氟二氧化硅,而在其他实施方式中,玻璃是未掺杂的纯二氧化硅。较佳的是,孔隙直径至少为10nm。

[0057] 纳米尺寸结构32使光从纤芯20向光纤外表面散射。然后,散射的光通过光纤12的外表面“扩散”,提供所需的照明作用。也就是说,大部分光沿着光纤长度通过光纤12的侧面扩散(经由散射)。较佳的是,光纤在其长度上发出基本上均匀的辐射,光纤在发出的辐射的波长(照明波长)上的散射诱导衰减大于50dB/km。较佳的是,在此波长上的散射诱导衰减大于100dB/km。在一些实施方式中,在此波长上的散射诱导衰减大于500dB/km,在一些实施方式中为1000dB/km,大于2000dB/km,以及大于5000dB/km。这些高散射损耗约为标准单模和多模光纤中瑞利散射损耗的2.5-250倍。

[0058] 芯区22和28中的玻璃可包含正掺杂剂,如Ge、Al和/或P。“非周期性设置”或“非周期性分布”是指当取光纤横截面时(如图2所示),孔隙32随机或非周期性地分布在光纤的一部分中。沿着光纤长度上不同的位置取类似的横截面将揭示不同的横截面孔隙图案,也就是说,各横截面具有不同的孔隙图案,而孔隙的分布和孔隙的尺寸不一致。也就是说,所述孔隙是非周期性的,即这些孔隙在光纤结构内不是周期性设置的。这些孔隙沿着光纤的长度(即平行于纵轴)拉长(伸长),但是对于传输光纤的常规长度来说,不会在整根光纤的整个长度上延伸。虽然不希望受到理论限制,但是本发明人相信,孔隙沿着光纤长度延伸小于10m,在许多情况下,延伸小于1m。

[0059] 在本发明中,在下面讨论的照明系统中使用的散光光纤12可通过采用预制件固结条件的方法制备,所述条件使显著量的气体滞留在固结玻璃坯中,从而在固结玻璃光纤预制件中形成孔隙。不是采用一些步骤来除去这些孔隙,而是利用所得的预制件形成其中包含孔隙或纳米尺寸结构的光纤。利用所得光纤的纳米尺寸结构或孔隙,沿着光纤长度,经其侧面使光散射出光纤或将光导出光纤。也就是说,通过光纤外表面将光导出纤芯20,提供所需的照明作用。

[0060] 如本文所用,纳米尺寸结构如孔隙的直径是从横穿光纤纵轴的垂直横截面观察光纤时的最长直线段,其端点a)。例如,美国专利申请序列第11/583098号描述了制备具有纳米尺寸孔隙的光纤的方法,所述文献通过参考结合于此。

[0061] 如上所述,在光纤12的一些实施方式中,纤芯部分22和28包含掺锗二氧化硅,即氧化锗掺杂的二氧化硅。在纤芯内,特别是在光纤中心线16处或附近,可单独或组合使用锗以外的掺杂剂,以得到所需的折射率和密度。在至少一些实施方式中,本文所揭示的光纤在纤芯部分22和28中的相对折射率分布不是负的。这些掺杂剂可以是例如Al、Ti、P、Ge或其组合。在至少一些实施方式中,光纤在纤芯中不含降低折射率的掺杂剂。在一些实施方式中,本文所揭示的光纤在纤芯部分22、24和28中的相对折射率分布不是负的。

[0062] 在本文所用的光纤12的一些示例中,纤芯20包含纯二氧化硅。在一个实施方式中,

光纤的优选特性是在所需的生物材料敏感的光谱范围内使光散射出光纤(使光扩散)的能力。在另一个实施方式中,散射光可用于特色装饰和白光应用。可通过改变光纤中玻璃的性质、纳米结构区26的宽度以及纳米尺寸结构的大小和密度来增加散射损耗量。

[0063] 在本文所用的光纤12的一些示例中,纤芯20是具有渐变折射率的纤芯,较佳的是,纤芯的折射率分布曲线具有抛物线(或者基本上呈抛物线)的形状;例如,在一些实施方式中,纤芯20的折射率分布曲线具有 $\alpha$ 形状,在850nm处测得的 $\alpha$ 值约为2,优选1.8-2.3。在其他实施方式中,折射率分布曲线上的一段或多段具有基本上呈阶梯的折射率形状,其中在850nm处测量的 $\alpha$ 值大于8,更优选大于10,甚至更优选大于20。在一些实施方式中,纤芯的折射率可具有中心线下沉的特点,其中纤芯的最大折射率和整根光纤的最大折射率与中心线16相隔较小距离,但在其他实施方式中,纤芯的折射率没有中心线下沉的特点,纤芯的最大折射率和整根光纤的最大折射率位于中心线处。

[0064] 在一个示例性实施方式中,光纤12具有基于二氧化硅的纤芯20和低陷折射率(相对于二氧化硅)聚合物包覆层40。低折射率聚合物包覆层40具有负的相对折射率,更优选小于-0.5%,甚至更优选小于-1%。在一些示例性实施方式中,包覆层40的厚度等于或大于20 $\mu\text{m}$ 。在一些示例性实施方式中,包覆层40具有比纤芯更低的折射率,其厚度等于或大于10 $\mu\text{m}$ (例如等于或大于20 $\mu\text{m}$ )。在一些示例性实施方式中,包覆层的外径是 $R_{\text{最大}}$ 的两倍,例如约为125 $\mu\text{m}$ (例如120-130 $\mu\text{m}$ ,或者123-128 $\mu\text{m}$ )。在其他实施方式中,包覆层的直径小于120 $\mu\text{m}$ ,例如60或80 $\mu\text{m}$ 。在其他实施方式中,包覆层的外径大于200 $\mu\text{m}$ ,大于300 $\mu\text{m}$ ,或者大于500 $\mu\text{m}$ 。在一些实施方式中,包覆层的外径沿着光纤12的长度保持恒定。在一些实施方式中,光纤12的折射率是径向对称的。较佳的是,纤芯20的外径 $2R_3$ 沿着光纤的长度保持恒定。较佳的是,纤芯部分22、26、28的外径也沿着光纤的长度保持恒定。我们所说的“恒定”是指直径相对于平均值的变化小于10%,优选小于5%,更优选小于2%。图3A是图2所示示例性光纤12的示例性相对折射率 $\Delta$ -光纤半径曲线(实线)。纤芯20也可具有渐变纤芯分布曲线,即 $\alpha$ 分布曲线,例如 $\alpha$ 值在1.8-2.3之间(例如1.8-2.1)。

[0065] 图3A是图2所示示例性光纤12的示例性相对折射率 $\Delta$ -光纤半径曲线(实线)。纤芯20也可具有渐变纤芯分布曲线,其特征是例如1.7-2.3(例如1.8-2.3)之间的 $\alpha$ 值。虚线显示了可选示例性折射率分布曲线。芯区22沿径向从中心线向外延伸至其外径 $R_1$ ,具有相对折射率分布曲线 $\Delta_1(r)$ ,对应于最大折射率 $n_1$ (以及相对折射率百分数 $\Delta_{1\text{最大}}$ )。在此实施方式中,参比折射率 $n_{\text{参比}}$ 是包覆层的折射率。第二芯区(纳米结构区)26具有最小折射率 $n_2$ 、相对折射率分布曲线 $\Delta_2(r)$ 、最大相对折射率 $\Delta_{2\text{最大}}$ 和最小相对折射率 $\Delta_{2\text{最小}}$ ,在一些实施方式中, $\Delta_{2\text{最大}} = \Delta_{2\text{最小}}$ 。第三芯区28具有最大折射率 $n_3$ 、相对折射率分布曲线 $\Delta_3(r)$ ,该相对折射率分布曲线具有最大相对折射率 $\Delta_{3\text{最大}}$ 和最小相对折射率 $\Delta_{3\text{最小}}$ ,在一些实施方式中, $\Delta_{3\text{最大}} = \Delta_{3\text{最小}}$ 。在此实施方式中,环形包覆层40具有折射率 $n_4$ 、相对折射率分布曲线 $\Delta_4(r)$ ,该相对折射率分布曲线具有最大相对折射率 $\Delta_{4\text{最大}}$ 和最小相对折射率 $\Delta_{4\text{最小}}$ 。在一些实施方式中, $\Delta_{4\text{最大}} = \Delta_{4\text{最小}}$ 。在一些实施方式中, $\Delta_{1\text{最大}} > \Delta_{4\text{最大}}$ 且 $\Delta_{3\text{最大}} > \Delta_{4\text{最大}}$ 。在一些实施方式中, $\Delta_{2\text{最小}} > \Delta_{4\text{最大}}$ 。在图2和图3A所示的实施方式中, $\Delta_{1\text{最大}} > \Delta_{3\text{最大}} > \Delta_{2\text{最大}} > \Delta_{4\text{最大}}$ 。在此实施方式中,这些区域的折射率具有以下关系: $n_1 > n_3 > n_2 > n_4$ 。

