

文章编号: 1001-3806(2009)05-0503-03

## 增益导引折射率反导引光纤激光特性的研究

王伟能, 谭晓玲, 田振, 耿优福, 王鹏, 姚建铨\*

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所 光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了实现大模场单模光纤, 采用增益导引和折射率反导引相结合的新方法, 进行了腔镜反射率对增益导引折射率反导引光纤激光器影响的理论研究, 数值模拟了不同增益系数和负折射率差值情况下的模场分布及对模场的影响, 得出了单模运转条件。结果表明, 增益导引和折射率反导引光纤可以实现大模场面积, 这为设计大模场光纤提供了理论依据, 具有重要的指导意义。

**关键词:** 光纤光学; 光纤激光器; 大模场光纤; 增益导引; 折射率反导引; 增益阈值

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.016

## Research on laser characteristics of gain-guided and index-antiguidded fibers

WANG Wei-neng, TAN Xiao-ling, TIAN Zhen, GENG You-fu, WANG Peng, YAO Jian-quan

(Key Laboratory of Opto-electronics Information Science & Technology of Ministry of Education, Institute of Laser and Opto-electronics, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In order to realize large mode area and single-mode fibers, a combining method of gain-guiding and index-antiguidding technique was adopted. Based on this method, the effect of the reflectivity of the resonator mirror on gain-guided and index-antiguidded fiber lasers was analyzed in detail. Numerical simulation results show that the mode field distribution is varied with gain coefficient and negative index step, so the large mode area fiber with single mode operation can be realized by choosing optimal parameters, which is highly instructive for the design of large mode area fibers.

**Key words:** fiber optics; fiber laser; large mode area fiber; gain guiding; index antiguidding; gain threshold value

### 引言

随着双包层掺稀土光纤制作工艺和高功率半导体激光抽运技术的发展, 单根双包层光纤激光器的输出功率逐步提高, 连续输出功率已经达到千瓦级。然而进一步增大光纤激光器的功率仍面临着挑战。对于飞秒和皮秒锁模光纤激光器, 自相位调制限制了峰值功率的提高; 对于纳秒调  $Q$  和连续光纤激光器, 喇曼散射限制了高功率的获得; 布里渊散射限制了窄线宽单频光纤激光器的功率, 此外, 非线性自聚焦也限制了功率的提高。在过去的几年里, 研究人员努力寻找提高光纤功率的方法, 其中一种方法就是通过设计光纤结构来抑制非线性效应, 如 W 型光纤<sup>[1-2]</sup>, 然而, 这些光纤的设计只是针对它们各自的非线性效应。第 2 种方法就是通过增大纤芯直径来增加光纤的模场面积, 因

为各种非线性效应都与光强有关, 增加模场面积可以降低光纤中的强度从而减小非线性效应。

然而, 随着纤芯直径的增大, 要想保持单模运转, 则需减小光纤的数值孔径, 而数值孔径的减小则会导致弯曲损耗的增加。FERMANN 提出了一种解决的方法<sup>[3]</sup>, 就是在某条件下, 维持适当的弯曲损耗多模光纤可能会支持单模运转。基于这种方法制作的商用光纤的直径已经达到  $35\mu\text{m}$ , 有效面积为  $550\mu\text{m}^2$ 。但是基于这种方法进一步扩大纤芯直径将会遇到很多问题, 如引起多模运转等等。另一种保持单模运转的方法就是共振模式耦合使高阶模耦合掉<sup>[4-5]</sup>, 这种机制运转的带宽比较窄, 且由于所有模式的模式折射率相差不大, 造成各模式的损耗差别也不大, 这就使得在维持基模损耗比较少时, 增大高阶模的损耗比较困难。光子晶体光纤 (photon crystal fiber, PCF) 是实现高功率的一种新颖光纤<sup>[6-7]</sup>, 通过改变包层空气孔大小和排列来控制模式, 保持单模运转, 但是由于弯曲损耗的限制, 目前报道的 PCF 的面积最大为  $1400\mu\text{m}^2$ <sup>[8]</sup>。

2003 年, 美国斯坦福大学的 SIEGMAN 教授提出了一种新的概念——增益导引光纤<sup>[9]</sup>, 与传统阶跃光纤不同的是这种光纤纤芯的折射率比包层的折射率

