



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112305663 B

(45) 授权公告日 2023. 01. 03

(21) 申请号 202011240230.7

(22) 申请日 2016.08.24

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112305663 A

(43) 申请公布日 2021.02.02

(30) 优先权数据
15002534.4 2015.08.26 EP

(62) 分案原申请数据
201680062482.0 2016.08.24

(73) 专利权人 马克斯-普朗克科学促进学会
地址 德国慕尼黑

(72) 发明人 P·拉塞尔 P·于贝尔
M·H·弗洛兹

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任
公司 11021

专利代理师 张启程

(51) Int.Cl.
G02B 6/02 (2006.01)
G02B 6/024 (2006.01)
G03B 37/027 (2006.01)
G03B 37/012 (2006.01)

(56) 对比文件
DE 102008057278 A1, 2009.05.20
EP 0061901 A1, 1982.10.06
CN 102132178 A, 2011.07.20
CN 103080796 A, 2013.05.01
DE 102015001990 A1, 2015.08.20

审查员 白如雪

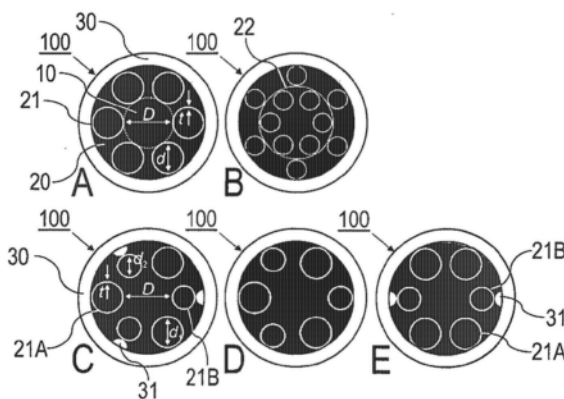
权利要求书2页 说明书15页 附图5页

(54) 发明名称

空芯光纤及包括空芯光纤的光学装置

(57) 摘要

本发明公开了一种空芯光纤,包括:空的芯区域,所述芯区域沿着所述空芯光纤轴向地延伸;内包层区域,所述内包层区域包括多个反谐振元件、即ARE,所述ARE沿着所述空芯光纤环绕所述芯区域,其中所述ARE包括:具有第一最小横向ARE尺寸的第一组ARE;和具有第二最小横向ARE尺寸的第二组ARE,其中所述第二最小横向ARE尺寸小于所述第一最小横向ARE尺寸。还公开了一种包括空芯光纤的光学装置。



1. 一种空芯光纤,包括:
空的芯区域,所述芯区域沿着所述空芯光纤轴向地延伸;
内包层区域,所述内包层区域包括多个反谐振元件、即ARE,所述ARE沿着所述空芯光纤环绕所述芯区域,
其中所述ARE包括:具有第一最小横向ARE尺寸的第一组ARE;和具有第二最小横向ARE尺寸的第二组ARE,其中所述第二最小横向ARE尺寸小于所述第一最小横向ARE尺寸。
2. 根据权利要求1所述的空芯光纤,还包括外包层区域,所述外包层区域沿着所述空芯光纤包围所述内包层区域,
其中多个突起设置在所述外包层区域的内表面上,所述突起具有沿着所述空芯光纤的轴向延伸尺度,所述第二组ARE中的每一个ARE固定至多个突起的一个突起的顶部。
3. 根据权利要求2所述的空芯光纤,其中所述突起的横截面为斑点。
4. 根据权利要求2所述的空芯光纤,其中所述突起和ARE由相同的材料制成。
5. 根据权利要求4所述的空芯光纤,其中所述材料为玻璃。
6. 根据权利要求5所述的空芯光纤,其中所述玻璃是二氧化硅或ZBLAN。
7. 根据权利要求2所述的空芯光纤,其中所述ARE适于引导横向的ARE模,
所述突起的径向高度被选择成在所述芯区域中形成最圆形对称的导引模式。
8. 根据权利要求1-7中任一项所述的空芯光纤,其中所述ARE所形成的布置结构是两重对称的,从而获得双折射保持偏振的空芯反谐振反射光纤,或者
所述ARE所形成的布置结构是三重对称的。
9. 根据权利要求1-7中任一项所述的空芯光纤,其中,所述芯区域具有最小横向芯尺寸并适于引导横向的基本芯模和横向的更高阶芯模,
所述第一最小横向ARE尺寸与最小横向芯尺寸之比接近第一类Bessel函数的零点的商($u_{01,ARE}/u_{11,芯}$)与拟合系数的乘积,零点($u_{01,ARE}$)、($u_{11,芯}$)分别描述LP₀₁ ARE模和LP₁₁芯模,所述拟合系数在0.9至1.5的范围内,
其中拟合系数是这样的模型参数,该模型参数通过将分析模型匹配于空芯反谐振反射光纤的LP_{1m} ARE模和LP_{1m}更高阶芯模的矢量有限元(FE)建模而获得。
10. 根据权利要求9所述的空芯光纤,其中所述第一最小横向ARE尺寸与最小横向芯尺寸之比选自0.5至0.8的范围。
11. 根据权利要求10所述的空芯光纤,其中所述第一最小横向ARE尺寸与最小横向芯尺寸之比选自0.62至0.74的范围。
12. 根据权利要求10所述的空芯光纤,其中所述第二最小横向ARE尺寸与最小横向芯尺寸之比接近第一类Bessel函数的零点的商($u_{01,ARE}/u_{21,芯}$)与所述拟合系数的乘积,所述Bessel函数($u_{01,ARE}$)、($u_{21,芯}$)分别描述LP₀₁ ARE模和LP₂₁芯模。
13. 根据权利要求12所述的空芯光纤,其中所述第二最小横向ARE尺寸与最小横向芯尺寸之比选自0.3至0.7的范围。
14. 根据权利要求13所述的空芯光纤,其中所述第二最小横向ARE尺寸与最小横向芯尺寸之比选自0.45至0.54的范围。
15. 根据权利要求1-7中任一项所述的空芯光纤,其中所述ARE的数量是3、4、5、6或7。
16. 根据权利要求1-7中任一项所述的空芯光纤,其中所述ARE布置成使得ARE的横截面

分布在环绕所述芯区域的单一环上,或者

所述ARE布置成使得ARE的横截面分布在环绕所述芯区域的多个环上。

17. 根据权利要求1-7中任一项所述的空芯光纤,其中所述ARE具有圆形、椭圆形或多边形横截面。

18. 根据权利要求1所述的空芯光纤,其中所述ARE由以下材料制成:玻璃;聚合物;复合材料;金属;或者晶体材料。

19. 根据权利要求18所述的空芯光纤,其中所述玻璃是二氧化硅或ZBLAN。

20. 根据权利要求18所述的空芯光纤,其中所述聚合物是PMMA。

21. 根据权利要求1-7中任一项所述的空芯光纤,其中,所述芯区域和所述ARE中的至少一个被抽空或者填充以下材料中的至少一种:气体;液体;具有非线性光学响应性的材料。

22. 根据权利要求21所述的空芯光纤,其中,所述气体是空气、惰性气体、氢气中的至少一种。

23. 根据权利要求2所述的空芯光纤,其中,所述外包层区域的横截面为多边形,并且所述ARE定位在所述多边形的角部处,或者

所述外包层区域的横截面为弯曲的形状,并且所述ARE均匀地分布在所述弯曲的形状中。

24. 根据权利要求2所述的空芯光纤,其中,所述外包层区域的横截面为圆形,并且所述ARE均匀地分布在所述圆形中。

25. 根据权利要求1-7中任一项所述的空芯光纤,其中,所述ARE适于引导横向的ARE模,所述芯区域适于引导横向的基本芯模和横向的更高阶芯模,

所述芯区域和所述ARE构造成在宽带波长范围内提供所述更高阶芯模与所述ARE模的相位匹配。

26. 根据权利要求25所述的空芯光纤,其中,所述芯区域和所述ARE构造成在以下波长范围内提供所述更高阶芯模与所述ARE模的相位匹配:该波长范围覆盖基本芯模的空芯光纤透明窗内的所有波长。

27. 根据权利要求25所述的空芯光纤,其中,所述芯区域和所述ARE构造成在至少覆盖10THz的波长范围内提供所述更高阶芯模和所述ARE模的相位匹配。

28. 一种光学装置,包括至少一个根据前述权利要求中任一项所述的空芯光纤,其中,所述光学装置被配置为用于超连续谱生成的频率转换器。

空芯光纤及包括空芯光纤的光学装置

[0001] 本申请是申请日为2016年8月24日、发明名称为“空芯光纤及其制造方法”、申请号为201680062482.0的专利申请的分案申请。

技术领域

[0002] 本发明涉及一种非带隙类型(或者:空芯反谐振反射光纤,HC-AF)的空芯光纤(HCF;或者:空芯光子晶体光纤,HC-PCF),这种空芯光纤尤其具有轴向的空的芯区域以及内包层区域,内包层区域包括由包围芯区域的反谐振元件(ARE)形成的布置结构。此外,本发明涉及一种包括至少一个HC-AF的光学装置和一种制造非带隙类型的HCF的方法。本发明的应用可以在于以下领域:数据传输,尤其低延迟数据传输;高功率光束传输系统,尤其用于材料处理;模态滤波;基于气体的非线性光学,尤其从紫外线到红外线的超连续谱生成或超短脉冲生成;光纤陀螺仪;或者化学感测。

背景技术

[0003] 在本申请中,参考下述现有技术,这些现有技术示出光导纤维的技术背景,尤其是带隙类型或非带隙类型的HCF的技术背景。

[0004] [1]T.A.Birks等人,《Optics Letters》,1997.22(13):p.961-963;

[0005] [2]N.A.Mortensen等人,《Optics Letters》,2003.28(20):p.1879-1881;

[0006] [3]US2015/0104131A1;

[0007] [4]P.J.Roberts等人,《Optics Express》,2005.13(1):p.236-244;

[0008] [5]J.K.Lyngso等人,《22nd International Conference on Optical Fiber Sensors》,Pts 1-3,2012.8421;

[0009] [6]J.M.Fini等人,《Nature Communications》,2014.5:文章号5085;

[0010] [7]F.Couny等人,《Optics Letters》,2006.31(24):p.3574-3576;

[0011] [8]B.Debord等人,《Optics Letters》,2014.39(21):p.6245-6248;

[0012] [9]W.Belardi等人,《Optics Express》,2014.22(8):p.10091-10096;

