



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102939552 B

(45) 授权公告日 2015.06.17

(21) 申请号 201080057196.8

(22) 申请日 2010.10.13

(30) 优先权数据

12/580,223 2009.10.15 US

12/580,358 2009.10.16 US

12/607,500 2009.10.28 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2012.06.15

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/US2010/052480 2010.10.13

(87) PCT国际申请的公布数据

W02011/047027 EN 2011.04.21

(73) 专利权人 IPG 光子公司

地址 美国马萨诸塞州

(72) 发明人 瓦伦丁·盖庞特瑟夫

弗拉基米尔·瑟古伊夫

尼古拉·普拉特诺夫

罗曼·雅古德金

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任公司 11021

代理人 汪洋

(51) Int. Cl.

G02B 6/02(2006.01)

(56) 对比文件

CN 1971323 A, 2007.05.30, 全文.

US 2003142940 A1, 2003.07.31, 全文.

US 7526167 B1, 2009.04.28, 全文.

CN 101408641 A, 2009.04.15, 全文.

审查员 薛松

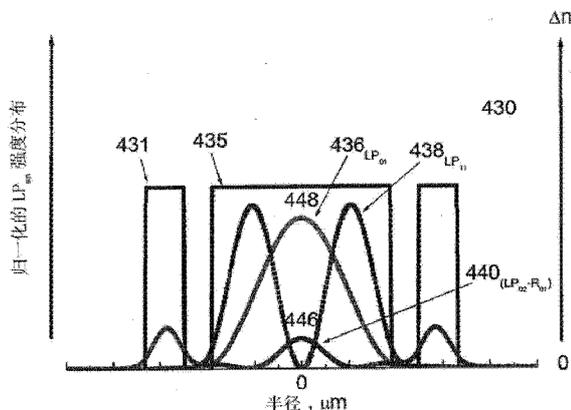
权利要求书3页 说明书17页 附图11页

(54) 发明名称

抑制高阶模的光纤装置

(57) 摘要

一种具有工作波长的光纤装置,其包括:光纤,所述光纤包括:包括活性材料的芯,所述活性材料用于响应于所述光学装置接收具有泵浦波长的泵浦光能而提供具有工作波长的光;围绕所述芯设置的覆层;与所述芯隔开的至少一个区域;其中所述光纤被构造和布置成使得,在所述工作波长处,所述光纤能够传播多个模,其中所述光纤包括主要为所述芯的模的基模以及为所述芯的选定模和所述至少一个区域的选定模的混合模的至少一个高阶模(HOM)。



1. 一种具有工作波长的光纤装置,包括:
光纤,所述光纤包括
包括活性材料的芯,所述活性材料用于响应于所述光纤装置接收具有泵浦波长的泵浦光能而提供具有所述工作波长的光;
围绕所述芯设置的覆层;
与所述芯隔开的至少一个区域;并且
其中所述光纤被构造和布置成使得,在所述工作波长下,所述光纤能够传播多个模,并且其中所述光纤包括基模和至少一个高阶模,所述基模主要为所述芯的模,所述至少一个高阶模为所述芯的选定模和所述至少一个区域的选定模的混合模。
2. 根据权利要求 1 所述的光纤装置,其中所述活性材料包括稀土材料。
3. 根据权利要求 2 所述的光纤装置,其中所述至少一个区域包括用于吸收具有工作波长的光能的吸收材料,并且,在对具有泵浦波长的光能是吸收性的情况下,所述至少一个区域对具有工作波长的光能的吸收率要高于对具有泵浦波长的光能的吸收率。
4. 根据权利要求 1 所述的光纤装置,其中所述至少一个高阶模包括具有零阶方位角的高阶模。
5. 根据权利要求 1 所述的光纤装置,其中所述芯的所述选定模包括 LP_{02} 芯模。
6. 根据权利要求 1 所述的光纤装置,其中所述至少一个高阶模包括具有非零阶方位角的高阶模。
7. 根据权利要求 1 所述的光纤装置,其中所述芯的所述选定模包括 LP_{11} 模。
8. 根据权利要求 1 所述的光纤装置,其中所述光纤包括至少一个纵向延伸的应力诱发区域,所述应力诱发区域具有不同于设置在所述应力诱发区域周围的所述光纤的材料的膨胀系数,所述应力诱发区域用于增强所述光纤的双折射。
9. 根据权利要求 1 所述的光纤装置,其中所述至少一个区域包括环形区域。
10. 根据权利要求 1 所述的光纤装置,其中所述光纤装置被构造为光纤激光器。
11. 一种具有工作波长的光纤装置,包括:
光纤,所述光纤包括
芯;
围绕所述芯设置的覆层;
与所述芯隔开的至少一个区域;
所述光纤被构造和布置成使得,在所述工作波长处,所述光纤包括第一模和第二模,所述第一模主要为所述芯和所述至少一个区域中的一个的模,所述第二模为所述芯的选定模和所述至少一个区域的选定模的混合模;并且
其中所述芯的所述选定模和所述至少一个区域的所述选定模具有相同的方位角阶数。
12. 根据权利要求 11 所述的光纤装置,其中所述相同的方位角阶数包括零阶。
13. 根据权利要求 11 所述的光纤装置,其中所述第一模包括所述光纤的主要为所述芯的模的基模,所述第二模包括高阶模。
14. 一种具有工作波长的光纤装置,所述光纤装置被构造成在所述工作波长处传播光能,所述光纤装置包括:
光纤,该光纤包括

芯；

围绕所述芯设置的覆层；

与所述芯隔开的至少一个区域；

所述光纤被构造和布置成使得，在所述工作波长处，所述光纤支撑多个模，其中基模主要为所述芯的模，至少一个高阶模为所述芯的选定模和所述至少一个区域的选定模的混合模，并且其中具有比所述至少一个高阶模更低的模阶数的至少另一个高阶模不是混合模而是主要为芯或所述至少一个区域的模；并且

其中“更低的模阶数”指的是所述至少另一个高阶模在有效折射率方面比所述至少一个高阶模更接近基模。

15. 根据权利要求 14 所述的光纤装置，其中所述至少一个高阶模包括具有零阶方位角的高阶模。

16. 根据权利要求 15 所述的光纤装置，其中所述芯的所述选定模包括 LP_{02} 芯模。

17. 根据权利要求 15 所述的光纤装置，其中所述至少一个区域的所述选定模包括具有零阶方位角的模。

18. 根据权利要求 14 所述的光纤装置，其中所述至少另一个高阶模包括具有非零阶方位角的高阶模。

19. 根据权利要求 18 所述的光纤装置，其中所述至少另一个高阶模包括 LP_{11} 芯模。

20. 根据权利要求 14 所述的光纤装置，其中所述光纤包括稀土材料，所述稀土材料用于响应于所述光纤装置接收具有泵浦波长的光能而提供具有所述工作波长的光能。

21. 根据权利要求 14 所述的光纤装置，其中所述芯具有至少 15 微米的直径，不大于 0.10 的数值孔径，以及在所述工作波长处大于 3 的 V 数。

22. 根据权利要求 14 所述的光纤装置，其中所述芯具有至少 15 微米的直径，不小于 0.13 的数值孔径，以及在所述工作波长处大于 3 的 V 数。

23. 一种光纤，该光纤具有基模，该基模具有增大的有效面积，从而光纤能够在不期望的非线性效应开始之前传播更高的功率，所述光纤包括：

芯结构，包括中心芯和多个同心的环形芯区域，所述多个同心的环形芯区域彼此隔开并且与所述中心芯隔开；

覆层区域，所述覆层区域围绕所述中心芯并设置在所述中心芯和所述多个环形芯区域中的最靠近所述覆层区域的那个环形芯区域之间；

所述光纤具有工作波长，所述中心芯的直径为至少 14 微米，并且如果被认为好像仅由覆层区域围绕的话，所述中心芯在所述工作波长处的 V 数为至少 3 并支持被称为中心芯高阶模的多个高阶模；并且

其中所述芯结构被构造和布置成使得，所述中心芯在所述工作波长处事实上是单模的，不需要弯曲所述光纤来充分地增大所述中心芯高阶模的弯曲损失。

24. 根据权利要求 23 所述的光纤装置，其中所述中心芯的直径为至少 20 微米。

25. 根据权利要求 23 所述的光纤装置，其中所述中心芯的直径为至少 30 微米。

26. 根据权利要求 23 所述的光纤装置，其中当关于所述覆层区域进行考虑时，所述中心芯的数值孔径不大于 0.10。

27. 根据权利要求 23 所述的光纤装置，其中所述多个中心芯高阶模中的每一个与环形

芯区域的模结合以形成所述芯结构的高阶模,其中所述芯结构高阶模与所述中心芯的重叠积分的值以及与环形芯区域的重叠积分的值处于相同量级,所述多个环形芯区域中的至少两个具有这样与中心芯高阶模结合的模。

抑制高阶模的光纤装置

技术领域

[0001] 本发明涉及光纤和光纤装置,例如光纤放大器、激光器和放大式自发射 (ASE) 源。

背景技术

[0002] 基于光纤的激光器、放大器和其它光学装置可以提供柔软、结实并且相对简单的光能来源。因此,在许多应用中,与基于气体介质(例如 CO₂) 或者块状固态介质(例如 Nd:YAG 棒)的光纤装置相比,这样的光纤装置经常可以具有一个或多个优点。例如,与类似应用中使用气体或块状棒式固态激光器相比,光纤激光器可具有较小的占地面积,或者可以更有效,或者可以不需要那么复杂的冷却装置。然而,经常希望提高光纤装置的输出功率,因为一些气体和块状固态激光器能够轻易地产生高 CW 输出功率或者具有高能量及 / 或高峰值功率的光能脉冲。

[0003] 不幸地是,由于将光能限制到光纤的相对小的横截面中时固有的高功率密度,非线性现象,例如激发拉曼散射 (SRS) 或激发布里渊散射 (SBS),会严重地限制按比例增大光纤激光器或放大器的输出功率到更高功率。虽然这些非线性过程复杂,通过降低在光纤的芯中的功率密度,可以至少部分地解决每个非线性问题。一种减小功率密度的方法是增大光纤的芯的直径及 / 或减小芯的数值孔径 (NA),从而光纤具有较大的模场直径 (MFD)。以此方式减小功率密度可以提高用于不期望的非线性现象的开始的功率阈值。

[0004] 然而,这种方法不是没有缺点的。具有较大芯径的光纤除了支持基模(例 LP₀₁) 以外,通常还可以支持更高阶的横模(例如,LP₁₁、LP₂₁、LP₀₂ 等等)。这种高阶模 (HOM) 倾向于降低光纤装置提供的输出光能的质量并因此增大 M² 参数(较低的 M² 意味着较高的光束质量)。在许多应用中都期望低的 M²。防止非线性效应开始同时还保持良好的光束质量对光纤装置的设计者提出了挑战。

[0005] 在本领域中已知一些应对该挑战的方法。例如,2002 年 12 月 17 日公告授予 Koplów、Kliner 和 Goldberg 的美国专利 6,496,301,教导了弯曲具有较大芯的光纤以便通过增大的弯曲损失来实质性地衰减高阶模,从而光纤放大器以大致单模提供增益。还请看 2008 年 9 月 9 日公告授予 Alamantas Galvanauskas 的美国专利 7,424,193,其教导一种复合波导,具有中央芯和螺旋地缠绕所述中央芯并在光学上接近中央芯的至少一个侧芯。根据'193 专利,中央芯的较高阶模选择性地耦合到螺旋形侧芯并经历较大损失,从而中央芯事实上是单模的。

[0006] 然而,现有的技术无法在所有情况中都必然让人完全满意。因此,本发明的目的是致力于解决现有技术的一个或更多缺陷或缺点。

发明内容

[0007] 在本公开的一个方面中,提供一种具有工作波长的光纤装置,包括光纤,所述光纤包括:包括活性材料的芯,所述活性材料用于响应于所述光学装置接收具有泵浦波长的泵浦光能而提供具有所述工作波长的光;围绕所述芯设置的覆层;与所述芯隔开的至少一个

区域；并且其中所述光纤被构造和布置成使得，在所述工作波长下，所述光纤能够传播多个模，并且其中所述光纤包括基模和至少一个高阶模（HOM），所述基模主要为所述芯的模，所述至少一个高阶模为所述芯的选定模和所述至少一个区域的选定模的混合模。

[0008] 在本公开的另一方面中，一种具有工作波长的光纤装置包括光纤，其中所述光纤：芯；围绕所述芯设置的覆层；与所述芯隔开的至少一个区域。所述光纤可以被构造和布置成使得，在所述工作波长处，所述光纤包括第一模和第二模，所述第一模主要为所述芯和所述至少一个区域中的一个的模，所述第二模为所述芯的选定模和所述至少一个区域的选定模的混合模；并且其中所述芯的所述选定模和所述至少一个区域的所述选定模具有相同的方位角阶数。所述相同的方位角阶数可以包括零阶和非零阶。第一模可以主要为芯的模，并且可包括所述基模。第二模可包括高阶模。

