

文章编号: 1001-3806(2007)02-0150-03

## 多点抽运的双包层光纤激光器数值分析研究

欧攀<sup>1,2</sup>, 张春熹<sup>1</sup>, 闫平<sup>2</sup>, 巩马理<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083; 2. 清华大学 精密仪器系 光子与电子技术研究中心, 北京 100084)

**摘要:** 为了对多点抽运的高功率双包层光纤激光器进行深入的理论分析, 从掺 Yb 双包层光纤激光器的速率方程和边界条件出发, 对多点抽运的双包层光纤激光器的数值分析方法进行了研究。通过坐标比例变换和抽运光与激光的连续性边界条件变换, 将多点抽运的高功率双包层光纤激光器的数值分析模型转化为两点边值问题, 然后利用两点边值问题的数值分析方法有效地进行求解, 得到了抽运光和激光沿双包层光纤的分布。通过对多点抽运的双包层光纤激光器进行数值分析, 不仅得到了激光器的输出功率, 还能够得到抽运光损耗以及激光损耗数值大小等数据, 有助于多点抽运的双包层光纤激光器的优化分析和设计。结果表明, 该数值分析方法对多点抽运的双包层光纤激光器的深入研究非常有意义。

**关键词:** 激光器; 光纤激光器; 双包层光纤; 数值分析; 多点抽运

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

### Numerical analysis for multi-position-pumped double-clad fiber lasers

OU Pan<sup>1,2</sup>, ZHANG Chun-xi<sup>1</sup>, YAN Ping<sup>2</sup>, GONG Ma-li<sup>2</sup>

(1. School of Instrument and Photoelectric Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 2. Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to theoretically study high-power multi-position-pumped double-clad fiber lasers intensively, the numerical analysis methods for this kind of fiber lasers were studied, based on the rate equations and boundary conditions of Yb-doped double-clad fiber lasers. By coordinate scale transform and continuum boundary transform of pumping powers and laser powers, the multi-position-pumped double-clad fiber lasers were transformed into two-boundary value problems and could be numerically analyzed effectively. And the power distributions of pumping lights and lasers along the double-clad fiber laser could be obtained. With numerical analysis, output powers, lost pumping powers and lost laser powers of the multi-position-pumped double-clad fiber lasers could be obtained also, which is very helpful for the optimal analysis and design of this kind of fiber lasers. The research shows that the numerical analysis methods are valuable for advanced study of multi-position-pumped double-clad fiber lasers.

**Key words:** lasers; fiber lasers; double-clad fiber; numerical analysis; multi-position-pumped

## 引 言

侧面抽运技术可以突破双包层光纤只有两个端面的限制, 能够在光纤的侧面多处注入抽运光, 对双包层光纤激光器进行功率扩展<sup>[1,2]</sup>, 从而形成多点抽运的高功率双包层光纤激光器<sup>[3,4]</sup>。虽然侧面抽运技术能够将抽运光注入双包层光纤内包层, 但是也会使内包层中传输的抽运光经过侧面耦合器时产生泄漏<sup>[5]</sup>。一些侧面耦合技术采用多级抽运需要对双包层光纤进行熔接从而导致纤芯中的激光产生损耗<sup>[6]</sup>。这些都

会引起双包层光纤中的抽运光或激光分布的不连续, 需要加以深入分析。笔者从掺 Yb 双包层光纤激光器的速率方程和边界条件出发, 对多点抽运的高功率双包层光纤激光器的数值求解方法进行了研究。首先从较为简单的 3 点抽运的双包层光纤激光器出发, 通过比例变换和边界条件变换将其转化为两点边值问题, 然后将该方法推广到多点抽运的双包层光纤激光器, 最后将其数值求解转化为两点边值问题进行数值求解, 得到了抽运光和激光沿双包层光纤的分布, 对多点抽运的双包层光纤激光器的深入研究非常有意义。

### 1 3 点抽运的双包层光纤激光器分析模型

高功率掺 Yb 双包层光纤激光器采用 LD 作为抽运源, 因此, 只考虑抽运光和激光输出线宽均很窄的情

作者简介: 欧攀 (1977-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光纤激光器和光纤传感器等方面的研究工作。