[0013] [10]W.Belardi等人,《arXiv:1501.00586v2》,2015:p.[physics.optics];

[0014] [11]P.Jaworski等人,《Optics Express》,2015.23(7):p.8498-8506;

[0015] [12]A.Hartung等人,《Optics Express》,2014.22(16);

[0016] [13]Benabid,A.F.等人,《Hollow-core photonic crystal fibre》,美国专利US8306379B2,GLOptonics SAS;

[0017] [14]F.Polettiin《Optics Express》,2014.22(20):p.23807-23828;

[0018] [15]T.G.Euser等人,《Optics Express》,2008.16(22):p.17972-17981;

[0019] [16]E.A.J.Marcatili等人,《Bell Systems Technical Journal》,1964.43:p.1783-1809;

[0020] [17]J.M.Fini等人,《Optics Express》,2013.21(5):p.6233-6242;

[0021] [18]C.Wei等人,《Optics Express》,2015.23:p.15824;以及

[0022] [19]A.Hartung等人,《Optics Letters》,2015.40(14):p.3432。

[0023] 实芯光纤被普通知晓并广泛应用在例如数据通信应用中。实芯光纤可以被设计成用于在光纤材料(比如石英玻璃)的宽带传输范围中进行低损失的单模传输。所谓的无级单模制导(ESM(endlessly single-mode guidance),即所有的更高阶模式(higher order mode,HOM)是泄漏的而基本 LP_{01} 模式是完全受限的)在实芯光子晶体光纤(PCFs)中通过构造包围实芯的包层结构来实现,如图7A(现有技术)所示,以使得包层结构中的通道的直径 d 以及它们的中心—中心间距(中心间距离,即pitch) Λ 满足几何条件 $d/\Lambda < 0.41$ ([1,2])。然而,由于实心光纤材料中的光导性,会具有缺点:数据传输的延迟增加,产生光学非线性效应并由此产生新的光频率,并且损伤阈值相对较低的。

[0024] 由于空芯光子晶体光纤、即HC-PCF能够在被抽空(真空芯)的、填充以气体或液体的非实芯区域引导光,因而所述空芯光子晶体光纤与实芯光纤相比具有独特的优点,从而具有以下应用领域:比如低延迟的数据传输,高功率光束传输,基于气体的非线性光学,具有超低非线性的光引导以及化学感测。HC-PCF根据物理引导机制通过分为两类:空芯光子带隙光纤(HC-PBF)和空芯反谐振反射光纤(HC-AF)。

[0025] 图7B至7I(现有技术)示出不同类型的传统HC-PCF的扫描电子显微照片的集选。图7B和7C示出在中央空芯内借助于包层中的光子带隙而限制出模式的HC-PBF[4-6]。这些类型的PCF通常在电信波长下具有相对较低的损失(约 $< 20\text{dB/km}$)。然而,由于光子带隙的特定波长效应,这些类型的PCF仅仅在相对较窄的带宽(大约 $< 15\text{THz}$)上引导光。尽管通常而言HC-PBF支持HOM,但是Fini等人([6],[3])已经证实弯曲的HC-PBF可以通过使包层中包括“卫星”空芯(图7B)而有效地实现单模。这些卫星通过与它们相位匹配而在芯中高度抑制HOM,从而导致高HOM损失。HC-PBF也可以在使用足够小的芯的情况下在窄波谱范围(大约 $< 7\text{THz}$)上确定地实现单模(参见图7C)[5],但是这会导致制造上的困难以及对于期待的基本模式显著更高的损失。

[0026] 图7D至7I示出HC-AF结构、即具有主要基于反谐振效应的引导机制的光纤的集选。图7D和7E具有Kagomé晶格包层[7,8,13],并且图7F和7G具有单独的反谐振元件(ARE)(图7F)或套设的反谐振元件(图7G)所形成的一个环。图7H示出具有方形芯的HC-AF[12],图7I示出在紫外线上具有引导特性的HC-AF[19]。与HC-PBF相比,HC-AF由于非理想的约束而损失普遍更大,但是传输窗更宽。

[0027] F.Poletti从数值分析的角度证实:通过在套设ARE之间设置径向距离可以使得HC-AF在限定的波长区间上有效地实现单模[14],但是这没有得到实验的证实。尤其,模抑制在[14]中仅仅对于特定的中心波长和特定的结构参数 z/R 予以证实,其中, z 是ARE和ARE中的套设结构之间的直径差, R 是空芯的半径。这种理论发现不能扩展至HC-AF的通用设计和制造。

[0028] 而且,Wei等人([18])和A.Hartung等人([19])证实HOM抑制可以被增强。这通过在HC-AF中利用接触的ARE来实现,但是总的HOM抑制相对较低。根据[18],接触的ARE的厚度的变化对于空芯和ARE的有效折射率的影响已经被研究。HOM抑制的最佳厚度已经被发现。该方法的缺陷在于:HOM抑制仅仅针对特定的波长而并非宽的波长区间。

[0029] 与实芯光纤相比较,传统的HC-AF的一个特别的缺陷是它们难以实现纯粹的单模,即它们在相对较长的距离上支持更高阶模式(HOM)。由此,输出光束的质量被降级,这在许

多应用中是不被期待的,这是因为这会引入模态跳动(modal beating)、模糊焦斑并且如果光纤应力出现变化的话还会导致功率波动。传统的HC-AF的另一缺点源自其在制造上的限制,尤其是难以以充分稳定和可再现的方式将ARE定位在特定的方位处。

发明内容

[0030] 本发明的目的在于提供一种非带隙类型的改进的空芯光纤,这种空芯光纤能够克服传统HC-AF的缺陷。尤其,HC-AF被设置成具有单模传输的扩大的波长范围,增加的HOM损失,和/或最高指数芯HOM与基本模式、例如 LP_{01} 模式之间的增加的损失比。此外,本发明的目的在于提供一种装配有至少一个HC-AF并克服传统光学装置的限制的改进光学装置,尤其在低损失单模制导上、无损伤高功率光传输上以及目标性形成光学非线性效应上改进的光学装置。此外,本发明的目的在于提供一种制造非带隙类型的空芯光纤的改进的方法,从而得到根据本发明的改进的HC-AF并克服传统制造方法的限制。

[0031] 这些目的通过一种非带隙类型的空芯光纤、一种光学装置以及一种制造非带隙类型的空芯光纤的方法来实现,所述空芯光纤、所述光学装置和所述方法分别包括独立权利要求的特征。本发明的有利实施例和应用限定在从属权利要求中。

[0032] 根据本发明的第一总体方面,上述目的通过一种非带隙式空芯光纤来实现,这种空芯光纤包括沿着空芯光纤的纵向延伸轴向地布置的空的芯区域以及内包层区域,所述内包层区域包括多个反谐振元件、即ARE所形成的布置结构,ARE沿着空芯光纤的长度包围芯区域。芯区域适于引导耦合到HC-AF中的光域的横向基本芯模和横向更高阶芯模。芯区域具有最小横向芯尺寸(D),所述最小横向芯尺寸(D)是布置在芯区域的径向相反的两侧上的ARE之间的最小的距离。优选地,所示最小横向芯尺寸沿着HC-AF的长度是恒定的。每个ARE适于引导横向ARE模,并且第i个ARE具有最小横向ARE尺寸(d_i)。优选地,最小横向ARE尺寸沿着HC-AF的长度也是恒定的。芯区域和ARE构造成提供芯区域的更高阶芯模与ARE的ARE模之间的相位匹配。换言之,更高阶芯模和ARE模具有彼此相等或近似的折射率,以使得更高阶芯模可以谐振地耦合至ARE模,即ARE模可以被更高阶芯模激励。

[0033] 根据本发明的HC-AF的空的芯区域由空芯光纤的内空间形成,所述内空间是空的(被抽空)或填充有气体(尤其是空气、惰性气体和氢气中的至少一种)、液体、和/或具有非线性光学响应性的材料(例如上述气体中的至少一种或Rydberg气体)。对应地,术语“空的芯区域”涵盖具有以下特点的任何纵向波导结构:在波导结构的内空间中没有固体材料。芯区域具有由它的材料确定的第一折射率,而芯模的折射率(或有效折射率)由材料折射率、芯区域的形状和激励波长确定。

[0034] 在径向上,芯区域被ARE包围,这些ARE以非接触的方式布置。换言之,内包层区域包括单独的ARE在没有角向接触的情况下所形成的布置结构。术语“反谐振元件”即ARE(或者:“管”或“包层毛细管”)指的是直径小于空的芯区域并沿着HC-AF的长度延伸的任何空心波导元件。优选地,内包层区域的ARE的壁厚度比芯尺寸D的20%要小,例如 $<5\mu\text{m}$ 。所有的ARE都具有相同的最小内尺寸,或者每个ARE可以具有不同的最小内尺寸。包围芯区域的内包层区域的折射率(第二折射率)大于芯区域的第一折射率。空ARE是空的(被抽空)或填充以比如气体或液体,例如像芯区域那样的气体或液体。

[0035] 偶数个、例如4个或6个ARE,或者奇数个、例如3个或5个或7个ARE被提供,这些ARE

可以以布置成限界芯区域的偶数或奇数重对称。优选地,ARE是非套设的ARE,和/或ARE由玻璃(尤其二氧化硅)、塑料材料(尤其聚合物)、复合物(尤其ZBLAN光纤复合物)、金属或晶体材料制成。优选地,为了保持ARE,外包层区域被提供,其中,ARE附接至外包层区域的内表面。

[0036] 根据本发明,每个ARE尺寸(d_i)和芯尺寸(D)选择成使得ARE尺寸与芯尺寸之比(d_i/D)接近第一类Bessel函数的零点的商($u_{1m,ARE}/u_{1m,芯}$)与一拟合系数的乘积,所述拟合系数位于0.9至1.5的范围内,优选地位于0.96至1.20的范围内,其中,m是1阶第一类Bessel函数的第m个零点,Bessel函数的所述零点分别相应地描述(建模计算)LP_{1m} ARE模和LP_{1m}更高阶芯模。有利地,发明人已经发现仅仅取决于一个无量纲的几何参数(d_i/D)的模态滤波效应,类似于用于无级单模实芯PCF的公知 d/Λ 参数。

