

文章编号: 1001-3806(2007)05-0526-04

多点抽运光纤激光器速率方程组的近似解析解

刘冀鹏¹, 徐庆超¹, 陈建国^{1*}, 周鼎富², 杨泽后²

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064; 2. 西南技术物理所, 成都 610041)

摘要: 为了方便地对多点抽运光纤激光器的特性进行分析, 采用保留上能级粒子再发射项主体部分的方法以提高精确度, 解析求解了多点抽运掺镱光纤激光器的稳态二能级速率方程组, 得到了光纤激光器的输出功率的近似解析解。并将输出功率的解析解与数值解进行了对比。结果表明, 解析解与数值解差别小于 5%。讨论了抽运光的利用效率与抽运点位置的关系, 得到抽运源应该尽量靠近光纤端面的结论。同时, 对比了单点抽运和多点抽运方案中抽运功率在光纤中的分布, 可以看到, 多点抽运时, 抽运功率的分布较为均匀, 能够缓解因包层对抽运光吸收引起的光纤局部过高的温升所造成的一系列问题, 是实现大功率激光输出的良好选择。

关键词: 激光器; 解析解; 多点抽运; 稳态速率方程组; 双包层光纤; 数值解

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

Approximate analytical solutions to rate equations of multi-position-pumped fiber lasers

LIU Ji-peng¹, XU Qing-chao¹, CHEN Jian-guo¹, ZHOU Ding-fu², YANG Ze-hou²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to analyze the characteristics of multi-position pumped fiber laser expediently, the predominant part of the re-emission was adopted to improve the solutions precise, and the rate equations describing the Yb-doped multi-position pumped fiber lasers were solved analytically. The solutions of the output power of the fiber lasers were got approximately. Comparing the analytical solutions and the numerical solutions, the result shows the difference between them is small than 5%. Based on the relationship between the position of the pump point and the utilization efficiency of pump light, the conclusion was drawn that pump sources should be set near the fiber ends. Simulating the distribution of pump light along the fiber of the two schemes (one-position-pump and multi-position-pump), the results show that for the multi-position-pump scheme, the distribution of pump power is relatively uniform along the fiber compared to that of the one-position-pump scheme. In other words, extra local temperature rise arising from the absorption of the external cold can be reduced in the multi-position-pump scheme, rendering it a better choice for the high power fiber lasers.

Key words: lasers; analytical solutions; multi-position-pump; continuous-wave rate equations; double-clad fiber; numerical solutions

引 言

光纤激光器与其它激光器相比, 具有转换效率高、光束质量好、阈值低、结构简单、可靠性高等优点, 因而在通讯、工业加工、军工、医疗等方面得到较为广泛的应用^[1~5]。大功率光纤激光器更是近几年来研究的热点, 目前, 光纤激光器输出功率已达到几百瓦, 甚至上千瓦的水平^[5, 6]。

从文献报道来看, 大功率双包层光纤激光器常采

用多点抽运方式, 抽运光不但从光纤的端面注入, 而且也从光纤的侧面耦合到光纤中^[6]。其优点包括: (1) 避免端面抽运时, 因端面抽运功率过高而造成端口附近包层过度吸收而引起的过度温升^[5, 7], 这种温升会降低激光器的效率, 甚至会损坏光纤; (2) 使光纤端面空留出来, 用于连接光器件等。

目前, 人们在用速率方程组研究多点抽运的光纤激光器时, 一般采用数值计算的方法求解方程。这种方法虽然较为准确, 但是比较复杂, 需要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, 不能方便地对各种因素进行直观的分析。而解析解的好处是便于对多点抽运光纤激光器进

作者简介: 刘冀鹏 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: optics_lab@163.com

收稿日期: 2006-08-31; 收到修改稿日期: 2006-09-30

行分析讨论。作者对掺 Yb 双包层光纤激光器二能级速率方程组进行求解,在保留了再发射项主体的近似情况下,以简洁的方式推导出了多点抽运的光纤激光器的输出功率的近似解析解。