[0066] 在一些实施方式中,芯区22、28具有基本上恒定的折射率分布,如图3A所示,它们具有恒定的 $\Delta_1(r)$ 和 $\Delta_3(r)$ 。在这些实施方式当中的一些实施方式中, $\Delta_2(r)$ 稍为正[ $0 < \Delta$

$2(r) < 0.1\%$  ]、稍为负 [ $-0.1\% < \Delta 2(r) < 0$ ] 或者为  $0\%$ 。在一些实施方式中,  $\Delta 2(r)$  的绝对值小于  $0.1\%$ , 优选小于  $0.05\%$ 。在一些实施方式中, 外包覆区 40 具有基本恒定的折射率分布, 如图 3A 所示, 它具有恒定的  $\Delta 4(r)$ 。在这些实施方式当中的一些实施方式中,  $\Delta 4(r) = 0\%$ 。纤芯部分 22 的折射率  $\Delta 1(r) \geq 0\%$ 。在一些实施方式中, 填充了孔隙的区域 26 具有相对折射率分布曲线  $\Delta 2(r)$ , 它具有负的相对折射率, 绝对值小于  $0.05\%$ , 而芯区 28 的  $\Delta 3(r)$  可以是例如正值或者零。在至少一些实施方式中,  $n_1 > n_2$  且  $n_3 > n_4$ 。

[0067] 在一些实施方式中, 包覆层 40 的折射率满足  $-0.05\% < \Delta 4(r) < 0.05\%$ 。在其他实施方式中, 包覆层 40 和纤芯部分 20、26 和 28 可包含纯的(未掺杂的)二氧化硅。

[0068] 在一些实施方式中, 包覆层 40 包含纯的或掺 F 二氧化硅。在一些实施方式中, 包覆层 40 包含纯的低折射率聚合物。在一些实施方式中, 纳米结构区 26 包含纯二氧化硅, 其中包含多个孔隙 32。较佳的是, 考虑到任何孔隙的存在, 纳米结构区 26 的最小相对折射率和平均有效相对折射率均小于  $-0.1\%$ 。孔隙 32 可包含一种或多种气体, 如氩气、氮气、氧气、氦气或  $\text{SO}_2$ , 或者可包含基本上没有气体的真空。但是, 不管是否存在任何气体, 纳米结构区 26 中的平均折射率因孔隙 32 的存在而降低。孔隙 32 可随机或非周期性地设置在纳米结构区 26 中, 在其他实施方式中, 孔隙周期性地设置在其中。

[0069] 在一些实施方式中, 所述多个孔隙 32 包含多个非周期性设置的孔隙和多个周期性设置的孔隙。

[0070] 在示例性实施方式中, 纤芯部分 22 包含掺杂了氧化锆的二氧化硅, 内环区 28 包含纯二氧化硅, 包覆环区 40 包含玻璃或者低折射率聚合物。在这些实施方式当中的一些实施方式中, 纳米结构区 26 在纯二氧化硅中包含多个孔隙 32; 而在这些实施方式当中的其他实施方式中, 纳米结构区 26 在掺氟二氧化硅中包含多个孔隙 32。

[0071] 在一些实施方式中, 纤芯的外半径  $R_c$  大于  $10\mu\text{m}$  且小于  $600\mu\text{m}$ 。在一些实施方式中, 纤芯的外半径  $R_c$  大于  $30\mu\text{m}$  且/或小于  $400\mu\text{m}$ 。例如,  $R_c$  可为  $125\text{--}300\mu\text{m}$ 。在其他实施方式中, 纤芯 20 的外半径  $R_c$  (请注意, 在图 3A 中,  $R_c = R_3$ ) 大于  $50\mu\text{m}$  且小于  $250\mu\text{m}$ 。纤芯 20 的中心部分 22 的半径范围是  $0.1R_c \leq R_1 \leq 0.9R_c$ , 优选  $0.5R_c \leq R_1 \leq 0.9R_c$ 。纳米结构环区 26 的宽度  $W_2$  优选为  $0.05R_c \leq W_2 \leq 0.9R_c$ , 优选为  $0.1R_c \leq W_2 \leq 0.9R_c$ , 在一些实施方式中为  $0.5R_c \leq W_2 \leq 0.9R_c$  (在纳米尺寸结构的密度相同的情况下, 纳米结构区越宽, 散射诱导衰减越大)。实心玻璃芯区 28 的宽度  $W_s = W_3$ , 使得  $0.1R_c < W_3 < 0.9R_c$ 。纤芯 20 的每个部分都包含基于二氧化硅的玻璃。纳米结构区 26 的径向宽度  $W_2$  优选大于  $1\mu\text{m}$ 。例如,  $W_2$  可为  $5\text{--}300\mu\text{m}$ , 优选等于或小于  $200\mu\text{m}$ 。在一些实施方式中,  $W_2$  大于  $2\mu\text{m}$  且小于  $100\mu\text{m}$ 。在其他实施方式中,  $W_2$  大于  $2\mu\text{m}$  且小于  $50\mu\text{m}$ 。在其他实施方式中,  $W_2$  大于  $2\mu\text{m}$  且小于  $20\mu\text{m}$ 。在一些实施方式中,  $W_2$  至少为  $7\mu\text{m}$ 。在其他实施方式中,  $W_2$  大于  $2\mu\text{m}$  且小于  $12\mu\text{m}$ 。芯区 28 的宽度  $W_3$  是  $(R_3 - R_2)$ , 其中点  $R_{3\text{中点}}$  是  $(R_3 + R_2)/2$ 。在一些实施方式中,  $W_3$  大于  $1\mu\text{m}$  且小于  $100\mu\text{m}$ 。

[0072] 光纤 12 的数值孔径 (NA) 优选等于或大于将光导入光纤的光源的 NA。较佳的是, 光纤 12 的数值孔径 (NA) 大于  $0.2$ , 在一些实施方式中大于  $0.3$ , 甚至更优选大于  $0.4$ 。

[0073] 在一些实施方式中, 第一芯区 22 的纤芯外半径  $R_1$  优选不小于  $24\mu\text{m}$  且不大于  $50\mu\text{m}$ , 即纤芯直径在约  $48\text{--}100\mu\text{m}$  之间。在其他实施方式中,  $R_1 > 24\mu\text{m}$ ; 在另一些实施方式中,  $R_1 > 30\mu\text{m}$ ; 在又一些实施方式中,  $R_1 > 40\mu\text{m}$ 。

[0074] 在一些实施方式中, 内环状部分 26 在超过  $50\%$  的径向宽度上的  $|\Delta 2(r)| <$

0.025%；在其他实施方式中，区域26在超过50%的径向宽度上的 $|\Delta_2(r)| < 0.01\%$ 。低陷折射率环状部分26从包覆层的相对折射率最先达到小于-0.05%的值处开始，沿径向从中心线向外延伸。在一些实施方式中，包覆层40具有相对折射率分布曲线 $\Delta_4(r)$ ，其最大绝对值小于0.1%，在此实施方式中 $\Delta_{4\text{最大}} < 0.05\%$ 且 $\Delta_{4\text{最小}} > -0.05\%$ ，而低陷折射率环状部分26终止于最外面的孔隙出现的位置。

[0075] 包覆结构40延伸至半径 $R_4$ ，它也是光纤最外面的周界。在一些实施方式中，包覆层的宽度 $R_4 - R_3$ 大于 $20\mu\text{m}$ ；在其他实施方式中， $R_4 - R_3$ 至少为 $50\mu\text{m}$ ；在一些实施方式中， $R_4 - R_3$ 至少为 $70\mu\text{m}$ 。