[0037] 发明人已经发现LP_{1m} ARE模和LP_{1m}更高阶芯模的模态折射率(modal refractive indices)可以被基于耦合的毛细管波导的模式的一种分析模型所代表,所述耦合的毛细管波导的模式近似于Marcatili-Schmeltzer表达,Marcatili-Schmeltzer表达基于提供模式的Bessel函数的零点和所述拟合系数。在以下情况下可以实现LP_{1m} ARE模和LP_{1m}更高阶芯模的相位匹配、即它们的模态指数的匹配:ARE尺寸与芯尺寸之比(d_i/D)适于第一类Bessel函数的零点的商($u_{1m,ARE}/u_{1m,芯}$)与拟合系数的乘积。

[0038] 优选地,拟合系数是这样的模型参数,该模型参数通过将分析模型匹配于HC-AF的LP_{1m} ARE模和LP_{1m}更高阶芯模的矢量有限元(FE)建模而获得。尤其,拟合系数通过第一因子与第二因子相除而获得,所述第一因子将分析模型与LP_{1m}更高阶芯模的FE模型匹配,而第二因子将分析模型与LP_{1m} ARE模的FE模型匹配,如下文中参考方程(4)所进一步说明的。

[0039] 术语“近似”(或“适于”)包括ARE尺寸与芯尺寸之比等于第一类Bessel函数的零点的商与拟合系数的乘积,或者ARE尺寸与芯尺寸之比与第一类Bessel函数的零点的商与拟合系数的乘积之间的差尽可能地小,以使得最高指数芯HOM与LP₀₁芯模之间的损失比(dB/m)为>5,尤其>10或甚至>25,优选地>50。

[0040] 有利地,对于用于选取ARE尺寸与芯尺寸之比的上述条件,发明人发现用于HC-AF的一个新的设计参数,该新的设计参数能够使耦合至ARE模的HOM的宽带范围例如大至能覆盖它的基本芯模的透明窗内的所有波长。根据本发明,芯区域和ARE的折射率在宽波长范围内彼此相等或近似,所述宽波长范围优选为至少10THz,尤为优选为至少20THz。

[0041] 除了基本模式以外的所有模式被高度抑制,从而获得HC-AF的有效单模行为(有效无极单模行为,eESM)。与(有效)单模HC-PBF[17]不同的是,所建议的HC-AF结构在相对较低的损失下提供大得多的带宽并同时提供eESM行为。此外,与[18]中描述的HC-AF不同的是,其中,在[18]中仅仅优化了包层中的玻璃毛细管的厚度,本发明提供了用于ARE尺寸与芯尺寸之比的新的设计参数。该新的设计提供真实的相位匹配,而在[18]中没有实现相位匹配(参见[18]中的图2a)。与用于HC-PBF的SM引导[6]不同的是,其中,在[6]中分流器(shunt)已经被包含在带隙包层中以针对相对较窄的波长范围增强HOM抑制,根据本发明的HC-AF在扩大的频率范围上支持HOM抑制。

[0042] ARE尺寸与芯尺寸之比基于以下模型来选择,该模型已经被发明人证实能够用来描述具有圆形横截面的管状ARE(ARE毛细管),如下所述。在这种情况下,最小横向ARE尺寸(d_i)是ARE的内直径。作为本发明的另外的优点,所选择的设计参数并非仅仅对于管状ARE

是有效的,而是对于具有其它横截面、比如椭圆形或偶数多边形横截面的ARE也是有效的。在后一种变型例的情况下,最小横向ARE尺寸(d_1)是ARE的最小内横截面尺寸。发明人已经发现:如果非圆ARE像管状ARE那样被近似地模型化的话,那么基于管状ARE的模型也能提供对非圆ARE中的HOM抑制的出色的接近。

[0043] 根据本发明的一优选的实施例,ARE具有第一最小横向ARE尺寸(d_1)并且第一最小横向ARE尺寸与芯尺寸之比(d_1/D)近似于第一类Bessel函数的零点的商($u_{01,ARE}/u_{1,芯}$)与拟合系数的乘积,所述零点($u_{01,ARE}$)、($u_{11,芯}$)分别描述LP₀₁ARE模和LP₁₁芯模。对应地,芯区域的最明显的HOM、即LP₁₁芯模耦合至ARE模。对于该实施例,优选地,所有的ARE具有相同的最小横向ARE尺寸。例如,所有的ARE是具有相同内直径的管状ARE。根据该实施例的尤为优选的变型例,第一ARE尺寸与芯尺寸之比(d_1/D)选自0.5至0.8的范围,优选地选自0.60至0.75的范围,尤其位于0.62至0.74的范围内。有利地,HC-AF设置有以下这些范围,从而在它的传输窗内的所有波长下对于基本模式具有低损失的引导,并能强烈地抑制LP₁₁芯模以及所有的更高阶模。

[0044] 根据本发明的另一有利实施例,ARE包括具有第一ARE尺寸(d_1)的第一组ARE和具有第二最小横向ARE尺寸(d_2)的第二组ARE,所述第二最小横向ARE尺寸(d_2)小于第一组ARE的第一ARE尺寸(d_1)。在该实施例中,第二ARE尺寸与芯尺寸之比(d_2/D)接近第一类Bessel函数的零点的商($u_{01,ARE}/u_{21,芯}$)与所述拟合系数的乘积,所述Bessel函数($u_{01,ARE}$)、($u_{21,芯}$)分别描述LP₀₁ARE模和LP₂₁芯模。具有第一ARE尺寸的ARE和具有第二ARE尺寸的ARE以交替的方式布置,从而环绕HC-AF的空芯区域。

[0045] 根据该实施例的尤为优选的变型例,第二ARE尺寸与芯尺寸之比(d_2/D)选自0.3至0.7的范围,优选地选自0.43至0.59的范围,尤其位于0.45至0.54的范围内。有利地,HC-AF设置有这些范围从而进一步提高HOM抑制。

[0046] 有利地,多个变型例可以用于设计ARE布置结构,所述ARE提供根据本发明的HC-AF的内包层区域。这些变型例可以基于本发明的具体应用选择成替代例或组合例。首先,ARE布置结构可以具有三重对称。替代地,ARE布置结构可以具有两重对称并获得光学双折射。此外,ARE可以布置成使得其横截面分布在环绕芯区域的单一环上。替代地,ARE可以布置成使得其横截面分布在多个、例如两个、三个或更多个环绕芯区域的共轴环上。有利地,可以利用本发明的这些变型例来实现具有改进的HOMS抑制的更低损耗的HC-AF。

[0047] 用于保持ARE的外包层区域的形状为空心衬套,该空心衬套沿着HC-AF延伸并具有用于衔接ARE的内表面、以及外表面,所述外表面可以作为HC-AF的表面而是暴露的,或者可以覆盖有另外的层,例如保护层(比例聚合物涂层)或不透明层。根据本发明的一变型例,外包层区域具有内横截面,内横截面的形状为正多边形、例如六边形,并且ARE固定至所述多边形的角部。有利的是,每个ARE沿着两个与外包层区域的内表面接触的接触线固定,从而在制备预制件时提高内包层区域(ARE)的机械稳定性。此外,ARE通过布置在多边形的角部而以固定的角向间距固定。根据本发明的一替代变型例,外包层区域具有内横截面,所述横截面的形状为弯曲的、尤其是圆形的,并且ARE在弯曲的形状中均匀地分布。

[0048] 根据本发明的第二总体方面,上述目的通过一种光学装置来实现,这种光学装置包括至少一个根据本发明的上述第一总体方面的空芯光纤。优选地,光学装置包括以下装置中的至少一个:模态滤波装置,光源(尤其是激光器),光学放大器,光束传输系统,数据通

信系统,频率转换器(尤其用于超连续谱生成),或者脉冲整形器(尤其用于脉冲压缩)。

[0049] 根据本发明的第三总体方面,上述目的通过一种制造根据本发明的上述第一总体方面的空芯光纤的方法来实现。优选地,所述制造空芯光纤的方法包括以下步骤:提供ARE预制件和空心套预制件,将ARE预制件以分布的方式固定在套预制件的内表面上,并且,加热并拉伸包括ARE预制件的套预制件直至设定最终的ARE尺寸和芯尺寸。

[0050] 可选地,包括ARE预制件的套预制件在第一加热和拉伸步骤中被首次拉伸成杆状,然后在第二加热和拉伸步骤中被拉伸成纤维直至设定最终的ARE尺寸和芯尺寸。

[0051] 优选地,加热和拉伸步骤包括将真空或增加的流体压力施加至套预制件和ARE预制件中的至少一个以分别设定ARE尺寸和芯尺寸。有利地,这使得能够精确地调节芯区域的最小横向芯尺寸(D)和ARE的最小横向ARE尺寸(d_1)。

[0052] 根据本发明的一有利实施例,ARE和芯尺寸在最终的加热和拉伸步骤中被选择、优选被设定,以在大于20THz的频率范围内获得更高阶芯模与ARE模之间的相位匹配。这可以通过理论考虑或参考测量来实现。

[0053] 根据本发明的另外的有利实施例,后处理步骤可以被提供,在后处理步骤中,芯区域和反谐振元件中的至少一个可以被填充以以下材料的至少一种:气体,尤其是空气、惰性气体和/或氢气;液体;和/或具有非线性光学响应性的材料。为此,空芯光纤的至少一部分可以封装在一单元中。该单元和所有的空的芯区域可以被填充以来自外部贮存器的材料;或者,空的芯区域中的一些被填充以来自第一外部贮存器的材料,而另一些被填充以来自第二外部贮存器的另一种材料。这种后处理步骤可以在光纤应用于例如光学实验之前不久或者应用在例如光学实验的过程中执行。之后可以进行另外的后处理步骤,以使根据本发明的光纤适于其应用场合,例如适于应用在数据传输或非线性光学中。

附图说明

[0054] 本发明的更多的优点和细节将在下文中参考附图予以说明,所述附图示出:

[0055] 图1:示出根据本发明的优选实施例的HC-AF的横截面;

[0056] 图2:示出图表以示出 d/D 变化时芯区域的HOM与ARE模的耦合及数值模拟,以寻找ARE尺寸 d 与芯尺寸 D 的最佳比;

[0057] 图3:示出数值模拟的图表以示出根据本发明的HC-AF的可缩放性;

[0058] 图4:示出将根据本发明的模型用于设计HC-AF;

[0059] 图5:示出根据本发明的一示例性实施例的光学装置;

[0060] 图6:示出制造根据本发明的HC-AF的方法的步骤;并且

[0061] 图7:示出传统的实芯或空芯光纤的横截面(现有技术)。

具体实施方式

[0062] 在下文中,示例性地参考对HC-AF的合适的几何形状、尤其芯和ARE(比如内包层区域中的玻璃毛细管)的直径的选取。实施本发明不局限于几何量、比如尺寸 D 、 d 和 t 所示出的示例,而是提供根据本发明的设计参数的变化的值也是可能的。HC-AF及其制造和应用的特征在现有技术已知的地方没有被说明。