E-mail: oupan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2006-03-13; 收到修改稿日期: 2006-04-23

况,稳态下光纤激光器的速率方程组<sup>[7]</sup>即为表示沿双包层光纤的正、反向传输的抽运光和激光的耦合方程组,可以记为参考文献[8]中的(2)式~(5)式。下面重点考虑 3 点抽运的双包层光纤激光器的耦合速率方程组及其边界条件。

如图 1 所示,3 点抽运的光纤激光器的 3 个抽运点分别用 1,2 和 3 来标识,它们分别位于双包层光纤

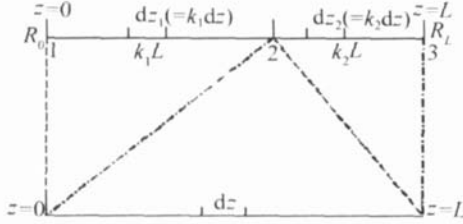


Fig 1 Scheme for numerical analysis of three-position-pumped double-clad fiber laser

的  $z=0$ ,  $z=k_1L$  和  $z=L$  处,  $L$  为双包层光纤的长度。无论是在抽运点 1 和 2 之间还是抽运点 2 和 3 之间的光纤段,速率方程组式都分别成立,但是由于在双包层光纤中段加入了一个抽运点,因此,会导致抽运光和激光的不连续分布,从而增加新的边界条件形成 3 点边值问题。通过比例变换和相应的边界条件变换可将 3 点边值问题转化为两点边值问题。首先以整个双包层光纤段为基,将抽运点 1 和 2 之间的求解区间通过线性坐标变换  $z=z_1/k_1$  由  $[0, k_1L]$  换成  $[0, L]$ ,然后把抽运点 2 和 3 之间光纤段通过线性坐标变换  $z=z_2/k_2$ ,将其求解区间由  $[0, k_2L]$  也变为  $[0, L]$ ,这里  $k_1$  和  $k_2$  分别是两段光纤与整个双包层光纤长度比,分别有  $dz_1 = k_1 dz$  和  $dz_2 = k_2 dz$ ,这样原来的 3 点边值问题就被转化为  $z=0$  和  $z=L$  的两点边值问题。此时相应的耦合速率方程组数目和边界条件的数目为原来的两倍。变换之后的扩展耦合速率方程组为:

$$\frac{dP_{p1}^+}{dz} = k_1 f_p^+ (P_{p1}^+, P_{p1}^-, P_{s1}^+, P_{s1}^-) \quad (1)$$

$$\frac{dP_{p1}^-}{dz} = k_1 f_p^- (P_{p1}^+, P_{p1}^-, P_{s1}^+, P_{s1}^-) \quad (2)$$

$$\frac{dP_{s1}^+}{dz} = k_1 f_s^+ (P_{p1}^+, P_{p1}^-, P_{s1}^+, P_{s1}^-) \quad (3)$$

$$\frac{dP_{s1}^-}{dz} = k_1 f_s^- (P_{p1}^+, P_{p1}^-, P_{s1}^+, P_{s1}^-) \quad (4)$$

$$\frac{dP_{p2}^+}{dz} = k_2 f_p^+ (P_{p2}^+, P_{p2}^-, P_{s2}^+, P_{s2}^-) \quad (5)$$

$$\frac{dP_{p2}^-}{dz} = k_2 f_p^- (P_{p2}^+, P_{p2}^-, P_{s2}^+, P_{s2}^-) \quad (6)$$

$$\frac{dP_{s2}^+}{dz} = k_2 f_s^+ (P_{p2}^+, P_{p2}^-, P_{s2}^+, P_{s2}^-) \quad (7)$$

$$\frac{dP_{s2}^-}{dz} = k_2 f_s^- (P_{p2}^+, P_{p2}^-, P_{s2}^+, P_{s2}^-) \quad (8)$$

