



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103080796 B

(45) 授权公告日 2016. 04. 27

(21) 申请号 201180040713. 5

C03B 37/027(2006. 01)

(22) 申请日 2011. 06. 27

H01S 3/067(2006. 01)

(30) 优先权数据

61/358709 2010. 06. 25 US

(56) 对比文件

WO 02/088801 A2, 2002. 11. 07,

US 2005/0152655 A1, 2005. 07. 14,

US 2009/0201953 A1, 2009. 08. 13,

Boris T. Kuhlmeier 等. Photonic crystal

fibres with resonant coatings. 《Physica B》. 2007, 第 394 卷 155-158.

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2013. 02. 22

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/DK2011/050242 2011. 06. 27

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/160646 EN 2011. 12. 29

审查员 李国琛

(73) 专利权人 NKT 光子学有限公司

地址 丹麦比克勒

(72) 发明人 T·T·奥克塞卓德

(74) 专利代理机构 北京泛华伟业知识产权代理

有限公司 11280

代理人 王勇 王博

(51) Int. Cl.

G02B 6/032(2006. 01)

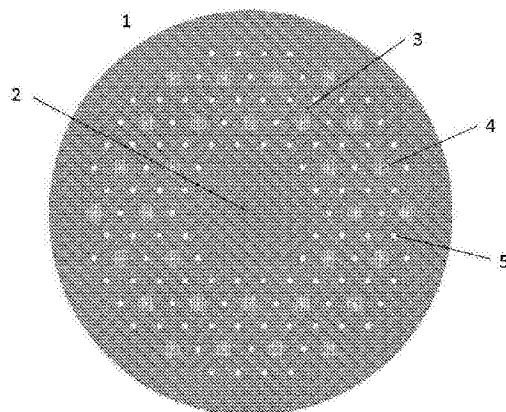
权利要求书2页 说明书12页 附图13页

(54) 发明名称

大纤芯面积的单模光纤

(57) 摘要

本发明涉及用于传导光信号的单模光纤。光纤的纤芯区域能够以纤芯基模传导光信号波长上的光信号。包层区域布置为包围纤芯区域且包括内包层区域和外包层区域。内包层区域包括背景材料和布置在所述背景材料中的多个内包层部件,其中至少有多个所述多个内包层部件为第一类型的部件。第一类型的部件包括由高折射率区域包围的气孔,其中高折射率区域包括的高折射率材料的折射率大于内包层背景材料的折射率。多个所述第一类型的部件支持了有效折射率为 n_1 的光学模式,其中 n_1 小于或等于在所述光信号波长上的纤芯基模的有效折射率。该光纤可包括有源材料并作为包层泵浦的光纤放大器来使用。



1. 一种单模光纤,用于传导光信号,所述光纤具有纵向的光轴以及垂直于该光轴的横截面,所述光纤包括:

纤芯区域,其能够以有效折射率为 n_c 的纤芯基模传导光信号波长为 λ_1 的光信号;

包层区域,其包围纤芯区域,该包层区域包括内包层区域和外包层区域,所述内包层区域包括折射率为 n_b 的背景材料以及布置在所述背景材料中的多个内包层部件,其中至少有一个所述多个内包层部件为第一类型的部件,所述第一类型的部件包括由高折射率区域包围的气孔,其中高折射率区域包括折射率 n_r 的高折射率材料,折射率 n_r 大于内包层背景材料的折射率,所述第一类型的部件支持有效折射率为 n_1 的光学模式,其中 n_1 小于或等于在所述光信号波长 λ_1 上的纤芯基模的有效折射率 n_c ,

其中所述纤芯区域的最大的横截面尺寸大于 $40\mu\text{m}$,

以及其中高折射率材料和内包层背景材料之间的折射率差小于 $1 \cdot 10^{-2}$ 。

2. 根据权利要求1所述的光纤,其中所述多个内包层部件还包括包括气孔的第二类型的部件。

3. 根据权利要求1所述的光纤,其中所述多个内包层部件是大体圆形的。

4. 根据权利要求1所述的光纤,所述光纤能够被包层泵浦或是纤芯泵浦且适于放大光信号,纤芯区域包括掺杂有至少一种有源成分的材料;以及内包层区域能够传导泵浦波长为 λ_p 的泵浦信号。

5. 根据权利要求1所述的光纤,其中纤芯区域具有纤芯有效折射率,该纤芯有效折射率大体上等于内包层背景材料的折射率。

6. 根据权利要求1所述的光纤,其中掺杂有有源成分的材料大体上布置在所述纤芯区域的有源部分,所述有源部分围绕所述纤芯区域的中心部分,以及其中所述有源部分被布置为使得纤芯基模具有与有源部分的模场重叠,该模场重叠低于50%。

7. 根据权利要求1所述的光纤,其中所述纤芯区域掺杂有一种或多种材料,所述材料选自氟(F)、锗(Ge)、铈(Ce)或其组合构成的组。

8. 根据权利要求1所述的光纤,其中所述内包层部件大体上布置为周期为 Λ 的周期晶格,以及其中所述晶格的周期 Λ 使得比值 Λ/λ_1 大于5。

9. 根据权利要求8所述的光纤,其中所述内包层部件大体上布置为六角形晶格。

10. 根据权利要求8所述的光纤,其中所述第一类型部件的气孔的直径 d_1 使得比值 d_1/Λ 小于0.3。

11. 根据权利要求1所述的光纤,其中所述第一类型部件的高折射率区域包括掺锗的硅。

12. 根据权利要求2所述的光纤,其中所述内包层部件大体上布置为六角形晶格,且围绕第一类型部件的六个最邻近的部件为所述第二类型部件。

13. 根据权利要求1所述的光纤,其中所述第一类型的部件能够支持一种光学模式,其在光信号波长 λ_1 上的有效折射率小于纤芯基模的有效折射率,且在小于光信号波长 λ_1 的波长区域上的有效折射率大于或等于纤芯基模的有效折射率。

14. 根据权利要求1所述的光纤,其中所述光纤为棒状光纤。

15. 根据权利要求6所述的光纤,其中所述有源部分大体上由围绕纤芯区域中心部分的横截面环形区域形成。

16. 一种包层泵浦的光纤, 用于放大光信号, 所述光纤具有纵向的光轴以及垂直于该光轴的横截面, 所述光纤包括:

纤芯区域, 其包括掺杂有至少一种有源成分的材料; 所述纤芯区域能够以有效折射率为 n_c 的纤芯基模传导光信号波长为 λ_1 的光信号;

包层区域, 其包围纤芯区域, 该包层区域包括内包层区域和外包层区域, 内包层区域能够传导泵浦波长为 λ_p 的泵浦信号, 所述内包层区域包括折射率为 n_b 的背景材料以及布置在所述背景材料中的多个内包层部件, 其中至少多个所述多个内包层部件为第一类型的部件, 所述第一类型的部件包括由高折射率区域包围的气孔, 其中高折射率区域包括折射率 n_r 的高折射率材料, 折射率 n_r 大于内包层背景材料的折射率, 所述第一类型的部件被布置为提供至少一种抑制高阶纤芯模式的包层模式。

17. 一种用于制造根据权利要求1的光纤的方法, 所述方法包括:

I. 提供至少一个纤芯预制元件和多个内包层预制元件;

II. 以预制件的形式设置所述纤芯预制元件和所述内包层预制元件, 使得所述内包层预制元件包围所述纤芯预制元件;

III. 将所述预制件拉丝为光纤;

其中所述内包层预制元件包括多个第一类型的预制元件, 其包括由高折射率区域包围的气孔。

18. 根据权利要求17所述的方法, 还包括布置多个外包层预制元件和/或外包层预制筒以包围该纤芯预制元件和该内包层预制元件。

19. 一种光放大系统, 用于放大光信号波长为 λ_1 的光信号, 所述系统包括

I. 根据权利要求1所述的单模光纤;

II. 泵浦光源, 其能够提供泵浦波长为 λ_p 的泵浦光, 所述泵浦光源光学地耦合至所述单模光纤; 以及

III. 种子光源, 被布置为向所述单模光纤的纤芯中发射光信号。

大纤芯面积的单模光纤

技术领域

[0001] 本发明涉及包括包含由高折射率区域包围的气孔的微结构的大纤芯面积(large core area)的单模光纤及其制造方法,以及这种光纤的多种应用,例如用于光信号的放大。

背景技术

[0002] 单模光纤及其应用在本领域是公知的。在一种配置中,能够传导泵浦光的包层区域包围单模纤芯,其中泵浦光用于光学地泵浦光纤材料中所包括的有源成分(active element)。

发明内容

[0003] 从下述几部分来描述本发明的各种实施例。

[0004] 本发明的目的之一在于提供一种用于传导光信号的单模光纤,所述光纤具有纵向的光轴以及垂直于该光轴的横截面,所述光纤包括纤芯区域和包层区域。纤芯区域能够以有效折射率为 n_c 的纤芯基模传导光信号波长为 λ_1 的光信号。包层区域被设置为包围纤芯区域,且包括内包层区域和外包层区域。内包层区域包括折射率为 n_b 的背景材料以及布置在所述背景材料中的多个内包层部件,其中至少有多个所述多个内包层部件为第一类型的部件。第一类型的部件包括由高折射率区域包围的气孔,其中高折射率区域包括的高折射率材料的折射率 n_r 大于内包层背景材料的折射率。该多个第一类型的部件支持了有效折射率为 n_1 的光学模式,其中 n_1 小于或等于在所述光信号波长上的纤芯基模的有效折射率。

[0005] 本发明的目的之一在于提供一种单模包层泵浦的光纤,用于放大光信号,所述光纤具有纵向的光轴以及垂直于该光轴的横截面。所述光纤包括纤芯区域和包层区域。纤芯区域包括掺杂有至少一种有源成分的材料,且能够以有效折射率为 n_c 的纤芯基模传导光信号波长为 λ_1 的光信号。包层区域包围纤芯区域,且包括能够传导泵浦波长为 λ_p 的泵浦信号的内包层区域,以及外包层区域。内包层区域包括折射率为 n_b 的背景材料以及布置在所述背景材料中的多个内包层部件。至少有多个所述多个内包层部件为第一类型的部件,所述第一类型的部件包括由高折射率区域包围的气孔,其中高折射率区域包括的高折射率材料的折射率 n_r 大于内包层背景材料的折射率 n_b 。该多个第一类型的部件支持有效折射率为 n_1 的光学模式,其中 n_1 小于或等于在所述光信号波长上的纤芯基模的有效折射率。

[0006] 在本发明的上下文中,与术语“高折射率区域”和“高折射率材料”相关使用的术语“高折射率”指的是大于内包层背景材料折射率的折射率。

[0007] 在本发明的上下文中,术语“内包层背景材料”指的是一种材料或具有大致相同的折射率的多种材料,若测量由该特定材料制成的内包层区域的横截面面积的各部分,那么内包层背景材料构成内包层的大部分,例如至少占50%的面积,例如至少占60%的面积,例如至少占70%的面积,例如至少占80%的面积,例如至少占90%的面积,例如至少占95%的面积。该内包层背景材料还可包括具有相似折射率的两种材料。

[0008] 在本发明的上下文中,诸如内包层区域的面积的区域或成分的面积,除另有规定

外指的是所述区域或成分的横截面面积。同样地,例如直径或厚度的尺寸是横截面尺寸,除非另有说明。

[0009] 本发明的目的之一在于提供一种用于制造根据本发明的光纤的方法。该方法包括:提供至少一种纤芯预制元件和多个内包层预制元件,并以预制件的形式设置所述纤芯预制元件和所述内包层预制元件。预制元件被布置为使得所述内包层预制元件包围所述纤芯预制元件。可选地,布置多个外包层预制元件和/或外包层预制筒包围该纤芯预制元件和该内包层预制元件。随后所述预制件被拉丝为光纤。该内包层预制元件包括多个第一类型的预制成分,其包括由高折射率区域包围的气孔。

[0010] 在本发明方法的一个实施例中,气孔的半径和高折射率材料区域的厚度之间的比值小于1。

[0011] 本发明的目的之一在于提供一种包层泵浦光纤,用于光信号放大,所述光纤具有纵向的光轴以及垂直于该光轴的横截面。所述光纤包括纤芯区域和包层区域。纤芯区域包括掺杂有至少一种有源成分的材料;所述纤芯区域能够以有效折射率为 n_c 的纤芯基模传导光信号波长为 λ_1 的光信号。包层区域被布置为包围纤芯区域,该包层区域包括内包层区域和外包层区域。该内包层区域能够传导泵浦波长为 λ_p 的泵浦信号。内包层区域包括折射率为 n_b 的背景材料,以及布置在所述背景材料中的多个内包层部件,其中至少有多个所述多个内包层部件为第一类型的部件。第一类型的部件包括由高折射率区域包围的气孔,其中高折射率区域含有的高折射率材料的折射率 n_r 大于内包层背景材料的折射率 n_b 。多个所述第一类型的部件被布置为提供至少一种抑制高阶纤芯模式的包层模式。