[0009] 在本公开的另外方面中，提供了一种具有工作波长的光纤装置，所述光学装置被构造在所述工作波长处传播光能，所述光纤装置包括光纤，该光纤包括：芯；围绕所述芯设置的覆层；与所述芯隔开的至少一个区域。所述光纤可以被构造和布置成使得，在所述工作波长处，所述光纤支撑多个模，其中基模主要为所述芯的模，至少一个高阶模（HOM）为所述芯的选定模和所述至少一个区域的选定模的混合模，并且其中具有比所述至少一个 HOM 更低的模阶数的至少另一个 HOM 不是混合模而是主要为芯或所述至少一个区域的模。“更低的模阶数”指的是所述至少另一个模在有效折射率方面比至少第一 HOM 更接近基模。。所述至少另一个 HOM 可包括具有非零阶方位角的模，例如 LP_{11} 模。

[0010] 在本发明的另外方面中，所述活性材料可包括稀土材料，例如，铒、镱、钕或铥中的一种或多种。所述至少一个区域可包括用于吸收具有工作波长的光能的吸收材料，并且，如果对具有泵浦波长的光能是吸收性的，则所述吸收材料对具有工作波长的光能的吸收率要高于对具有泵浦波长的光能的吸收率。吸收材料可包括例如钐、镨或铽中的一种或多种。在工作波长下，所述至少一个 HOM 可具有明显大于基模的传播损失。工作波长可以是例如大约 1060 纳米、大约 1550 纳米或者大约 2000 纳米（例如铥离子发出激光所处的波长范围）。所述至少一个 HOM 可包括具有零阶方位角的 HOM。所述芯的所述选定模可包括 LP_{02} 芯模。所述至少一个 HOM 可包括具有非零阶方位角的 HOM。所述芯的所述选定模可包括 LP_{11} 模。所述至少一个区域可包括环形区域。所述至少一个区域可包括常规环形芯。所述至少一个区域可包括布置成环形的多个卫星区域。在工作波长处，所述至少一个 HOM 可具有明显大于基模的传播损失。在工作波长处，以每单位距离 dB 来算，所述至少一个 HOM 的传播损失可以比基模的传播损失高至少 5 倍。

[0011] 在本公开的更多个方面中，所述光纤包括至少一个纵向延伸的应力诱发区域，所述应力诱发区域具有不同于设置在所述应力诱发区域周围的所述光纤的材料的膨胀系数。所述应力诱发区域能增强所述光纤的双折射。双折射可以被增强，从而光纤包括偏振保持（“PM”）光纤。所述光纤包括稀土材料，该稀土材料用于响应于所述光学装置接收具有泵浦波长的光能而提供具有工作波长的光能。光纤的芯具有至少 15 微米的直径，选定的数值孔径和在所述工作波长处大于 3 的 V 数。所述 V 数可大于 5。所述选定的数值孔径可不大于 0.10，或者可替代地，可以不小于 0.13 或不小于 0.15。

[0012] 在本公开的更多个方面中，所述光纤装置可被构造为光纤激光器。所述激光器可包括由至少一个光纤布拉格光栅限定的激光腔。激光器还可以被构造为主振荡功率放大器

(MOPA) 布置,其中种振荡器向功率放大器通向功率放大器,所述功率放大器可包括光纤放大器。主振荡器不需要包括基于光纤的装置,可例如包括激光二极管,在这种情况下光纤装置在某些情形下可不包括由至少一个光纤布拉格光栅限定的激光腔。光纤装置可被构造成和调整为使得光纤被“端泵浦”或“侧泵浦”。还有,光学装置可包括与所述光纤并排设置的第二光纤,如此处其它部分更详细地描述的那样,以提供泵浦光能到光纤。

[0013] 根据本公开的又一个方面,还教导一种设计及/或制造具有混合模的光纤的方法,该方法包括下述步骤:选择该光纤的第一模,例如该光纤的一区域将与另一个模混合以形成混合模的模;确定所选择的第一模的方位角阶数和有效折射率;选择该光纤的至少一个其它区域的模以具有与第一模基本相同的有效折射率和相同的方位角阶数;以及构造和安排该光纤的设计,从而所选择的模混合以形成混合模。在此上下文中“基本相同”意味着足够接近以便所旋转的模将混合以形成混合模。

[0014] 在一个一般方面中,本公开包括这样的认识:HOM,尽管通常被理解为对要求良好光束质量的应用来说是普遍不期望的,但实际应用中并非同样麻烦。典型地,在强度分布上包括与基模的实质重叠的 HOM 更容易被激发,而导致光束质量变差;那些重叠较少的模则可能不那么成问题。在一些情况中,具有零阶方位角的 HOM(例如 LP_{02}) 或者在强度分布图上没有实质性的中央最小值或零的那些模会具有较大的重叠,而良好对准的接合(例如在单模光纤和放大器的多模光纤之间的接合)可以使在具有非零阶方位角的模(例如 LP_{11}) 或者在强度分布中没有实质性的中央最小值或零的那些模中产生的激发更小(因为这些模的重叠较小)。然而,在其它情况中,可能需要更多地关注这些模。

[0015] 例如,如果芯的 LP_{02} 模容易被激发,则该模可以与所述至少一个区域的模混合,而混合后的模可以相对于基模明显地衰减,例如混合模是“漏的”或者替代地或附加地,通过引入吸收材料到所述至少一个区域。引入到基模的任何附加损失(基模通常不被转变成混合模,因此不受所述至少一个区域的影响)被减小因而通常不会过度有害。不是所有的 HOM(例如在一些情况中,不那么成问题的模的一个或多个,诸如 LP_{11} 芯模)都需要被转变成混合模,而是可以保持主要为芯或与芯隔开的所述至少一个区域的模。因而,在某种意义上,本公开教导一种更“外科手术式”的并且因此更简单的方法,该方法能够更加集中精力在“成问题的”HOM 上。

[0016] 现在一般性地讨论此处所用的术语。其它术语将在详细描述中和下面的其它地方讨论。

[0017] “主要为芯的模”或“主要为芯模”指的是该模(例如基模)不是芯和环形芯的混合模,而至少一个 HOM 是芯和与芯隔开的环形芯的混合模。换句话说,主要为芯的模的所述模的特性基本上由芯的特性和覆层的特性决定,而隔开的环形芯(所述至少一个 HOM 是该环形芯的混合模)的存在因而对所述模的特性没有影响。

[0018] 此处所使用的术语,“明显更大的传播损失”指的是当以每单位距离(例如每米)的 dB 测量时,所述损失在工作波长时为至少 5 倍以上(例如,如果参照基线为 0.2dB/米,则至少 1.0dB/米)。可以基于不包含稀土材料(因为这种材料可能同样会吸收工作波长时的光能,因此使对比变得困难(例如测量相对较大的数值之间的相对较小的差值的难题))的测试光纤来确定这种传播损失。说一个模相对于另一个模被抑制的意思是,它比所述另一个模在传播损失上明显更大。注意到,有时“折射率”和“折射的率”在此处互换使用。“多

模”意思是不是单模,并且包括本领域所称呼的“几个模”。典型地,多模光纤在其工作波长时的V数大于2.405。“材料”包括离子形式的材料(例如,表述“包括一定浓度的铒”是指包括一定浓度的 Er^{3+} 离子)。

[0019] 从下面的非限制性的本发明的实施例中,同时参考附图,本发明的另外的优点、新颖的特征和目的将变得显而易见,其中附图是示意性的并且不是一定依比例绘制。为了清楚起见,并未在每一幅下面的附图中都标记出每个部件,并且本发明的每个实施例的每个部件不应被认为是允许本领域技术人员理解本发明所必须需要的。

附图说明

[0020] 图1示意地示出沿垂直于光纤延伸所沿的纵轴所截取到的光纤的横截面;

[0021] 图2示出对图1的光纤的芯和覆层的可能折射率分布的理想曲线图,以及对应的对基模和所选择的更高阶模(HOM)的归一化强度分布;

[0022] 图3示意性地示出根据本公开的光纤的横截面,所述光纤具有芯和与所述芯隔开的至少一个区域;

[0023] 图4为图3的光纤的可能折射率分布的理想图,以及对应的对基模和所选择的HOM的归一化强度分布;

[0024] 图5示出对另一光纤的基模和更高阶模的强度分布图,其中在分析中仅考虑所述芯和覆层;

[0025] 图6示出对应图5的光纤的基模和更高阶模的强度分布图,附带条件是在分析中只考虑环形芯和覆层;

[0026] 图7A示出图5和6中考虑的光纤的基模和更高阶模的强度分布图,其中在分析中考虑了芯、环形芯和覆层的全部;

[0027] 图7B示出图7A中考虑的光纤的另外的更高阶模的强度分布图;

[0028] 图8示出另外的光纤的基模和更高阶模的强度分布图,附带条件是在分析中仅考虑了芯和覆层;

[0029] 图9A示出对应于图8的光纤的基模和更高阶模的强度分布图,附带条件是在分析中仅考虑环形芯和覆层;

[0030] 图9B示出对图9A的光纤的另外的更高阶模的强度分布图;

[0031] 图10示出图8和9中考虑的光纤的基模和更高阶模的强度分布图,其中在分析中考虑芯、环形芯和覆层的全部;

[0032] 图11示意性地示出根据本公开的光纤的横截面,所述光纤包括一对纵向延伸的应力诱发区;及

[0033] 图12为透视图,示意性地示出根据本公开的光学装置的一个示例,所述光学装置包括与第一光纤并排放置的第二光纤以及绕第一和第二光纤设置的公共覆层。

具体实施方式

[0034] 图1示意性地示出光纤12的沿垂直于光纤12延伸所沿的纵轴截取的,横截面。图1的光纤12可包括芯14和绕所述芯14设置的覆层16。通常覆层16接触性地围绕芯12并倾向于将光纤12所传播的光能限制至芯14,用于在芯14处进行引导(例如通过全反射

现象)。光纤 12 可包括绕覆层 16 设置的至少一个另外区域 18。图 1 中示出的区域 18 可表示绕覆层 16 设置的第二覆层,以倾向于限制光能(例如泵浦光能)至覆层 16,用于在覆层 16 处进行引导。在本领域中这样的光纤叫做“覆层泵浦式”或“双覆层”光纤,而覆层 16 可被称为“泵浦覆层”。第二覆层可包括,例如,玻璃或在光纤 12 牵拉期间涂覆并固化的氟化低折射率聚合物涂层。替代地,区域 18 表示高折射率聚合物保护区域,一般包括设置在内侧低模量层上的外侧高模量层。作为牵拉工序的一部分,所述层中的一个或两者可以作为涂层施加到光纤上。上述内容的变型自然也是可能的。例如,区域 18 可包括玻璃的第二覆层,以倾向于限制泵浦光至覆层 16,接着绕区域 18 可以设置具有一层或多层的聚合物保护区域。

[0035] 如上面指出的那样,如果被激发的话,HOM 会降低光束质量。在许多情况中, LP_{02} 模是最成问题的,因为它与基模共享具有大致中心最大值的强度分布,从而基模的激发(例如通过至单模光纤的简单接合)会非常容易激发 LP_{02} 模。在其它情形中, LP_{11} 模可能是成问题的。

[0036] 芯 14 可包括活性材料,该活性材料响应于光纤 12 接收具有泵浦波长的泵浦光能而提供光能(例如,通过受激辐射)。活性材料可包括稀土材料,例如,铒、镱、钕或钍中的一种或多种(例如一定浓度的 Er、Yb、Nd 或 Th 离子)。

[0037] 所述芯 14 是典型多模的,并具有大于标准单模芯(例如直径 5 微米的芯)的直径 D,以提供具有更大的模场直径(MFD)的基模。更大的 MFD 可以减小功率密度并因此提高非线性现象开始的功率阈值。精确的 MFD 当然可取决于其它因素,例如折射率分布,但是对许多标准设计来说,一般直径更大的芯的基模的 MFD 更大。

[0038] 图 2 包括用于图 1 的光纤 12 的芯 14 和覆层 16 的一种可能的折射率分布的曲线,还包括用于基模和所选择的 HOM 的最接近归一化强度分布曲线。(通过设定 $r \cdot dr \cdot d\phi$ 上的整数为 1,对每个模的强度进行归一化)。如图 2 中所示,除了附图标记 36 表示的基模 LP_{01} 以外,光纤 12 还可以支持多个 HOM,例如附图标记 38 表示的 LP_{11} 模、附图标记 40 表示的 LP_{21} 模,以及附图标记 42 表示的 LP_{02} 模。注意到,虽然某些 HOM,例如 LP_{11} 模 38 和 LP_{21} 模 40 具有中心最小值或零点, LP_{02} 模包括不具有这样的最小值零点的强度分布,相反在其中心处是明显非零的,如图 2 中附图标记 47 所表示的那样。大致中心最大值(一般是绝对最大值而非仅仅是局部最大值)是具有零阶方位角的模的特征,至少对较低阶模是这样的。方位角阶数指的是模名称的第一个下标。