1 稳态速率方程组的解析求解

本文中,用于计算的掺 Yb 双包层光纤激光器,如图 1 所示。从图中可以看到,长度为 L 的光纤上有 l

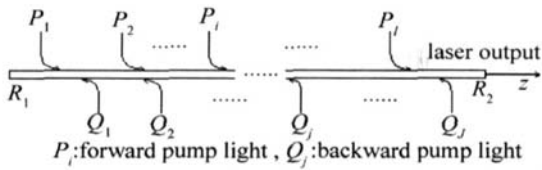


Fig 1 Double-clad multi-position pump fiber lasers

个正向传输的抽运光,有 j 个反向传输的抽运光。多点抽运二能级激光器稳态速率方程组可以写为^[4,8]:

$$\frac{dP_i}{dz} = [\Phi_i N(z) - \Psi_i N_0] P_i(z) - \alpha_i P_i(z),$$

$$(i = 1, 2, 3, \dots, i \dots, I) \quad (1)$$

$$- \frac{dQ_j}{dz} = [\Phi_j N(z) - \Psi_j N_0] Q_j(z) - \alpha_j Q_j(z),$$

$$(j = 1, 2, 3, \dots, j \dots, J) \quad (2)$$

$$\pm \frac{dS^\pm}{dz} = [\Phi_s N(z) - \Psi_s N_0] S^\pm(z) - \alpha_s S^\pm(z) \quad (3)$$

$$N(z) / \tau = \sum_i [\Psi_i N_0 - \Phi_i N(z)] P_i / hA v_i + \sum_j [\Psi_j N_0 - \Phi_j N(z)] Q_j / hA v_j + [\Psi_s N_0 - \Phi_s N(z)] (S^+ + S^-) / hA v_s, \quad (4)$$

式中, P_i, Q_j 分别表示侧面正向和反向抽运光功率,抽运点(即抽运光注入光纤之处)的位置是 z_i 和 z_j , 而端面抽运可以看作是一种特殊情况,即 $z_i = 0$ 或 $z_j = L$, S 代表激光的功率,上标“+”、“-”分别表示光沿 $+z$ 和 $-z$ 方向传输, N_0 表示掺杂浓度, $N(z)$ 为激光上能级粒子数密度, τ 为上能级粒子寿命, h 为普朗克常量, v_s, v_i 和 v_j 分别为激光、第 i 个和第 j 个抽运光的频率, A 为纤芯面积, $\Phi_k = \Gamma_k (\sigma_{ak} + \sigma_{ek}), \Psi_k = \Gamma_k \sigma_{ak} (k = i, j, s)$, 而 Γ 为光束与纤芯的交迭因子, σ_a 和 σ_e 分别表示介质的吸收截面和发射截面。

$z=0$ 和 $z=L$ 处的端面反射镜对激光的反射系数分别是 r_1 和 r_2 , 可以得到如下的边界条件:

$$S^+(0) = S^-(0) r_1, S^-(L) = S^+(L) r_2 \quad (5)$$

$$P_i(z_i) = P_{i, in}, Q_j(z_j) = Q_{j, in} \quad (6)$$

式中, $P_{i, in}$ 和 $Q_{j, in}$ 表示各个注入点的抽运光功率。利用(3)式不难证明: $S^+(z), S^-(z)$ 是一个与 z 无关的常数, 令 $S^+(z) S^-(z) = C^2$ 。于是边界条件(5)式可以写作:

$$S^+(L) = C/r_2, S^-(L) = C/r_1,$$

$$S^+(0) = C/r_1, S^-(0) = C/r_2 \quad (7)$$

实际情况中,各点抽运光波长差别很小(且不相干), 即 $v_i \approx v_j \approx v_p$, 于是可以假设 $\Phi_i \approx \Phi_j \approx \Phi_p, \Psi_i \approx \Psi_j \approx \Psi_p, \alpha_i \approx \alpha_j \approx \alpha_p$ 。采用上述近似后, (1)式 ~ (4) 相加, 可得:

$$N(z) / \tau + \sum_i (dP_i / dz) / hA v_p - \sum_j (dQ_j / dz) / hA v_p + (dS^+ / dz - dS^- / dz) / hA v_s = - \alpha_p (\sum_i dP_i / dz + \sum_j dQ_j / dz) / hA v_p - \alpha_s (dS^+ / dz + dS^- / dz) / hA v_s \quad (8)$$

在(3)式中,两边同除以 S^+ 或者 S^- , 对 S^+ 或者 S^- 进行积分,完成积分后利用边界条件可以得到上能级的粒子数平均值:

$$\bar{N} = \frac{1}{L} \int_0^L N(z) dz \Big| / L = [- \ln(r_1 r_2) / L + \Psi_s N_0 + \alpha_s] / \Phi_s \quad (9)$$