[0012] 本发明的目的之一在于提供一种光放大系统,用于放大光信号波长为 λ_1 的光信号,所述系统包括根据本发明的单模包层泵浦光纤、泵浦光源以及种子光源。泵浦光源能够提供泵浦波长为 λ_p 的泵浦光,所述泵浦光源光学地耦合至所述包层泵浦光纤。种子光源被布置为向所述包层泵浦光纤的纤芯中发射光信号。

[0013] 本发明的目的之一在于提供一种光学激光系统,用于发射光信号波长为 λ_1 的光信号,所述系统包括根据本发明的包层泵浦光纤,以及能够提供泵浦波长为 λ_p 的泵浦光的泵浦光源,所述泵浦光源光学地耦合至所述包层泵浦光纤。

[0014] 该包层泵浦光纤的单模纤芯可具有较大的横截面面积,借此通过在每纤芯面积单元上降低信号强度,使得纤芯材料中的非线性光学效应的影响减弱了。

[0015] 在一个实施例中,纤芯区域的纤芯有效折射率大致等于内包层背景材料的折射率。在一个实施例中,纤芯有效折射率与内包层背景材料折射率之间的折射率差约为 $5 \cdot 10^{-4}$ 或更少,例如约为 $2 \cdot 10^{-4}$ 或更少,例如约为 $1 \cdot 10^{-4}$ 或更少,例如约为 $5 \cdot 10^{-5}$ 或更少。

[0016] 在一个实施例中,纤芯区域的最大的横截面尺寸大于约 $20\mu\text{m}$,例如大于约 $30\mu\text{m}$,例如大于约 $40\mu\text{m}$,例如大于约 $50\mu\text{m}$,例如大于约 $75\mu\text{m}$,例如大于约 $100\mu\text{m}$,例如大于约 $125\mu\text{m}$,例如大于约 $150\mu\text{m}$,例如大于约 $175\mu\text{m}$,例如大于约 $200\mu\text{m}$,例如大于约 $300\mu\text{m}$ 。在一个实施例中,纤芯区域的最大的横截面尺寸小于约 $2000\mu\text{m}$,例如小于约 $1500\mu\text{m}$,例如小于约 $1000\mu\text{m}$,例如小于约 $750\mu\text{m}$,例如小于约 $500\mu\text{m}$ 。

[0017] 在本申请的上下文中,诸如纤芯区域的光纤区域的术语“最大横截面尺寸”指的是区域的圆形横截面的直径、或区域的非圆形横截面的外接圆的直径。

[0018] 在一个实施例中,纤芯区域的最大横截面尺寸大于约20倍的 λ_1 ,例如大于约30倍

的 λ_1 ,例如大于约40倍的 λ_1 ,例如大于约50倍的 λ_1 ,例如大于约60倍的 λ_1 ,例如大于约75倍的 λ_1 ,例如大于约100倍的 λ_1 ,例如大于约125倍的 λ_1 ,例如大于约150倍的 λ_1 ,例如大于约200倍的 λ_1 ,例如大于约300倍的 λ_1 。在一个实施例中,纤芯区域的最大横截面尺寸小于约2000倍的 λ_1 ,例如小于约1500倍的 λ_1 ,例如小于约1000倍的 λ_1 ,例如小于约750倍的 λ_1 ,例如小于约500倍倍的 λ_1 。

[0019] 在一个实施例中,所述纤芯区域的面积在约 $300\mu\text{m}^2$ 至约 $67500\mu\text{m}^2$ 的区间内,例如在约 $600\mu\text{m}^2$ 至约 $50000\mu\text{m}^2$ 的区间内,例如在约 $750\mu\text{m}^2$ 至约 $40000\mu\text{m}^2$ 的区间内,例如在约 $1000\mu\text{m}^2$ 至约 $35000\mu\text{m}^2$ 的区间内,例如在约 $1200\mu\text{m}^2$ 至约 $32000\mu\text{m}^2$ 的区间内,例如在约 $1500\mu\text{m}^2$ 至约 $25000\mu\text{m}^2$ 的区间内,例如在约 $1900\mu\text{m}^2$ 至约 $18000\mu\text{m}^2$ 的区间内,例如在约 $2000\mu\text{m}^2$ 至约 $15000\mu\text{m}^2$ 的区间内。

[0020] 光纤可包括选自硅玻璃、硫系玻璃以及软玻璃的组中的材料。

[0021] 光纤可为棒状光纤,其外直径大于约0.5mm,例如大于约0.75mm,例如大于约1mm,例如大于约1.5mm,例如大于约2mm。

[0022] 由于存在有将能量从泵浦光传输至信号光的有源材料,因而在纤芯区域中传播的光信号得到了放大。该有源成分可包括稀土元素,选自于下述成分构成的组:镱(Yb)、铒(Er)、镨(Pr)、钕(Nd)、钬(Ho)、铥(Tm)、镝(Dy)或其组合,例如铒(Er)和镱(Yb)的组合。

[0023] 可以以多种方式将这种掺杂有有源成分的材料布置在纤芯区域中。在一个实施例中,有源成分大体上均匀地分布在纤芯区域中。有源部分可至少部分地包含在所述纤芯区域中和/或所述包层区域中。在一个实施例中,有源区域包括环形区域。该环形区域可包括包围所述纤芯区域中心的连续环。

[0024] 对于某些应用来说,有源光纤中的光子暗化是一个问题。如共同待决的专利权合作条约申请PCT/DK2009/050314中所描述的,可通过减少传导的光信号与有源区域的重叠来减弱光子暗化随时间发生的程度。可通过多种方式来减少模态(modal)的重叠。在一个实施例中,在距所述纤芯区域中心的第二半径距离 r_2 上的有源成分的浓度高于距所述纤芯区域中心的第一半径距离 r_1 上的有源成分的浓度,其中 $r_1 < r_2$ 。在一个实施例中,在所述纤芯区域的中心,所述有源成分的浓度具有局部最小值。在所述纤芯区域的中心,所述有源成分的浓度可大体上为零。附图3中示出这种光纤设计的例子。

[0025] 在一个实施例中,环形区域包括布置在包围所述纤芯区域中心的环中的多个有源部件。

[0026] 通过在所述纤芯区域的横截面的有限部分中布置有源纤芯部件,也可减少纤芯区域中传导的光信号与有源区域的模态重叠。该有源区域可包括至少一个有源纤芯部件。在一个实施例中,光纤包括大致沿第一芯线布置的至少一个有源纤芯部件。该第一芯线可平行于所述第一线。

[0027] 由于有源成分的存在,有源部件的折射率受到了影响。可通过添加一种或多种其他掺杂物来调节折射率。在一个实施例中,有源部件的折射率曲线低于或大致等于所述内包层背景材料的折射率。

[0028] 当作为有源光纤使用时,所述有源光纤施加有相对较高的泵浦能量以反转有源材料的数量,(例如由反转的空间非均匀分布造成的)热效应可能导致单模光纤至少部分地支持高阶模式。当能量被最有效地转换为纤芯中心上的纤芯基模时反转的空间非均匀分布可

能发生,其中在纤芯中心上基模具有其最大强度。

[0029] 有源区域可被设置为使得纤芯高阶模与有源成分的模态重叠减少。在一个实施例中,高阶模与有源成分的模场重叠低于约50%,例如低于约25%,例如低于约20%,例如低于约15%,例如低于约10%,例如低于约5%,例如低于约1%。在一个实施例中,传导的光信号可包括以多种模式传播的光,且传导的光信号与有源成分的模态重叠低于约25%,例如低于约20%,例如低于约15%,例如低于约10%,例如低于约5%,例如低于约1%。附图4中示出了一种光纤设计,其中纤芯基模具有其最大强度,有源成分被布置为使得用于所述纤芯基模的增益有益地更大。

[0030] 有源成分在其发射光谱上具有至少一个波长区域,其中当有源成分被泵浦信号泵浦时,观察相对较强的发射。

[0031] 光纤可适于抑制高阶模式(HOM)和/或传导在较窄光谱波长区域上的光。在一个实施例中,多个第三类型的内包层部件形成一个或多个在横截面上延伸的光学谐振结构,提供纤芯模式与一个或多个光沉的谐振耦合。

[0032] 在包括一段有源材料的纤芯区域中,纤芯区域有源部分的面积和纤芯区域的总面积之间的比值在约0.1至约0.9之间的范围内,例如在约0.2至约0.8之间、约0.3至约0.7之间、约0.4至约0.6之间的范围内。

[0033] 有源材料也可大体上分布在整个纤芯区域上,从而纤芯区域的有源部分的面积和纤芯区域的总面积之间的比值大致等于1。

[0034] 有源成分的浓度可在纤芯区域的横截面上逐渐变化。也可以设置成在纤芯区域的诸如圆形或环形的部分上浓度大体上更高,而在纤芯区域或其他部分上浓度较低。这种情况下,纤芯区域的术语“有源部分”指的是纤芯区域上浓度最高的部分。

[0035] 在一个实施例中,所述有源部分设置为纤芯基模与有源部分的模态重叠低于约50%,例如低于约25%,例如低于约20%,例如低于约15%,例如低于约10%,例如低于约5%,例如低于约1%。

[0036] 纤芯区域可进一步地掺杂有一种或多种材料,选自氟(F)、锗(Ge)、铈(Ce)或其组合构成的组。

[0037] 纤芯区域的基模的有效折射率大于内包层区域的有效折射率,从而光以全内反射的方式沿着纤芯区域传播。

[0038] 泵浦光可由外包层限制在内包层区域中。外包层区域的折射率低于内包层区域的折射率。在一个实施例中,外包层区域包括折射率低于硅的聚合物包层。外包层可包括空气包层。在本发明的上下文中,术语“空气包层”指的是多个气孔被布置为连贯地围绕内包层区域的情形。连串的两个相邻气孔之间设置的硅区域的宽度可小于约1.2 μm ,例如小于约1 μm ,例如小于约0.9 μm ,例如小于约0.8 μm ,例如小于约0.7 μm ,例如小于约0.6 μm ,例如小于约0.5 μm ,例如小于约0.4 μm 。

[0039] 信号波长可以在所述有源材料的发射带上,例如在为约900nm至约1200nm范围的镱发射带上,例如在为约1500nm至约1600nm范围的铒发射带上,例如在为约1800nm至约2400nm范围的镱发射带上。

[0040] 泵浦波长可以在所述有源材料的吸收带上。

[0041] 理论上可以以任意方式布置内包层部件,借此满足了内包层区域的有效折射率的

要求,且其中第一类型的内包层部件可被布置为光学地耦合,即这些部件被布置为具有部件-部件间距,以允许来自第一类型的内包层部件所支持的模式的光学能量转换为所述第一波长上的另一模式,形成为第一类型的部件的局部模式组合的所谓超模式。

[0042] 在一个实施例中,内包层部件大体上布置为具有周期 Λ 的周期晶格,例如六角形晶格。

[0043] 所述晶格的周期 Λ 可设置为比值 Λ/λ_1 大于约5,例如大于约8,例如大于约10,例如大于约12,例如大于约15,例如大于约20,例如大于约30,例如大于约40,例如大于约50。比值 Λ/λ_1 可在约5至约60的区间内,例如在约8至约40的区间内,例如在约10至约30的区间内,例如在约12至约28的区间内,例如在约15至约25的区间内,例如在约18至约22的区间内。

[0044] 在一个实施例中,所述晶格的周期 Λ 可大于约 $5\mu\text{m}$,例如大于约 $8\mu\text{m}$,例如大于约 $10\mu\text{m}$,例如大于约 $12\mu\text{m}$,例如大于约 $15\mu\text{m}$,例如大于约 $17\mu\text{m}$,例如大于约 $20\mu\text{m}$,例如大于约 $23\mu\text{m}$,例如大于约 $26\mu\text{m}$,例如大于约 $30\mu\text{m}$,例如大于约 $40\mu\text{m}$,例如大于约 $50\mu\text{m}$,例如大于约 $75\mu\text{m}$,例如大于约 $100\mu\text{m}$ 。周期可小于约 $500\mu\text{m}$,例如小于约 $400\mu\text{m}$,例如小于约 $200\mu\text{m}$,例如小于约 $150\mu\text{m}$,例如小于约 $125\mu\text{m}$ 。