式中,  $P_p^+$  和  $P_p^-$  分别是沿双包层光纤分布的正、反向抽运光功率,  $P_s^+$  和  $P_s^-$  分别是沿双包层光纤分布的正、反向传输的激光功率,它们都是光纤纵向位置  $z$  的函数,  $f$  表示它们的耦合方程组,其中下标“p”和“s”分别表示抽运光和激光,上标“+”和“-”分别表示正向和反向传输。下标“1”和“2”分别表示第 2 抽运点前后两段光纤。这时两个边界分别为  $z=0$  和  $z=L$ ,由于第 1 段光纤的后端面和第 2 段光纤的前端面前后相接,考虑到正、反向抽运光在经过第 2 抽运点时的泄漏以及正、反向激光经过第 2 抽运点时的损耗,新的边界条件如下:

$$P_{p1}^+ (0) = P_1^+ \quad (9)$$

$$P_{p1}^- (L) = (1 - \mu_2^-) P_{p2}^- (0) \quad (10)$$

$$P_{s1}^+ (0) = R_0 P_{s1}^- (0) \quad (11)$$

$$P_{s1}^- (L) = (1 - \eta_2^-) P_{s2}^- (0) \quad (12)$$

$$P_{p2}^+ (0) = (1 - \mu_2^+) P_{p1}^+ (L) + P_2^+ \quad (13)$$

$$P_{p2}^- (L) = P_3^- \quad (14)$$

$$P_{s2}^+ (0) = (1 - \eta_2^+) P_{s1}^+ (L) \quad (15)$$

$$P_{s2}^- (L) = R_L P_{s2}^+ (L) \quad (16)$$

式中,  $P_1^+$ ,  $P_2^+$  和  $P_3^-$  分别是双包层光纤 3 个抽运点注入的抽运光功率,  $\mu_2^+$  和  $\mu_2^-$  分别是正、反向抽运光在经过第 2 抽运点时的泄漏比率,  $\eta_2^+$  和  $\eta_2^-$  分别是正、反向激光在经过第 2 抽运点时的损耗比率,下标表示注入抽运点的序号。  $R_0$  和  $R_L$  分别为激光在双包层光纤的前端面和后端面的反射率,光纤激光器的输出功率为  $P_{out} = (1 - R_L) P_{s2}^+ (L)$ 。上面的边界条件中第 3 个抽运点是采用前向抽运,当第 3 个抽运点采用后向抽运时, (10)式和 (13)式要分别改写为:

$$P_{p1}^- (L) = (1 - \mu_2^-) P_{p2}^- (0) + P_2^- \quad (17)$$

$$P_{p2}^+ (0) = (1 - \mu_2^+) P_{p1}^+ (L) \quad (18)$$

## 2 多点抽运的双包层光纤激光器分析模型

图 2 是一种多点抽运的光纤激光器的典型结构,采用光纤角度磨抛侧面耦合技术从双包层光纤侧面注

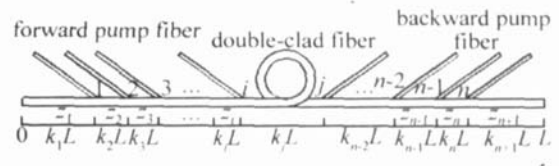


Fig 2 The structure of multi-position-pumped double-clad fiber laser

入抽运光,一共有  $n$  个抽运点。与前面分析的 3 点抽运的双包层光纤激光器类似,在多点抽运的双包层光纤激光器中,位于第  $m-1$  抽运点和第  $m$  抽运点之间的第  $m$  段双包层光纤中的正、反向抽运光以及正、反向激光满足耦合方程组:

$$\frac{dP_{pm}^+}{dz} = k_m f_p^+ (P_{pm}^+, P_{pm}^-, P_{sn}^+, P_{sn}^-) \quad (19)$$

$$\frac{dP_{pm}^-}{dz} = k_m f_p^- (P_{pm}^+, P_{pm}^-, P_{sn}^+, P_{sn}^-) \quad (20)$$

$$\frac{dP_{sn}^+}{dz} = k_m f_s^+ (P_{pm}^+, P_{pm}^-, P_{sn}^+, P_{sn}^-) \quad (21)$$

$$\frac{dP_{sn}^-}{dz} = k_m f_s^- (P_{pm}^+, P_{pm}^-, P_{sn}^+, P_{sn}^-) \quad (22)$$