[0039] 如上面指出的那样,如果被激发的话,HOM 会降低光束质量。在许多情况中, LP_{02} 模是最成问题的,因为它与基模共享具有大致中心最大值的强度分布,从而基模的激发(例如通过至单模光纤的简单接合)非常容易激发 LP_{02} 模。在其它情形中, LP_{11} 模可能是成问题的。

[0040] 现在考虑图 3 的光纤 412,其与图 1 的光纤 12 基本类似,并因此可以包括上面提到的一些或所有的结构特征。光纤 412 包括芯 414、围绕芯 414 设置的覆层 416、以及任选的围绕覆层 416 设置的第二区域 418。然而,除了图 1 的光纤 12 的特征以外,光纤 412 还可包括与芯 414 隔开的至少一个区域 423。在图 4 所示的实施例,所述至少一个区域 423 包括环形芯 425。所述至少一个区域 423 可包括用于吸收具有选定波长(例如光纤 412 的工作波长)的光能的吸收材料。吸收材料优选在泵浦波长处是低吸收的。

[0041] 图 4 画出光纤 412 的一个可能的折射率分布 430 以及基模和选定 HOM 的归一化强度分布。折射率分布 430 包括对应芯 412 的内区段 435 和对应环形芯 425 的外区段 431。该折射率分布在区段 435(对应于芯)和区段 431(表示环形芯 425)之间的区段对应于覆层 416,在区段 431 外面的区段对应的也是覆层。在图 4 中覆层区段并未用附图标记指出。注意到折射率分布区段 435 和区段 431 相对于覆层可具有大致相同的折射率差。

[0042] 附图标记 436 表示基模 LP_{01} 而附图标记 438 表示 HOM LP_{11} , 两者至少分别比较类似于图 3 中的 LP_{01} 和 LP_{11} 模式(在图 4 中分别由附图标记 36 和 38 表示)。注意到图 2 和 4 在相当程度上是不同的,不同之处在于图 2 的 LP_{02} 模的强度分布具有明显非零的中心部分,所述中心部分基本在图 4 中没有出现。表现出来的是在光纤大致中心处的非零强度分布 446(除了基模 LP_{01} 的大致在中心的非零强度分布 448),但是强度分布 446 的峰值 LP_{02} 与强度分布 46 相比明显减小。图 2 的 LP_{02} 模已经被“转变”成芯 414 和至少一个区域 423 的混合模(或者无论如何 LP_{02} 看起来已经消失而混合模出现)。因为混合模在环形芯 425 中有合适的强度,因此混合模(包括存在于芯 414 中的混合模的该强度部分)被组成环形芯 425 的吸收材料显著地衰减。然而,由于不是混合模,基模 LP_{01} 基本未受影响,或者至少在许多实际应用中其衰减的任何增大容易得到调整及/或不会过于有害。

[0043] 如果光纤装置包括要被泵浦的稀土材料,则希望选择倾向于不会吸收所述泵浦光能的吸收材料。可以和典型稀土一起使用的吸收材料包括钐、镨或铽。当光纤装置包括提供 1060nm 附近的光的稀土材料(例如铽)时,分别在 1064nm 和 1030nm 附近具有强的吸收的 Sm^{3+} 和 Pr^{3+} 离子会是有用的。铽可以在例如 915、940 或 975nm 处被泵浦,并且作为例子,钐和镨在 975nm 处吸收较小或具有低的吸收。当稀土材料包括钐或铽和铒时,钐也会是尤其有用的。当例如在 1576nm 处泵浦稀土材料铽和在 790nm 处泵浦钐时,铽会是尤其有用的。如本领域中已知的那样,铽可以在大约 2000nm 处提供光能。吸收材料的浓度可以是例如大约 500ppm、1000ppm、1500ppm、2000ppm 或者大约 2000ppm。

[0044] 环形芯可包括硅基玻璃。硅基玻璃可包括例如一种或多种一定浓度的铝、磷、锗或氟。在一个例子中,环形芯包括在例如硅基玻璃中一定浓度的磷和氟;在另一个例子中,环形芯可包括一定浓度的铝,并且例如可包括一定浓度的锗。在一个例子中,硅基玻璃可包括铝和锗浓度,而吸收材料可包括钐。上面对吸收材料所指定的浓度范围对上面提到的 Al、Ge、P 和 F 材料是有用的。

[0045] 建模显示,衰减混合模的衰减可以比基模的衰减大至少一个量级到两个量级之间,其中衰减用 dB/米来表示(例如与 LP_{02} 模被转变成的混合模的几十 dB/米相比, LP_{01} 为几分之一 dB/米)。看下面的表 I。

[0046] 表 I

[0047] 图 3 和 4 的光纤中的基模和 HOM 的模型化损失(芯径 = $19\mu m$, $\Delta n = 0.006$ 、环 = $12.5/16.5\mu m$, $\Delta n = 0.006$)

[0048]

模	在 1060nm 处的模型化损失 (dB/m) 用 1000ppm 的 Sm 掺杂的环形芯
LP ₀₁ (基模)	0.1586
LP ₁₁	1.3708
LP ₂₁ (被转变成混合模)	----
LP (3) = (混合的芯/环形芯模 446)	74.8062
LP (4) = (混合的芯/环形芯模 440)	38.0906

[0049] 这样,图 3 和 4 的光纤可提供这样的光纤,该光纤得到了(具有增大的模场直径的)基模的好处,这降低了芯的功率密度并且允许在非线性现象开始之前能进行更高功率传输。通过例如选择芯 414 及 / 或环 425 的组分、几何形状、位置和折射率分布中的一个或多个,光纤 412 可以构造成和布置成使得在期望的工作波长处,光纤 412 支持基模和作为芯和环的混合模的至少一个 HOM。所述至少一个 HOM 会衰减,同时基模可以保持主要为芯 414 的模。

[0050] 经常获得更高功率的激光器或光学放大器意味着提供更高功率的泵浦光到光纤 412,光纤 412 应该能够在不引起光纤退化(例如由于光暗化)的情况下处理所述高功率。如上面关于图 1 的讨论中所提到的那样,覆层 416 可包括玻璃,例如硅基玻璃。经常期望覆层 416 由或者主要由玻璃(例如硅基玻璃或纯硅玻璃)构成,以有助于保证光纤 412 能够处理具有泵浦波长的高功率水平的光,尤其是在光纤 412 包括覆层泵浦式光纤时。在本公开的某些方面中,覆层 416 可以是基本同质的(除了存在影响混合模的所述至少一个区域,以及如果需要的话,应力诱发区域),因此不应被认为是包括用于引导光能的“微结构”。

[0051] 参考上面的图 1-4,模型化光纤具有阶梯形折射率分布 30 的直径为 19 微米的芯 14,其中凸出的部分对应于芯 14 的折射率并且相对于覆层 16 具有大约 0.006 的折射率差 Δn 。针对大约 1060nm 的工作波长进行计算。环形芯 425 的厚度 T 为大约 4 微米,并与芯 414 隔开大约 2.5 微米的间距 S(环形芯的内径 = 12.5 微米,环形芯的外径 = 16.5 微米)。环形芯 425 被认为用大约 1000ppm 的吸收材料(钐)掺杂。在覆层和环部分 431 之间(或者更一般的说,在所述至少一个区域之间)的折射率差或 Δ 也被认为是大约 0.006,但一般不必等于芯部分 425 和覆层之间的 Δ 。环部分和覆层之间的 Δ 可以小于、基本等于或大于芯部分 425 和覆层之间的 Δ 。

[0052] 为了进一步促进对本公开的理解,下面给出关于光纤的另外的细节,所述光纤具有一个或多个混合模以及主要是芯的模或是所述至少一个区域的至少一个或多个模。为了说明本公开的通用性,考虑不同的光纤设计。

[0053] 考虑大致如图 3 和 4 中示出的光纤,该光纤具有直径为 21 微米的中心芯和内径为 16 微米而外径为 21 微米的环形芯。光纤具有如图 4 中所示的大致阶梯形折射率分布,中心芯和环形芯的 Δn 为 0.0025。在 1060nm 波长处,覆层的折射率为 1.44968。单独考虑的话,所述芯的数值孔径 (NA) 为 0.085,在 1060nm 处的 V 数为 5.30。

[0054] 可以分析光纤,就好像环形芯不存在(即,被覆层材料代替)一样。此处将其称为“单独芯”分析,而将所述模称为“芯模”。然而,虽然环形芯没有出现,在归一化的模强度和

光纤的环形芯（如果出现的话）会占据的那一部分之间的重叠积分是可以计算的。参见下面的表 II。

[0055] 表 II

[0056] 光纤中的波导模，其中芯径为 $21.0\ \mu\text{m}$ ， Δn 为 0.0025，在 1060nm 处 $n_{\text{clad}} = 1.44968$ ， $\text{NA} = 0.085$ ， $V = 5.30$

[0057]

LP 模	模的类型	模的有效折射率	模与芯的重叠积分	模与环的重叠积分
1	LP_{01}	1.45182	0.9733	0.00040
2	$\text{LP}_{11\text{o}}$	1.45129	—	—

[0058]

3	$\text{LP}_{11\text{e}}$	1.45129	0.9267	0.00179
4	$\text{LP}_{21\text{o}}$	1.45061	0.8529	0.00693
5	$\text{LP}_{21\text{e}}$	1.45061	—	—
6	LP_{02}	1.45040	0.8041	0.01586
7	$\text{LP}_{31\text{o}}$	1.44982	0.7165	0.03404
8	$\text{LP}_{31\text{e}}$	1.44982	—	—

[0059] 这些模通过它们的折射率值来分阶，阶数高的模具有低的有效折射率。有效折射率大于覆层的那些模要考虑被引导。奇、偶简并模分别由“o”和“e”下标表示。在奇、偶模的数值被认为会相同的情况下，只进行一次计算。图 5 示出表 II 的模的二维强度分布图。

[0060] 也可以像存在环形芯而不存在芯一样分析光纤。表 III 给出这种分析的结果，而图 6 示出用于表 III 的模的强度分布图。此处将上述分析称为“单独环形芯”分析，而所述模被称为“环形芯”或者“环”模。

[0061] 表 III

[0062] 光纤中的波导模，其中环 r_1/r_2 为 $16.0/21.0\ \mu\text{m}$ ， Δn 为 0.00154，在 1060nm 处 $n_{\text{clad}} = 1.44968$

[0063]

LP 模	模的类型	模的有效折射率	模与芯的重叠积分	模与环的重叠积分
1	R_{01}	1.45041	0.00137	0.67097
2	$R_{11\text{o}}$	1.45037	—	—
3	$R_{11\text{e}}$	1.45037	0.00065	0.67395

4	R_{21o}	1.45029	0.00023	0.67764
5	R_{21e}	1.45028	—	—
6	R_{31o}	1.45013	0.00062	0.67857
7	R_{31e}	1.45013	—	—
8	R_{41o}	1.44994	0.00002	0.67354
9	R_{41e}	1.44993	—	—
10	R_{51o}	1.44969	0.00000	0.65995
11	R_{51e}	1.44968	—	—

[0064] 下面的表 IV 将实际光纤的模分析制成表格, 实际光纤就是中心芯和环形芯两者都存在的光纤。图 7 示出用于表 IV 的实际光纤分析的模的二维强度分布图。

[0065] 表 IV

[0066] 光纤中的波导模, 其中芯径为 $21.0 \mu\text{m}$, Δn 为 0.0025, 环 $r1/r2$ 为 $16.0/21.0 \mu\text{m}$, Δn 为 0.00154, 在 1060nm 处 $n_{clad} = 1.44968$

[0067]

LP 模	模的类型	模的有效折射率	模与芯的重叠积分	模与环的重叠积分
1	LP ₀₁	1.45182	0.97237	0.00045
2	LP _{11o}	1.45129	-	-
3	LP _{11e}	1.45129	0.92049	0.00343
4	LP _{21o}	1.45063	0.77994	0.04831
5	LP _{21e}	1.45063	-	-
6	(LP ₀₂ -R ₀₁)m1	1.45051	0.38302	0.33125
7	R _{11o}	1.45037	-	-
8	R _{11e}	1.45037	0.01737	0.66734
9	(LP ₀₂ -R ₀₁)m2	1.45026	0.47590	0.34334
10	R _{21o}	1.45025	0.00664	0.64030
11	R _{21e}	1.45024	-	-
12	R _{31o}	1.45016	0.06734	0.60407
13	R _{31e}	1.45016	-	-
14	R _{41o}	1.44995	0.00741	0.66361
15	R _{41e}	1.44993	-	-
16	LP _{31o}	1.44976	0.68473	0.08991
17	R _{51e}	1.44968	0.00234	0.65680