[0076] 在另一实施方式中，整个纤芯20都是纳米结构化的（例如填充了孔隙），而包覆层40将纤芯20包围。纤芯20具有“阶梯式”折射率 $\Delta$ ，或者具有渐变纤芯分布曲线，即 $\alpha$ 分布曲线，例如 $\alpha$ 值在1.8-2.3之间。

[0077] 对于图3C、4A和6-8所示的例子，光纤预制件和光纤的制备如下：在此示例性实施方式中，通过外蒸汽沉积法(OVD)将470g  $\text{SiO}_2$ （密度为 $0.5\text{g/cc}$ ）烟炱沉积到长1m、直径为20mm的完全固结纯二氧化硅无孔隙芯棒上，得到预制组件（有时称作预制件或光纤预制件），所述预制组件包含被烟炱二氧化硅区包围的固结无孔隙二氧化硅芯区。然后按以下步骤对该预制组件的烟炱包覆层进行烧结。所述预制组件首先在包含氦气和3%氯气（所有的百分数都是体积百分数）的气氛中，在加热炉的上部区域部分，在 $1100^\circ\text{C}$ 的温度下干燥2小时，然后驱动它以 $200\text{mm/min}$ 的速率（相当于在向下驱动的过程中，烟炱预制件外侧的升温速率约为 $100^\circ\text{C/min}$ ）向下通过加热区，所述加热区的温度设定在约 $1500^\circ\text{C}$ ，烧结气氛是100体积%的 $\text{SO}_2$ 。然后驱动所述预制组件以 $100\text{mm/min}$ 的速率（相当于在向下驱动的过程中，烟炱预制件外侧的升温速率约为 $50^\circ\text{C/min}$ ）再次（即第二次）向下通过加热区。然后驱动所述预制组件以 $50\text{mm/min}$ 的速率（相当于在向下驱动的过程中，烟炱预制件外侧的升温速率约为 $25^\circ\text{C/min}$ ）再次（即第三次）向下通过加热区。然后，驱动所述预制组件以 $25\text{mm/min}$ 的速率（相当于在向下驱动的过程中，烟炱预制件外侧的升温速率约为 $12.5^\circ\text{C/min}$ ）再次（即第四次）向下通过加热区，最后以 $6\text{mm/min}$ 的速率（约 $3^\circ\text{C/min}$ 的加热速率）进行烧结，从而将所述烟炱烧成具有 $\text{SO}_2$ 气籽的二氧化硅外包覆层预制件。在每个向下驱动的步骤之后，以 $200\text{mm/min}$ 的速率将所述预制组件向上驱动至加热炉的上部区域部分（该部分继续设定在 $1100^\circ\text{C}$ ）。用该第一系列的较高的向下进料速率使光纤预制件的外侧变光，这便于将气体截留在预制件内。然后在温度设定为 $1000^\circ\text{C}$ 、用氦气吹扫的保温炉内，将所述预制件放置24小时，脱除预制件中残留的任何氦气。然后在温度大致设定为 $1700^\circ\text{C}$ 的常规石墨再拉制炉上，在氦气气氛下将此预制件再拉制成包含无孔隙的 $\text{SiO}_2$ 纤芯和具有 $\text{SO}_2$ 气籽（即包含非周期性设置的包含 $\text{SO}_2$ 气体的孔隙）的二氧化硅外包覆层的坯棒，其直径为10mm，长1m。

[0078] 将一根10mm的坯棒放回车床内，通过OVD再沉积约190g  $\text{SiO}_2$ （密度为 $0.52\text{g/cc}$ ）烟炱。然后通过以下步骤对用于该组件的此包覆层（可以称作外包覆层）的烟炱进行烧结。该组件首先在由氦气和3%氯气组成的气氛中，在 $1100^\circ\text{C}$ 干燥2小时，然后在100体积%的氦气气氛下，驱动它以 $5\text{mm/min}$ 的速率向下通过设定在 $1500^\circ\text{C}$ 的加热区，使得所述烟炱烧结，形成预制件，所述预制件包含含有氧化锆的无孔隙二氧化硅纤芯、具有 $\text{SO}_2$ 气籽的二氧化硅环（即包含含有 $\text{SO}_2$ 的孔隙的二氧化硅）以及无孔隙外包覆层。在温度设定为 $1000^\circ\text{C}$ 、用氦气吹扫的保温炉内，将所述预制件放置24小时，脱除预制件中的任何残留氦气。在石墨电阻炉

上,在氦气气氛中,在约1900-2000℃将光纤预制件拉制成长3km、直径为125 $\mu$ m的光纤。通过监测和控制光纤的拉力来控制光纤预制件的温度;在此实施方式中,在光纤拉制操作的每个部分(例如3km的长度),将光纤拉力保持在30-600g之间的一个数值上。在拉制过程中,给光纤涂覆基于低折射率二氧化硅的涂层。

[0079] 利用另一根如上所述的包含无孔隙二氧化硅纤芯和具有SO<sub>2</sub>气籽的二氧化硅外包覆层的10mm坯棒(即第二坯棒)制造光纤预制件和光纤,其例子示于图4B。更具体地,将第二根包含无孔隙二氧化硅纤芯和具有SO<sub>2</sub>气籽的二氧化硅外包覆层的10mm坯棒放回车床,通过OVD再沉积约3750g SiO<sub>2</sub>(密度为0.67g/cc)烟炱。然后通过以下步骤对用于此包覆层(在此组件中可以称作外包覆层)的烟炱进行烧结。该组件首先在由氦气和3%氯气组成的气氛中,在1100℃干燥2小时,然后在100体积%的氦气气氛下,驱动它以5mm/min的速率向下通过设定在1500℃的加热区,使得所述烟炱烧结,形成预制件,所述预制件包含含有氧化锆的无孔隙纤芯、具有SO<sub>2</sub>气籽的二氧化硅环(即包含含有SO<sub>2</sub>的孔隙的二氧化硅)以及无孔隙外包覆层。在温度设定为1000℃、用氩气吹扫的保温炉内,将所得光纤预制件放置24小时,脱除预制件中的任何残留氦气。最后,如上所述,将光纤预制件拉制成长5km、直径为125 $\mu$ m的光纤,并涂覆低折射率聚合物。

[0080] 图3B呈现了散光光纤12的又一示例性实施方式的示意图。图3B所示光纤包含具有相对折射率 $\Delta_1$ 的纤芯20、位于纤芯20之上并包围纤芯20的纳米结构区26'。纤芯20可具有“阶梯式”折射率分布曲线,或者渐变纤芯分布曲线,即 $\alpha$ 分布曲线,例如 $\alpha$ 值在1.8-2.3之间。

[0081] 在此示例性实施方式中(见图3B),纳米结构区26'是具有多个孔隙32的环带。在此实施方式中,区域26'的宽度可小至1-2 $\mu$ m,可具有负的平均相对折射率 $\Delta_2$ 。包覆层40包围纳米结构区26'。包覆层40的(径向)宽度可小至1 $\mu$ m,该包覆层的相对折射率可以是负的、正的或0%(相对于纯二氧化硅)。图3A和3B所示例子之间的主要区别在于,图3A所示的纳米结构区位于散光光纤12的纤芯20中,而在图3B中,它位于纤芯/包覆层界面上。低陷折射率环状部分26'从纤芯的相对折射率最先达到小于-0.05%的值处开始,沿径向从中心线向外延伸。在图3B所示的实施方式中,包覆层40具有相对折射率分布 $\Delta_3(r)$ ,其最大绝对值小于0.1%; $\Delta_{3最大}<0.05\%$ 且 $\Delta_{3最小}>-0.05\%$ ,低陷折射率环状部分26终止于填充了孔隙的区域内出现最外面的孔隙处。