对于典型掺 Yb 双包层光纤激光器来说, $N(z) \ll N_0$ ^[9, 10], 加之抽运光与纤芯的重叠因子又很小, 于是速率方程(1)式和(2)式中的再发射项可以忽略。然而 ZHANG 等人的研究表明: 当光纤长度较短时, 再发射项的贡献还是可观的。因此, 更为可靠的办法是保留再发射项的主体 (N 的平均值 \bar{N}), 忽略 N 对 \bar{N} 的偏差, 因为它是更高阶的小量^[10]。考虑到 α_s 相对较小可以忽略^[9, 10], 于是可以完成(1)式和(2)式的积分, 然后对(8)式两端从 0 到 L 进行积分, 结果是:

$$NL hA v_p / \tau + K C v_p / v_s - (1 - \alpha_p / \gamma_p) \times \{ \sum_i P_{i, in} [1 - \exp(-\gamma_p L + \gamma_p z_i)] + \sum_j Q_{j, in} [1 - \exp(-\gamma_p z_j)] \} = 0 \quad (10)$$

由(10)式解得 C :

$$C = (v_s / v_p K) (1 - \alpha_p / \gamma_p) \times \{ \sum_i P_{i, in} [1 - \exp(-\gamma_p L + \gamma_p z_i)] + \sum_j Q_{j, in} [1 - \exp(-\gamma_p z_j)] \} / NL hA v_s / \tau K \quad (11)$$

式中,

$$\gamma_p = \alpha_p + \Psi_p N_0 - \Phi_p N, K = (1 - r_1 r_2) (r_1 + r_2) / r_1 r_2 \quad (12)$$

考虑到激光器的输出功率 $P_{out} = S^+(L) (1 - r_2)$, 计及(7)式有:

$$P_{out} = (1 - r_2) C / r_2 \quad (13)$$

将(11)式代入到(13)式就可以得到 $z=L$ 处激光器的输出功率确切表达式。

2 分析与讨论

2.1 影响输出功率 P_{out} 因素的讨论

由(11)式 ~ (13)式可以推出 P_{out} 的表达式:

$$P_{out} = \nu_s \eta_1 (1 - \frac{\tau}{L}) \times \left\{ \sum_i P_{i in} [1 - \exp(-\gamma_p L + \gamma_p z_i)] (1 - \alpha_p / \gamma_p) / \nu_p + \sum_j Q_{j in} [1 - \exp(-\gamma_p z_j)] (1 - \alpha_p / \gamma_p) / \nu_p - hA g_{th} L / (\Phi_s \tau) \right\} / [(1 - \eta_1 \eta_2) (\eta_1 + \eta_2)] \quad (14)$$

式中, $P_i(z_i) [1 - \exp(-\gamma_p L + \gamma_p z_i)]$, $Q_j(z_j) [1 - \exp(-\gamma_p z_j)]$ 分别是代表 z_i 点注入的正向抽运、 z_j 点注入的反向抽运项对输出的贡献; 其中, $[1 - \exp(-\gamma_p L + \gamma_p z_i)]$ 和 $[1 - \exp(-\gamma_p z_j)]$ 两个因子分别代表了第 i 束 (正向传输) 和第 j 束 (反向传输) 抽运光的利用效率。容易看出, 抽运光经过的光纤长度越长, 利用效率越高。在图 2 中, 给出了只有一个抽运源时, 抽运点

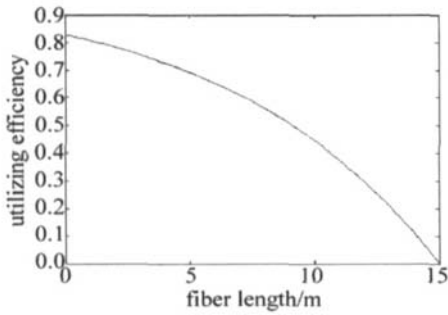


Fig 2 Utilization efficiency of the pump light versus pump positions

(正向抽运)位置 (即 z_i 值) 与抽运光利用效率的关系。计算中使用的参数为^[19]: $\lambda_p = 975\text{nm}$ ($\sigma_{ap} = 25 \times 10^{-25}\text{m}^2$, $\sigma_{ep} = 25 \times 10^{-25}\text{m}^2$), $\lambda_s = 1090\text{nm}$ ($\sigma_{as} = 1.4 \times 10^{-27}\text{m}^2$, $\sigma_{es} = 2 \times 10^{-25}\text{m}^2$), $N_0 = 4 \times 10^{25}\text{m}^{-3}$, $\Gamma = 0.82$, $\Gamma_p = 0.0012$, $\eta_1 = 0.98^{1/2}$, $\eta_2 = 0.2$, $\alpha_p = 3 \times 10^{-3}\text{m}^{-1}$, $h = 6.626 \times 10^{-34}\text{J} \cdot \text{s}$, $\tau = 1 \times 10^{-3}\text{s}$, $A = 5 \times 10^{-11}\text{m}^2$, $L = 15\text{m}$ 。