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60637010); 国家九七三重点基础研究发展计划资助项目 (2007CB310403)

作者简介: 王伟能 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事大模场光纤特性的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: jqyao@tju.edu.cn

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2008-12-22

小,传统的全内反射理论在这种光纤中不再适用。理论分析表明,采用增益导引效应,可实现芯径百微米量级的单模大模场光纤<sup>[10]</sup>。2008年报道的二极管抽运芯径200 $\mu\text{m}$ 的增益导引折射率反导引光纤激光器,光束质量比较高<sup>[11]</sup>。作者基于增益导引理论,对基于增益导引折射率反导引光纤的激光运转特性进行了数值模拟,详细分析了在不同增益系数和负折射率差值情况下的模场分布及其对模场的影响,为设计大模场光纤提供了有力的理论依据。

## 1 理论基础

在传统折射率导引光纤中,归一化频率 $\nu$ 决定光纤中的模式特性, $\nu$ 的表达式为:

$$\nu^2 = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 [(n + \Delta n)^2 - n^2] \approx \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 (2n\Delta n) \quad (1)$$

式中, $a$ 是纤芯半径, $n$ 是包层的折射率, $\Delta n$ 是芯层与包层的折射率差, $\lambda$ 是真空中波长。在纤芯引入的增益因子 $\Delta g$ ,即纤芯折射率由 $(n + \Delta n)$ 等效为 $(n + \Delta \tilde{n})$ ,其中 $\Delta \tilde{n} = \Delta n + i(\lambda/2\pi)\Delta g$ ,则 $\nu$ 参量的表达式变为<sup>[10]</sup>:

$$\tilde{\nu}^2 = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 [(n + \Delta \tilde{n})^2 - n^2] \approx \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 2n \left(\Delta n + i \frac{\lambda}{2\pi} \Delta g\right) = \Delta N + iG \quad (2)$$

式中,等效折射率差 $\Delta N$ 和增益系数 $G$ 分别表示 $\tilde{\nu}^2$ 的实部和虚部。从(2)式可以看出,引入增益后, $\tilde{\nu}$ 不仅与纤芯半径 $a$ 、波长 $\lambda$ 、包层折射率 $n$ 及折射率差 $\Delta n$ 有关,还与增益因子 $\Delta g$ 有关。

因为增益导引光纤纤芯的折射率比包层的折射率小,所以模式在纤芯中传输经过多次反射后,不能很好地约束在纤芯中,而会向包层中泄漏。每次反射都有能量损耗,如果模式的增益足够大,反射造成的损失将会得到弥补,模式将会很好地被限制在纤芯中。 $\text{LP}_{01}$ 模和 $\text{LP}_{11}$ 模的增益阈值为<sup>[12]</sup>:

$$G_{\text{th},01} = \sqrt{\frac{4j_{01}^4}{-\Delta N}} = \sqrt{\frac{133.8}{-\Delta N}} \quad (3)$$

$$G_{\text{th},11} = \sqrt{\frac{4j_{11}^4}{-\Delta N}} = \sqrt{\frac{862.2}{-\Delta N}} \quad (4)$$

式中, $j_{01}$ 表示零阶贝塞尔函数的第1个零根, $j_{11}$ 表示1阶贝塞尔函数的第1个零根。基于增益导引折射率反导引光纤的光纤激光器,只有增益弥补传输损耗才能形成激光振荡,为了保证单模输出,即只有 $\text{LP}_{01}$ 模输出,其它高阶模都不能振荡,谐振腔的增益与损耗要求满足以下不等式:

$$G_{\text{th},01} + G_{\text{th},\text{osc}} < G_{\text{th},11} \quad (5)$$

考虑内部为增益导引光纤的F-P腔,部分反射的两个

腔面的反射系数为 $R_1$ 和 $R_2$ ,则产生激光的阈值增益为:

$$G_{\text{th},\text{osc}} \triangleq \alpha + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad (6)$$