[0082] 在图3B所示的实施方式中,纤芯20的折射率大于环区26'的折射率 $n_2$ ,而包覆层40的折射率 $n_1$ 也大于折射率 $n_2$ 。

[0083] 图3C呈现了已经制成的光纤12的一个实施方式的纤芯20。此光纤具有外半径R1约为33.4 $\mu$ m的第一芯区22、外径R2=42.8 $\mu$ m的纳米结构区26、外半径R3=62.5 $\mu$ m的第三芯区28和外径R4(未示出)为82.5 $\mu$ m的聚合物包覆层40。在此实施方式中,纤芯材料是纯二氧化硅(未掺杂的二氧化硅),包覆材料是低折射率聚合物[例如,折射率为1.413的可UV固化的硅树脂,可以商品名Q3-6696购自密歇根州米德兰市陶氏-康宁公司(Dow-Corning, Midland, Michigan)],该聚合物与玻璃纤芯一起使光纤的NA为0.3。相比于标准单模传输光纤例如SMF-28e<sup>R</sup>光纤,光纤12对波长具有较平坦(弱)的依赖性,见图4B。在标准单模(如SMF-28<sup>R</sup>)或多模光纤中,在小于1300nm的波长处的损耗主要取决于瑞利散射。这些瑞利散射损耗由材料的性质决定,对可见光波长(400-700nm)通常约为20dB/km。瑞利散射损耗对波长的依赖性与 $\lambda^{-p}$ 成正比, $p \approx 4$ 。在包含至少一个纳米结构区的光纤中,在400-1100nm波长

范围内至少80% (例如大于90%) 的波长上, 依赖于波长的散射损耗的指数小于2, 优选小于1.400-1100nm的平均光谱衰减在以40g的拉力控制光纤时约为0.4dB/m; 在以90g的拉力控制光纤12时约为0.1dB/m。在此实施方式中, 纳米尺寸结构包含SO<sub>2</sub>气体。申请人发现, 纳米结构环中填充SO<sub>2</sub>的空隙极大地促进了散射。此外, 当用SO<sub>2</sub>气体形成纳米结构时, 发现利用此气体可获得热可逆损耗, 即低于600℃时纳米结构化光纤散射光, 而高于600℃时同一光纤将对光起导引作用。SO<sub>2</sub>赋予的这种独特性质也是可逆的, 也就是说, 将同一光纤冷却到低于600℃时, 光纤12将起散光光纤的作用, 并再次产生可观察到的散射效应。

[0084] 在优选的实施方式中, 通过在控制工艺中控制光纤拉力, 控制沿着光纤长度的照明均匀性, 使最小散射照明强度不小于最大散射照明强度的0.7倍。

[0085] 散光光纤12中纳米尺寸结构的存在产生光散射损耗, 经光纤外表面散射出去的光可用于照明目的。图4A是图3C所示光纤(具有填充了SO<sub>2</sub>气体的孔隙的光纤)的衰减(损耗)(dB/m)-波长(nm)曲线。图4A表明, (i)散光光纤12可在可见光波长范围内实现非常大的散射损耗(因此可提供高照明强度)。相比于常规125μm渐变折射率纤芯多模比较光纤A(光纤A是没有纳米结构区的阶梯式折射率多模光纤, 在可见光波长范围内的瑞利散射损耗约为0.02dB/km, 或者在500nm波长处约为20dB/km, 且具有1/λ<sup>4</sup>的强波长依赖性), 光纤12的散射损耗也具有弱波长依赖性(L<sub>s</sub>与1/λ<sup>-p</sup>成正比, 其中p小于2, 优选小于1, 甚至更优选小于0.5)。图4A-4B还显示了光纤12的拉力效应。更具体地, 图4A-4B表明, 控制光纤的拉力越大, 所得散射损耗越小; 控制光纤的拉力越小, 得到散射损耗越大(即照明强度越高)的光纤部分。图4A绘出了在90g和400g的不同光纤拉力下拉制出的散光光纤12(纤芯中有孔隙)的衰减-波长关系图。图4B绘出了在90g和40g的不同光纤拉力下拉制出的不同散光光纤12(纤芯中有孔隙)、具有归一化损耗的比较多模光纤(光纤A)和具有1/λ损耗依赖性的理论光纤的衰减-波长关系图。[说明: 图4B所示图线描述了损耗对波长的依赖性。在此示例中, 为了比较光纤12和光纤A的散射斜率, 将低损耗光纤(光纤A)的损耗乘以20, 使得这两条曲线容易显示在同一幅图中]。虽然不受任何特定理论的限制, 但是本发明人相信, 当控制拉力减小, 例如从90g减小到40g时, 散射损耗之所以增大, 是因为纳米结构的平均直径增大了。因此, 光纤拉力的这种效应可用来沿着光纤长度产生恒定的衰减(照明强度), 具体做法是在控制过程中改变光纤拉力。例如, 在高拉力T<sub>1</sub>下拉制的损耗为α<sub>1</sub>dB/m、长度为L<sub>1</sub>的第一光纤部分将使光功率从输入水平P<sub>0</sub>衰减到P<sub>0</sub>exp(-α<sub>1</sub>\*L<sub>1</sub>/4.343)。在较低拉力T<sub>2</sub>下拉制的损耗为α<sub>2</sub>dB/m、长度为L<sub>2</sub>的第二光纤部分与第一光纤部分光连接后, 将进一步使光功率从P<sub>0</sub>exp(-α<sub>1</sub>\*L<sub>1</sub>/4.343)衰减到P<sub>0</sub>exp(-α<sub>1</sub>\*L<sub>1</sub>/4.343)exp(-α<sub>2</sub>\*L<sub>2</sub>/4.343)。可调节第一和第二光纤部分的长度和衰减, 以便沿着连接好的光纤的长度提供均匀的强度。

[0086] 散光光纤12的优点之一是它们能够沿着散光光纤的长度提供均匀照明。图5呈现了光纤12的一种设置, 该设置沿光纤长度得到均匀照明, 并且在单一散光光纤12中利用双光程。在此设置中, 将反射镜M置于散光光纤12的端部。光源150提供给散光光纤12的输入光沿散光光纤12的轴传播, 余下的光被反射镜反射, 反过来沿光纤12的轴朝输入端传播。若适当选择光纤12的衰减和长度, 则回传到光源的光输出功率小于起始光功率的2%-5%。对于具有恒定损耗分布的光纤(见图4A), 散射损耗强度可能在光纤的头部更高, 而在光纤的尾部更弱。但是, 若以周期性受控的拉力(拉力值与炉温有关, 炉温可从1800℃变化到2100℃)控制散光光纤12, 使得散射损耗在光纤头部更低(强度高)而在尾部更高(强度更低), 则可

使所得散射强度的变化更小,或者说稳定(例如,如图6A所示,示例C)。可在例如40-400g之间控制和改变控制光纤的拉力,从而提供宽范围的散射诱导衰减(例如高达6倍)。图5中的反射镜M也可用第二光源代替,所述第二光源的功率密度输出接近于第一光源的功率密度输出(在2倍的范围内,即在50%-200%的范围内),不仅产生更均匀的照明,而且增加光纤所散射的光的量。

[0087] 生物反应器/照明系统的一个示例性实施方式的一个方面是散射光强度的角度分布在角度空间里是均匀的或接近均匀。自光纤表面沿轴向散射的光相对于平均散射强度的变化小于50%,优选小于30%,优选小于20%,更优选小于10%。在没有纳米尺寸结构的基于二氧化硅的常规光纤中,主要散射机理是瑞利散射,这种散射具有宽角度分布。光纤12若因纳米结构环中的孔隙而具有额外的散射损耗,则可具有强正向分量(forward component),如图6A(实施方式a和b)和图6B(实施方式a')所示。但是,此分布可通过在散光光纤12的涂层顶部设置散射材料来矫正。利用包含基于TiO<sub>2</sub>的白油墨的涂料制成的散光光纤(参见图6B,实施方式b')所提供的散射光角度分布具有明显更小的正向偏置。通过更厚的附加TiO<sub>2</sub>油墨层(例如1-5μm),有可能进一步减小正向散射分量,从而提高角度强度分布的均匀性。但是,如图7所示,若照明器设计可利用与后向反射镜或附加光源光连接的光纤(见图5),则即使光纤没有基于TiO<sub>2</sub>的白油墨涂层,此构造也能提供较平坦(即非常均匀)的角度散射强度(见图6A)。在一些实施方式中,油墨涂层沿着光纤长度的受控变化(油墨涂层厚度或者涂层中油墨浓度的变化)将提供另一种途径,使光纤在大角度(超过15度)上散射的光的强度变化更均匀。