[0045] 在一个实施例中,大部分所述第一类型的内包层部件,例如所有第一类型的内包层部件,被布置为具有大致相同的部件-部件间距。所述间距可大于约 $5\mu\text{m}$,例如大于约 $8\mu\text{m}$,例如大于约 $10\mu\text{m}$,例如大于约 $12\mu\text{m}$,例如大于约 $15\mu\text{m}$,例如大于约 $20\mu\text{m}$,例如大于约 $25\mu\text{m}$,例如大于约 $30\mu\text{m}$,例如大于约 $50\mu\text{m}$ 。该间隔可小于约 $250\mu\text{m}$ 。

[0046] 所述间隔和所述第一波长之间的比值可大于约5,例如大于约8,例如大于约10,例如大于约12,例如大于约15,例如大于约20,例如大于约25,例如大于约30。该比值可小于约250。

[0047] 第一类型的内包层部件的高折射率区域提供了折射率曲线中的变化,其可以导致具有有效的折射率的超模式,相比于不具有高折射率区域,其会对孔的尺寸更敏感。高折射率区域可采用不同的横截面形状,例如环形,例如由内圆和外圆限定的环,包括高折射率元件的连串,包括至少一个包含高折射率材料的第一元件、和第二元件的连串,两个半圆以及材料理论上的至少部分地围绕第一类型部件的气孔的任意布置。

[0048] 在一个实施例中,高折射率区域的平均厚度 t_{avg} 和晶格的周期被设置为 t_{avg}/Λ 大于约0.01,例如大于约0.05,例如大于约0.08,例如大于约0.10,例如大于约0.15,例如大于约0.18,例如大于约0.20,例如大于约0.25,例如大于约0.3,例如大于约0.35,例如大于约0.4,例如大于约0.45。

[0049] 在具有均匀宽度的高折射率区域中,该区域的平均厚度等于该区域的厚度,从而由同心布置的内圆和外圆定义的环的厚度等于该环的平均厚度。

[0050] 所述第一类型部件的气孔的直径 d_1 可设置为比值 d_1/Λ 小于约0.5,例如小于约0.4,例如小于约0.35,例如小于约0.3,例如小于约0.25,例如小于约0.2,例如小于约0.15,例如小于约0.1,例如小于约0.05。

[0051] 根据本发明的光纤可包括多种不同类型的内包层部件。这些部件中的一些被布置为在第一类型部件之间提供一定的距离以控制由这些部件支持的模式之间的耦合。其他类型的内包层部件被布置为对光纤提供其他的功能,例如将纤芯模式谐振耦合至储能器

(reservoir)。

[0052] 在一个实施例中,多个内包层部件进一步地包括了包含有低折射率区域的第二类型部件。在一个实施例中,低折射率区域是气孔或者包括气孔。在一个实施例中,低折射率区域是下掺杂(down-doped)区域或者包括下掺杂区域。

[0053] 在一个实施例中,第一和第二类型部件中的气孔的直径大体上相同,例如两个尺寸之间的差小于所述第一类型部件的直径的约25%,例如小于其的约20%,例如小于其的约15%,例如小于其的约12%,例如小于其的约10%,例如小于其的约8%,例如小于其的约5%,例如小于其的约2%,例如气孔实际上相同。

[0054] 在预制制造光纤的预制件时,第一类型的预制元件的气孔的直径可小于第二类型的预制元件的气孔的直径。在用于由预制件制造光纤的拉丝工艺期间加热预制件时,气孔尺寸之间的差可被拉平为相同的程度。

[0055] 在一个实施例中,第一类型部件的气孔略大于第二类型部件的气孔,例如大至少约5%,例如大至少约8%,例如大至少约10%,例如大至少约15%,例如大至少约20%,例如大至少约25%,例如大至少约50%。

[0056] 在另一实施例中,第二类型部件的气孔略大于第一类型部件的气孔,例如大至少约5%,例如大至少约8%,例如大至少约10%,例如大至少约15%,例如大至少约20%,例如大至少约25%,例如大至少约50%。

[0057] 第一和第二类型部件可布置为使得对于大部分所述第一类型部件而言,最邻近的包层部件是所述第二类型部件。在所述内包层部件被大体上布置为六角形晶格的内包层区域中,围绕第一类型部件的六个最邻近的部件是所述第二类型的。附图2中示出包括这种内包层区域的光纤设计的例子。

[0058] 第二类型的部件可不同于所述第一类型的部件,至少在围绕所述气孔的材料的组成方面不同。第二类型的部件可包括围绕其气孔的高折射率区域。在一个实施例中,所述第二类型部件中的这种高折射率区域的折射率低于所述第一类型部件的高折射率区域的折射率。第一类型部件的高折射率区域的折射率与第二类型部件中的高折射率区域的折射率的差至少为约 $1 \cdot 10^{-5}$,例如至少为约 $5 \cdot 10^{-5}$,例如至少为约 $1 \cdot 10^{-4}$,例如至少为约 $5 \cdot 10^{-4}$,例如至少为约 $7 \cdot 10^{-4}$,例如至少为约 $1 \cdot 10^{-3}$,例如至少为约 $2 \cdot 10^{-3}$ 。折射率差可小于约 $1 \cdot 10^{-2}$ 。

[0059] 所述第二类型部件的高折射率区域所延伸的横截面面积小于所述第一类型部件的所述高折射率区域的面积,例如面积为至少约1/2倍,例如约1/3,例如约1/4,例如约1/5,例如约1/7,例如约1/9,例如约1/10,例如约1/16,例如约1/20,例如约1/25,例如约1/30,例如约1/36,例如约1/40,例如约1/49,例如约1/64,例如约1/81,例如约1/100,例如约1/150,例如约1/200,例如约1/400,例如约1/600,例如约1/1000,例如第二类型部件基本上没有具有高折射率的材料。

[0060] 在一个实施例中,第二类型的部件由所述气孔和内包层背景材料组成。

[0061] 多个内包层部件可包括多种不同类型的部件,例如第三和第四类型的部件。在一个实施例中,不同类型的部件布置为使得内包层区域能够至少在波长间隔上抑制高阶纤芯模式。

[0062] 所述第一类型部件的高折射率区域可包括掺锗的硅。

[0063] 在一个实施例中,第一类型的内包层部件进一步地包括第二区域。该第二区域可包括折射率低于高折射率区域的材料。该第二区域可包括折射率大于内包层背景材料的材料。

[0064] 可以以与高折射率区域不同的方式布置所述第一类型的内包层部件中的这种第二区域。在一个实施例中,第二区域被布置为围绕所述高折射率区域。附图7d中示出这种配置的例子。在一个实施例中,高折射率区域被布置为围绕所述第二区域。附图7e中示出这种配置的例子。

[0065] 高折射率材料和内包层背景材料之间的折射率差至少为约 $1 \cdot 10^{-5}$,例如至少为约 $5 \cdot 10^{-5}$,例如至少为约 $1 \cdot 10^{-4}$,例如至少为约 $5 \cdot 10^{-4}$,例如至少为约 $7 \cdot 10^{-4}$,例如至少为约 $1 \cdot 10^{-3}$,例如至少为约 $1.5 \cdot 10^{-3}$,例如至少为约 $2 \cdot 10^{-3}$,例如至少为约 $2.5 \cdot 10^{-3}$,例如至少为约 $3 \cdot 10^{-3}$,例如至少为约 $4 \cdot 10^{-3}$ 。折射率差可小于约 $1 \cdot 10^{-2}$ 。

[0066] 所述第一类型部件的高折射率区域的横截面面积可大于约 $5\mu\text{m}^2$,例如大于约 $10\mu\text{m}^2$,例如大于约 $20\mu\text{m}^2$,例如大于约 $30\mu\text{m}^2$,例如大于约 $40\mu\text{m}^2$,例如大于约 $50\mu\text{m}^2$,例如大于约 $60\mu\text{m}^2$,例如大于约 $70\mu\text{m}^2$,例如大于约 $75\mu\text{m}^2$,例如大于约 $80\mu\text{m}^2$,例如大于约 $100\mu\text{m}^2$,例如大于约 $125\mu\text{m}^2$,例如大于约 $150\mu\text{m}^2$,例如大于约 $200\mu\text{m}^2$,例如大于约 $300\mu\text{m}^2$,例如大于约 $400\mu\text{m}^2$,例如大于约 $500\mu\text{m}^2$ 。横截面面积可小于约 $1000\mu\text{m}^2$ 。

[0067] 在一个实施例中,内包层区域包括储能材料(reservoir material),其折射率大于由第一类型的内包层部件支持的光学模式的有效折射率。该储能材料可布置在围绕布置有所述内包层部件的内包层部分的区域中。

[0068] 第一和第二类型的部件可布置为使得对于大部分所述第一类型部件而言,最邻近的包层部件是所述第二类型的内包层部件。在所述内包层部件被大体上布置为六角形晶格的内包层区域中,围绕第一类型部件的六个最邻近的部件可为不同类型的部件,例如为所述第二类型的部件、或与所述第一类型部件不同的部件的组合。

[0069] 第一类型的内包层部件可被布置为使得由这些部件支持的模式能够与邻近第一类型部件的模式耦合。优选地,诸如第一类型部件的至少一种类型的内包层部件能够支持信号波长上的光学模式。在一个实施例中,第一类型部件的高折射率区域被布置为确保支持在信号波长上的模式。所述第一类型部件中的高折射率材料可以不同的方式布置在高折射率区域中以允许支持一种模式。在一个实施例中,至少部分所述第一类型部件的高折射率区域具有大体上角度均匀的折射率曲线。可通过均匀的锗掺杂来获得均匀的折射率曲线。在一个实施例中,高折射率区域的折射率曲线在各角度上发生变化。在角度上的变化可设置为使得该区域的折射率曲线大体上为n次旋转对称,其中n可为2、3、4、5、6、8、10或大于10。

[0070] 在一个实施例中,第一类型的内包层部件能够支持一种光学模式,其在光信号波长 λ_1 上的有效折射率小于纤芯基模的有效折射率,且在小于光信号波长 λ_1 的波长区域上的有效折射率大于或等于纤芯基模的有效折射率。

[0071] 在一个实施例中,第一类型的内包层部件能够支持至少一种模式,其在光信号波长 λ_1 上的有效折射率等于或大于所述纤芯区域的第一高阶模式的有效折射率,且在光信号波长 λ_1 上的折射率小于纤芯基模的有效折射率。

[0072] 内包层部件可大体上布置为六角形晶格,且所述纤芯区域相应于以固体棒替换7

个或19个内包层部件。在一个实施例中,固体棒包括硅材料,例如掺杂有锗和/或氟的硅材料。

[0073] 在根据本发明的方法的一个实施例中,该纤芯预制元件包括掺杂有至少一种有源成分的材料。若使用多于一个的纤芯预制元件,则一个或多个该元件可包括掺杂有至少一种有源成分的材料。

[0074] 在一个实施例中,预制件中布置的第一类型的预制元件进一步包括内包层背景材料的区域,其布置为围绕所述高折射率区域。

[0075] 内包层预制元件可进一步包括多个第二类型的预制元件,每一所述元件包括气孔。在一个实施例中,所述第二类型的预制元件的气孔被内包层背景材料围绕。

[0076] 根据本发明的方法可进一步包括以晶格的形式堆叠所述内包层预制元件,例如呈六角形晶格。在一个实施例中,预制件包括布置为所述六角形晶格的7个或19个纤芯预制元件以在所述光纤中提供纤芯区域。

[0077] 第一和第二类型的内包层部件可被布置为,对大部分所述第一类型的预制元件的最接近的内包层预制元件是第二类型的预制元件。

[0078] 该方法可进一步包括通过熔合一个结构来提供所述第一类型的预制元件,该结构包括由多个具有高折射率材料的棒围绕的内筒和包括背景材料的外筒,在熔融时维持其中内筒的气孔。当所述内筒包括高折射率材料时,第一类型的预制元件的横截面设计示出在附图7b中。

[0079] 在一个实施例中,将所述预制件拉丝为光纤包括将所述预制件拉丝为细茎,随后将该细茎拉丝为所述光纤。在拉丝为光纤之前,可向所述细茎提供外包层。

[0080] 在一个实施例中,至少部分所述外包层预制元件包括气孔且被布置为连贯地围绕所述内包层预制元件,从而在所述光纤中提供空气包层。

[0081] 在一个实施例中,在拉丝过程中响应于气孔的增大的高折射率区域能够增大其内直径。在该说明书中,气孔的增大可被理解为相较于气孔未被增大的光纤,其绝对尺寸和/或相对于光纤外直径的尺寸的增大。

[0082] 折射率通常为均匀材料的常规折射率。而有效折射率为波长为 λ 的光线传播通过可以是不均匀的(意思是材料合成体,例如包括两种或多种子材料,可以是一种具有折射率的背景材料和具有不同折射率/系数的一种或多种类型的部件(在本申请中通常被称为微结构元件))给定材料的折射率。对于均匀材料,折射率和有效折射率自然是相似的。