[0068] 本分析被称为“实际光纤”分析,而所述模被称为“实际光纤模”或者“实际模”。

[0069] 现在讨论此处在各幅附图和表中呈现的数据,以展示用来将所述模分类为混合模或主要为芯的模或区域、以及确定怎样识别已经混合而形成特定混合模的那些模的方法。为了更好地展示模强度分布图,用来产生图 5-10 的分布图的分析并不包括吸收材料(诸如图 3 的环 425 包括的吸收材料)的影响。

[0070] 下面的标准表示一种方法,所述方法确定在实际光纤分析中所识别的模是在单独分析中所识别的特定模已经混合的混合模:(1) 实际光纤的强度图看起来是混合而形成混合模的单独的模的单独的强度图的组合;(2) 正在混合的模具有相同的方位角阶数;以及(3) 然而尽管混合模强度具有相同量级,但单独考虑的那些模在芯和环形芯中的强度可能不具有相同的量级(如具有相同量级的重叠积分所显示的那样)。对于(3)的目的来说,“具有相同量级”意味着较大的数量不大于较小数量的大约六倍。还有,额外的标准可以是:芯和所述至少一个区域的单独的模的有效折射率不应该差得太多。

[0071] 参考表 II 和 III,注意到 LP₀₂芯模的有效折射率(1.45040)基本等于 R₀₁环形芯模的有效折射率(1.54041)。(注意到差值, 1×10^{-5} , 自然被认为是窄于“基本相同”的整个范

围。)此外,两个模具有相同的方位角阶数(在此例中为零阶)。另外,虽然图 7A 和 7B 包括很像单独的芯模的每个强度图或者单独的环模的强度图,图 7A 和 7B 并不包括类似于 LP_{02} 芯模的模。例如,图 7A 的实际光纤分析的模 LP(1)-LP(5) 的强度图中的每一个都很像图 5 的芯分析的模 LP(1)-LP(5) 的强度图。然而,图 7A 的实际分析的 LP(6) 模不像图 5 的任何一个芯模强度图或者图 6 的任何一个环形芯模强度图,相反它看起来像 LP_{02} 芯模(图 5 的单独芯分析的 LP(6)) 和 R_{01} (图 6 的单独环形芯分析的 LP(1)) 的结合。

[0072] 表 II-IV 的重叠积分确认 LP(6) 实际光纤模是 LP_{02} 芯模和 R_{01} 环形芯模的混合模。虽然 R_{01} 环形芯模与环形芯的重叠大约是与芯的重叠的 500 倍,而 LP_{02} 芯模与芯的重叠大约是与环形芯的重叠的 50 倍,对于 LP(6) 实际模,较大重叠值与较小重叠值的比现在减小到 1.1563,表明接近于在芯和环形芯之间的均匀分布。

[0073] 基于对 LP(9) 实际模的类似分析,因此得出的结论是 LP_{02} 芯模和 R_{01} 环形芯模混合而形成两个混合模-表 IV 和图 7A 的 LP(6) 和 LP(9) 模。在环形芯中包括吸收材料会抑制该混合模,但是实际光纤基模 LP(1) 或 LP_{01} 受到的衰减则非常少,因为它主要是芯的模(它们是芯模 LP(2)-LP(6),这些模包括对应于该芯的 LP_{11} 和 LP_{21} 奇、偶模的模)。

[0074] 注意到某些实际 HOM 的强度分布看起来像是芯和覆层混合物模,但是这些模并不认为是混合模。例如,图 7B 的 LP(10) 看起来像是 LP(4) 或图 6 的环形芯模 R_{210} 和 LP(4) 或图 5 的环形芯模 R_{210} 的结合。然而, R_{210} 模的有效折射率(1.45029)并没有那么接近 LP_{210} 模的有效折射率(1.45069),并且最重要的是,实际光纤 HOM LP(10) 的重叠积分相差大约 100 倍(看表 IV),因而强度的绝大多数与环形芯重叠。因此,虽然 R_{210} 和 LP_{210} 模的方位角阶数相同,并且两者都具有奇数个方位,但是并不认为它们被混合而形成混合模,尽管 LP(10) 实际光纤强度分布看起来是 R_{210} 环形芯模和 LP_{210} 覆层模的直接结合。LP(10) 实际光纤模看起来主要是环形芯的模,不管强度图的附加特征。此处,因为强度图的外观,诸如 LP(10) 的模被称为“复合模”,而非混合模。

[0075] 因此,用于混合区域的选定模(例如芯的选定模(或许从而能抑制它))的一种方法是设计环形芯,使得具有和目标芯模相同方位角阶数的环形模具有与目标芯模类似的有效折射率。对实际光纤数据的分析确认混合模的存在。如果需要的话可进行迭代,改变芯和环形芯的几何形状、之间间距、折射率分布等等中的一个或多个,以实现使期望模式混合而形成期望的混合模的设计。可以查明包括在多个区域中的一个(例如芯或环形芯)中的吸收材料的效果,以实现抑制或者进一步确认某个模是混合模或主要模。例如,在环形芯中的吸收材料会影响混合模和主要为环形芯的模的模,但一般不会对主要为芯的模的模产生实质性的影响。

[0076] 在上面的例子中, LP_{02} 芯模与环形芯模混合而形成实际模,但并不试图混合 LP_{11} 芯模。在表 V-VII 和图 8-10 中给出了数据,所述数据展示了其中 LP_{11} 芯模与环形芯模混合而形成混合模的光纤。该过程遵循上面关于表 II-IV 和图 5-7B 所描述的过程。在这个例子中,光纤的芯具有 $14.0 \mu\text{m}$ 的直径,关于覆层的 $\Delta n = 0.003$,并且像前面的例子一样,在 1060nm 处的折射率为 1.44968。单独考虑的话,所述芯的数值孔径(NA)为 0.093 而 V 数为 3.87。该光纤包括环形芯,该环形芯的内径为 $14 \mu\text{m}$ 而外径为 $20 \mu\text{m}$,关于覆层的 $\Delta n = 0.00215$ 。

[0077] 表 V 给出单独芯分析,图 8 示出表 V 中给出的模的对应的强度图;

[0078] 表 VI 给出单独考虑的环形芯,图 9 示出表 VI 模的对应的强度图;表 VII 给出实际光纤模数据,图 10 示出表 VII 的实际光纤模的强度分布图。

[0079] 表 V

[0080] 光纤中的波导模,其中芯径为 $14.0 \mu\text{m}$, Δn 为 0.003,在 1060nm 处 $n_{\text{clad}} = 1.44968$, $\text{NA} = 0.093$, $V = 3.87$

[0081]

LP 模	模的类型	模的有效折射率	模与芯的重叠积分	模与环的重叠积分
1	LP ₀₁	1.45198	0.94157	0.00007
2	LP _{11o}	1.45096	-	-
3	LP _{11e}	1.45096	0.83074	0.00098
4	LP _{21o}	1.44978	0.58417	0.03368
5	LP _{21e}	1.44977	-	-

[0082] 表 VI

[0083] 光纤中的波导模,其中环 r_1/r_2 为 $14.0/20.0 \mu\text{m}$, Δn 为 0.00215,在 1060nm 处 $n_{\text{clad}} = 1.44968$

[0084]

LP 模	模的类型	模的有效折射率	模与芯的重叠积分	模与环的重叠积分
1	R ₀₁	1.45100	0.00070	0.80418
2	R _{11o}	1.45096	-	-
3	R _{11e}	1.45096	0.00041	0.80945
4	R _{21o}	1.45086	0.00019	0.81169
5	R _{21e}	1.45085	-	-
6	R _{31o}	1.45068	0.00007	0.81247
7	R _{31e}	1.45068	-	-
8	R _{41o}	1.45044	0.00002	0.80934
9	R _{41e}	1.45043	-	-
10	R _{51o}	1.45014	0.00001	0.79959

11	R_{51e}	1.45014	-	-
12	R_{61o}	1.44978	0.00000	0.78037
13	R_{61e}	1.44978	-	-

[0085] 表 VII

[0086] 光纤中的波导模,其中环 r_1/r_2 为 $14.0/20.0 \mu\text{m}$, Δn 为 0.00215 ,在 1060nm 处 $n_{\text{clad}} = 1.44968$

[0087]

LP 模	模的类型	模的有效折射率	模与芯的重叠积分	模与环的重叠积分
1	LP_{01}	1.45182	0.94077	0.00038
2	$(LP_{11}-R_{11})m1o$	1.45129	-	-
3	$(LP_{11}-R_{11})m1e$	1.45129	0.39740	0.39548
4	R_{01}	1.45063	0.00258	0.80793
5	$(LP_{11}-R_{11})m2o$	1.45062	-	-
6	$(LP_{11}-R_{11})m2e$	1.45047	0.42913	0.42612
7	R_{21o}	1.45027	0.00146	0.80846
8	R_{21e}	1.45027	-	-
9	R_{31o}	1.45020	0.00027	0.81170
10	R_{31e}	1.45016	-	-
11	R_{41o}	1.45015	0.00005	0.80919
12	R_{41e}	1.45008	-	-
13	R_{51o}	1.45008	0.00001	0.79953
14	R_{51e}	1.44985	-	-
15	R_{61o}	1.44984	0.00073	0.77957
16	R_{61e}	1.44974	-	-
17	LP_{21o}	1.44974	0.60800	0.01824

[0088] 根据表 V 和 VI,注意到 LP_{11o} 和 LP_{11e} 芯模具有和 R_{11e} 和 R_{11o} 环形芯模基本相同的有效折射率。当然,这些模具有相同的方位角阶数(在本例中方位角阶数是 1)。奇模和偶模中的每一个混合而形成两个混合的实际光纤模,得到总计四个混合模。就是说, LP_{11o} 与 R_{11o} 混合而形成表 VII 和图 10 中的 LP(2) 和 LP(5) (分别标记为 $(LP_{11}-R_{11})m1o$ 和 $(LP_{11}-R_{11})m2o$)。类似地, LP_{11e} 芯模与 R_{11e} 环形芯模混合而形成表 VII 和图 10 中示出的 LP(3) 和 LP(6) 混合

实际光纤模（分别标记为 $(LP_{11}-R_{11})m1e$ 和 $(LP_{11}-R_{11})m2e$ ）。实际光纤 LP(2) 和 LP(5) 模的模场分布图看起来是 LP_{11e} 与 R_{11e} 模的逻辑结合，而 LP(3) 和 LP(7) 模的模场分布图看起来是人们期望的 LP_{11e} 与 R_{11e} 模的结合。对重叠积分的考虑同样支持所识别的混合模的形成。LP(2)、LP(3)、LP(5) 和 LP(7) 实际光纤模的重叠积分的较高值与较低值的比大约为 1，表明在芯和环形芯中分布几乎相等。

[0089] 注意到表 V 的 LP_{21} 芯模（即 LP_{21e} 和 R_{21e} 芯模）的有效折射率（1.44978、1.44979）基本等于表 VI 的 R_{61} 环形芯模的有效折射率（1.44978）。然而，在对实际光纤的分析中，完全考虑表 V-VII 和图 8-10 中出现的所有数据表明 LP_{21} 和 R_{61} 模虽然是“折射率匹配”的，并没有混合而形成混合模，而仍然分别主要是芯和环形芯的模。申请人认为，这是因为 LP_{21} 芯模具有明显不同于第 6 阶 R_{61} 环形芯模的方位角阶数（阶数为 2）。这种见识——匹配的方位角阶数能极大地促进选择模用于模混合，并且至少在一些情况中，比严格的有效折射率匹配更加重要，并且会是让模混合的条件——看起来未被现有技术所了解。

[0090] 虽然此处提供的例子集中于保存基模的完整性和某些 HOM 的选择性抑制，在某些情况中此处的教导可适用于以可能损害基模为代价而支持选定 HOM 超过另一 HOM。这样的方法也在本公开的范围之内。让 LP_{11} 和 LP_{02} 芯模两者与环形芯模混合以形成混合模同样被认为是在本公开的范围之内。该设计可包括两个环形芯，一个环形芯围绕另一个环形芯，其中 LP_{11} 芯模与一个环形芯的模混合，而 LP_{02} 芯模与另一个环形芯的模混合。在另一个方法中，芯 LP_{02} 可以与 R_{02} 环形芯模混合，而芯 LP_{11} 与阶数低于 R_{02} 模的环形芯的模混合。