[0088] 在一些实施方式中,油墨可以是将散射光转换成波长更长的光的荧光材料。在一些实施方式中,通过将具有这种涂层的散光光纤12连接到UV光源,例如405nm或445nm二极管激光器,可使光纤12发出白光(从外表面扩散出来)。在示例性实施方式中,荧光白光的角度分布是基本均匀的(例如在角度空间中为25%-400%,优选50-200%,甚至更优选50%-150%,或70%-130%,或80%-120%)。

[0089] 光照系统的构造

[0090] 要将光纤有效连接到低成本光源如发光二极管(LED)或太阳光上,需要光纤具有高NA和大纤芯直径。对于类似于图2所示的设计,可使多模纤芯20的尺寸最大,并且可具有高达500μm的半径。包覆厚度可小得多,例如约为15-30μm(例如约为20μm)。例如,根据一个实施方式,可将多根散光光纤12卷绕在支承结构上,每根散光光纤可光连接到光源或多个光源。多根散光光纤12可捆扎在一起,形成以下至少一种形式:带、带堆(ribbon stack)或圆束(round bundle)。光纤束或光纤带(即多根光纤的集合)也可设置成光源的形状,以提高连接效率。典型的束/带结构可包括例如2-36根散光光纤12,或者可包含最多达数百根光纤12。作为多根光纤的组合件的光缆设计形式是众所周知的,可包括带、多根带的集合或者聚集到管中的光纤。这种光纤可包括一根或多根散光光纤12。

[0091] 单根光纤

[0092] 连接到散光光纤中的连续亮光源可用于不同的应用,如标志或显示照明。若照明系统使用纤芯直径为125-300μm的单根光纤12,则可使用多模激光二极管作为光源,将光提供到光纤12中。图8A显示了一个示例性光照装置(用于显示屏的亮边照明器),该装置使用单根光纤12,所述光纤12具有反射涂层,将光导向一个方向。根据一些实施方式中,利用散

光光纤12实现的单光纤或多光纤照明可用于水性环境,例如用来照亮船坞、鱼线或鱼饵,以及相关应用,这些应用非常需要散光光纤12的小弹性尺寸和安全浸入水中的能力。散光光纤12也可用于出口照明、道路照明、为室内监测器发射IR辐射,或者用作衣物,特别是防护/反射衣物中的线,以进一步提高穿着者的可见性。在装饰性照明中使用散光光纤12的例子有很多,但有些例子是用于器具发光和边缘效果,汽车/航空器照明,或者家用和家具照明。

[0093] 图8B呈现了生物生长系统98和用于该生物生长系统的照明系统100,其中生物室170是具有内部172的烧瓶。光源150和光连接系统160被构造用来将光从光源接入光导纤维的输入端。低散射光导纤维12A的输出端与散光光纤12(光源光纤)的输入端相连。在图8B所示的实施方式中,光源光纤12由单根逆绕光纤形成。应当指出,光纤12可卷绕在支撑结构上,形成光源光纤部分,其中导光从光纤外表面散射,形成延伸光源,发出基本均匀的辐射。在光源光纤部分形成弯曲,提高散光光纤12中的散射量。逆绕至少一根光纤可补偿发出的辐射沿着光源光纤部分的长度下降的效应,从而提高辐射均匀性。可将多根光纤12依次卷绕到支撑结构上,每根光纤与光源相连,可用来形成很长的延伸光源。散光光纤12可被构造成为适合各种生物室几何形状,为生物材料180的生物材料生长提供光。生物材料180可以是例如海藻(例如海藻群落、藻华)或细菌(例如蓝细菌)。在一个示例性实施方式中,生物材料180可悬浮在支持介质184如水中。

[0094] 涂层

[0095] 在一个示例性实施方式中,光纤12可包含上面结合图2所讨论的涂层44。在一个示例性实施方式中,涂层44包括亲水涂层,如提供改进的湿黏附性的UV固化丙烯酸酯涂层。涂层可以是可UV固化的涂层,包含邻近玻璃的低模量初级涂层(通常<3MPa)和模量较高的次级涂层(通常>50MPa)。模量较高的次级涂层邻近并位于初级(模量较低的)涂层之上。也可利用其他的或者附加的涂层,作为单层涂层或者作为多层涂层中的一层施涂。这种材料的例子有亲水涂层44A(未示出),它起细胞生长培养基的作用,或者作为包含能使逸出光额外散射的材料的涂层。这些涂层也可用作光纤12的保护性覆盖层。

[0096] 用于涂层44的示例性亲水涂层44是那些常用来促进细胞黏附和生长到表面上并且包含羧酸官能团和胺官能团(例如包含丙烯酸或丙烯酰胺的制剂)的涂层。此外,可对亲水涂层44A进行强化,将其用作生物材料生长所必需的营养物的储器。

[0097] 在一些示例性实施方式中,涂层44包含吸收荧光或紫外光的分子,用来改进辐射光。涂层中还可包含合适的向上或向下转换分子,用来产生波长不同于输入光源的波长的光。还可施涂油墨涂层,以改变发出的光的颜色或色调。其他涂层实施方式包含能使光纤发出的光发生额外散射的分子。另一个实施方式可将光活性催化剂加到涂层上,可用来增大光反应速率。这种催化剂的一个例子是作为光催化剂的金红石TiO<sub>2</sub>。

[0098] 根据一些实施方式,散光光纤12可包在聚合物、金属或玻璃覆盖层(或涂层)中,其中所述涂层或覆盖层具有大于250μm的最小外尺寸(例如直径)。若光纤具有金属涂层,则金属涂层可包含开口部分,以便将光优先导入给定区域。这些附加涂层或覆盖层还可包含其他化合物,以便按照与上面所述的涂覆在光纤上的涂层相同的方式改变发出的光或者对反应进行催化。

[0099] 如上所述,散光光纤12可包含设置在光纤外表面上的亲水涂层。同样,可在光纤涂层中设置荧光物质(例如紫外光吸收材料),以及能够使发出的光发生额外散射的分子。A根

据一些实施方式,与散光光纤12连接的光源产生200–500nm波长范围内的光,光纤涂层内的荧光材料(荧光物质)产生白光、绿光、红光或NIR(近红外)光。

[0100] 此外,可在光纤外表面上提供附加涂层。此层可构造用来改进辐射光,改变涂层材料的相互作用。这种涂层的例子是分别包含诸如但不限于聚(2-丙烯酸酰胺基-2-甲磺酸)、邻硝基苄基或偶氮苯部分之类的材料的涂层。

[0101] 示例性照明系统的构造

[0102] 照明系统的一些示例性实施方式包含:(i)产生具有200–2000nm范围内的至少一种波长 $\lambda$ 的光源;以及(ii)至少一根散光光纤12。光纤12包含纤芯、包覆层和多个位于纤芯内或纤芯-包覆层边界处的纳米尺寸结构32。此光纤还包含外表面以及至少一个与光源光连接的端部。如上所述,散光光纤12被构造用来通过纳米尺寸结构如孔隙散射导光,使其离开纤芯,通过外表面,形成具有一定长度的光源光纤部分,所述光源光纤部分沿其长度发出基本均匀的辐射。对于200–2000nm范围内(例如400–700nm,或者1–2 $\mu\text{m}$ )的一个或多个波长,散光光纤12的散射诱导衰减大于50dB/km。光纤12可具有多个形成于其中的弯曲部,以便优先在指定区域通过纳米尺寸结构32散射光,使其离开纤芯20,通过外表面。较佳的是,在所述长度上,散射光照明强度的偏差小于最大散射照明强度的30%。根据一些实施方式,散射诱导衰减在100–6000dB/km之间或者更高。在一些实施方式中,对位于200–2000nm范围内的一个或多个波长,由光纤12的散射引起的衰减是6000–20000dB/km。根据一些实施方式,光纤12的长度在0.5–100m之间,对位于200–2000nm范围内的一个或多个波长的散射诱导衰减在300–5000dB/km之间,且/或大于3dB/光纤长度。在其他实施方式中,光纤12的长度在0.1–0.5m之间,对位于200–2000nm范围内的一个或多个波长的散射诱导衰减在5000–20000dB/km之间。较佳的是,纳米尺寸结构32是充气孔隙(例如填充 $\text{SO}_2$ 的孔隙),其直径大于10nm,优选大于50nm,更优选大于100nm。较佳的是,光纤包覆层是玻璃或聚合物,至少厚20 $\mu\text{m}$ 。包覆层与所述纤芯一起提供0.2或更大的NA。如上所述,通过在控制过程中控制光纤拉力,可实现照明沿光纤长度的均匀性(与最大强度相差约30%,优选与最大强度相差约20%以内,更优选与最大强度相差约10%以内)。如前所述,在与连接到光源的光纤端相反的光纤端连接反射器,利用此反射器可进一步降低照明均匀性。