[0083] 对于根据本发明的光纤,最重要的光波长是在紫外至红外区间上(例如,从约150nm至11 μ m的波长)。在该波长区域上,用于光纤制造的最相关的材料(例如硅)的折射率可以被认为是大体上与波长无关的,或至少并非较强地依赖于波长。然而,对于非均匀材料,例如包括诸如空隙或气孔的微结构元件的光纤,有效折射率较强地依赖于材料的形态。此外,这种光纤的有效折射率会较强地依赖于波长。确定给定的具有空隙或气孔的光纤结构在给定波长上的有效折射率的工艺对本领域的技术人员来说是公知的(参见例如Broeng等,Optical Fibre Technology,第5卷第305-330页,1999)。

[0084] 在一个实施例中,通过下掺杂所述内包层背景材料来提供高折射率环和内包层背景材料之间的折射率差。高折射率环可包括上掺杂(up-doped)的硅材料或基本上纯的硅。

[0085] 可以以有序的布置方式(例如晶格)或具有少数次序或周期的布置方式放置内包

层部件。在一个实施例中，内包层部件的布置大体上围绕所述纤芯区域。在一个实施例中，内包层部件的布置包括仅部分地围绕所述纤芯区域的局部部分。内包层部件可布置在一个或多个分离的部分中，每一部分被限制在所述横截面中相应的角度范围内。

[0086] 在一个实施例中，气孔的半径和高折射率材料区域的厚度之间的比值小于约0.9，例如小于约0.8，例如小于约0.7，例如小于约0.6，例如小于约0.5，例如小于约0.4，例如小于约0.3，例如小于约0.2。

[0087] 内包层部件可进一步包括布置为谐振结构的第三类型部件，将第一波长区间上的光从所述纤芯区域谐振耦合至所述外包层区域。内包层部件可进一步包括布置成第二谐振结构的第四类型部件，将第二波长区间上的光从所述纤芯区域谐振耦合至所述外包层区域。第一和第二波长区间对光纤的弯曲是敏感的。

[0088] 所述第一类型部件的高折射率环允许这些部件以支持一种或多种光学模式。

[0089] 在一个实施例中，通过改变所述第一类型部件作用的气孔的直径来调整由所述第一类型部件支持的模式的有效折射率。

[0090] 在一个实施例中，第二类型部件由被内包层背景材料区域围绕的气孔组成。

[0091] 在一个实施例中，第一和第二类型的部件皆包括高折射率环。至少能通过部件的高折射率环的厚度来区分这两种部件。第二类型部件的厚度和第一类型部件的厚度之间的比值可小于约0.9，例如小于约0.8，例如小于约0.7，例如小于约0.6，例如小于约0.5，例如小于约0.4，例如小于约0.3，例如小于约0.2，例如小于约0.1，例如小于约0.05，例如小于约0.02。

[0092] 内包层部件的布置使得根据本发明的光纤是双折射的。通过向光纤增加应力施加成分，可以增强或减弱双折射，或引入双折射。在一个实施例中，光纤进一步包括应力施加成分，布置为向所述纤芯区域和/或所述内包层部件施加应力。这些所述应力施加成分可包括掺杂硼(B)和/或氟(F)的硅。应力施加成分也可被称为应力施加内包层部件。

[0093] 如果纤芯是无源的，即仅包含不足量的有源材料（例如没有包含有源材料），光纤仍可进行光信号的放大。在一个实施例中，泵浦信号的波长相对于光信号的波长向下漂移，这种波长漂移相应于硅玻璃的拉曼漂移，根据本发明的光学系统能够向在纤芯区域中传播的光信号提供拉曼增益。在一个实施例中，信号波长为1064nm，泵浦波长约为1010nm。

[0094] 在一个实施例中，多个第一类型的内包层部件抑制了在小于波长间隔的波长阻带中的纤芯基模，其中纤芯区域是单模的。因而在纤芯区域为信号波长上的单模的同时，光纤可滤除来自纤芯区域的短波长的放大的自发辐射。在一个实施例中，纤芯区域是1064nm的信号波长上的单模，而在1030nm波长左右的间隔处的波长上抑制纤芯模式。

[0095] 在一个实施例中，泵浦光源包括激光器，其能够发射所述有源成分的吸收光谱的波长上的光。

[0096] 在一个实施例中，种子光源包括种子光激光源。

[0097] 可使用光学元件将泵浦光耦合入所述光纤的包层区域，其中光学元件选自如下的组：光纤锥、泵浦反射镜、透镜系统或熔接至泵浦传送光纤的熔接点。

[0098] 泵浦光源可包括激光器，其能够发射所述有源成分的吸收光谱的波长上的光。

[0099] 激光系统可进一步包括用于Q开关的元件。

[0100] 所述系统可进一步包括至少一个泵浦能反射器。

附图说明

[0101] 本发明借由独立权利要求的特征定义。从属权利要求中定义了优选的实施例。权利要求中的任何附图标记并不旨在对其范围进行任何限制。

[0102] 前文中示出了一些优选的实施例,但应注意本发明并不限于此,而是可以以在下述权利要求中定义的主题内的其它方式来具体化。

[0103] 附图1示出根据本发明的光纤的设计示意图。

[0104] 附图2示出根据本发明的光纤的设计示意图。

[0105] 附图3示出根据本发明的有源光纤的设计示意图,用于减少纤芯基模和所述纤芯区域的有源部分的模态重叠。

[0106] 附图4示出根据本发明的有源光纤的设计示意图,其中对于所述纤芯的所述基模的增益优选地更大。

[0107] 附图5示出根据本发明的光纤的设计示意图,其中外包层区域包括空气包层。

[0108] 附图6示出根据本发明的光纤的设计示意图,其中外包层区域包括聚合物包层。

[0109] 附图7示出第一类型的预制元件的不同设计。

[0110] 附图8示出放大器设置和包括根据本发明的光纤的激光器设置的示意图。

[0111] 附图9示出根据本发明的光纤的计算出的单模区域。

[0112] 附图10示出对应于根据本发明的光纤的归一化的气孔直径的有效折射率。

[0113] 附图11示出根据本发明的光纤测量的传输光谱。

[0114] 附图12示出附图11的传输光谱在1000nm至1200nm的波长区间部分上的放大图。

[0115] 附图13示出具有布置为六角形晶格的第一类型的内包层部件的光纤的端面图像。

[0116] 附图14示出具有布置为六角形晶格的内包层部件的光纤的端面图像,其中部分部件为第一类型的部件。

[0117] 附图15示出根据本发明的光纤的设计示意图。

[0118] 附图16示出根据本发明的光纤的设计示意图。

[0119] 附图17示出根据本发明的光纤的设计示意图。

[0120] 附图18示出根据本发明的光纤的设计示意图。

[0121] 附图19示出根据本发明的光纤的设计示意图。

[0122] 附图20示出根据本发明的有源光纤的设计示意图。

[0123] 附图1示出光纤1的设计,其中布置在内包层区域3中的所有内包层部件都为第一类型部件4。内包层部件布置为六角形晶格且纤芯区域2相应于晶格中的19个晶胞。附图13示出以这种设计实现的光纤1的图像。第一类型部件4包括由高折射率区域(明亮部分)包围的气孔(黑暗部分),其中高折射率区域大体上形成为具有环形横截面的圆柱体结构。六角形晶格的间距为 $14.5\mu\text{m}$,气孔的直径为 $3.5\mu\text{m}$,高折射率区域的厚度约为 $3\mu\text{m}$ 。

[0124] 附图15示出光纤1的设计,对应于附图1中示出的光纤。因而此处只讨论两个实施例之间的差别。该实施例中,纤芯区域2相应于六角形晶格中的7个晶胞。与附图1的实施例相比,该实施例的内包层部件4相对于晶格的周期更小。这里示出的光纤1仅具有两个内包层部件的环,但所属领域技术人员可认识到,在不背离本发明的情况下光纤可具有其他数量的环,例如3个、4个、5个或更多。

[0125] 附图2示出光纤1的设计,其中布置在内包层区域3中的部分所述内包层部件为第一类型部件4,部分为第二类型部件5。内包层部件布置为六角形晶格,且所有第一类型部件4的最邻近的部件是包括气孔的第二类型的内包层部件5。纤芯区域2相应于六角形晶格中的19个晶胞。第一类型部件的布置限定了蜂巢式或kagome晶格。附图14示出以这种设计实现的光纤1的图像。第一类型部件4包括由高折射率区域(明亮部分)包围的气孔(黑暗部分),其中高折射率区域大体上形成为具有环形横截面的圆柱体结构。第二类型部件5由被内包层材料包围的气孔构成。六角形晶格的间距为 $14.5\mu\text{m}$,高折射率区域的厚度约为 $4\mu\text{m}$,第一和第二类型部件的气孔的直径约为 $2\mu\text{m}$ 。

[0126] 附图16示出光纤1的设计,对应于附图2中示出的设计。因而此处只讨论两个实施例之间的差别,相同的附图标记表示相同或相应的部件。该实施例中,第二类型的内包层部件5a是下掺杂区域,例如包括掺杂氟的硅。所属领域技术人员可认识到,附图2和附图16的实施例的组合是可以预期的,其包括含有气孔的一个或多个第二类型的内包层部件、以及含有下掺杂区域的一个或多个第二类型的内包层部件。以这种方式,能够在很大程度上修整内包层区域的有效折射率曲线。

[0127] 附图17示出光纤1的设计,对应于附图2和附图16中示出的光纤。因而此处只讨论两个实施例之间的差别。该实施例中,仅包括紧密地围绕纤芯区域2的第二类型的内包层部件5,而在光纤结构的别处并无第二类型部件5。

[0128] 附图18和19示出光纤1的实施例,分别对应于附图15和17的实施例。在该实施例中,第一类型的内包层部件4的气孔与附图15和17的光纤相比,具有相对于晶格周期增大的直径。

[0129] 附图3、4和20示出根据本发明的有源光纤设计的例子,其中纤芯中的有源材料的浓度是分段的。附图3中,纤芯的有源部分6形成为围绕所述纤芯区域的中心7的连续环。附图4中,有源部分8布置为纤芯的中心,在中心处纤芯基模具有其最大的强度,且在泵浦诱发的高阶模式可能出现的纤芯区域的周界上,有源材料的浓度较小。在附图20中,有源部分8基本上包括整个纤芯区域。

[0130] 附图5和6示出外包层区域包括围绕内包层区域3的空气包层9和聚合物包层10的设计,内包层区域3包括布置为蜂巢式或kagome晶格的第一类型的内包层部件4,其中每个第一类型部件被第二类型部件5围绕。

[0131] 附图7示出与第一类型部件的气孔有关的高折射率材料的不同布置。第一类型部件中心的白色区域为气孔,最暗的部分为内包层背景材料。附图7a中,高折射率材料被布置为环形,在附图7b中,通过在高折射率内筒和内包层背景材料的外筒之间放置高折射率棒来提供高折射率材料的布置,并且在维持气孔的开口的同时熔融这些结构。在附图7c中,连串地布置具有交替的折射率的棒以围绕气孔。在附图7d中,两个同心布置、具有不同折射率的环围绕气孔。至少一个该环的折射率大于内包层背景材料的折射率。可选地,两个环的折射率都大于内包层背景材料的折射率。在附图7e中,一圈内包层背景材料的环布置在高折射率区域内。在附图7f中,示出包括高折射率棒和高折射率环的组合的高折射率区域。在附图7g示出包括的高折射率区域为多个分区。

[0132] 附图8中示出根据本发明的有源光纤1在放大器配置11和激光器配置21中的应用。

[0133] 在放大器配置中,自光源12发射的光信号通过隔离器13,之后被耦合入光纤1。使

用透镜17、14和泵浦反射器15将泵浦信号16耦合入内包层。光信号在光纤内被放大,且如箭头18所示在光源对面的端口从系统输出。

[0134] 在激光系统21中,放射器元件20形成激光腔的一部分,且布置在该反射器元件对面的端面可构成腔的另一反射器。

[0135] 附图9示出对于0.1-0.24的归一化的气孔直径,测量的无源蜂巢结构(附图2)的单模区域。示出了两个单模带,相应于将高阶模式耦合出纤芯的多个第一类型部件的两个不同的包层模式。水平线将1030nm标记为信号波长的示例,而垂直线指示了气孔直径间隔,其中光纤为信号波长上的单模。

[0136] 附图10示出在1064nm波长上,蜂巢结构(例如如附图2所示)的基模(点线)和第一高阶模(虚线,向下的斜线)的模拟的模式折射率。光纤结构的间隔 Λ 为14.5 μm ,环的折射率高于硅,为 $2.5 \cdot 10^{-3}$ 。若气孔直径较大,则光纤为多模的,但随着气孔直径 d 的减小,在0.17至0.19的 d/Λ 上(陡峭的虚线),归一化的环的厚度增大并增加了包层模式的有效折射率并将高阶模式耦合出纤芯。 $d/\Lambda < 0.17$ 时,并不传导纤芯基模。图中还示出了作为气孔直径函数的归一化的环的厚度(假定高折射率材料的质量守恒)。