[0091] 这样，根据本公开的一个方面，申请人意识到，根据相同禁止原则来解决所有 HOM 可能是不必要的。在许多应用中，某些 HOM 比其它 HOM 更容易造成麻烦，因此相对于更麻烦的 HOM 来说用相同方式解决这些 HOM 变得不那么重要。从 SM 光纤到 MM 光纤的接合非常容易激发强度分布图是基本中心且方位角对称的 HOM，而不是激发其它的基本不是中心且方位角对称的 HOM。例如，认为这样的接合很容易激发图 3 中所示的 LP_{02} 模而非 LP_{11} 模。

[0092] V 数和 NA 是详细说明光纤经常用的参数。除非另外说明，芯的 NA 和 V 数指的是芯被单独考虑时的 NA 和 V 数，就是说，不考虑对混合模的形成未做出贡献的所述至少一个区域。注意到光纤可以是“微结构式的”，就是说，可包括诸如纵向延伸的折射率改变区域的阵列（例如，空穴阵列，所述空穴的折射率不同于限定空穴的材料的折射率）之类的特征，所述折射率改变区域提供光子带隙效应或者经由折射率改变区域和硅基区域的折射率的加权平均分析而宏观地改变覆层的平均折射率。在后一种情况中，由芯进行的引导仍被认为是全内反射（TIR）。微结构式光纤仍被认为是在本公开的范围之内。例如，在一种微结构设计总，可以通过在设置在芯周围的环形区域中留出空穴而形成“环”，对芯的单独分析将包括包含所述空穴的覆层（而所述环包含其它遗漏的空穴），当然，被认为将“主要”由芯引导的模会受到所述空穴的影响。

[0093] 在另一个例子中，根据本公开的光纤可包括芯、围绕所述芯设置的覆层、以及任选的围绕所述覆层设置的区域。光纤可包括与芯隔开的至少一个区域，所述至少一个区域可包括多个卫星区域，所述卫星区域可以是单独纵向延伸的空穴或者布置成环形或其它构造的折射率改变区域。

[0094] 在某些方面中，根据本公开的光纤可具有芯，所述芯在光纤的工作波长处的 V 数不小于 4.0；不小于 5.0；不小于 6.0；不小于 7.0；不小于 7.5。在本公开的某些方面中， V

数可以为从 3.0 到 5.0 ;从 5.0 到 7.0 ;或者从 7.0 到 10.0。在本公开的其它方面中, V 数可以不大于 3, 不大于 3.5, 不大于 4, 不大于 4.5, 不大于 5, 或者不大于 5.5。

[0095] 在本公开的其它方面中, 在光纤的工作波长处光纤的芯的 NA 可以不小于 0.12, 不小于 0.15, 不小于 0.16, 或者不小于 0.17。芯的 NA 可以是大约 0.17。

[0096] 在本公开的另外方面中, 光纤的芯的直径可以为至少 15 微米 ;至少 20 微米 ;至少 25 微米 ;至少 30 微米 ;至少 35 微米 ;至少 40 微米 ;或者至少 50 微米。

[0097] 如阅读了此处公开的内容的本领域技术人员将意识到的那样, 前述方面的结合在本公开的范围。现在描述光纤的另外的实施例。

[0098] 图 11 示意性地示出根据本公开的光纤 1012 的横截面, 所述光纤除了芯 1014 和与芯 1014 隔开的至少一个区域 1023 以外, 还包括一对纵向或轴向延伸的应力诱发区域, 应力诱发区域由附图标记 1033A 和 1033B 表示。应力诱发区域 1033A 和 1033B 例如通过光弹性效应可以帮助在光纤中诱发选定的双折射。应力诱发区域的热膨胀系数可被选择成不同于设置在应力诱发区域周围的光纤材料的热膨胀系数, 从而当光纤在被拉制以后冷却时, 引起永久的应力。双折射指的是光纤的至少一个区域 (例如芯 1014) 对一种偏振光的折射率明显不同于对与之正交的偏振光的折射率。光纤 1012 可以时偏振保持光纤或者偏振光纤, 至少部分地取决于应力诱发区域的成分、形状和位置中的一种或多种的选择。通过使用各种掺杂剂 (例如上面提到的那些), 应力诱发区域 1033 的折射率可被调整, 以低于覆层 1016 的折射率、基本匹配覆层 1016 的折射率、或者甚至高于覆层 1016 的折射率。

[0099] 图 12 为透视图, 示意性地示出根据本公开的光纤装置的一个例子。光学装置 1110 可以包括第一光纤 1112, 如上所述, 第一光纤 1112 可以包括芯 1114、围绕芯 1114 设置的覆层 1116 以及与芯 1114 隔开的用于支撑与芯 1114 混合的选定混合模的至少一个区域 1123。光纤 1112 可具有工作波长并且可包括稀土材料, 所述稀土材料响应于光纤 1114 接收具有泵浦波长的泵浦光能而提供具有工作波长的光能。光纤装置 1110 可包括与第一光纤并排设置的第二光纤 1135, 并且第二光纤可包括至少一个芯 1137。光纤装置 1110 可包括围绕第一和第二光纤设置的公共覆层 1145。公共覆层 1145 可被构造和布置为倾向于限制光能到第二光纤 1135 的芯 1137, 用于由芯 1137 引导。第二光纤 1135 可传播泵浦光能并且第一和第二光纤设置成彼此并排, 如图 10 中所示, 从而泵浦光能耦合至第一光纤 1112, 用于光学泵浦例如构成第一光纤 1112 的芯 1114 的稀土材料。第一光纤 1112 和第二光纤 1135 分别可在公共覆层 1145 内被一起拉制。光学装置 1110 可构造和布置成使得可以在光纤装置 1110 的长度的末端处单独地访问 (access) 第一和第二光纤, 以便例如将光能耦合到第二光纤, 用于随后耦合至第一光纤, 以及传送信号到第一光纤 1112 的芯 1114 和 / 或从第一光纤 1112 的芯 1114 提取信号。

[0100] 根据本公开的一个方面, 光纤装置可以构造成作为激光器。这样的激光器可包括至少一个反射器, 所述至少一个反射器可包括光栅, 例如通过选择性应用光化学辐射到光纤的感光部分而形成的布拉格光栅。激光器可包括第二反射器。如本领域中所知晓的那样, 所述反射器中的一个的反射性通常不像其它反射器的反射性那么强。两个隔开的反射器可在其间形成激光腔。所述激光器还可构造成分布式反馈 (DFB) 激光器, 并且可使用典型地为在其中改变相位的一个光栅形式的分布式反射器, 并且可提供窄线宽的光。激光器还可以被构造为主振荡功率放大器 (MOPA) 布置, 其中主振荡器, 例如二极管或光纤激光器, 启

动光纤放大器。根据本公开的光纤装置可包括用于将泵浦光耦合到光纤装置的光纤光学耦合器。

[0101] 如上面提到的那样, 光纤可包括稀土材料, 用来响应于光纤接收第二波长的光 (例如“泵浦光”) 而提供第一波长的光 (即, 被泵浦的光)。此处所用的“稀土材料”指的是一种或多种稀土, 一般以稀土离子的形式包含在光纤中。泵浦式光纤领域的普通技术人员例如可以从周期表中的镧系元素 (原子数 57-71 的材料) 中选择稀土。可以如图所示和如上面讨论那样泵浦所述光纤。同样, 如本领域所知道的那样, 光纤可以被“端泵浦”, 并且可包括第二或“泵浦”覆层, 该第二覆层用来传播经由端泵浦输送至光纤的泵浦光。

[0102] 前面附图中示出的折射率分布是理想化的。在预成形件上或者从从预成形件上拉出的实际光纤上测得的实际折射率分布会包括其它特征, 这在本领域中是熟知的, 例如在多个部分之间的圆形边缘以及在芯的折射率中的标记“微陷 (dip)”, 微陷是在改进的化学气相沉积 (MCVD) 工序 (假定 MCVD 工艺被用来制造光纤预成形件) 的沉淀阶段期间由掺杂剂在芯中的熔化引起的。还有, 折射率分布的对应于光纤的特定区域的一些部分被绘画以将折射率描述为在该区域中基本不变。不需要在本公开的所有实践中都是这样。如本领域所熟知的那样, 光纤的一区域 (例如光纤的芯) 的折射率不必是恒定的, 而是可以根据预定功能改变以提供特定结果。例如, 本领域已知提供一种包括渐变式折射率分布的芯, 其该分布对应抛物线或其它合适的函数。

[0103] 此处已经描述和示出本发明的几个实施例。本领域技术人员能容易地想到用于实现所述功能及 / 或获得此处描述的结果或优点的各种其它手段和结构, 每个上述变型或修改被认为落入本发明的范围内。一般地说, 本领域技术人员将容易地认识到, 此处描述的所有参数、尺寸、材料和构造都是示例性的, 实际参数、尺寸、材料和构造将取决于使用本公开的教导的特定应用。

[0104] 本领域技术人员将意识到或者能够只是使用常规实验就可以确定此处描述的本发明的特定实施例的许多等同方案。因此, 应该理解前述实施例仅作为例子给出并且在所附权利要求及其内容的范围内, 本发明可以以不同于特定描述的其它方式实践。本发明针对此处描述的每个单独的特征、系统、材料及 / 或方法。另外, 任何两个或更多这样的特征、系统、材料及 / 或方法的结合 (如果这些特征、系统、材料及 / 或方法不是相互冲突的话) 都包含在本发明的范围内。

[0105] 在权利要求书中以及在上面的详细说明中, 所有过渡短语例如“包括”、“携带”、“具有”、“包含”、“涉及”等等应理解为是开放的。只有过渡短语“由... 构成”和“主要由... 构成”才分别是封闭或半封闭过渡短语。如美国专利局专利审查程序指南 § 2111.03 (第七版, 修订版) 中所阐明的那样。

[0106] 用语“A 或 B”以及“A 或 B 中之一”一般表示包含“或”的关系, 意思是所有三种可能性 A、B 以及 A 和 B 这两者都包含在内, 除非上下文清楚地表明排除性的“或”更合适 (即, A 和 B 是相互排斥的, 因此不能同时出现)。

[0107] 在专利法中一般广泛接受的是, “a”的意思是“至少一个”或者“一个或更多”。然而, 偶尔情况下意思相反。为了清楚起见, 此处所用的“a”及类似用于表示“至少一个”或者“一个或更多”。有时会明确地使用短语“至少一个”来强调这一点。在一个权利要求的陈述中使用短语“至少一个”不应被理解为在另一陈述中缺乏上述用语 (例如, 只是使用“a”)

则要进行某种更大的限制。此外,后面提到术语“至少一个”如在“所述至少一个”中那样不应被理解为引入额外的限制(在缺乏对这些限制的明确陈述的情况下)。例如,陈述一个装置包括“至少一个小部件”而随后陈述“所述至少一个小部件被染成红色”并不意味着权利要求需要具有一个以上小部件的装置的所有小部件均为红色。该权利要求应理解为一个装置,其具有一个或更多个小部件,只要所述小部件中的至少一个被染成红色即可。