式中,  $k_m$  是该段光纤在整个双包层光纤中的长度比率, 该段的边界条件为:

$$P_{pm}^+(0) = (1 - \mu_{m-1}^+) P_{p(m-1)}^+(L) + P_{m-1}^+ \quad (23)$$

$$P_{pm}^-(L) = (1 - \mu_m^-) P_{p(m+1)}^-(0) + P_m^- \quad (24)$$

$$P_{sn}^+(0) = (1 - \eta_{m-1}^+) P_{s(m-1)}^+(L) \quad (25)$$

$$P_{sn}^-(L) = (1 - \eta_m^-) P_{s(m+1)}^-(0) \quad (26)$$

式中,  $P_{m-1}^+$  和  $P_m^-$  分别是该段双包层光纤前、后端点注入的正、反向抽运光功率,  $\mu_{m-1}^+$  和  $\mu_m^-$  分别是正、反向抽运光经过前、后抽运点的泄漏比率,  $\eta_{m-1}^+$  和  $\eta_m^-$  分别是正、反向激光在经过前、后抽运点时的损耗比率, 下标中的  $m$  表示相应的抽运点序号 (或者光纤段序号)。

多点抽运的双包层光纤激光器靠近两个端点的两光纤段 (第 1 段和第  $n+1$  段) 的边界条件稍有不同, 可以参考 (9) 式 ~ (18) 式。图 2 所示的多点抽运的双包层光纤激光器有  $n$  个抽运点, 因此, 可以分为  $n+1$  段光纤段, 可以得到  $4(n+1)$  个扩展耦合方程和  $4(n+1)$  个扩展边界条件。

### 3 多点抽运的双包层光纤激光器数值分析

根据前面的分析模型, 将多点抽运的双包层光纤转化为两点边值问题后就能够对其进行数值分析。两点边值问题的数值分析方法主要有打靶法和松弛法等<sup>[9]</sup>, 也可利用 MATLAB 提供的处理两点边值问题的函数 bvp4c 来进行数值求解<sup>[10]</sup>。通过数值分析得到每段光纤的抽运光和激光沿双包层光纤的分布之后, 再通过坐标反变换 (将相应的纵向坐标值乘以该段长度比率  $k_m$ ) 对应到该段在整段双包层光纤的位置, 即可得到整个双包层光纤激光器的抽运光和激光分布的数值解。

这里对一个典型的 6 点抽运的双包层光纤激光器进行了数值分析。其基本示意图 2, 前 3 个抽运点采取前向抽运, 后 3 个抽运点采取后向抽运, 每个抽运点注入的抽运功率都为 100W, 第 1 个抽运点和最后的抽运点距离双包层的两端面分别为 1m, 其余各抽运点沿双包层光纤均匀分布。正反向传输的抽运光在经过任一抽运点时泄漏比均相等, 为  $\mu = 0.123$ , 正反向激光经过抽运点时均没有损耗  $\eta = 0$ 。数值分析中用到的其它数据见参考文献 [8] 中的表 1。

图 3 是双包层光纤长度取 38m 时得到的正反向抽运功率和正反向激光功率沿着双包层光纤的分布,

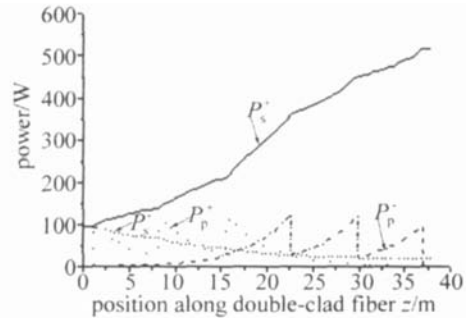


Fig 3 Power distributions along 38m double-clad fiber laser

此时双包层光纤激光器的输出功率为 501.5W。为了对比, 还考虑了双包层光纤长度减为一半, 即 19m 的情况。图 4 即为双包层光纤长度取 19m 时, 得到的正