从图 2 看出, 抽运点 (正向抽运) 越靠近入射端, 吸收越强, 利用效率越高。

2.2 光纤内抽运功率的分布

在图 3 中, 分别模拟了单端抽运 (虚线) 和 3 点抽

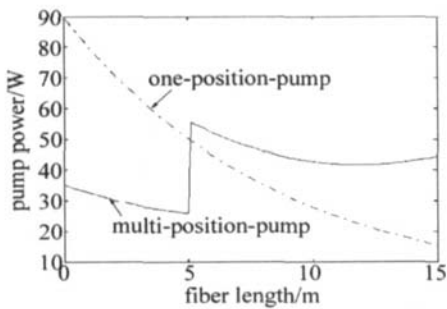


Fig 3 Distribution of pump light along the fiber in one-position pump and multi-position pump schemes

运 (实线) 时, 抽运功率在光纤中的分布情况。单端抽运用 1 个 90W 的抽运源, 3 点抽运用 3 个 30W 的抽运源 (其中两个分别从光纤两端注入, 另一个在 5m 处正

向注入)。计算中使用的参数与图 2 相同。且由计算可知, 单端抽运时, 激光输出功率 $P_{out} = 66.65\text{W}$, 3 点抽运 $P_{out} = 63.10\text{W}$ 。后者功率稍低是因为中间注入的抽运光只在光纤中传输了 10m , 利用率低于端面注入的抽运光。

从图中可以看到, 在激光输出 P_{out} 差不多的前提下, 单点抽运方案中, 在入射端附近的抽运光功率较高, 而多点抽运时, 抽运功率在整个光纤上相对较均匀。因此, 多点抽运方案可以避免包层局部吸收过大, 缓解光纤局部温升过大的问题, 因为抽运光和激光频率不等, 就算一个抽运光子转化为一个激光光子, 也会有 $h(\nu_p - \nu_s)$ 的能量转化为热。

2.3 输出功率数值解与解析解的比较

为了与本文中推导出的解析解 (实线) 进行比较, 用数值法计算了 (1) 式 ~ (4) 式的数值解 (圆点), 计算结果见图 4 和图 5。计算中假设入射端、出射端和

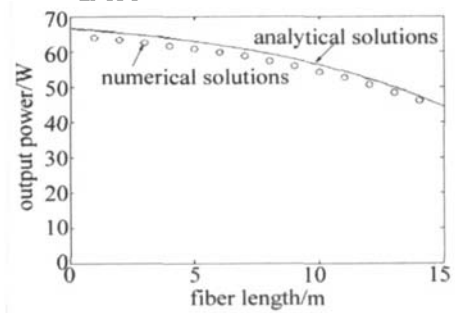


Fig 4 Comparison between analytical solutions and numerical ones of output pump power (side pump light traveling in the direction of +z)

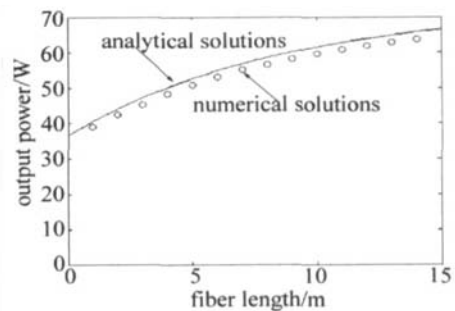


Fig 5 Comparison between analytical solutions and numerical ones of output pump power (side pump light traveling in the direction of -z)

侧面 z 点 (位置可变) 3 点抽运, 抽运总功率 90W , 光纤长为 15m 。图 4 中抽运功率 $P(0) = 30\text{W}$, $Q(L) = 30\text{W}$, $P^+(z) = 30\text{W}$ (侧面 z 点抽运光沿 $+z$ 方向传输); 图 5 中抽运功率 $P(0) = 25\text{W}$, $Q(L) = 25\text{W}$, $Q^-(z) = 40\text{W}$ (侧面 z 点抽运光沿 $-z$ 方向传输)。上面两图给出了激光器输出功率随侧面抽运源入射位置变化的情况。从图中可以看出, 推导得出的多点 (包含正向和反向) 抽运激光器输出功率的解析解与数值解存在的差异很小 (小于 5%), 因此本文中求得的解析解是可以采用的。