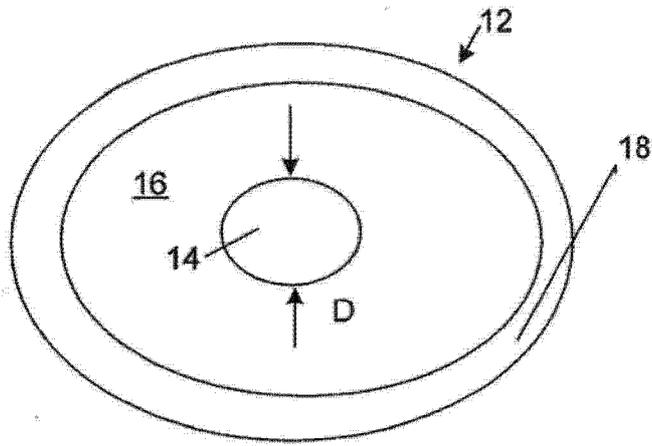


图 1

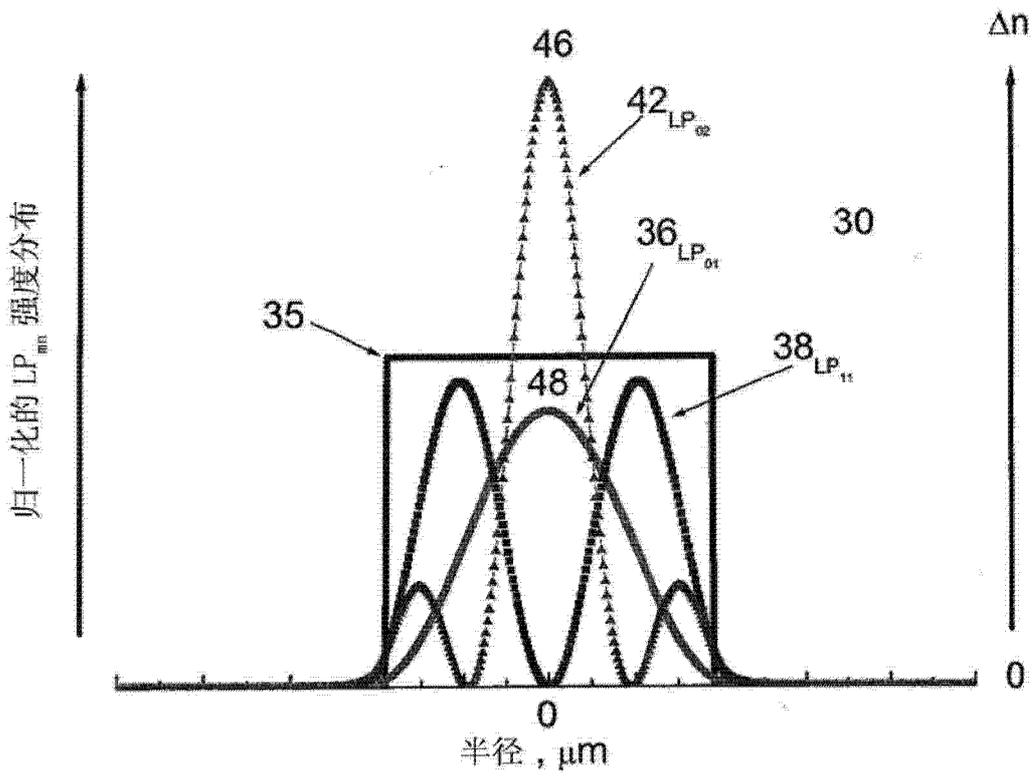


图 2

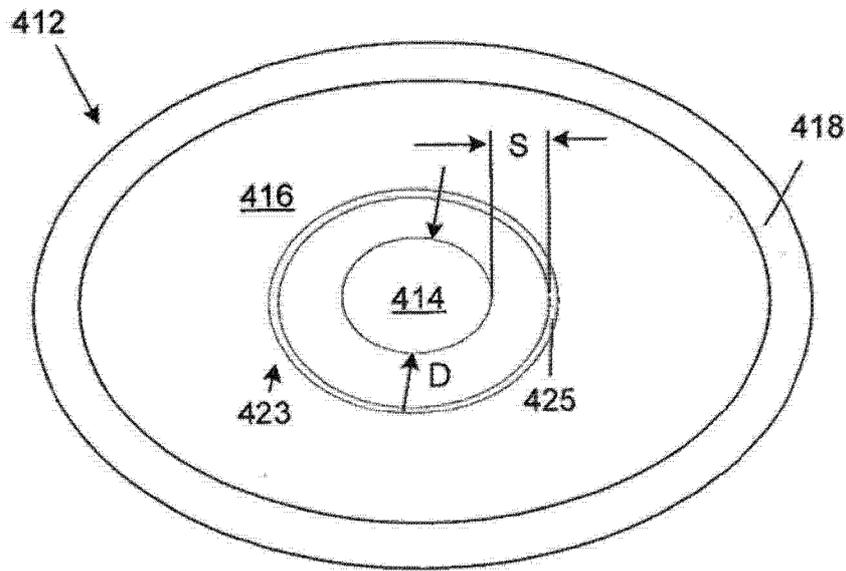


图 3

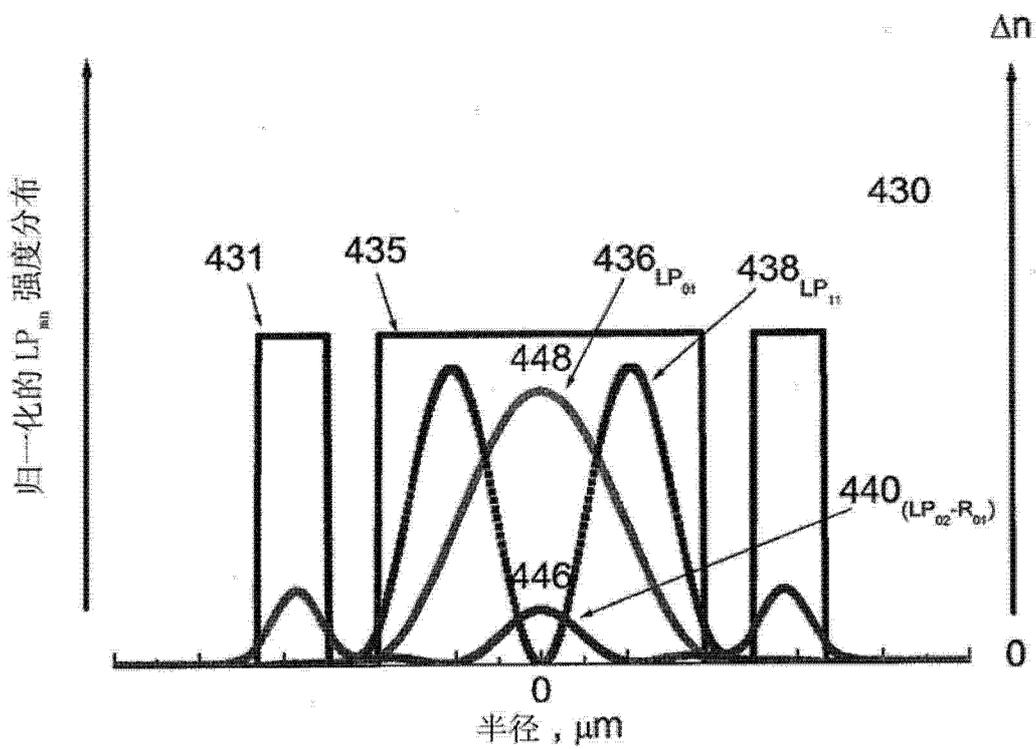


图 4

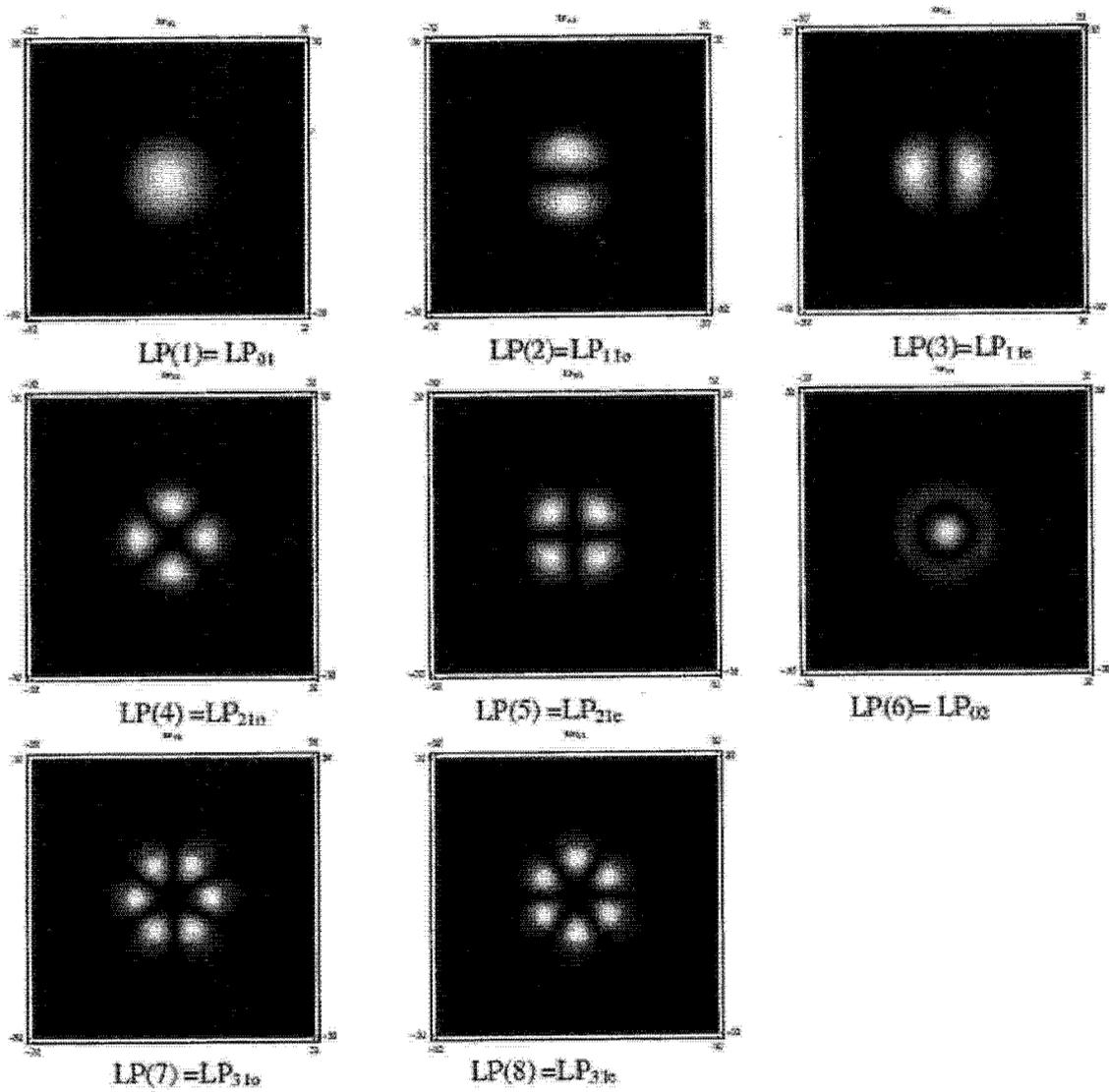


图 5

表 II 的模的强度分布图 (针对芯径为 $21.0 \mu\text{m}$ 和 $n = 0.0025$ 的光纤, 在 1060nm 下的前 8 个波导 LP 模)

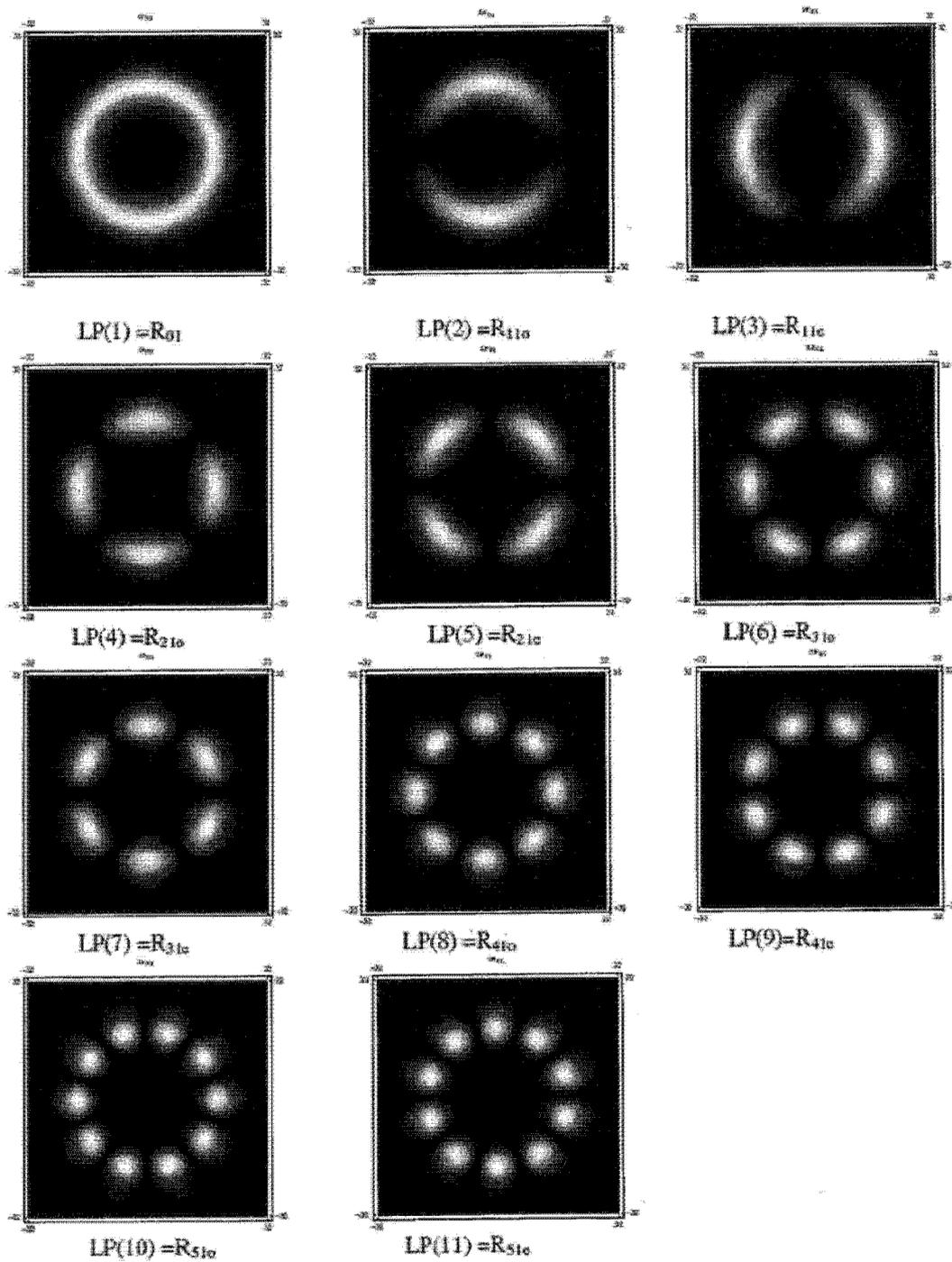


图 6

表 III 的模的强度分布图（针对具有半径为 $16.0/21.0 \mu\text{m}$ 和 $n = 0.00154$ 的环的光纤, 在 1060nm 下的前 11 个波导 LP 模）