[0103] 因此,根据一些实施方式,散光光纤12包含至少部分填充用来散射光的纳米结构的纤芯、围绕纤芯的包覆层以及至少一个围绕包覆层的涂层。例如,纤芯和包覆层可被初级和次级涂层以及/或者油墨层包围。在一些实施方式中,油墨层包含颜料,以提供额外的吸收,并改进光纤所散射的光的光谱[例如为扩散的光提供额外的颜色]。在其他实施方式中,一个或多个涂层包含对通过纤芯传播的光的波长进行转换的分子,使从光纤涂层发出的光(被光纤扩散的光)具有不同的波长。在一些实施方式中,油墨层和/或涂层可包含磷光体,以便将从纤芯出来的散射光转换为不同波长的光。在一些实施方式中,磷光体和/或颜料分散在初级涂层中。在一些实施方式中,颜料分散在次级涂层中;在一些实施方式中,颜料分散在初级和次级涂层中。在一些实施方式中,磷光体和/或颜料分散在聚合物包覆层中。

[0104] 根据一些实施方式,光纤12包含初级涂层、包围初级涂层的任选次级涂层和/或油墨层(例如直接位于包覆层或者涂层之一上)。初级和/或次级涂层可包含下面至少一种材料:颜料、磷光体、荧光材料、UV吸收材料、亲水材料、调光材料或其组合。

[0105] 多根散光光纤12可通过下面至少一种形式捆扎在一起:带、带堆或圆束。光纤束或

带(即多根光纤的集合)也可设置成光源的形状,以提高连接效率。典型的束/带结构可包含例如2-36根散光光纤12,或者加上叠置的光纤,可包含多达数百根光纤12。

[0106] 如上所述,光纤可包含设置在光纤外表面上的亲水涂层。或者,亲水涂层可设置在光纤带的外表面上。光纤带也可设置成光源的形状,使散光光纤12与光源之间能够更好地连接。带状结构带来的一个优点是不需要卷绕单根光纤,因为光纤带可形成弯曲结构,如波状、螺旋状或螺线状,从而使光能够散射到所需区域。此外,使用多条光纤带有可能得到大堆的光纤带。这种光纤带堆可提供聚集量更大的光,同时为不同光源如红色激光、太阳光、发光二极管的使用或者点光源的传导开辟了可能性。例如,根据一个实施方式,可将多根散光光纤12光连接到单一光源或者多个光源,同时将散光光纤12捆扎成下面至少一种形式:带、带堆或圆束。此外,散光光纤12的束或带可通过传输光纤连接到光源,所述传输光纤能够以最小的损耗将光导向散光光纤。可以预期,后面这种构造对远程光照应用非常有用,其中光是从远离光的输送目的地的光源收集的。

[0107] 应当理解,以上的描述只是本发明的示例,用来提供综览,以理解本发明的性质和特征,本发明的性质和特征由权利要求书限定。包括的附图提供了对本发明的进一步理解,附图被结合在本说明书中并构成说明书的一部分。附图举例说明了本发明的各种特征和实施方式,并与描述一起用来解释本发明的原理和操作。对本领域的技术人员显而易见的是,在不偏离所附权利要求书限定的本发明的精神或范围的情况下,可以对本文所述的本发明的优选实施方式进行各种修改。