[0063] HC-AF的实施例

[0064] 图1A至1E示出本发明的HC-AF 100的实施例的横截面(垂直于HC-AF 100的轴向)。亮圈代表ARE或外包层区域的固体材料,比如石英玻璃或二氧化硅,而黑色部分不具有固体材料(被抽空或填充以气体或液体)。HC-AF 100的几何设计如以下文的模型段落中所描述的那样来选择。

[0065] 每个HC-AF 100包括空的芯区域10(在图1A中由虚线圈表示)、具有多个ARE 21的内包层区域20、和外包层区域30。空的芯区域10是ARE 21之间的空白的空间,该空间沿着HC-AF 100的纵向长度延伸并具有最小横向芯尺寸D。内包层区域20的ARE 21包括毛细管,毛细管具有壁厚度 t 和最小横向ARE尺寸 d 。ARE 21固定至外包层区域30的内表面,如下文参考图6所描述的。外包层区域30包括较大的毛细管,所述较大的毛细管例如由玻璃制成并提供HC-AF 100的闭合包层。

[0066] 图1A的HC-AF 100示出一实施例,在该实施例中,ARE 21包括由六个具有圆形横截面的薄壁式毛细管(内直径 $d=13.6\mu\text{m}$,壁厚度 $t=0.2\mu\text{m}$)构成的单一环,这六个薄壁式毛细管以六重对称图案布置在外包层区域30的较大的毛细管内从而形成具有直径 D (径向上相反布置的ARE 21之间的最短距离)的中央空芯,其中, $D=20\mu\text{m}$ 。外包层区域30的外直径是 $125\mu\text{m}$ 并且包层厚度是 $38\mu\text{m}$ 。替代地,芯尺寸 D 可以选自 $10\mu\text{m}$ 至 $1000\mu\text{m}$ 的范围,其中,其它几何参数(比如 d 、 t)对应地放大或缩小。

[0067] 图1B示出一改型实施例,在该改型实施例中,由以六重对称的方式布置在外包层区域30内的多个ARE 21构成多个、尤其是两个共轴环($d=13.6\mu\text{m}$, $t=0.2\mu\text{m}$,并且 $D=20\mu\text{m}$)。为了保持由ARE 21构成的内环和外环,支撑管22包含在HC-AF 100内。支撑管22例如由二氧化硅制成并且直径例如为 $48\mu\text{m}$ 。

[0068] 图1C和1D示出根据本发明的HC-AF 100的一种三重对称布置并且图1E示出根据本发明的HC-AF 100的一种两重对称布置,从而有利地提供增强的eESM效应。

[0069] 根据图1C,ARE 21A、21B包括具有较大的第一ARE尺寸 d_1 (例如 $13.6\mu\text{m}$)的第一组ARE 21A和具有较小的第二ARE尺寸 d_2 (例如 $10.2\mu\text{m}$)的第二组ARE 21B,这两组ARE的壁厚度例如均为 $0.2\mu\text{m}$ 。在外包层30的内表面上,纵向突起31被设置,所述纵向突起具有沿着HC-AF 100的轴向延伸尺度。在图1C的剖视图中,突起31示出为斑点。优选地,突起31和ARE由相同的材料、例如玻璃制成。较小的ARE 21B中的每个分别固定至相应的一个突起31的顶部。ARE 21A、21B环绕直径 $D=20\mu\text{m}$ 的芯区域10。突起31的径向高度优选地选择成在中央芯区域10中形成最圆形对称的导引模式。替代地,突起31可以被省去,从而得到更简单的结构,如图1D所示。

[0070] 通过布置ARE 21A、21B以形成两重对称结构(图1E),可以获得双折射保持偏振的HC-AF,从而呈现eESM行为。

[0071] 根据本发明的如图1所示的HC-AF 100的示例可以被改型,尤其可以在以下方面被改型:ARE 21、21A、21B的形状,ARE 21、21A、21B可以例如具有椭圆形或多边形横截面;外包层30的内部形状,外包层30可以例如具有多边形横截面(参见图6);ARE 21、21A、21B的固体材料,该固体材料可以包括例如塑料(比如PMMA)、玻璃(例如二氧化硅)、或者软玻璃(例如ZBLAN);ARE 21、21A、21B的尺寸;由ARE构成的环的数量,环的数量例如为三个或三个以上;ARE的数量,ARE的数量例如是4个或5个或7个或7个以上;以及ARE布置的对称方式。

[0072] 用于HC-AF设计的模型

[0073] 根据本发明的HC-AF 100的ARE尺寸(d_1)和芯尺寸(D)选择成使得ARE尺寸与芯尺寸之比(d_1/D)接近第一类Bessel函数的零点的商($u_{1m,ARE}/u_{1m,芯}$)乘以上文所限定的拟合系数。如果全部的ARE都具有相同的ARE尺寸(d_1),那么ARE尺寸与芯尺寸之比(d_1/D)优选地接近第一类Bessel函数的零点的商($u_{01,ARE}/u_{11,芯}$)与拟合系数的乘积,其中,零点($u_{01,ARE}$), ($u_{11,芯}$)分别描述LP₀₁ARE模和LP₁₁芯模。如果另外的ARE具有较小的第二ARE尺寸,那么第二ARE尺寸与芯尺寸之比(d_2/D)优选地接近第一类Bessel函数的零点的商($u_{01,ARE}/u_{21,芯}$)乘以拟合系数,其中,Bessel函数($u_{01,ARE}$), ($u_{21,芯}$)分别描述LP₀₁ARE模和LP₂₁芯模。

[0074] 这些设计条件是基于下文参考图2至4所示出的理论考虑和数值模拟而发现的。这些理论考虑和数值模拟可以对应地扩展至高于LP₂₁芯模的芯模与ARE模的耦合。

[0075] HC-AF 100的中央芯区域10支持多种横向芯模,这多种横向芯模中的每种均具有特征模型折射率和泄漏损失。根据本发明的结构设置成使得LP₀₁模式(具有最高有效折射率)的损失远低于任何芯HOM的损失。这通过以下方式来实现:将ARE 21、21A、21B以及ARE 21、21A、21B之间的间隙设计成支持与芯区域10中的HOM相位匹配的泄漏模式(或状态)带,从而具有更高的泄漏性。这种高度的损失区分可以形成足以获得eESM行为的宽带。

[0076] 图2A示出图1A(左边)的HC-AF 100从而示出基本LP₀₁芯模(中间)和LP₁₁芯模(右边)以及泄漏ARE模(右边),LP₁₁芯模和更高阶芯模谐振地耦合至泄漏ARE模。图2B示出有限元(FE)建模计算的有效折射率随参数 d/D 的变化曲线,并且图2C示出变化的ARE尺寸 d 但恒定的芯尺寸 D 下的泄漏损失的变化曲线。图2C中的中央曲线示出对应的HOM抑制。虚线示出对于具有直径 d 和厚度 t 的自由站立的管的LP₀₁模式的全矢量计算值。示例性结构参数是 $t/D=0.01$ 并且 $D/\lambda=20$, $n_{玻璃}=1.45$ 和 $n_{芯}=1$ 。

[0077] 图2A中示出的结构支持由ARE 21的具有负曲率的壁处的反谐振反射所形成的多种泄漏横向芯模。ARE 21支撑由内包层区域20提供的包层光子带结构并且所述ARE 21可以大致近似于自由站立的薄壁管。外包层区域30的厚的包围性玻璃壁没有显著地影响模态特性,而是被设置成在物理上支撑ARE 21。

[0078] 图2B示出ARE直径变化从而有效地改变包层光子带结构时(对于固定的 D)的两个折射率最高的芯模LP₀₁和LP₁₁的有效折射率分布。LP₀₁芯模的折射率足够高以足以避免与基本ARE模的谐振耦合,并保持几乎独立于 d/D ,而LP₁₁芯模在 $d/D\approx 0.68$ 时强烈地抵抗与基本ARE模的抗交叉。在远离该抗交叉点移动时,偶数和奇数本征模式以渐进的方式演变成脱耦的LP₁₁芯模和基本ARE模。更为高阶的芯模(图2B中未示出)具有更低的折射率并耦合至ARE环的高度泄漏模式,这些高度泄漏模式中的一些集中在ARE 21之间的间隙内。

[0079] 图2C绘制出LP₀₁模式及两个混合LP₁₁/ARE₀₁模式的计算出的泄漏损失。在图示的区间上,LP₀₁芯模具有相对较为恒定的损失,该相对较为恒定的损失在 $d/D\approx 0.65$ 处具有最小值0.17dB/m。ARE 21直径越小,损失越大,从而密切地匹配于孤立的厚壁式介电毛细管在极限 $d/D\rightarrow 0$ (图2C中未示出)时的值。该极限被用来交叉校验FE计算结果与分析结果[16],尤其用来交叉校验完全匹配层(PML, perfectly matched layer)的精确性。在抗交叉点处,这两个混合LP₁₁/ARE₀₁模式的损失剧烈地增加,几乎达到真空下孤立的毛细管的值(棕色虚线),真空下孤立的毛细管的值是通过解呈全矢量形式的麦克斯韦方程而计算出的。这进一步确认PML是否被正确地设置。

[0080] HOM抑制在抗交叉点处剧烈地增加,从而达约1200的峰值。在远离抗交叉点处,

HOM抑制下降至小于5,这类似于在kagomé-PCF[15]中通常所达到的值。为了综合分析,所有更高阶芯模的HOM抑制必须被计算。FE建模计算揭示出在LP₁₁芯模后具有次最低损失的HOM是四瓣式LP₂₁芯模,其中,d/D≈0.68处的HOM抑制为~70,并且相对于基本ARE模的抗交叉点位于d/D≈0.51处。然而,在实验中,这种特别的芯模不太可能被端射照明激励或被来自的芯模LP₀₁的由应力和弯曲所引起的散射激励(折射率差是LP₁₁芯模的大致两倍)。FE建模计算表明更加高阶的LP_{1m}芯模不影响总的HOM抑制,这是因为它们与ARE环的模式(ARE环的模式中的一些集中在ARE 21之间的间隙)相位匹配,从而造成强泄漏损失。