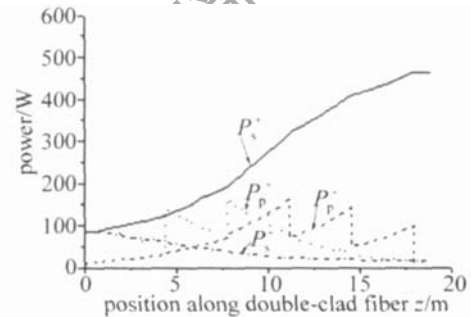


Fig 4 Power distributions along 19m double-clad fiber laser

反向抽运功率和正反向激光功率沿着双包层光纤的分布, 此时双包层光纤激光器的输出功率为 450.5W。两种情况下根据参考文献 [8] 中的 (15) 式定义的总体抽运损耗功率的数值分析结果分别为 22.2W 和 83.8W。考虑到抽运光转化为激光的量子效率, 可以看出, 不同长度的多点抽运双包层光纤激光器的激光输出功率差异主要是因为总体抽运损耗功率不同。比较图 3 和图 4 可以看出, 抽运点之间的距离减小时, 抽运光在双包层光纤内包层中传输的过程中经过每一抽运点的泄漏功率都较大, 而且在双包层光纤两端未被充分吸收的残余功率也较大。因此, 还需要对多点抽运的双包层光纤激光器进行优化设计, 通过选择抽运点的最佳位置, 来使总体抽运损耗功率最小, 以提高双包层光纤激光器的激光输出功率。

### 4 结论

从掺 Yb 双包层光纤激光器的速率方程和边界条件出发, 对多点抽运的高功率双包层光纤激光器的数值求解方法进行了研究。通过坐标比例变换和抽运光与激光的连续性边界条件变换将多点抽运的高功率双包层光纤激光器的数值分析模型转化为两点边值问题, 然后利用两点边值问题的数值分析方法有效地进

(下转第 178 页)

率。如果强度太大或太小,即使曝光量相同,衍射效率也会有所下降。

另外,根据耦合波理论,对于非倾斜光栅(即参物光对称入射记录),材料所具有的最大衍射效率 $\eta_{\max}$ 和最大折射率调制度 $\Delta n$ 的关系为: $\Delta n = \arcsin(\eta_{\max})^{1/2} \lambda \cos\theta / \pi d$ , $d$ 是材料的厚度, $\lambda$ 是记录波长, $\theta$ 是入射角,计算得 $\Delta n = 0.0027$ ,说明该材料的折射率调制度还是比较大的。

总之,光致聚合物作为全息记录材料,其衍射效率与光栅空间频率、曝光时间、曝光强度等都有着密切的关系,衍射效率受光栅的空间频率和曝光强度的制约,这些结论在全息显示、高密度全息存储,尤其是多角度复用存储方面有很重要的参考意义。在实验中还发现,聚合物光栅的衍射效率和聚合物薄膜的质量关系密切。所以,通过改善聚合物原料的纯度、聚合物的颗粒细度、均匀度以及膜层表面的平整度等,可以进一步提高光栅的衍射效率。