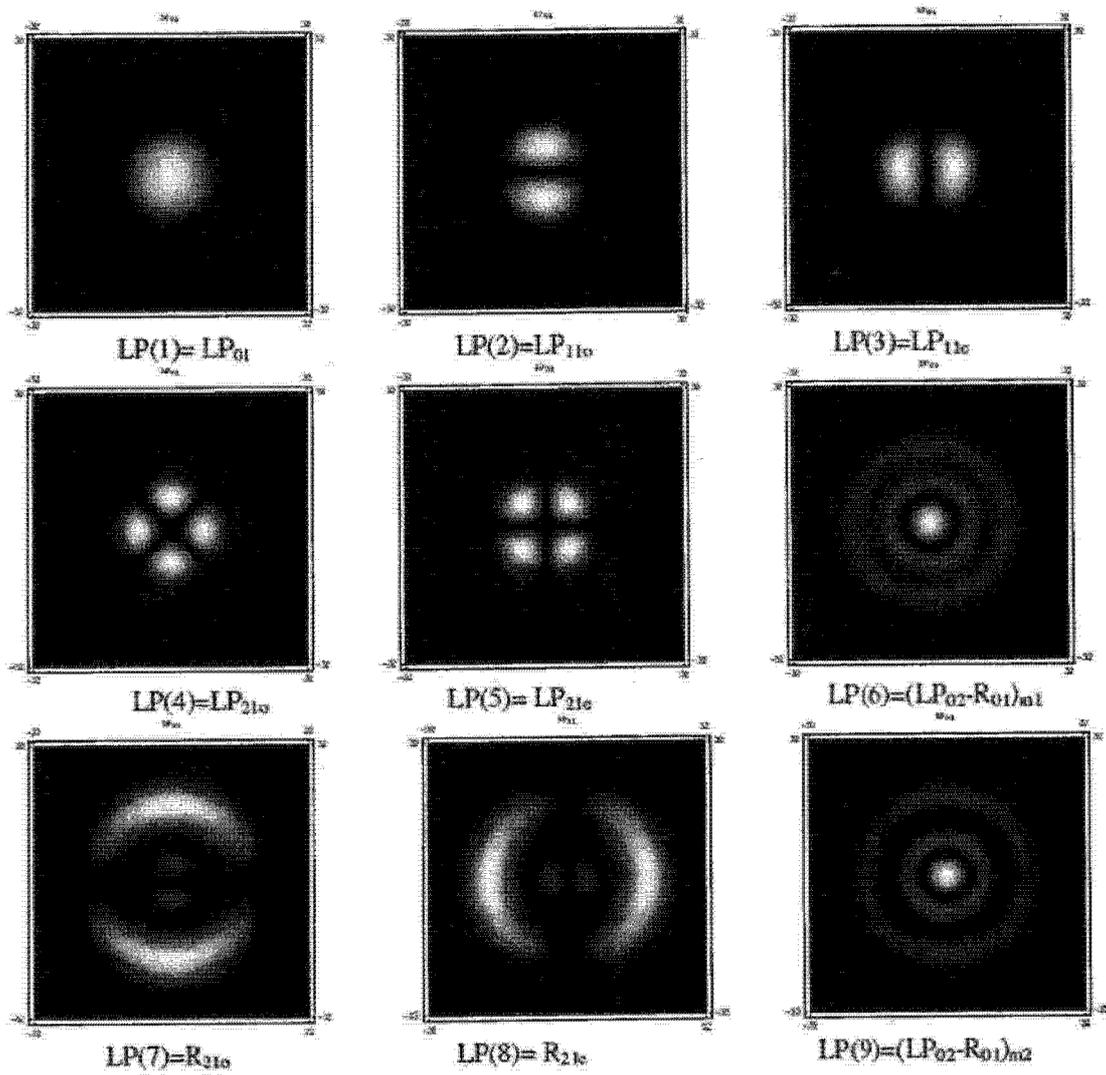


图 7A

表 IV 的模的强度分布图 (针对芯径为 $21.0 \mu m$ 和 $n = 0.0025$ 的光纤以及半径为 $16.0/21.0 \mu m$ 和 $n = 0.00154$ 的环, 在 $1060nm$ 下的前 9 个波导 LP 模)

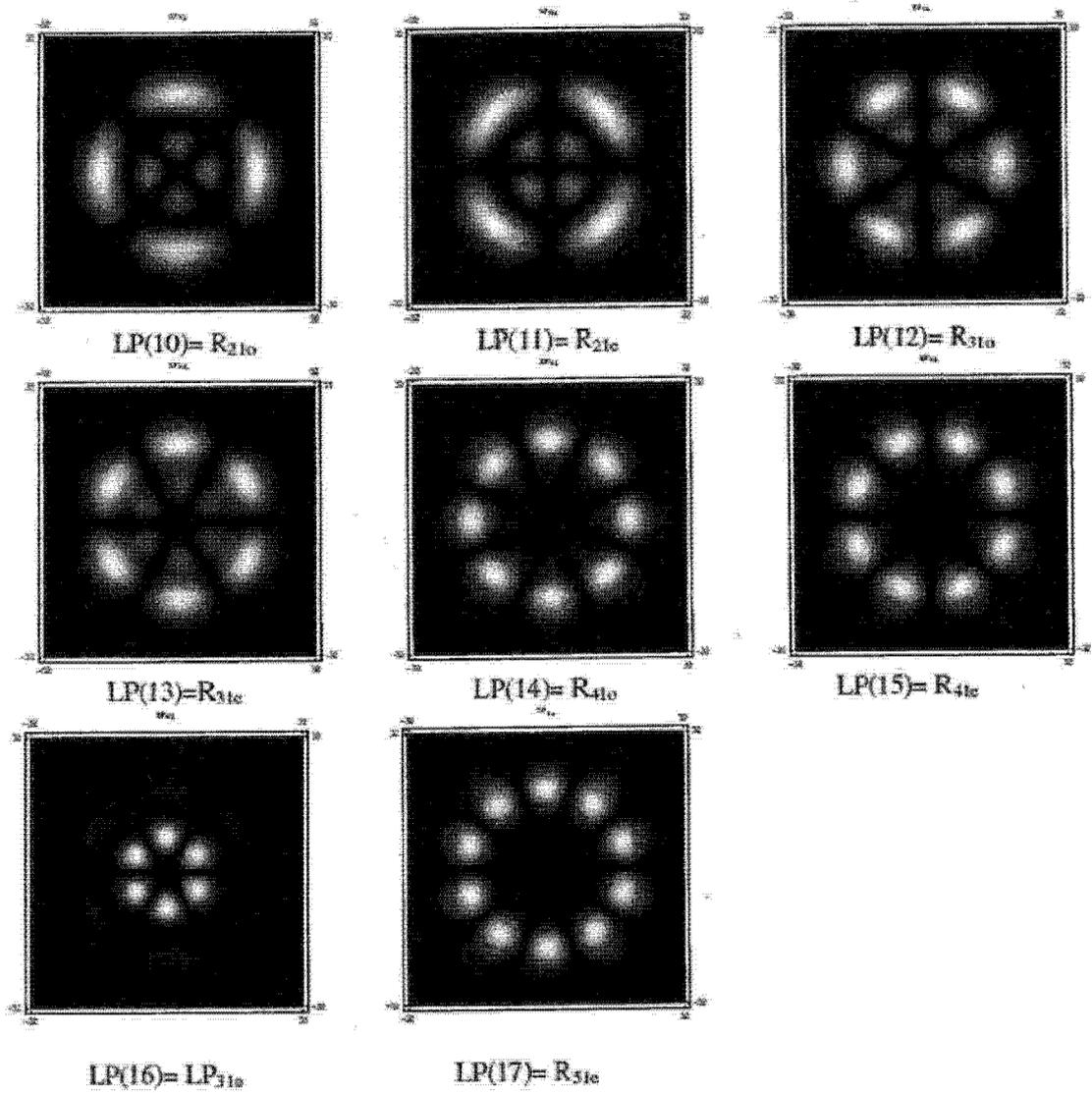


图 7B

表 1V 的模的强度分布图 (针对芯径为 $21.0 \mu\text{m}$ 和 $n = 0.0025$ 且具有半径为 $16.0/21.0 \mu\text{m}$ 和 $n = 0.00154$ 的环的光纤, 在 1060nm 下的前 9 个波导 LP 模)

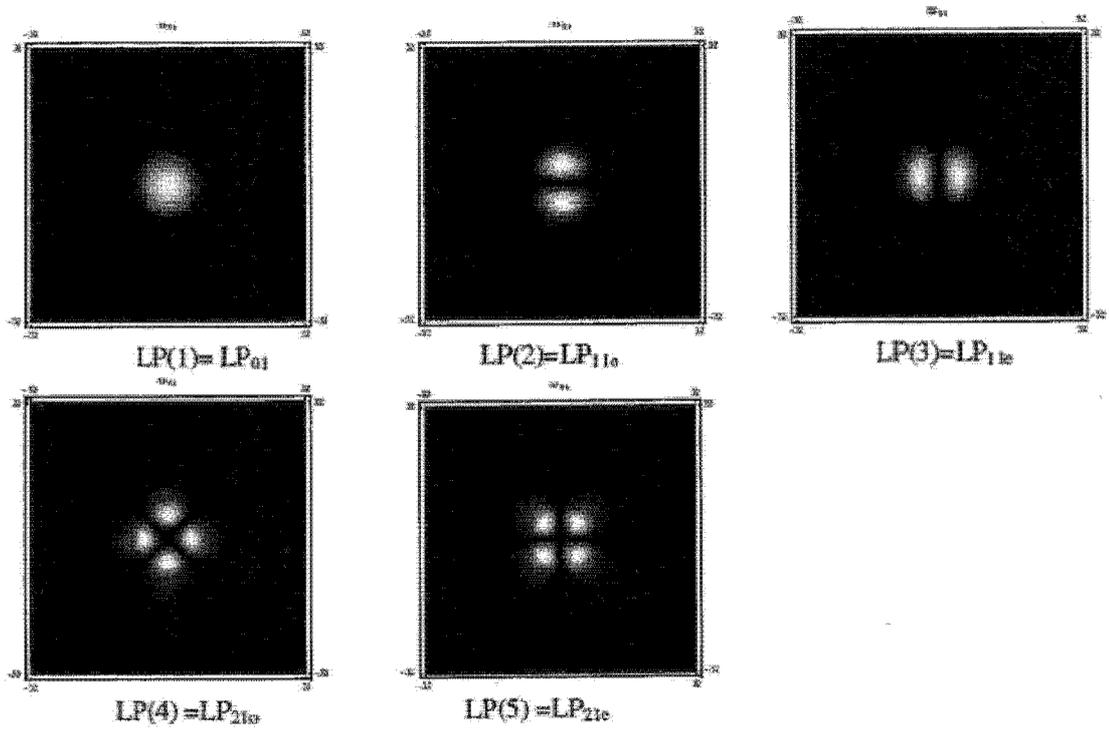


图 8

表 V 的模的强度分布图 (针对芯径为 $14.0 \mu\text{m}$ 和 $n = 0.003$ 的光纤, 在 1060nm 下的前 5 个波导 LP 模强度)