式中, $L$ 为增益介质长度, $\alpha$ 为谐振腔内部的损耗系数。

## 2 数值结果

从上面表达式可以看出,腔镜的反射率必须介于一定的范围之内,如果反射率太小,则谐振腔的增益大于 $\text{LP}_{11}$ 模的增益因子阈值,引起多模运转;如果反射率太大,则不能使得激光起振。图1中给出了腔镜反射率 $R$ ( $R = R_1 R_2$ )与纤芯半径 $a$ 的关系。其中波长为

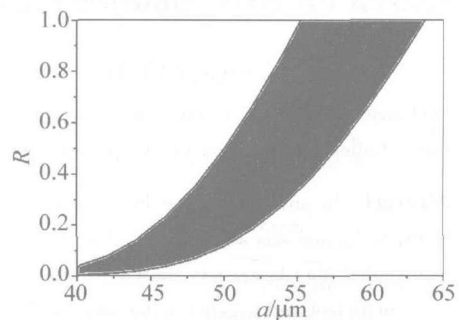


Fig. 1 Range of mirror reflectivity as a function of core radius

1.064 $\mu\text{m}$ ,包层折射率为1.57,纤芯与包层的折射率差为-0.005,谐振腔的单程损耗系数为 $5 \times 10^{-2}/\text{cm}$ ,增益介质长度为10cm。图1中的阴影部分即为光纤激光器单模运转时腔镜反射率的取值范围。例如当 $a = 50\mu\text{m}$ 时,端面反射率 $R$ 的取值范围为0.116~0.498。随着纤芯半径的增加, $R$ 的取值增加,取值范围增大。当 $a > 64\mu\text{m}$ 后, $R$ 的最小值取值大于1,这是因为随着纤芯半径的增加,增益因子阈值减小的缘故。因此,当纤芯半径 $a$ 进一步增大时,可通过降低掺杂浓度改变折射率差,保证 $R$ 最小值取值小于1。

图2中给出了纤芯半径50 $\mu\text{m}$ 不变时,反射率与增益介质长度的关系。图中的阴影部分为光纤激光器

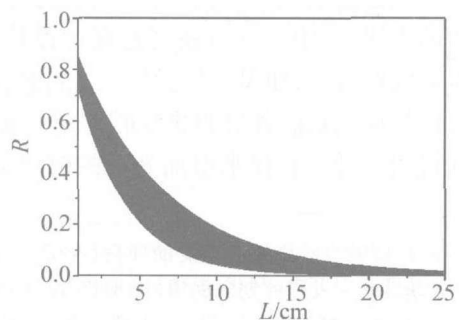


Fig. 2 Range of mirror reflectivity as a function of gain medium length

单模运转时端面反射率 $R$ 的取值范围。由图2可发现,随着增益介质长度的增加, $R$ 减小,当增益介质长度大于25cm时, $R$ 的最大值取值趋近于0,端面反射

率  $R$  的取值范围也将趋近于 0。另外,从图中可以看出,  $R$  的取值范围在 8cm 左右比较宽,在两端比较窄。对于增益导引折射率反导引光纤激光器,存在一个最佳的增益介质长度。

另外还分析了增益导引折射率反导引光纤  $LP_{01}$  模的电场分布与等效折射率差  $\Delta N$  和增益系数  $G$  的关系。从图 3 中可以看出,增益系数  $G$  的大小影响光纤中