#### 参 考 文 献

- [1] YAO H W, CHEN Z Y, HOU L S *et al* Introduction of holographic data storage-based organic photopolymers [J]. *Progress in Physics*, 2001, 21 (4): 459~468 (in Chinese).
- [2] NEIPP C, GALLEGRO S, ORTUNO M. Characterization of a PVA/acrylamide photopolymer influence of a cross-linking monomer in the final characteristics of the hologram [J]. *Opt Commun*, 2003, 224: 27~34.
- [3] YAO H W, HUANG M J, CHEN Zh Y *et al* Optimization of a monomers-based photopolymer used for holographic recording [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22 (5): 632~635 (in Chinese).
- [4] YAO H W, HUANG M J, CHEN Zh Y *et al* Optimization of acrylamide-based photopolymer and its holographic character investigation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, A29 (11): 972~974 (in Chinese).
- [5] WANG D Y, ZHOU Ch M, TAO Sh Q *et al* Holographic storage characteristics in a new photopolymer films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 31 (S2): 33~39 (in Chinese).
- [6] YAO H W, HUANG M J, CHEN Zh Y. Acrylamide-based photopolymer used for holographic recording [J]. *Proc SPIE*, 2003, 5060: 199~202.
- [7] HUANG M J, YAO H W, CHEN Zh Y *et al* The effect of the thickness of photopolymer on high-density holographic recording parameters [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31 (2): 119~122 (in Chinese).
- [8] GALLEGRO S, ORTUNO M, NEIPP C *et al* Temporal evolution of the angular response of a holographic diffraction grating in PVA/acrylamide photopolymer [J]. *Optics Express*, 2003, 11 (2): 182~190.
- [9] KM N, KM E S, CHO I Y S *et al* Dynamic characteristics using dark reaction in photopolymer [J]. *Proc SPIE*, 1999, 3638: 2~8.
- [10] BLA YA S, CARRETERO L, MALLAVIA R *et al* Holography as a technique for the study of photopolymerization kinetics in dry polymeric films with a nonlinear response [J]. *Appl Opt*, 1999, 38 (6): 955~962.
- [11] YU M W, ZHANG Ch L, YANG Y Y. Holographic recording material and its application [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997. 125~182 (in Chinese).
- [12] KOSTUK R K. Dynamic hologram recording characteristics in Dupont photopolymers [J]. *Appl Opt*, 1999, 38 (8): 1357~1363.

(上接第 152 页)

行求解,就能够得到抽运光和激光沿双包层光纤的分布。本文中不仅给出了多点抽运的高功率双包层光纤激光器的扩展耦合方程和扩展边界条件,而且对 6 点抽运的双包层光纤激光器进行了数值分析。通过数值分析可以看出,总体抽运损耗功率直接影响到双包层光纤激光器的输出功率。对多点抽运的双包层光纤激光器进行数值分析,不仅得到了激光器的输出功率,还能够得到抽运光损耗以及激光损耗数值大小等数据。该数值分析方法对多点抽运的双包层光纤激光器的深入研究非常有意义。

#### 参 考 文 献

- [1] GOLDBERG L, COLE B, SNITZER E. V-groove side-pumped 1.5  $\mu\text{m}$  fibre amplifier [J]. *Electron Lett*, 1997, 33 (25): 2127~2129.
- [2] KOPLOW J P, MOORE S W, KLNER D A V. A new method for side pumping of double-clad fiber sources [J]. *IEEE J Q E*, 2003, 39 (4): 529~540.
- [3] WEI W L, OU P, YAN P *et al* Side-pumping coupler technology for double-clad fiber [J]. *Laser Technology*, 2004, 28 (4): 116~121 (in Chinese).
- [4] OU P, YAN P, GONG M L *et al* Multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2 (5): 285~287.
- [5] OU P, YAN P, GONG M L *et al* Studies of pump light leakage out of couplers for multi-coupler side-pumped Yb-doped double-clad fiber lasers [J]. *Opt Commun*, 2004, 239: 421~428.
- [6] YAN P, GONG M L, LI Ch *et al* Distributed pumping multifiber series fiber laser [J]. *Optics Express*, 2005, 13 (7): 2699~2706.
- [7] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE J Q E*, 1998, 34 (9): 1570~1577.
- [8] OU P, YAN P, GONG M L *et al* Optimum design on three-position-pumped high-power double-clad fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2007, 31 (1): 57~60 (in Chinese).
- [9] KNCA D D, CHENEY W. Numerical analysis: mathematics of scientific computing [M]. 3rd ed, Beijing: China Machine Press, 2003. 419~460 (in Chinese).
- [10] SHAMPNE L F, GLADWELL I, THOMPSON S. Solving ODEs with MATLAB [M]. New York: Cambridge University Press, 2003. 133~211.