[0081] 图3A绘制出:在恒定的d/D=0.68和t/D=0.01下,LP_{1m}芯模与基本ARE模的折射率之差 Δn_{1m} 相对于D/λ(λ:波长)的变化。 Δn_{01} 随着D/λ的增加而降低但是总体保持为正的。由此,LP₀₁芯模相对于基本ARE模是反谐振的并保持受限于芯(还参见图3A中的插入图表的左图面)。与之不同的是, Δn_{11} 要小得多,在D/λ≈66处达到像10⁻⁶这样小的值。

[0082] 在某些D/λ值处,在LP₀₁模式与第q阶横向模式之间于ARE 21的玻璃壁中出现抗交叉点,这遵循以下简单关系:

$$[0083] \quad \left(\frac{D}{\lambda}\right)_q \approx \frac{q}{2(t/D)\sqrt{n_g^2-1}} \quad (1)$$

[0084] 图3中的竖虚线居于这些谐振中的前两个谐振处,对于t/D=0.01。在这些点附近,LP₀₁芯模通过谐振的ARE 21快速地泄漏到实心玻璃套30中,从而产生与孤立的厚壁式介电毛细管[16]的损失值接近的损失值;结果是HOM抑制的强下降(参见图3B)。然而,在离开这些窄区间处,HOM抑制保持相对较高,原因在于LP₁₁芯模与基本ARE模的折射率保持彼此接近。结果是在LP₀₁模传输的所有范围上都具有非常强的LP₁₁芯模抑制。

[0085] 为了解释对于所有的波长最大HOM抑制出现在d/D=0.68处的原因(除了ARE壁谐振附近,参见方程1),发明人已经应用一种分析模型,在该分析模式中,具有芯10和ARE 21的真实结构被视作厚壁式毛细管(参见图4A)。厚壁式毛细管中的LP_{1m}模式的模态指数可以近似于经改型的Marcatili-Schmeltzer公式[16]:

$$[0086] \quad n_{1m} = \sqrt{1 - \left(\frac{u_{1m}}{\pi f_s}\right)^2 \left(\frac{\lambda}{d_i}\right)^2} \quad (2)$$

[0087] 其中,u_{1m}是Bessel函数J₁的第m个零点,d_i是毛细管的内直径。参数f_s(其值接近1,s=co代表芯10,并且s=ARE代表ARE 21)被用来将来自模型方程的分析值试探性地拟合于FE模拟结果。它校正了非圆芯以及芯10和ARE 21的有限壁厚度。

[0088] 图4B绘制出两个LP₁₁/ARE₀₁混合模式的有效折射率连同对于LP₁₁模式的拟合值(零线),该拟合值是借助于方程(2)、对于芯10利用拟合参数f_{co}=1.077并对于ARE 21的利用拟合参数f_{ARE}=0.990而计算出的。方程(2)的便利的分析形式允许得到针对以下d/D值的简单表达:在该d/D值处,LP₁₁芯模和ARE₀₁模式最佳地耦合:

$$[0089] \quad \frac{d}{D} = \frac{u_{01}}{u_{11}} \frac{f_{co}}{f_{ARE}} = 0.68 \quad (3)$$

[0090] 方程 (3) 提供一种用于稳健地设计单模 eESM PCF 的便利的拇指规则。为了首次接近, 它既没有取决于折射率也没有取决于光纤的绝对物理尺寸, 从而使得设计是可相应地缩放。这意味着: 如果保持 d/D 比, 则能够设计大芯 eESM PCF 并能够将若干 dB/km 的损失在多个传输窗中传递, 这些多个传输窗中最宽的一个的尺寸大于一个八度。

[0091] 通过利用方程 (2) 还可以容易地发现更高阶芯模 (例如 LP_{21} 芯模) 被有效地抑制处的结构参数。而且, 通过调整物理尺寸, 谐振带可以蓝/红偏移 (对于更小的/更厚的壁厚度 t) 并且 LP_{01} 芯模的最小传输损失可以被调整 (对于变化的芯直径)。

[0092] 方程 (2) 也可以用来找到用于设计具有增强的 eESM 效应的 HC-AF 的合适的几何参数以, 具有增强的 eESM 效应的 HC-AF 也就是以下光纤: 在该光纤中, 芯的前两个 HOM 耦合至 ARE 中的谐振。这得到以下条件:

$$\frac{d_1}{D} = \frac{u_{01}}{u_{11}} \frac{f_{co}}{f_{ARE}} = 0.68 \quad \text{and} \quad \frac{d_2}{D} = \frac{u_{01}}{u_{21}} \frac{f_{co}}{f_{ARE}} = 0.51 \quad (4)$$

[0093] 具有这种增强 eESM 效应的光纤结构在图 1C 至 1E 中示出, 其由具有不同的内直径 d_1 和 d_2 的 ARE 所组成的一个或多个单一环构成。

[0094] 光学装置的实施例

[0095] 根据本发明的 HC-AF 100 对于光导、例如光束传输、数据传输或频率转换具有多种应用。对应地, 代表本发明的另一主题的光学装置包括至少一个根据本发明的 HC-AF 100 和另外的光学构件、监测构件、检测器构件和/或控制构件, 这些构件是基于光学装置的具体应用来选择的。

[0096] 图 5 示意性示出根据本发明的一实施例的光学装置 200, 这种光学装置适于高功率光束传输, 例如适于表面加工。光学装置 200 包括光源 210 (比如激光源) 和 HC-AF 100。光源 210 的输出与 HC-AF 100 的输入侧光学耦合, 而 HC-AF 100 的输出侧指向光束传输的部位 (参见箭头)。

[0097] 在本发明的替代应用的情况下, 光源 210 包括用于在 HC-AF 100 中驱动频率转换过程、尤其是超连续谱生成过程或脉冲压缩的激光源。根据另一应用, 光源 210 可包括数据通信系统的光学发射器, 该光学发射器通过 HC-AF 100 与光学接收器 (未示出) 耦合。

[0098] 需要说明的是, 图 5 仅仅代表一种示意图。包括至少一个根据本发明的 HC-AF 100 的光学装置的细节可以如传统光学装置所知晓的那样来实施。

[0099] 制造 HC-AF 的方法

[0100] 图 6 示意性示出制造根据本发明的 HC-AF 100 的主要步骤。图 6 仅仅是一个示意图, 其示出以下主要步骤: 提供 ARE 预制件 23 和空心套预制件 32 (图 6A), 将 ARE 预制件 23 固定在套预制件 32 的内表面上 (图 6B) 并且加热并拉伸包含有 ARE 预制件 23 的预制件套 32 以获得 HC-AF 100 (图 6C)。可选地, 加热和拉伸步骤可包括: 第一步, 将带有 ARE 预制件 23 的套预制件 32 加热并拉伸成杆状; 第二步, 加热并拉伸所述杆状直至 ARE 尺寸和芯尺寸被设定。图 6A、6B 和 6C 中的步骤的细节可以如传统光纤制造方法中所知晓的那样来实施。

[0101] 根据图 6A, 套预制件 32 是由玻璃制成的空心管状形式, 其内横截面为正六边形。套预制件 32 的外直径例如为 28mm, 而内横向尺寸为约 22mm。套预制件 32 和 ARE 预制件 23 的纵向长度是大约 120cm。

[0102] 在图6B的固定步骤中,ARE预制件23被固定至套预制件32的内六边形的角部。这通过施加加热而使ARE预制件和套预制件之间形成物理连接来实现。随后,套预制件32和ARE预制件23的复合物在施加加热的过程被拉伸直至获得ARE和芯横向尺寸。ARE和芯横向尺寸可以通过在加热和拉伸的步骤中向套预制件32和/或ARE预制件23施加真空或增加的压力来影响。

[0103] 在加热和拉伸步骤过程中施加真空或增加的压力在图6B中示意性示出。套预制件32的中空内空间连接至第一外部贮存器41、比如加压氮气源。此外,ARE预制件23连接至至少一个第二外部贮存器42、例如外部加压氮气源。如果所有的ARE要被制造成具有同样的内横向尺寸,那么所有的ARE可以连接至共同的外部贮存器。否则,例如,两组ARE连接至两个不同的外部贮存器以形成不同的内横向尺寸,例如在图1E中所示。最终的加热和拉伸步骤例如在炉中执行,该炉是根据套预制件32和ARE预制件23的材料所选取的(例如对于二氧化硅成分为约2000°C)。

[0104] 在获得最终的HC-AF 100后,HC-AF可以被填充以气体(比如空气或惰性气体或氢气)或液体(比如水),并且HC-AF 100的输入侧和输出侧被能承受高流体压力并部分地可透射(例如通过包括玻璃板)以用于光学辐射(例如来自激光源)的单元封围。

[0105] 在以上说明、附图以及权利要求中公开的本发明的特征对于本发明的实施以它的不同的实施例单独地、组合地或者子组合地重要的。

[0106] 可以使用以下方面进一步描述实施例:

[0107] 1、一种空芯光纤,包括:

[0108] 空的芯区域,所述芯区域沿着所述空芯光纤轴向地延伸;

[0109] 内包层区域,所述内包层区域包括多个反谐振元件、即ARE,所述ARE沿着所述空芯光纤环绕所述芯区域,

[0110] 其中所述ARE包括:具有第一最小横向ARE尺寸的第一组ARE;和具有第二最小横向ARE尺寸的第二组ARE,其中所述第二最小横向ARE尺寸小于所述第一最小横向ARE尺寸。

[0111] 2、根据方面1所述的空芯光纤,还包括外包层区域,所述外包层区域沿着所述空芯光纤包围所述内包层区域,

[0112] 其中多个突起设置在所述外包层区域的内表面上,所述突起具有沿着所述空芯光纤的轴向延伸尺度,所述第二组ARE中的每一个ARE固定至多个突起的一个突起的顶部。

[0113] 3、根据方面2所述的空芯光纤,其中所述突起的横截面为斑点。

[0114] 4、根据方面2所述的空芯光纤,其中所述突起和ARE由相同的材料、例如玻璃制成,所述玻璃尤其是二氧化硅或ZBLAN。

[0115] 5、根据方面2所述的空芯光纤,其中所述ARE适于引导横向的ARE模,

[0116] 所述突起的径向高度被选择成在所述芯区域中形成最圆形对称的导引模式。

[0117] 6、根据方面1-5中任一项所述的空芯光纤,其中所述ARE所形成的布置结构是两重对称的,从而获得双折射保持偏振的空芯反谐振反射光纤,或者

[0118] 所述ARE所形成的布置结构是三重对称的。

[0119] 7、根据方面1-5中任一项所述的空芯光纤,其中,所述芯区域具有最小横向芯尺寸并适于引导横向的基本芯模和横向的更高阶芯模,

[0120] 所述第一最小横向ARE尺寸与最小横向芯尺寸之比接近第一类Bessel函数的零点

的商 ($u_{01,ARE}/u_{11,芯}$) 与所述拟合系数的乘积, 零点 ($u_{01,ARE}$)、($u_{11,芯}$) 分别描述 LP_{01} ARE 模和 LP_{11} 芯模。