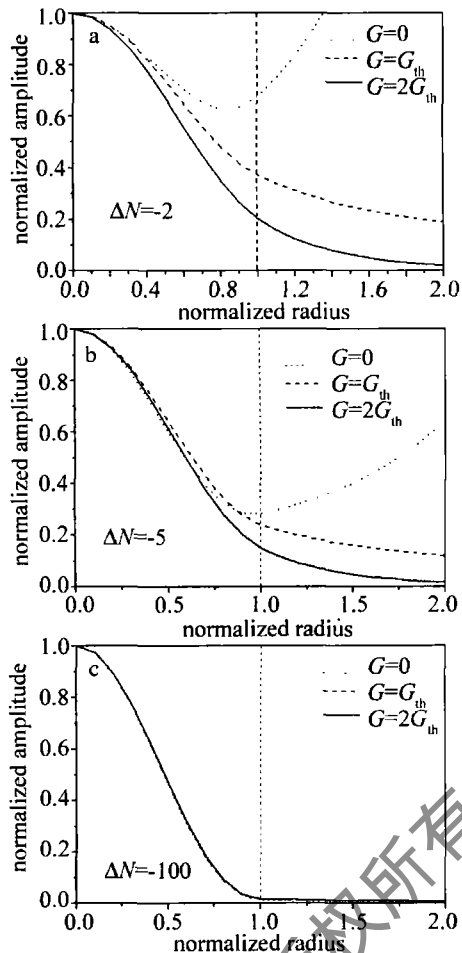


Fig. 3 The distributions of  $LP_{01}$  mode versus index parameter  $\Delta N$  and gain parameter  $G$

模场的分布,当  $G < G_{th}$  时,模场向包层中泄漏,能量损耗较大,随着  $G$  增加,模式向包层的泄漏减弱,向纤芯集中。且折射率差越小,  $G$  的变化对模场分布的影响越小,模场几乎都集中于纤芯中,这是因为折射率差越小,增益阈值越低。可见,对于  $\Delta N$  很小的折射率反导引光纤,引入微扰的增益就能很好地将模式限制在光纤中传输。

### 3 结论

基于增益导引折射率反导引光纤的光纤激光器,激光器腔镜的反射率必须介于一定的范围之内,如果反射率太小,则谐振腔的增益大于 2 阶模的增益阈值,引起多模运转;如果反射率太大,则不能使得激光起振。还分析了基模电场分布与折射率差和增益系数的关系,发现当增益系数比较大时,模场主要集中在纤芯中。且纤芯与包层的折射率差越小,增益系数的变化对模场分布的影响越小,模场几乎都集中于纤芯中,可见对于折射率差很小的折射率反导引光纤,引入微扰的增益就能很好地将模式限制在光纤中传输。

#### 参考文献

- [1] KIM J, DUPRIEZ P, CODEMARD C, *et al.* Suppression of stimulated Raman scattering in a high power Yb-doped fiber amplifier using a W-type core with fundamental mode cut-off [J]. *Optics Express*, 2006, 14(12):5103-5113.
- [2] KOPYAKOV A, KUMAR S, CHOWDHURY D, *et al.* Design concept for optical fibers with enhanced SBS threshold [J]. *Optics Express*, 2005, 13(14):5338-5346.
- [3] FERMAN M E. Single-mode excitation of multimode fibers with ultrashort pulses [J]. *Opt Lett*, 1998, 23(1):52-54.
- [4] FINI J. Design of solid and microstructure fibers for suppression of higher-order modes [J]. *Optics Express*, 2005, 13(9):3477-3490.
- [5] LAVOUTE L, ROY P, DESFARGES-BERTHELENOT A, *et al.* Design of microstructured single-mode fiber combining large mode area and high rare earth ion concentration [J]. *Optics Express*, 2006, 14(7):2994-2999.
- [6] DENG Y L, YAO J Q, RUAN Sh Ch, *et al.* High power photonic crystal fiber laser and key issues [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(6):596-598 (in Chinese).
- [7] PAN Y Zh, ZHANG J, HU G J, *et al.* Photonic crystal fiber and laser [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1):48-51 (in Chinese).
- [8] TSUCHIDA Y, SAITOH K, KOSHIBA M. Design of single-moded holey fibers with large-mode-area and low bending losses: the significance of the ring-core region [J]. *Optics Express*, 2007, 15(14):1794-1803.
- [9] SIEGMAN A E. Propagating modes in gain-guided optical fibers [J]. *J O S A*, 2003, A20(8):1617-1628.
- [10] CHEN Y, SUDESH V, MCCOMB T, *et al.* Lasing in gain-guided index antiguided fiber [J]. *J O S A*, 2007, B24(8):1683-1688.
- [11] SUDESH V, MCCOMB T, CHEN Y, *et al.* Diode-pumped 200  $\mu\text{m}$  diameter core, gain-guided, index-antiguided single mode fiber laser [J]. *Appl Phys*, 2008, B90(3/4):369-372.
- [12] CHEN Y, MCCOMB T, SUDESH V, *et al.* Very large-core, single-mode, gain-guided, index-antiguided fiber lasers [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(17):2505-2507.