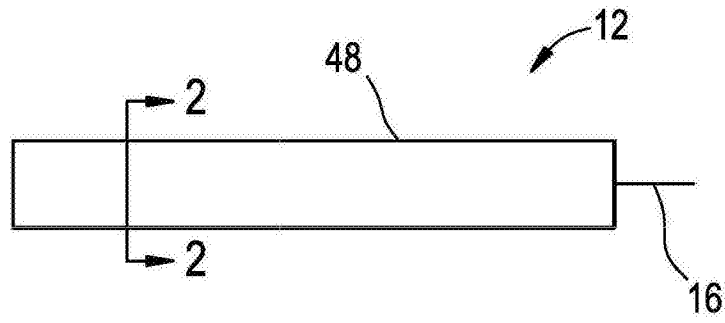


图1

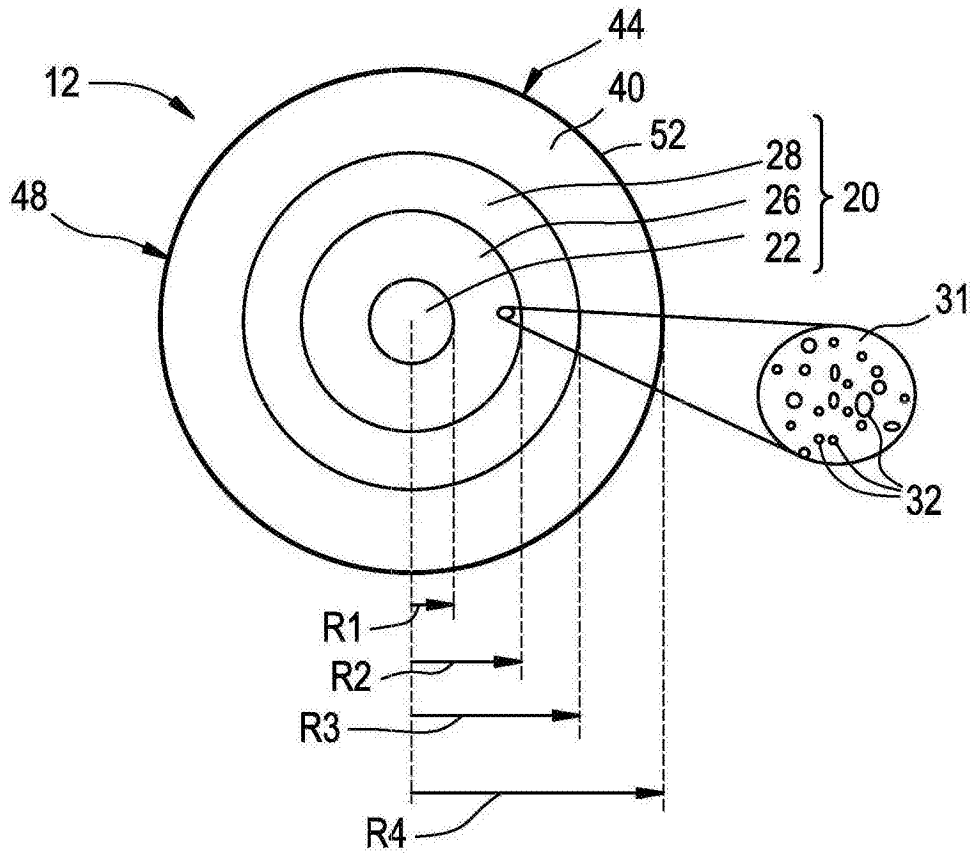


图2

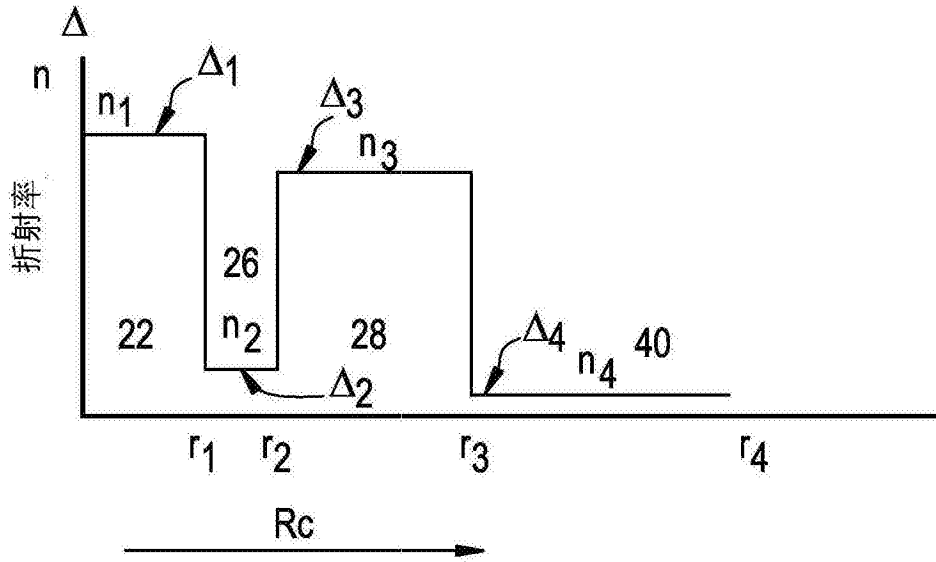


图3A

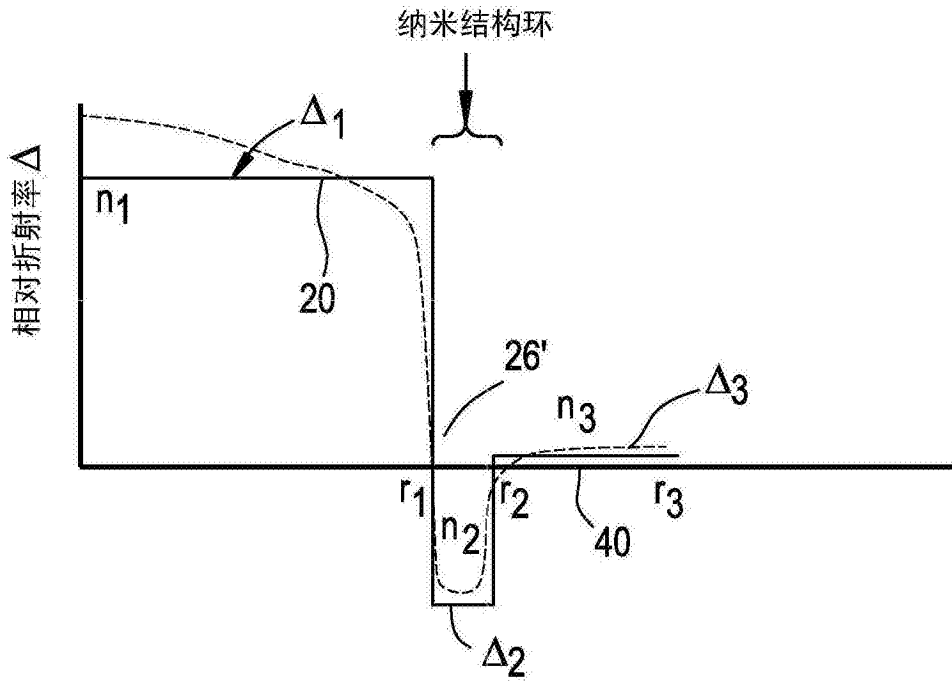


图3B

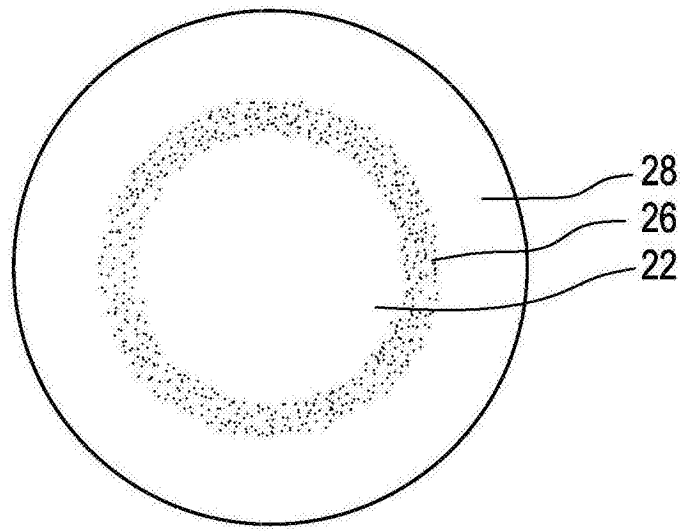


图3C

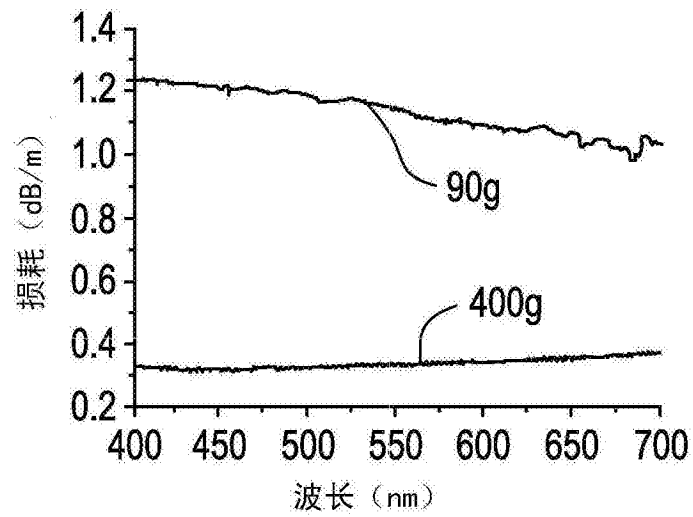


图4A

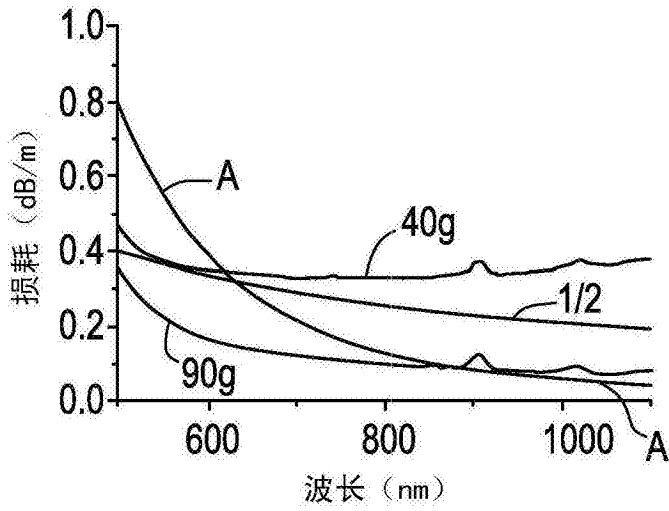