[0137] 附图11和12示出无源蜂巢式或kagome结构的传输光谱31,其具有来自基模和高阶纤芯模式之间差拍的重叠的差拍频谱(beat spectrum)。在1050nm-1070nm左右未观察到振荡,这表示在该波长带32上光纤是单模的。并不传导或仅微弱地传导在970nm-1050nm波长上的纤芯模式,这表示该波长带35上,包层模式与纤芯基模交叉且将其耦合出纤芯。该阻带可抑制短波长的放大的自发辐射。附图12中,在大于1070nm的波长上观察到振荡,这表示多模行为的开始。并不传导或仅微弱地传导小于1050nm波长的纤芯模式,这表示包层模式与纤芯基模交叉且将其耦合出纤芯。

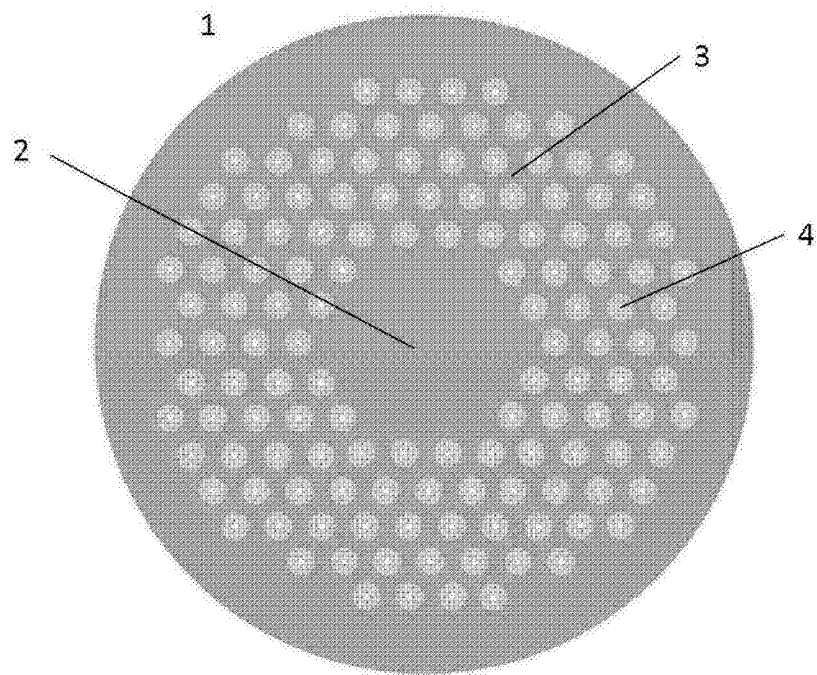


图1

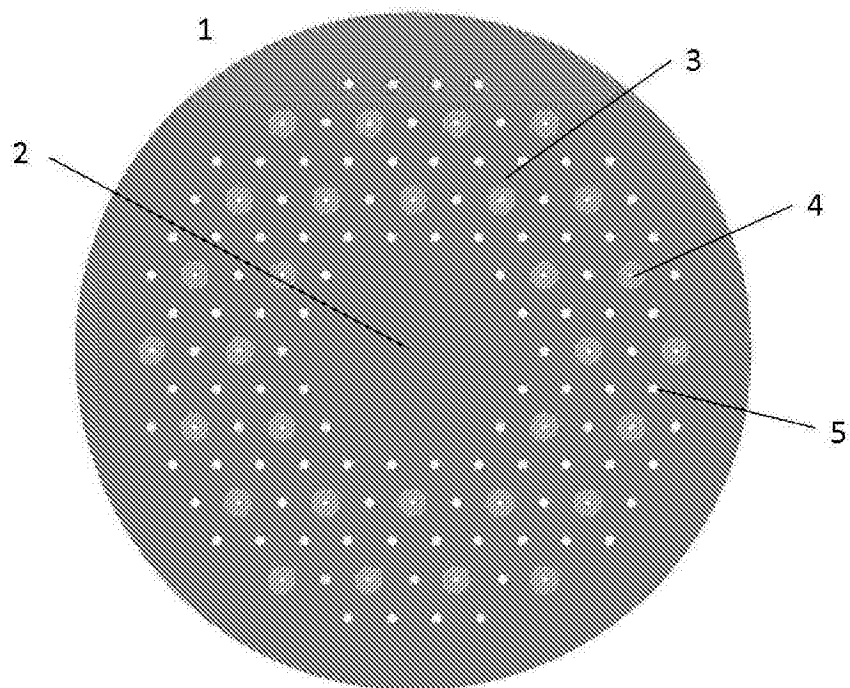


图2

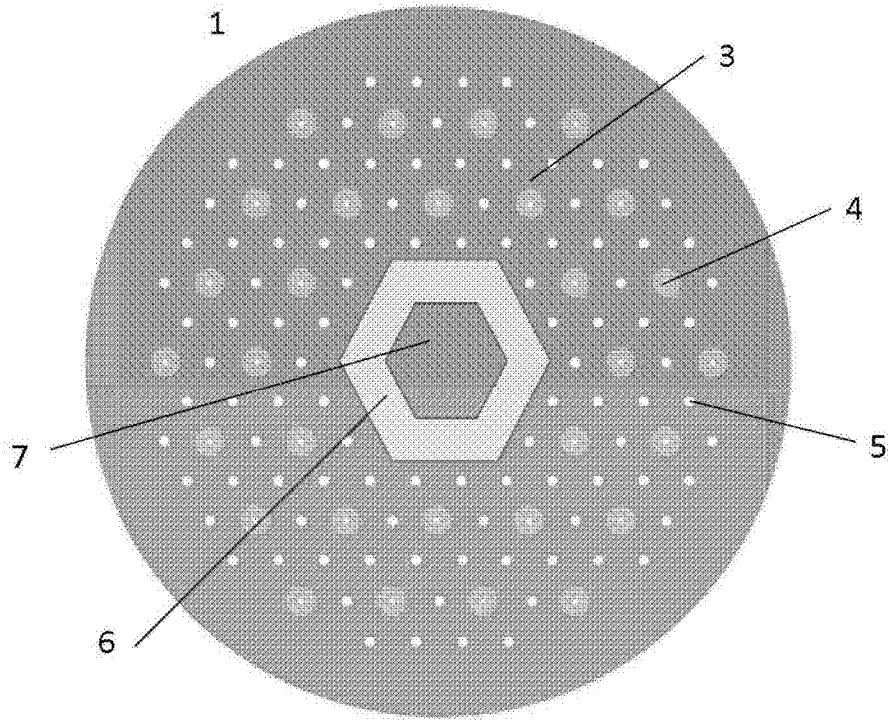


图3

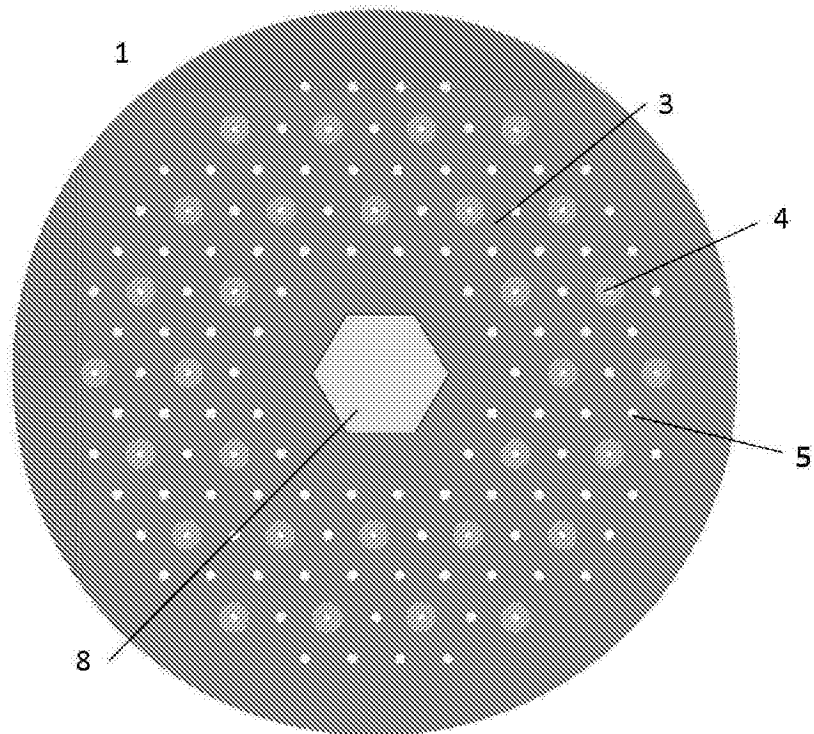


图4

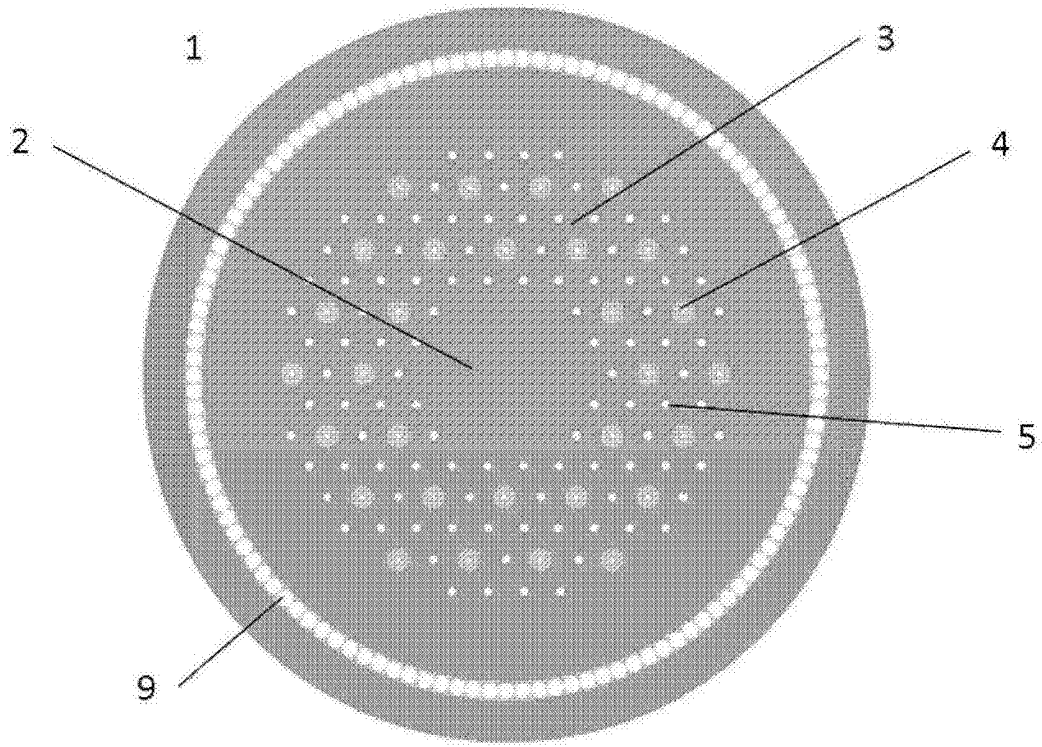


图5

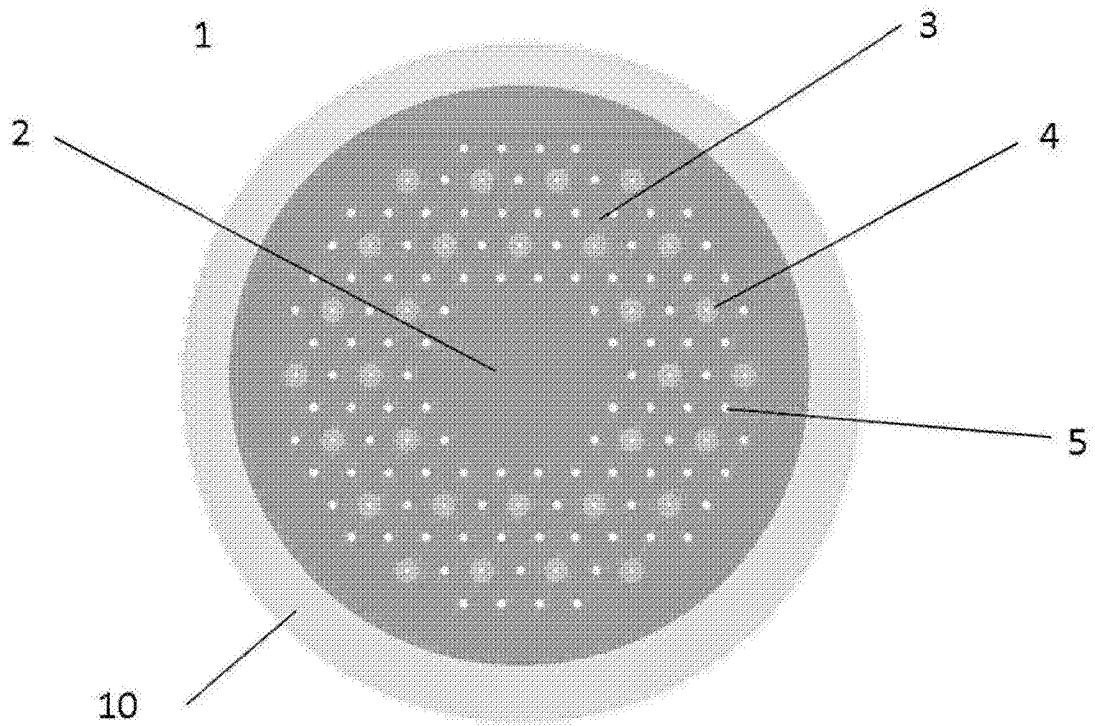


图6

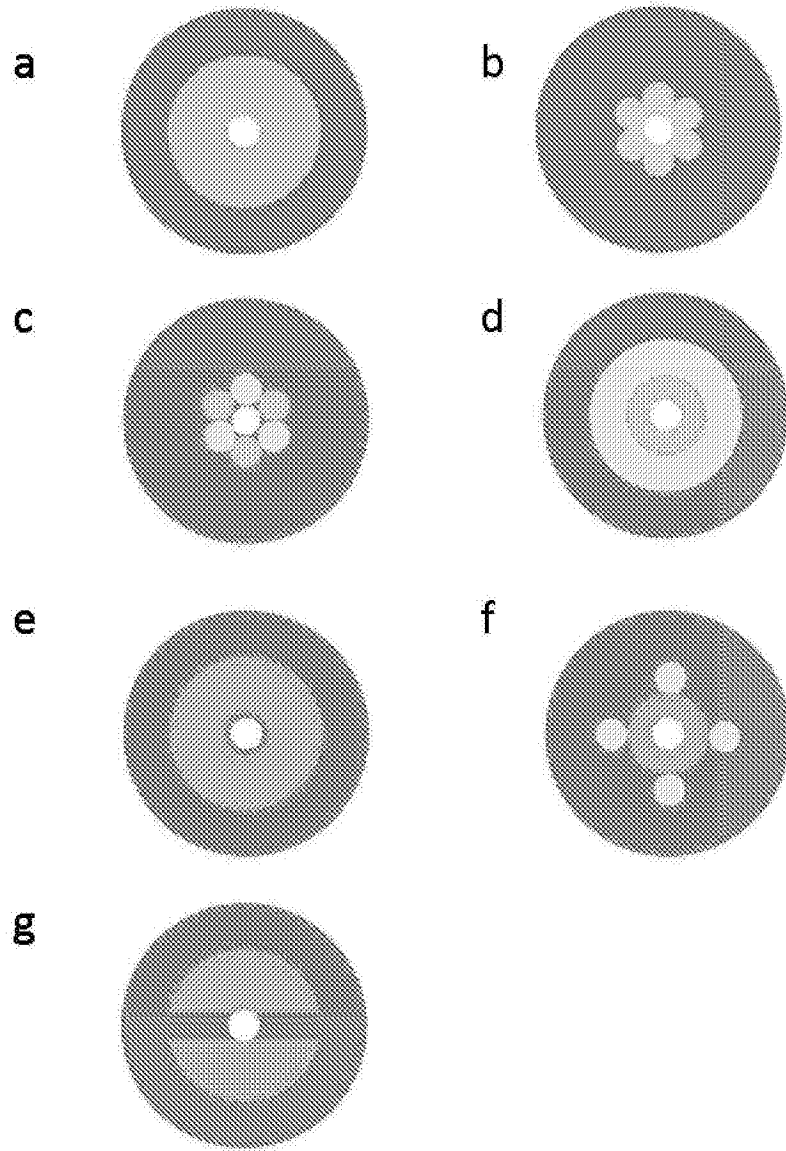


图7