[0121] 8、根据方面7所述的空芯光纤, 其中所述第一最小横向ARE尺寸与最小横向芯尺寸之比选自0.5至0.8的范围, 尤其是选自0.62至0.74的范围。

[0122] 9、根据方面8所述的空芯光纤, 其中所述第二最小横向ARE尺寸与最小横向芯尺寸之比接近第一类Bessel函数的零点的商 ($u_{01,ARE}/u_{21,芯}$) 与所述拟合系数的乘积, 所述Bessel函数 ($u_{01,ARE}$)、($u_{21,芯}$) 分别描述 LP_{01} ARE 模和 LP_{21} 芯模。

[0123] 10、根据方面9所述的空芯光纤, 其中所述第二最小横向ARE尺寸与最小横向芯尺寸之比选自0.3至0.7的范围, 尤其是选自0.45至0.54的范围。

[0124] 11、根据方面1-5中任一项所述的空芯光纤, 其中所述ARE的数量是3、4、5、6或7。

[0125] 12、根据方面1-5中任一项所述的空芯光纤, 其中所述ARE布置成使得ARE的横截面分布在环绕所述芯区域的单一环上, 或者

[0126] 所述ARE布置成使得ARE的横截面分布在环绕所述芯区域的多个环上。

[0127] 13、根据方面1-5中任一项所述的空芯光纤, 其中所述ARE具有圆形、椭圆形或多边形横截面。

[0128] 14、根据方面1所述的空芯光纤, 其中所述ARE由以下材料制成: 玻璃, 尤其是二氧化硅或ZBLAN; 聚合物, 尤其是PMMA; 复合材料; 金属; 或者晶体材料。

[0129] 15、根据方面1-5中任一项所述的空芯光纤, 其中, 所述芯区域和所述ARE中的至少一个被抽空或者填充以下材料中的至少一种: 气体, 尤其是空气、惰性气体、氢气中的至少一种; 液体; 具有非线性光学响应性的材料。

[0130] 16、根据方面2所述的空芯光纤, 其中, 所述外包层区域的横截面为多边形, 并且所述ARE定位在所述多边形的角部处, 或者

[0131] 所述外包层区域的横截面为弯曲的形状, 尤其是圆形, 并且所述ARE均匀地分布在所述弯曲的形状中。

[0132] 17、根据方面1-5中任一项所述的空芯光纤, 其中, 所述ARE适于引导横向的ARE模,

[0133] 所述芯区域适于引导横向的基本芯模和横向的更高阶芯模,

[0134] 所述芯区域和所述ARE构造成在宽带波长范围内提供所述更高阶芯模与所述ARE模的相位匹配。

[0135] 18、根据方面17所述的空芯光纤, 其中, 所述芯区域和所述ARE构造成在以下波长范围内提供所述更高阶芯模与所述ARE模的相位匹配: 该波长范围覆盖基本芯模的空芯光纤透明窗内的所有波长。

[0136] 19、根据方面17所述的空芯光纤, 其中, 所述芯区域和所述ARE构造成在至少覆盖10THz的波长范围内提供所述更高阶芯模和所述ARE模的相位匹配。

[0137] 20、一种光学装置, 包括至少一个根据前述方面中任一项所述的空芯光纤, 其中, 所述光学装置被配置为用于超连续谱生成的频率转换器。

[0138] 21、一种非带隙类型的空芯光纤, 所述空芯光纤包括:

[0139] 空的芯区域, 所述芯区域沿着空芯光纤轴向地延伸并具有最小横向芯尺寸, 其中, 所述芯区域适于引导横向的基本芯模和横向的更高阶芯模, 以及

[0140] 内包层区域, 所述内包层区域包括反谐振元件、即ARE所组成的布置结构, 所述反

谐振元件沿着所述空芯光纤环绕所述芯区域,每个反谐振元件具有最小横向ARE尺寸并适于引导横向的ARE模,

[0141] 其中,

[0142] 所述芯区域和所述ARE被构造成提供所述更高阶芯模与所述ARE模的相位匹配,并且

[0143] ARE尺寸和芯尺寸选择成使得ARE尺寸与芯尺寸之比逼近于第一类Bessel函数的零点的商($u_{1m,ARE}/u_{1m,芯}$)与一拟合系数的乘积,所述拟合系数位于0.9至1.5的范围内,其中,m是1阶第一类Bessel函数的第m个零点,Bessel函数的所述零点分别描述LP_{1m}ARE模和LP_{1m}更高阶芯模。

[0144] 22、根据方面21所述的空芯光纤,其中,

[0145] 环绕所述芯区域的所述ARE以非接触的方式布置。

[0146] 23、根据方面21或22所述的空芯光纤,其中,

[0147] 所述ARE具有第一最小横向ARE尺寸,并且

[0148] 所述第一最小横向ARE尺寸与芯尺寸之比接近第一类Bessel函数的零点的商($u_{01,ARE}/u_{11,芯}$)与所述拟合系数的乘积,零点($u_{01,ARE}$)、($u_{11,芯}$)分别描述LP₀₁ARE模和LP₁₁芯模。

[0149] 24、根据方面23所述的空芯光纤,其中,

[0150] 所述第一最小横向ARE尺寸与芯尺寸之比选自0.5至0.8的范围。

[0151] 25、根据方面24所述的空芯光纤,其中,

[0152] 所述第一最小横向ARE尺寸与芯尺寸之比选自0.62至0.74的范围。

[0153] 26、根据方面23至25中任一项所述的空芯光纤,其中,

[0154] 每个ARE均具有所述第一最小横向ARE尺寸。

[0155] 27、根据方面23至25中任一项所述的空芯光纤,其中,

[0156] 第一组ARE具有所述第一最小横向ARE尺寸,并且

[0157] 第二组ARE具有第二最小横向ARE尺寸,所述第二最小横向ARE尺寸小于第一组ARE的所述第一最小横向ARE尺寸,并且

[0158] 所述第二最小横向ARE尺寸与芯尺寸之比接近第一类Bessel函数的零点的商($u_{01,ARE}/u_{21,芯}$)与所述拟合系数的乘积,所述Bessel函数($u_{01,ARE}$)、($u_{21,芯}$)分别描述LP₀₁ARE模和LP₂₁芯模。

[0159] 28、根据方面27所述的空芯光纤,其中,

[0160] 所述第二最小横向ARE尺寸与芯尺寸之比选自0.3至0.7的范围。

[0161] 29、根据方面27所述的空芯光纤,其中,

[0162] 所述第二最小横向ARE尺寸与芯尺寸之比选自0.45至0.54的范围。

[0163] 30、根据方面21-29中任一项所述的空芯光纤,其中,

[0164] ARE的数量是3、4、5、6或7。

[0165] 31、根据方面21-30中任一项所述的空芯光纤,其中,所述ARE所形成的布置结构具有以下特征中的至少一个:

[0166] 所述ARE所形成的布置结构是三重对称的,

[0167] 所述ARE所形成的布置结构是两重对称的并获得光学双折射,

- [0168] 所述ARE布置成使得ARE的横截面分布在环绕所述芯区域的单一环上,并且
- [0169] 所述ARE布置成使得ARE的横截面分布在环绕所述芯区域的多个环上。
- [0170] 32、根据方面21-31中任一项所述的空芯光纤,其中,所述ARE具有以下特征中的至少一个:
- [0171] 所述ARE具有圆形、椭圆形或多边形横截面,并且
- [0172] 所述ARE由以下材料制成:玻璃,尤其是二氧化硅或ZBLAN;聚合物,尤其PMMA;复合材料;金属;或者晶体材料。
- [0173] 33、根据方面21-32中任一项所述的空芯光纤,其中,
- [0174] 所述芯区域和所述ARE中的至少一个被抽空或者填充以以下材料中的至少一种:气体,尤其是空气、惰性气体、氢气中的至少一种;液体;和具有非线性光学响应性的材料。
- [0175] 34、根据方面21-33中任一项所述的空芯光纤,其中,所述空芯光纤包括:
- [0176] 外包层区域,所述外包层区域沿着所述空芯光纤包围所述内包层区域,其中,
- [0177] 所述外包层区域的横截面为多边形,并且
- [0178] 所述ARE定位在所述多边形的角部处。
- [0179] 35、根据方面21至33中任一项所述的空芯光纤,其中,所述空芯光纤包括:
- [0180] 外包层区域,所述外包层区域沿着所述空芯光纤包围所述内包层区域,其中,
- [0181] 所述外包层区域的横截面为弯曲的形状,尤其是圆形,并且
- [0182] 所述ARE均匀地分布在所述弯曲的形状中。
- [0183] 36、根据方面21-35中任一项所述的空芯光纤,其中,
- [0184] 所述芯区域和所述ARE构造成在宽带波长范围内提供所述更高阶芯模与所述ARE模的相位匹配。
- [0185] 37、根据方面36所述的空芯光纤,其中,
- [0186] 所述芯区域和所述ARE构造成在以下波长范围内提供所述更高阶芯模与所述ARE模的相位匹配:该波长范围覆盖基本芯模的空芯光纤透明窗内的所有波长。
- [0187] 38、根据方面36或37所述的空芯光纤,其中,
- [0188] 所述芯区域和所述ARE构造成在至少覆盖10THz的波长范围内提供所述更高阶芯模和所述ARE模的相位匹配。
- [0189] 39、光学装置,所述光学装置包括至少一个根据方面21-38中任一项所述的空芯光纤。
- [0190] 40、根据方面39所述的光学装置,所述光学装置包括以下器件中的至少一个:
- [0191] 模态滤波装置,
- [0192] 光源,尤其是激光源,
- [0193] 光学放大器,
- [0194] 光束传输系统,
- [0195] 脉冲整形器,尤其用于脉冲压缩,
- [0196] 数据通信系统,和
- [0197] 频率转换器,尤其用于超连续谱生成。
- [0198] 41、一种制造非带隙类型的空芯光纤的方法,所述方法包括以下步骤:
- [0199] 提供空的芯区域,所述芯区域沿着所述空芯光纤轴向地延伸并具有最小横向芯尺