图4B

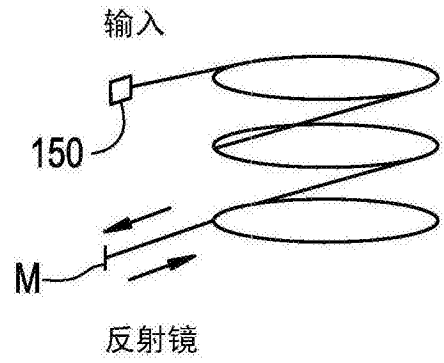


图5

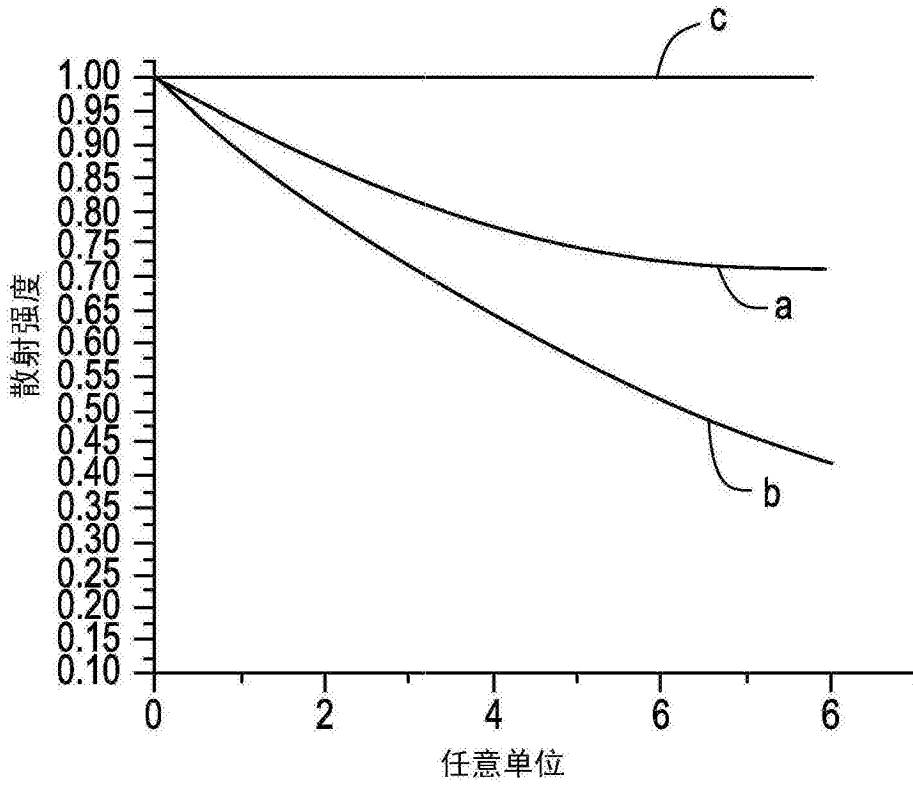


图6A

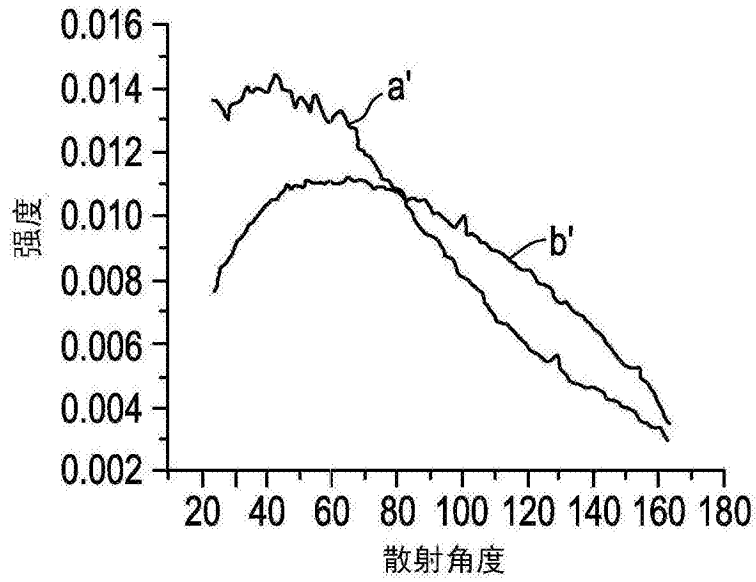


图6B

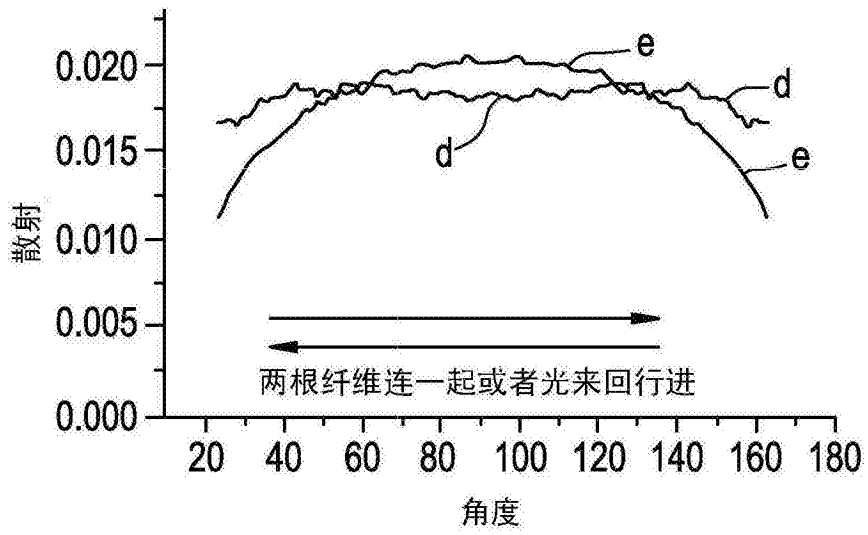


图7

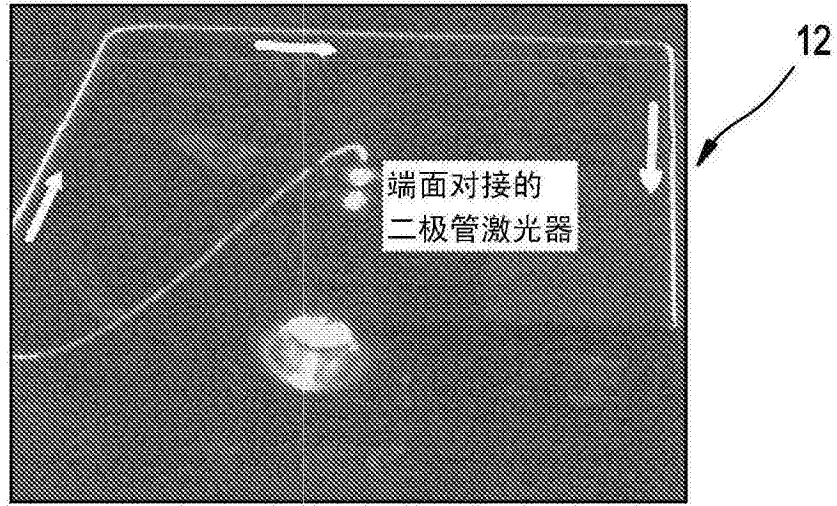


图8A

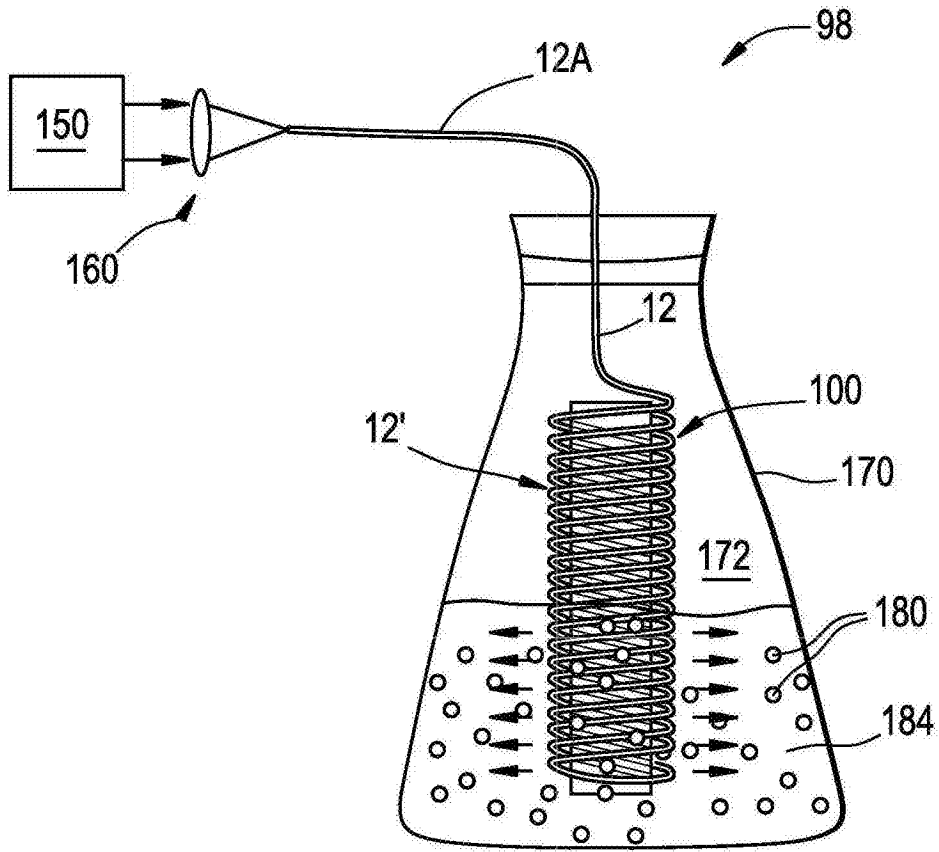


图8B