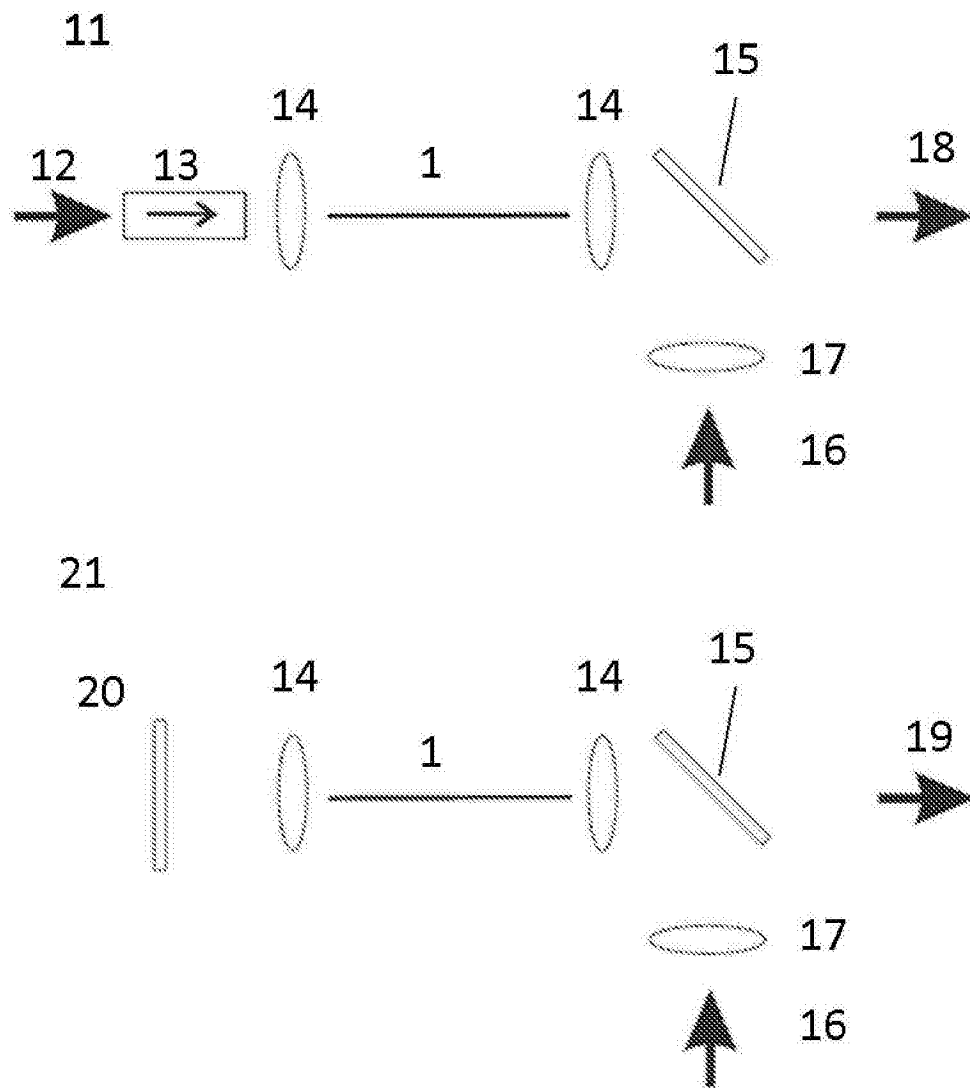


图8

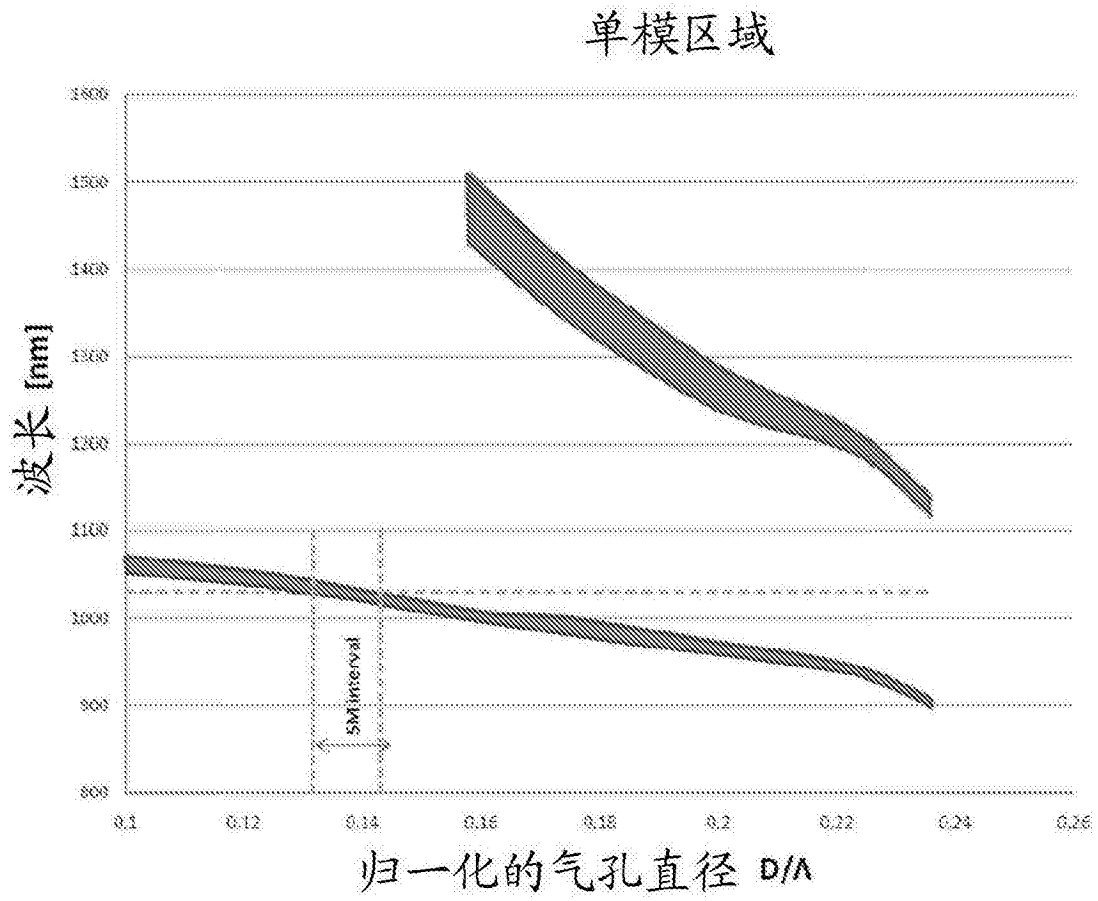


图9

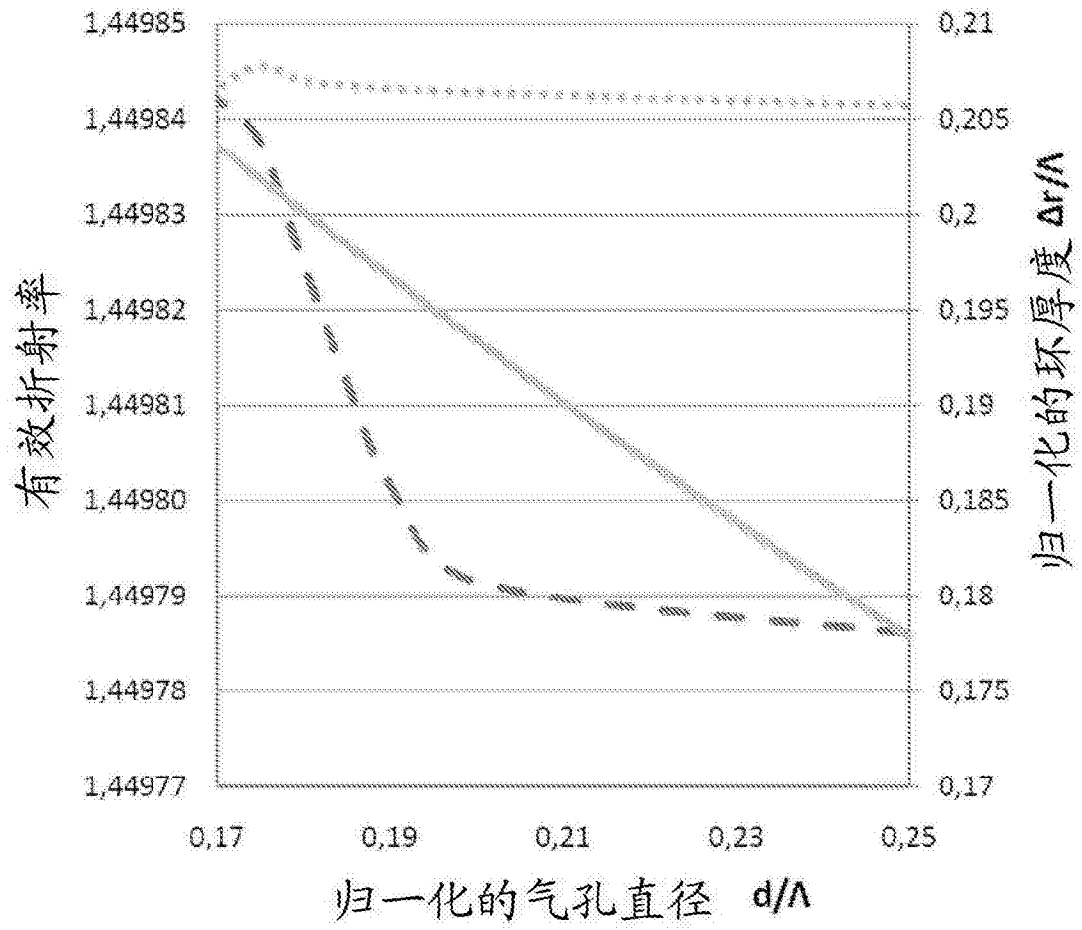


图10

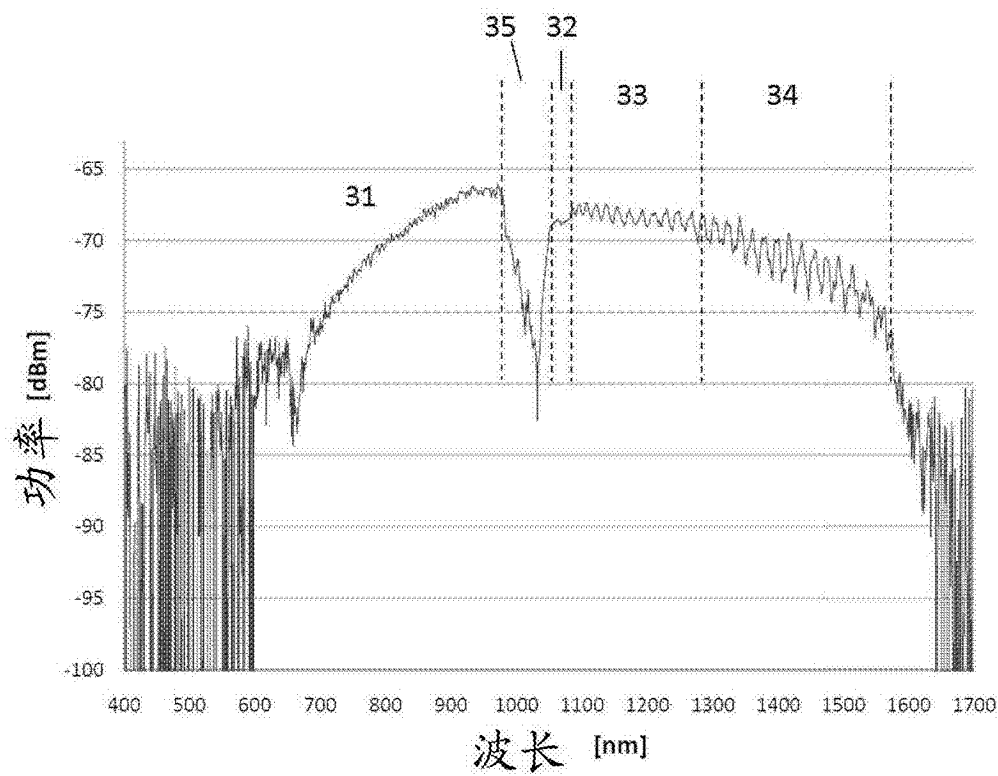


图11

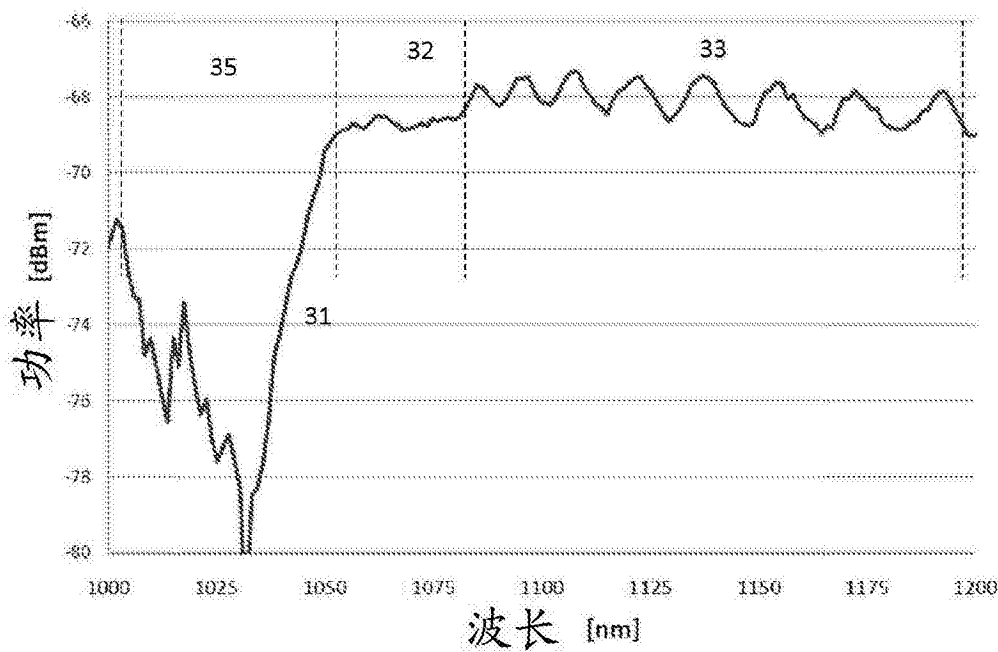


图12

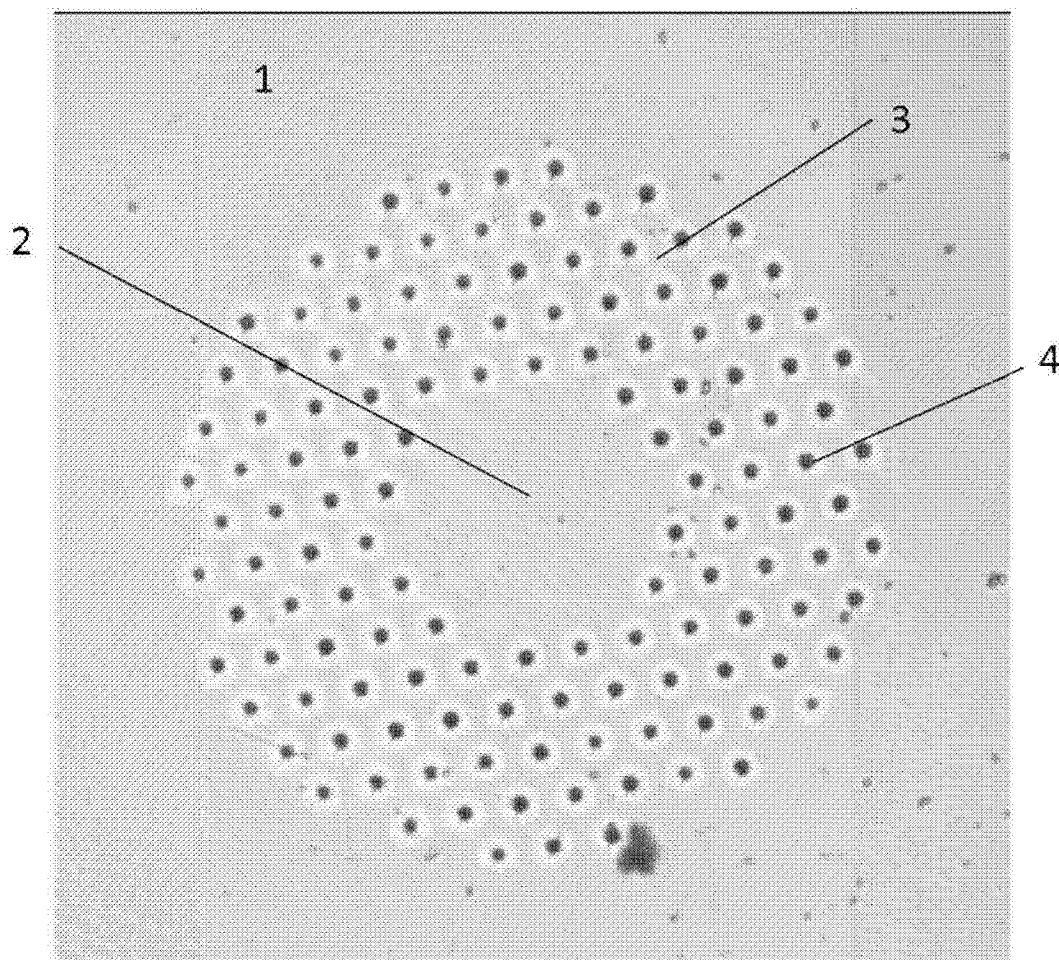


图13

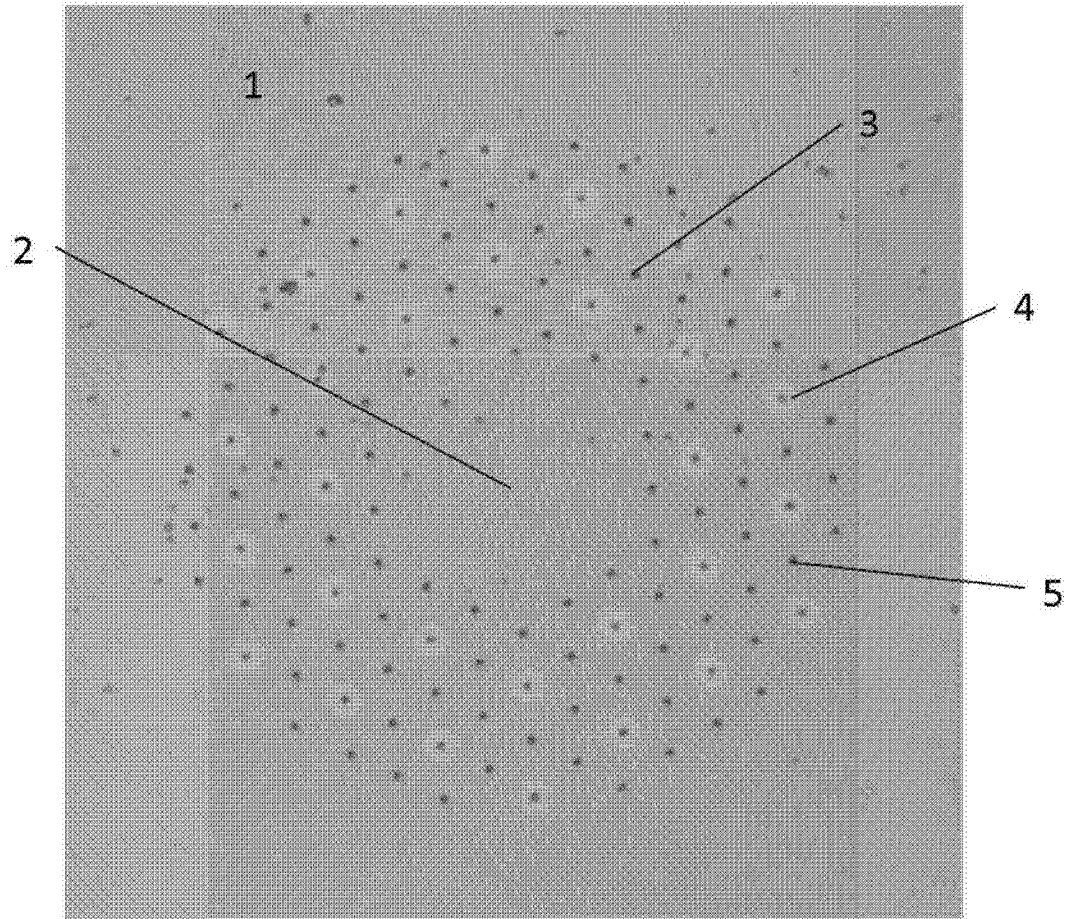