3 小 结

求解了多点抽运方式下掺镱光纤稳态二能级速率方程组,在保留了再发射项主体的近似情况下,得出了多点抽运光纤激光器的输出功率的近似解析解。然后,对抽运光利用效率进行讨论,可以看到,抽运源越靠近光纤端口,抽运光利用效率越高;并且对单点和多点抽运方案中,抽运光的功率在光纤内的分布进行了对比,结论是多点抽运可以缓解光纤局部过度吸收;最后,将输出功率的解析解与数值解进行对比,结果表明,所推导出的解析解与数值模拟的结果差异很小,可以为多点抽运的光纤激光器的设计和试验提供参考和依据。

参 考 文 献

- [1] WEI W L, YAN P, OU P *et al* Numerical analysis and experimental results of output characteristics for strongly pumped Yb^{3+} doped double-clad fiber laser [J]. *Optical Technique*, 2004, 30 (1): 13~19 (in Chinese).
- [2] LIC, SONG J. Diode pumped high power fiber lasers and applications [J]. *Proc SPIE*, 1999, 3862: 246~253.
- [3] OU P, YAN P, WEI W L *et al* Side-pumped Yb -doped double-clad fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24 (9): 1240~1244 (in Chinese).
- [4] SONG L Y, GUO Y B, WANG L J *et al* Research on Yb -doped double-clad fiber laser [J]. *Laser Journal*, 2003, 24 (2): 8~10 (in Chinese).
- [5] CHEN J X, SU I Zh, CHEN F Sh *et al* Thermal effect of Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser [J]. *Laser Technology*, 2006, 30 (3): 268~270 (in Chinese).
- [6] ZHANG C W, XIANG Sh Q, WANG Ch A *et al* Numerical analysis on spatial three-position pumped Yb -doped double-cladding fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23 (2): 249~254 (in Chinese).
- [7] CANNING J. Fiber lasers and related technologies [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44 (7): 647~676.
- [8] XIA J Zh, QU R H, CAI H W *et al* Studies on relaxation oscillation characteristics of fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31 (7): 807~810 (in Chinese).
- [9] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. *IEEE J Q E*, 1998, 34 (9): 1570~1577.
- [10] XIAO L M, YAN P, CONG M L *et al* An approximate analytic solution of strongly pumped Yb -doped double-clad fiber lasers without neglecting the scattering loss [J]. *Opt Commun*, 2004, 230: 401~410.
- [1] GUO M X, SHEN G Q, LU Y T. Technology of laser diode beam shaping [J]. *Laser Technology*, 2003, 27 (4): 357~361 (in Chinese).
- [2] CHEN Y F. Design criteria for concentration optimization in scaling diode end-pumped lasers to high powers: influence of thermal fracture [J]. *IEEE J Q E*, 1999, 35 (2): 234~239.
- [3] XIONG Z, LI Zh G, MOORE N *et al* Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode-pumped $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ lasers [J]. *IEEE J Q E*, 2003, 39 (8): 979~985.
- [4] JAGUS J, KWATKOWSKI J, ZENZIAN W *et al* Characterization of thermo-optic effects in diode end-pumped lasers [J]. *Proc SPIE*, 2005, 5958: 595821-1~595821-8.
- [5] FAN T Y, SANCHEZ A. Pump source requirements for end-pumped lasers [J]. *IEEE J Q E*, 1990, 26 (2): 311~316.
- [6] KOSHEL R J, WALMSLEY I A. Non-edge-ray design: improved optical pumping of lasers [J]. *Opt Engng*, 2004, 43 (7): 1511~1521.
- [7] HALL D G. Optimum mode size criterion for low gain lasers [J]. *Appl Opt*, 1981, 20 (9): 1579~1583.
- [8] PAOLO L. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [J]. *IEEE J Q E*, 1991, 27 (10): 2319~2326.
- [9] LIU J H, LÜ J H, LU J R *et al* Mode matching research of high power end-pumped SSDL [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20 (2): 186~189 (in Chinese).
- [10] ZHANG Y M. Applied optics first vision [M]. Beijing: China Machine Press, 1982. 25~53 (in Chinese).
- [11] WANG P Y. Beam-shaping optics delivers high-power beams [J]. *Laser Focus World*, 2001, 37 (12): 115.
- [12] JABCZYNSKI J K. Quasi-geometrical approach in laser diode optics problems [J]. *SPIE*, 1995, 2538: 202~211.

(上接第 510 页)