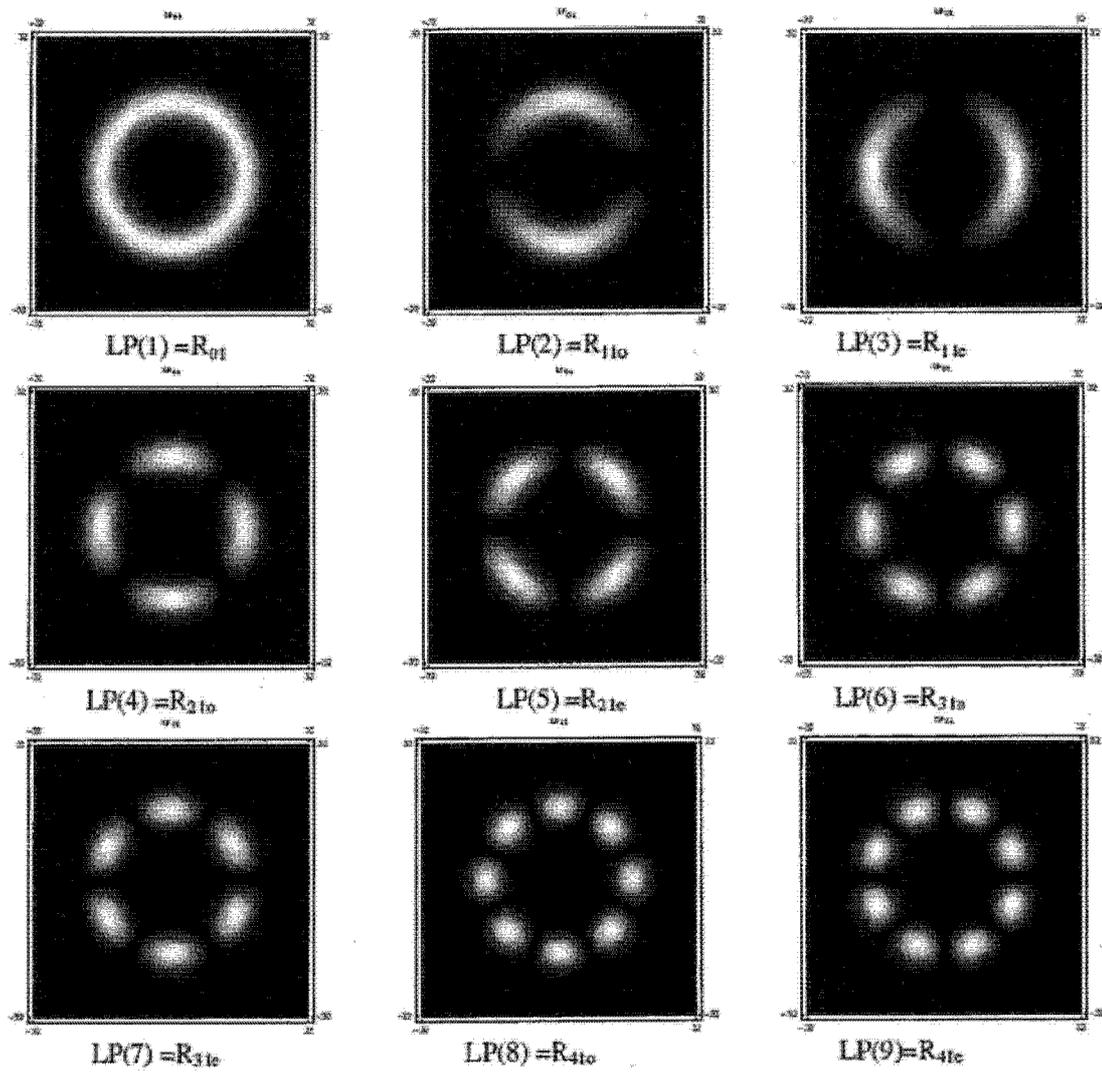


图 9A

表 VI 的枚的强度分布图 (针对半径为 14.0/20.0 μm 和 $n = 0.00215$ 的环, 在 1060nm 下的前 9 个波导 LP 模强度)

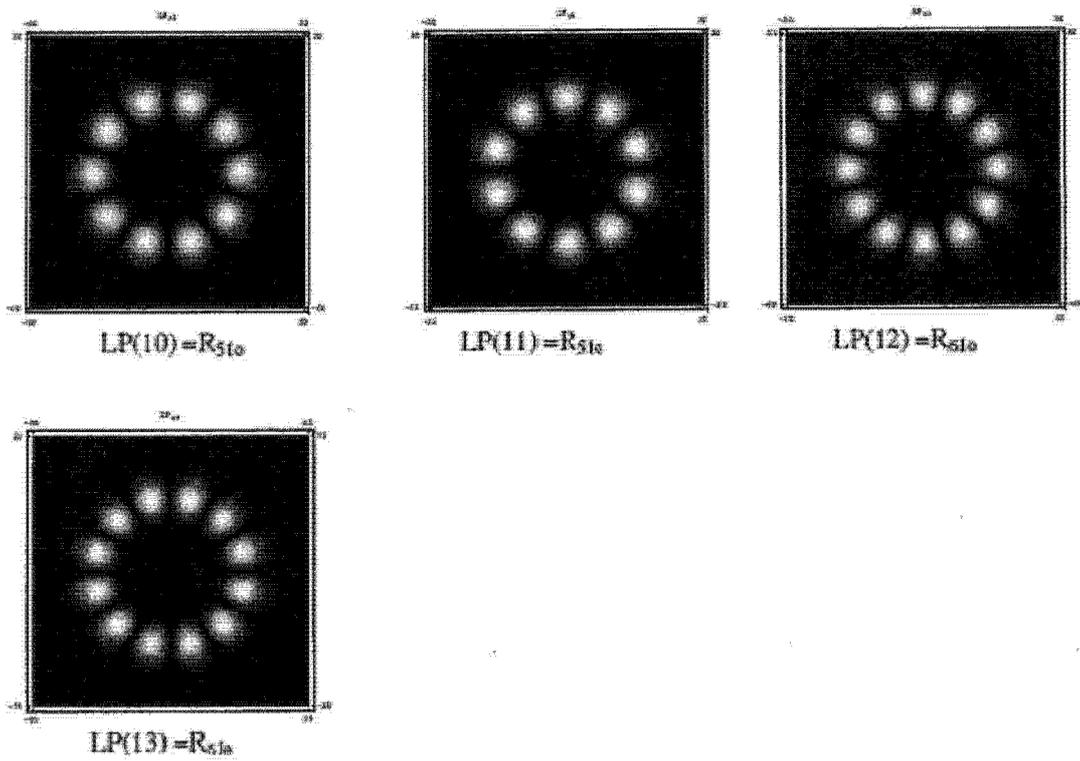


图 9B

表 VI 的模的强度分布图 (针对半半径为 $14.0/20. \mu\text{m}$ 和 $n = 0.00215$ 的环, 在 1060nm 下的接下来的 4 个波导模强度)

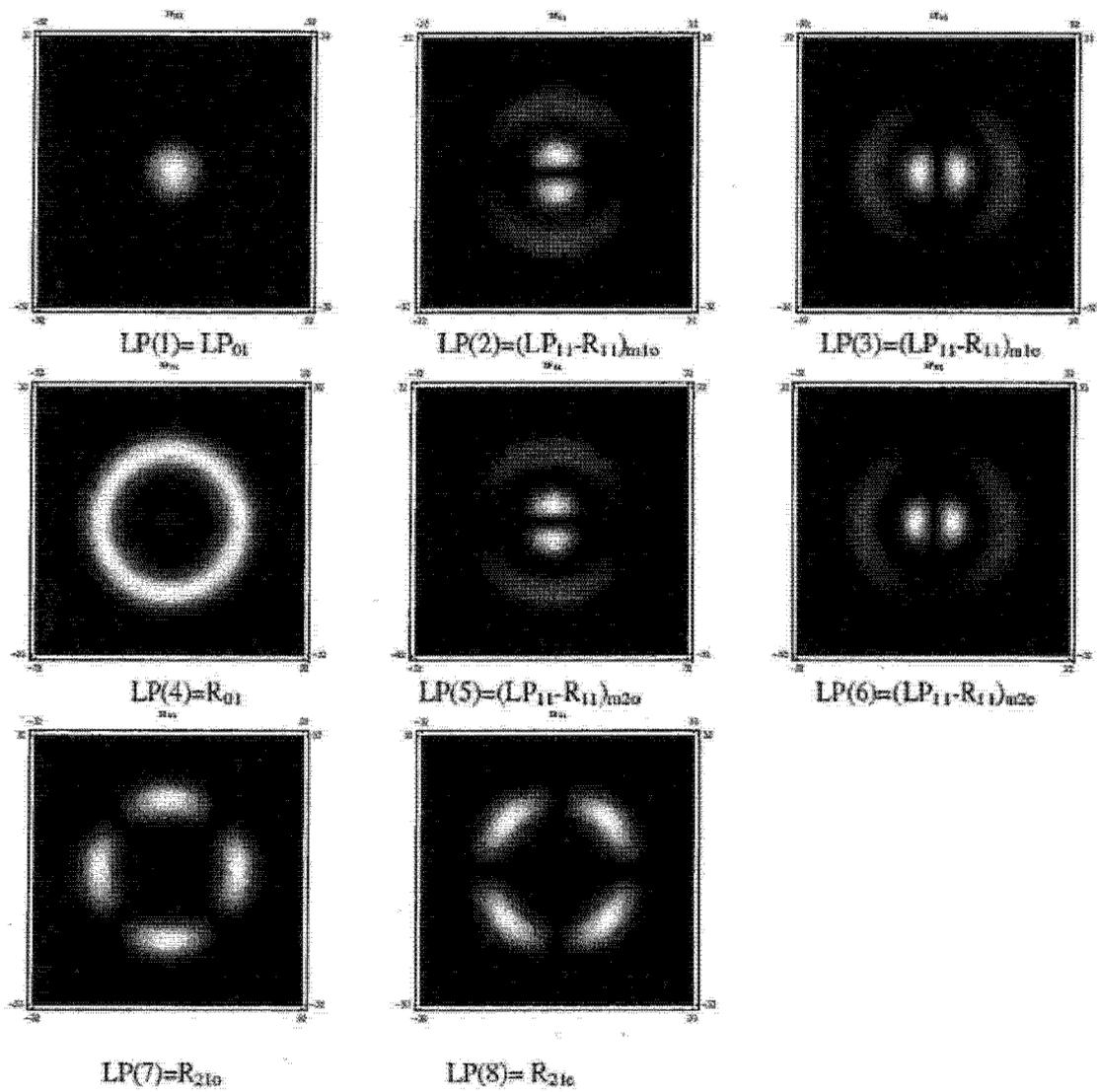


图 10

表 VII 的模的强度分布图 (针对芯径为 $14.0 \mu m$ 和 $n = 0.003$ 的光纤以及半径为 $14.0/20.0 \mu m$ 和 $n = 0.00215$ 的环, 在 $1060nm$ 下的前 8 个波导 LP 模强度)

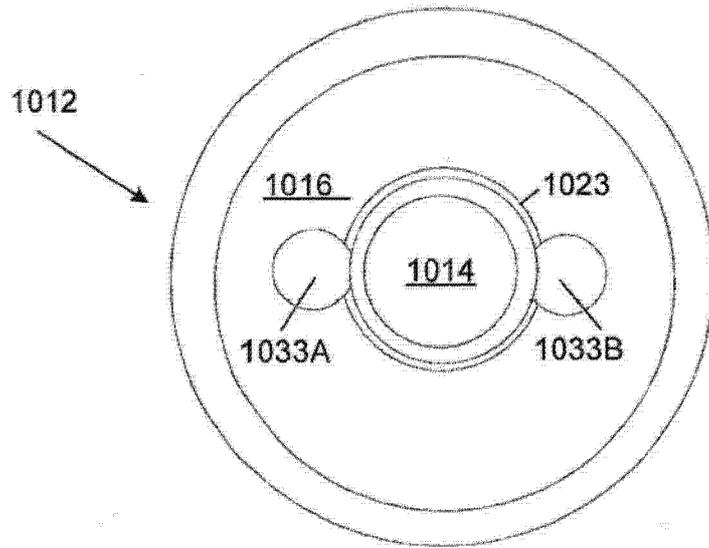


图 11

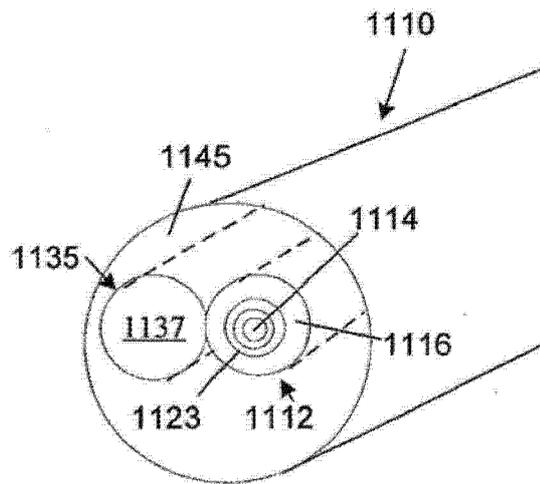


图 12