寸,其中,所述芯区域适于引导横向的基本芯模和横向的更高阶芯模,并且

[0200] 提供内包层区域,所述内包层区域包括由沿着所述空芯光纤环绕所述芯区域的反谐振元件、即ARE所形成的布置结构,每个反谐振元件具有最小横向ARE尺寸并适于引导横向的ARE模,其中,

[0201] 所述芯区域和所述ARE构造成提供更高阶芯模与所述ARE模的相位匹配,

[0202] 其中,

[0203] ARE尺寸和芯尺寸选择成使得所述ARE尺寸与芯尺寸之比接近第一类Bessel函数的零点的商($u_{1m,ARE}/u_{1m,芯}$)与一拟合系数的乘积,所述拟合系数位于0.9至1.5的范围内,其中,m是1阶第一类Bessel函数的第m个零点,Bessel函数的所述零点分别描述LP_{1m}ARE模和LP_{1m}更高阶芯模。

[0204] 42、根据方面41所述的方法,其中,

[0205] 所述空芯光纤制造成具有根据方面21至37中任一项所述的空芯光纤的特征。

[0206] 43、根据方面41或42所述的方法,其中,

[0207] 通过应用一分析模型而选取所述ARE尺寸,在所述分析模型中,芯和所述ARE被视作毛细管,其中,所述毛细管中的LP_{1m}模式的模态指数通过以下方程来近似:

$$[0208] \quad n_{1m} = \sqrt{1 - \left(\frac{u_{1m}}{\pi f_s} \right)^2 \left(\frac{\lambda}{d_i} \right)^2}$$

[0209] 其中, u_{1m} 是所述Bessel函数 J_1 的第m个零点, d_i 是毛细管的内直径,并且参数 f_s 是试探性拟合参数。

[0210] 44、根据方面41至43中任一项所述的方法,其中,所述方法包括以下步骤:

[0211] (a) 提供ARE预制件和空心套预制件,

[0212] (b) 将所述ARE预制件以分布的方式固定在所述套预制件的内表面上,

[0213] (c) 加热并拉伸包含有所述ARE预制件的所述套预制件直至ARE尺寸和芯尺寸被设定。

[0214] 45、根据方面44所述的方法,其中,步骤(c)包括:

[0215] (c1) 将包含有所述ARE预制件的所述套预制件加热并拉伸成杆,以及

[0216] (c2) 加热并拉伸所述杆直至ARE尺寸和芯尺寸被设定。

[0217] 46、根据方面45所述的方法,其中,步骤(c)包括:

[0218] -将真空或增加的压力施加至所述套预制件和所述ARE预制件中的至少一个或者所述杆的空心区域以设定ARE尺寸和芯尺寸。

[0219] 47、根据方面45或46所述的方法,其中,所述方法包括以下后处理步骤:

[0220] -使所述芯区域和所述ARE中的至少一个填充以以下材料中的至少一种:气体,尤其是空气或惰性气体或氢气;液体;和具有非线性光学响应性的材料。

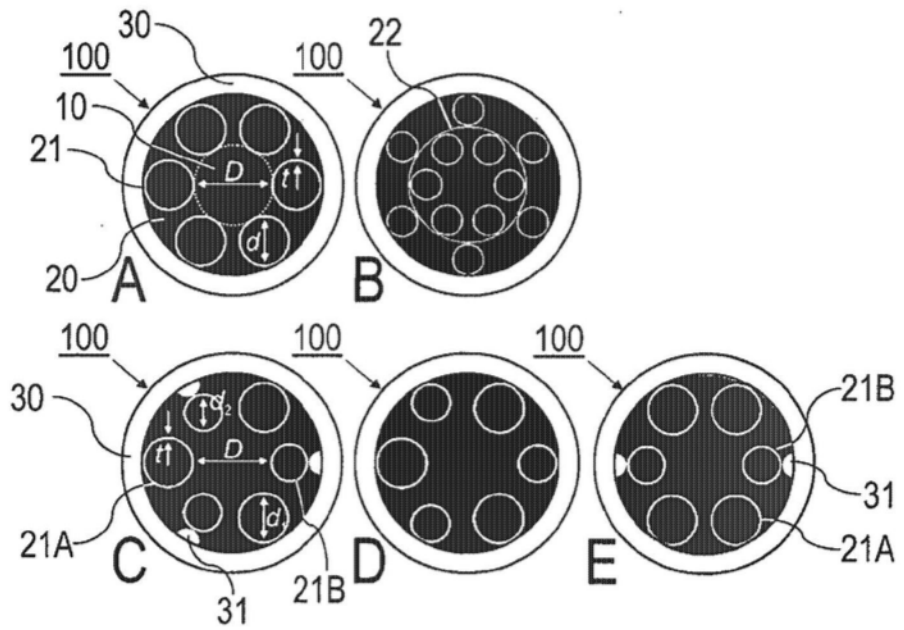


图1

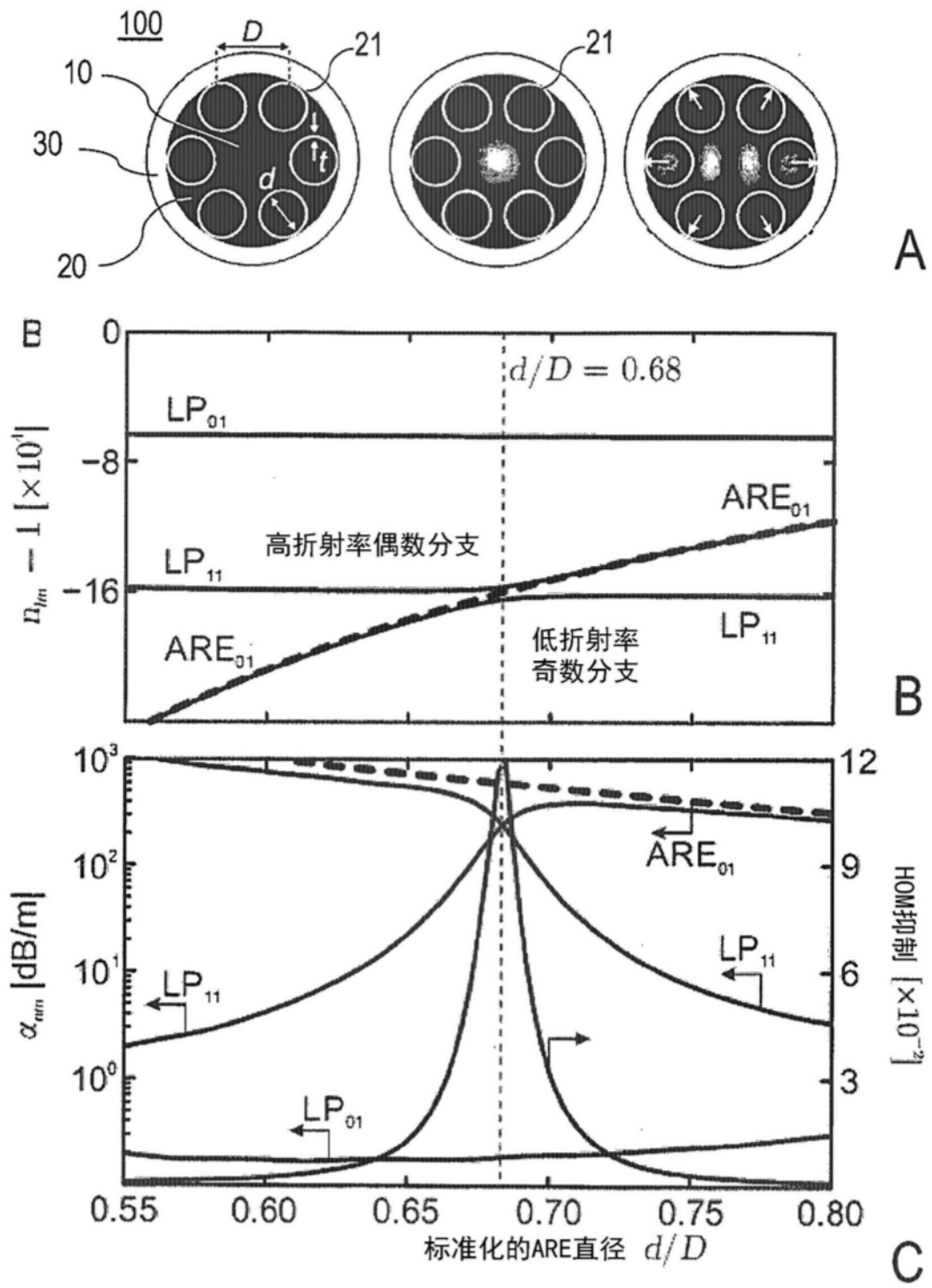


图2

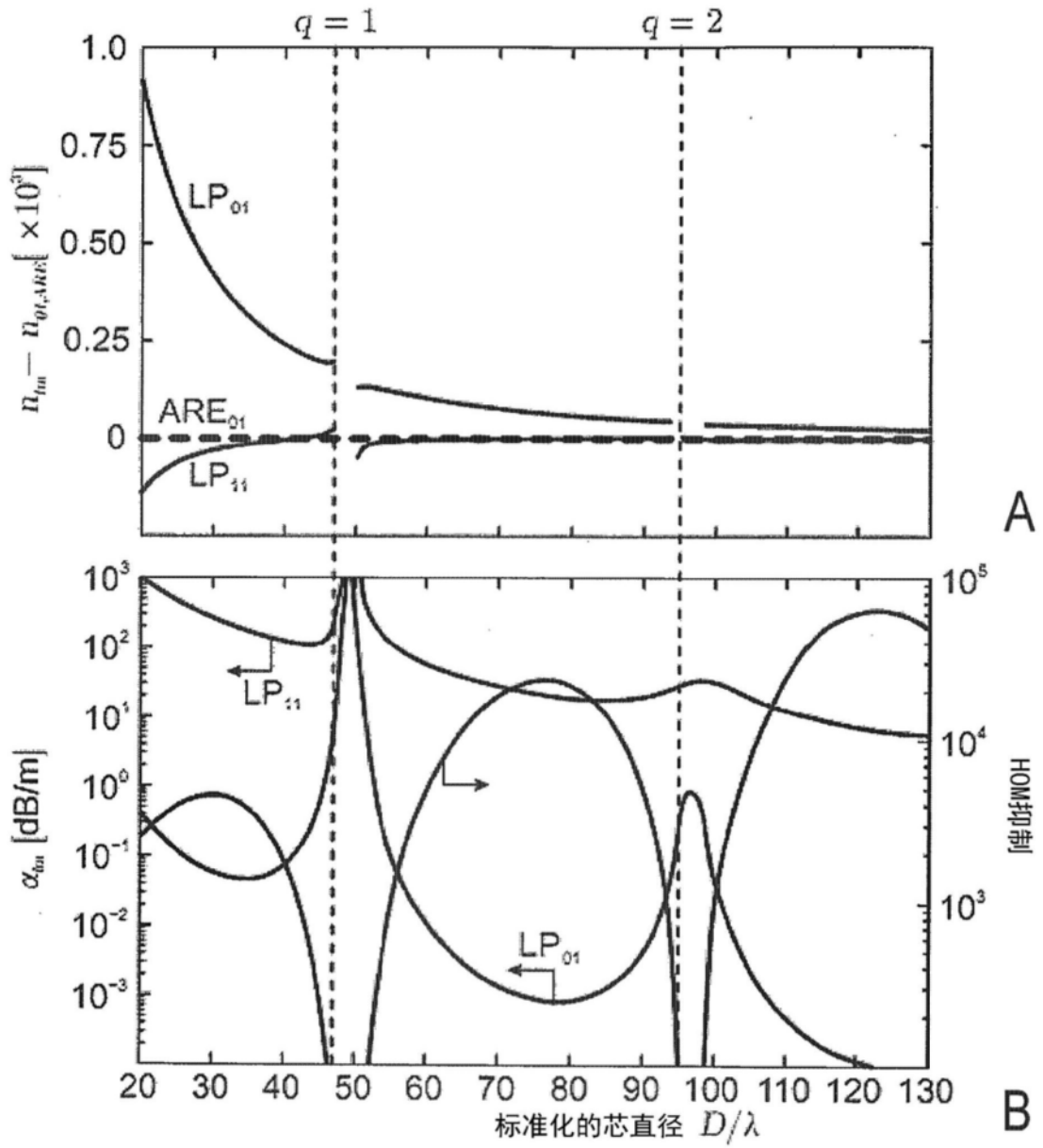


图3

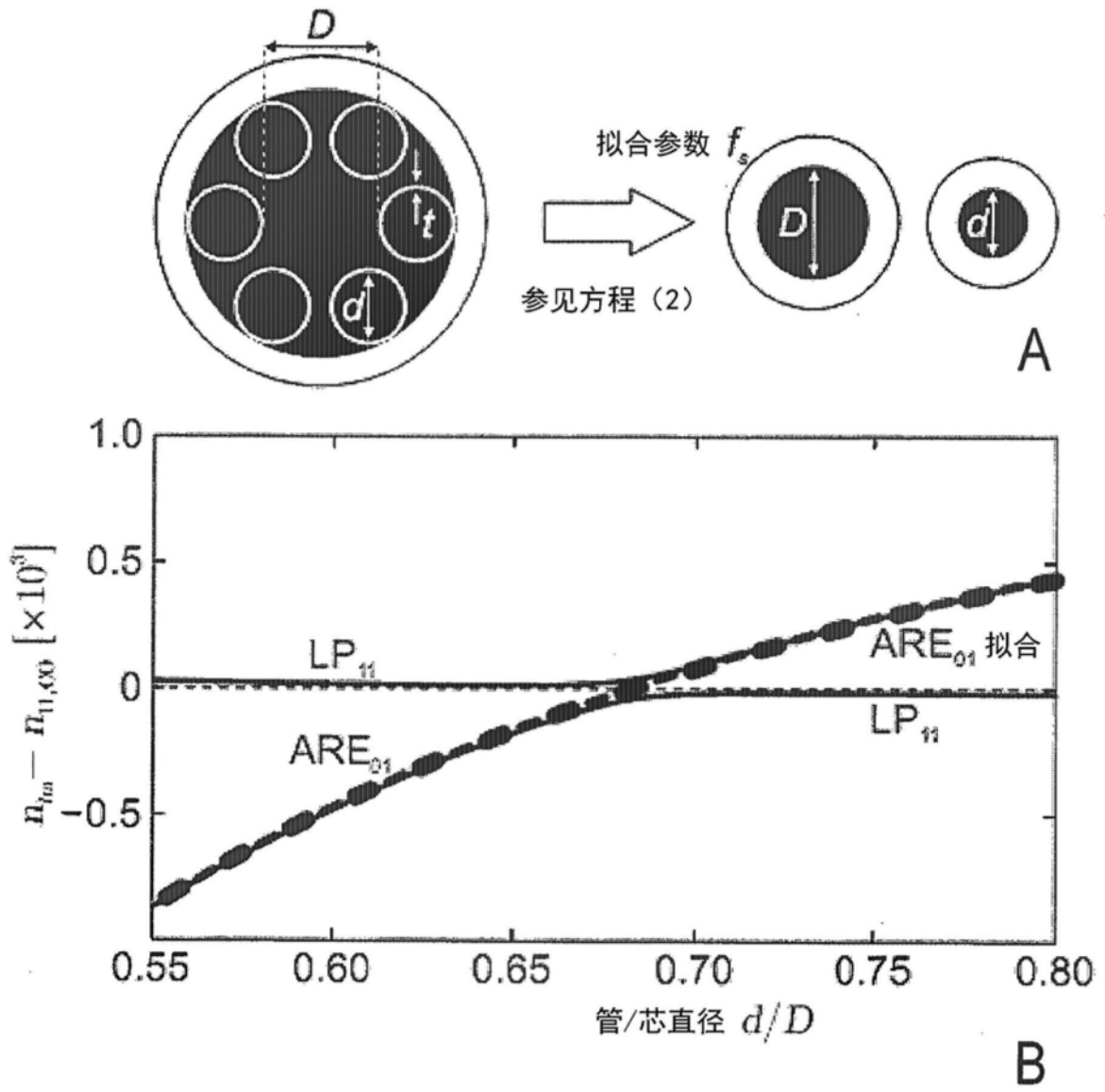


图4

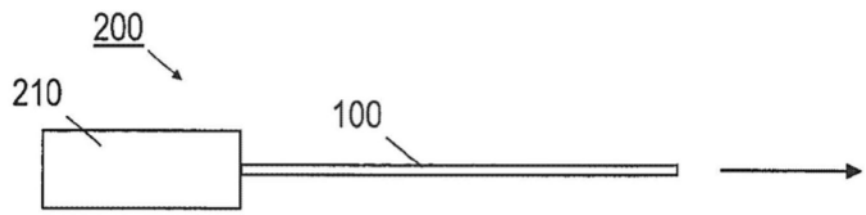


图5

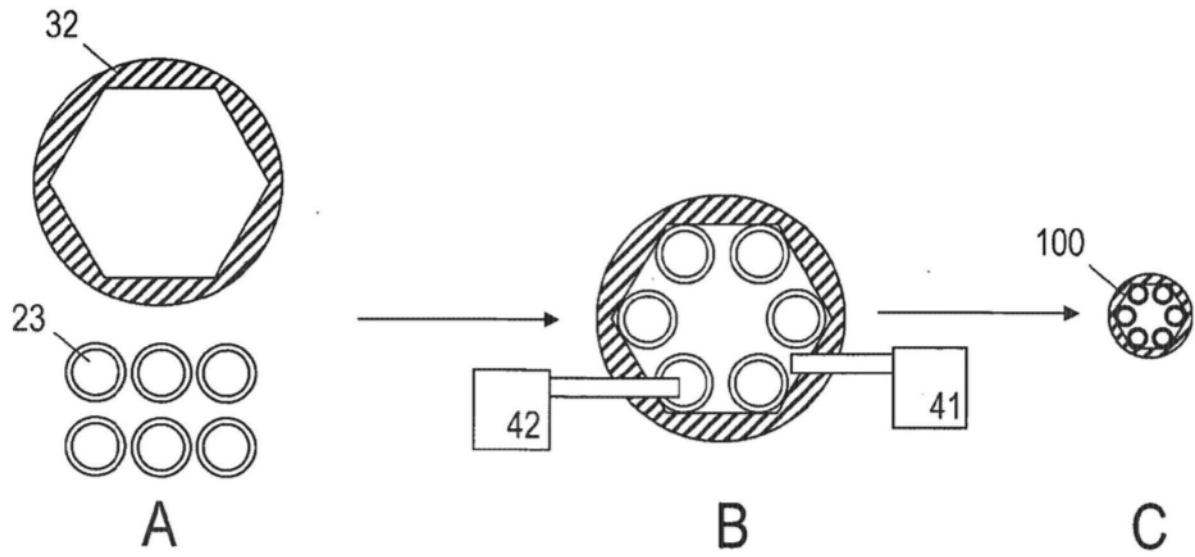


图6

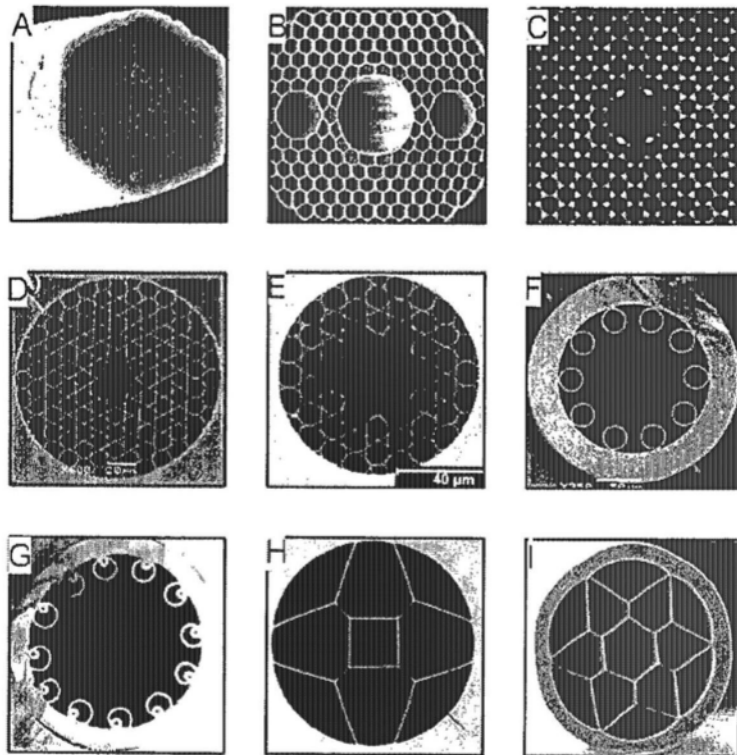


图7