图14

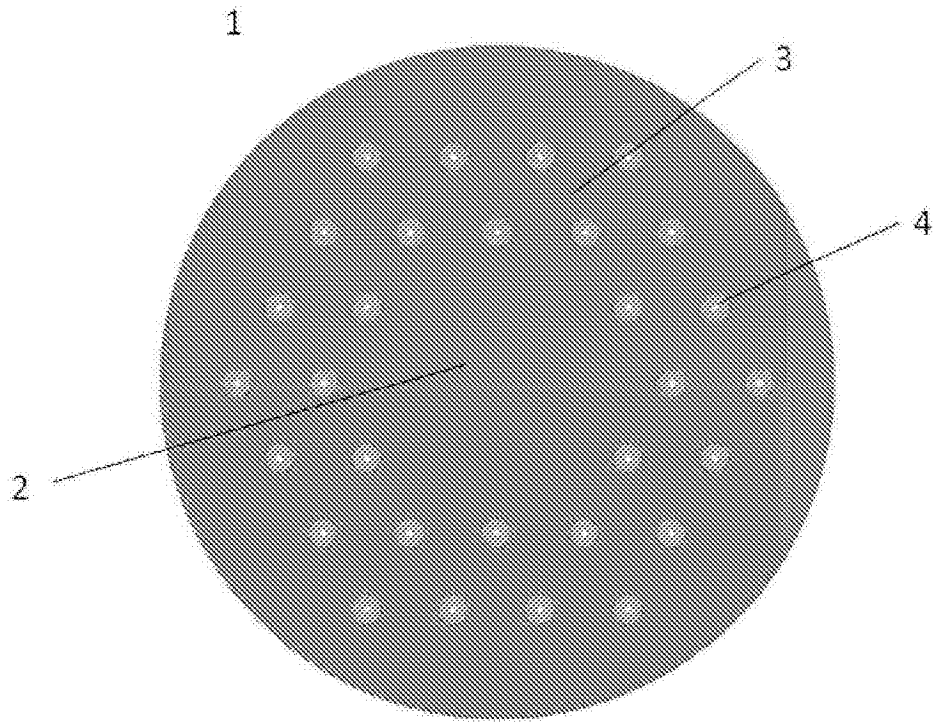


图15

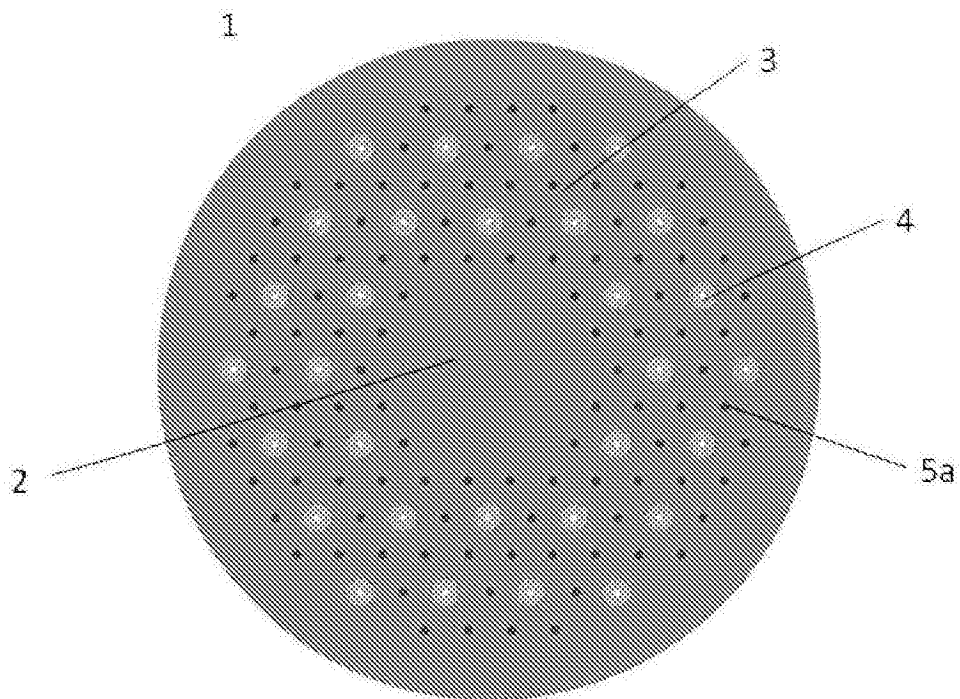


图16

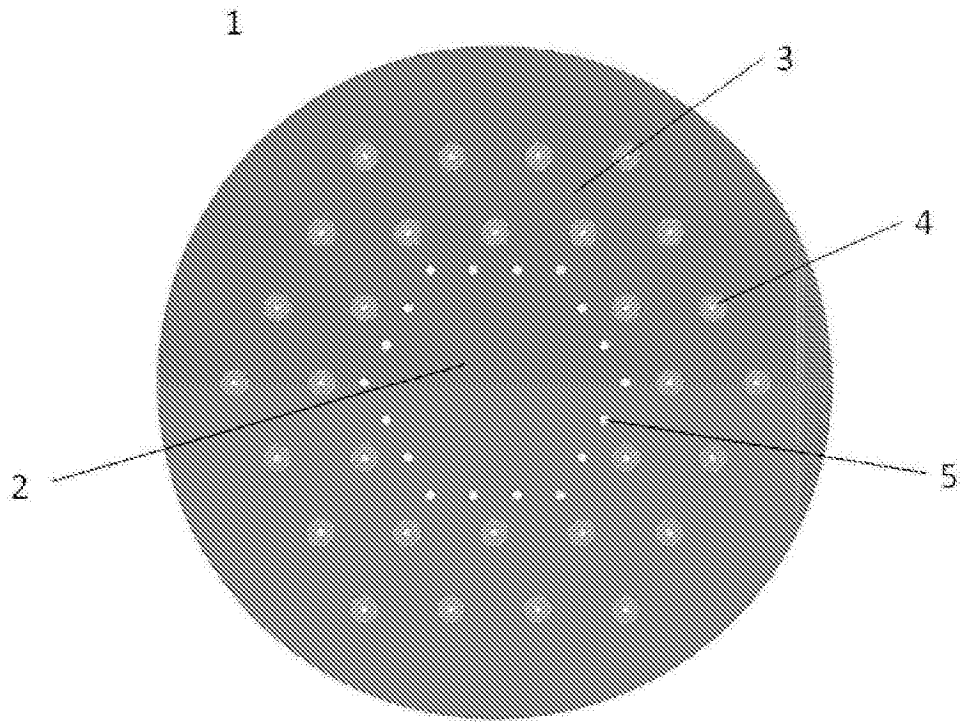


图17

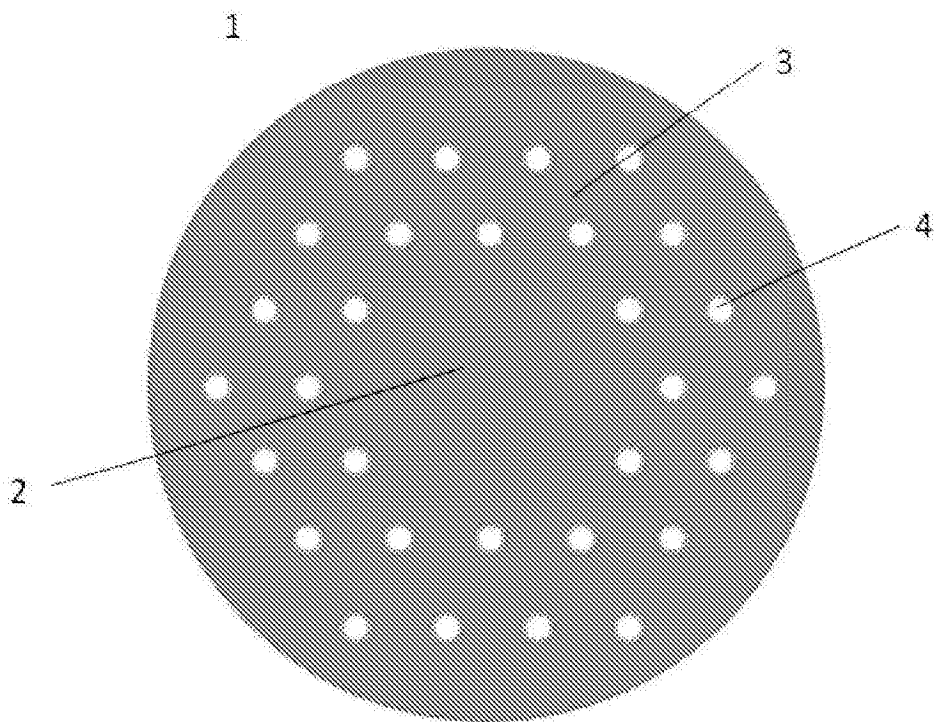


图18

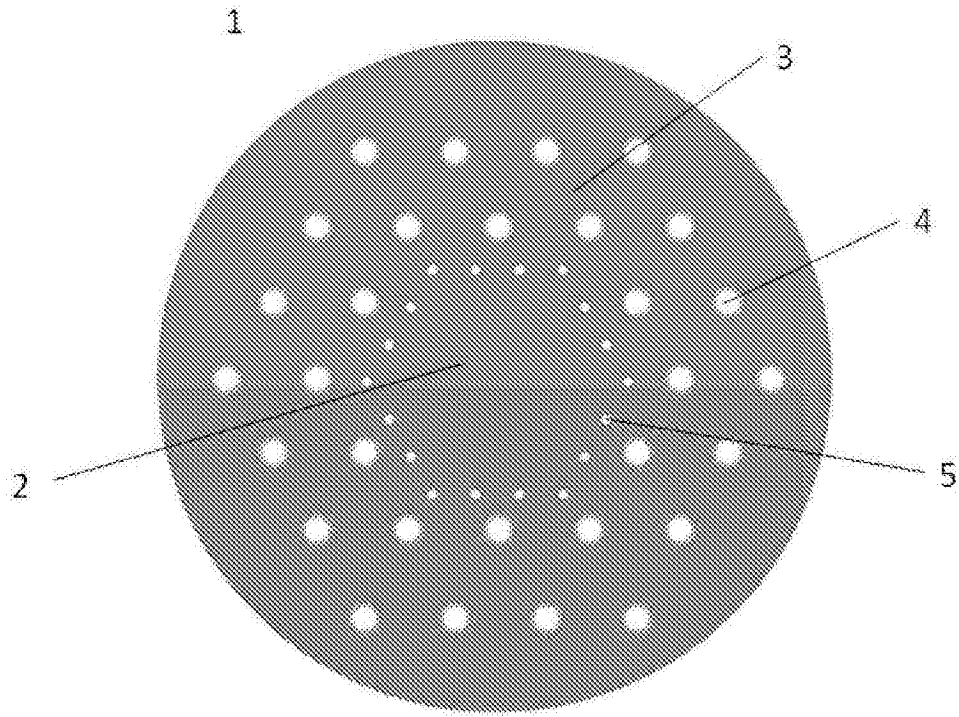


图19

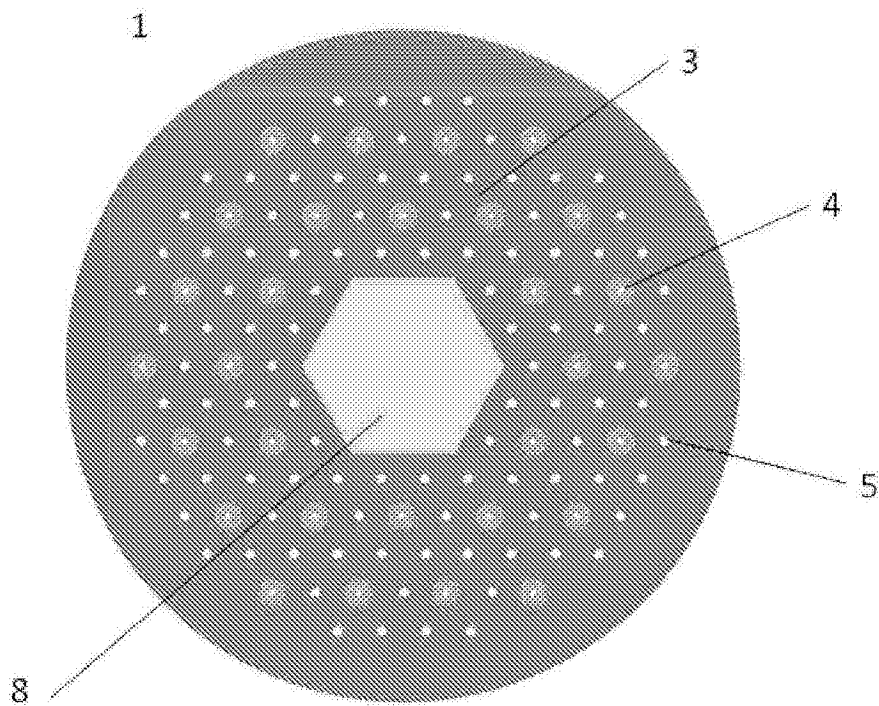


图20