

大功率光纤激光器空间多点抽运模型的算法研究

胡姝玲 刘宏海 苑丹丹

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100091)

摘要 对大功率光纤激光器空间多点抽运模型进行了算法研究。通过对空间多点抽运模型的特点进行分析,推导出一种近似快速解法。这种解法能够迅速计算出激光及抽运光沿光纤的功率分布状况以及输出功率,计算误差百分比约为 1%,最高达到 0.2%;在计算时间上为微分方程数值解用时的 2%~17%。这种近似快速解法解决了空间多点抽运模型中微分方程数值解法运算量大、计算时间长的问题,可利用该模型快速准确地对激光器抽运方式进行设计和优化。

关键词 光纤激光器;抽运;大功率;多点

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100208

Algorithm of Multipoint-Pump Model Based on High-Power Fiber Laser

Hu Shuling Liu Honghai Yuan Dandan

(School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100091, China)

Abstract Algorithm of multipoint-pump model based on high-power fiber laser is studied. An fast approximate solution is derived by analyzing the characteristics of multipoint-pump model. This solution can quickly calculate the laser and pump power distribution along the fiber and the output power. The result of the percentage error is about 1% and up to 0.2%. The working time of approtimate fast algorithm is 2%~17% of that of numerical algorithm. The fast approximate solution solves the problem of long computing time and large amount of computation in the numerical solution. The model can be quickly and accurately used for the laser design and optimization of pumping.

Key words fiber laser; pump; high-power; multipoint

OCIS codes 060.3510; 140.5560; 140.3510; 140.3615

1 引 言

近年来,随着大功率半导体激光器抽运技术和双包层光纤制作工艺的发展,光纤激光器的输出功率水平快速提升,单根光纤的输出已经从最初的几百毫瓦上升到了千瓦级水平,并在高精度激光加工、激光医疗、光通信及国防等领域获得了广泛应用^[1]。大功率光纤激光器中双包层光纤应用解决了光纤中抽运激光的容量,而如何将抽运激光耦合进入百微米量级的光纤内包层则是构建大功率光纤激光器的关键。目前抽运耦合技术主要分为端面抽运和侧面抽运两种^[2],但由于端面抽运、侧面抽运在单一使用时若想实现大功率抽运都会受到一些条件的制约,并且会产生一些弊端,因此就限制了抽运光功率的

进一步提高^[3]。为了更好地实现大功率抽运耦合,空间多点抽运耦合方法是一种很好的选择。空间多点抽运方式是指在沿光纤长度方向上,在不同的位置设立多个抽运点,而不管这点是在光纤端面还是在光纤长度中间的位置。如果在端头,则属于端面抽运;如果在中间,则属于侧面抽运。空间多点的抽运方法与传统的单一抽运相比,由于每一点抽运功率的提高,在不要求太高单一激光二极管功率的情况下,可提高整体的输入功率,从而提高输出功率。此外,可以根据具体情况,设计抽运位置和功率大小。

本文通过分析大功率光纤激光器空间多点抽运模型的特点,推导出一种近似快速解法,可迅速计算

收稿日期: 2011-03-02; **收到修改稿日期**: 2011-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(61074158)资助课题。

作者简介: 胡姝玲(1971—),女,博士,副教授,主要从事光纤激光器与放大器、微波光子学等方面的研究。

E-mail: hulxi@buaa.edu.cn

出激光及抽运光在整个光纤上的分布特性,以及激光输出特性随抽运光注入位置和大小变化关系,从而解决了模型中微分方程数值解法运算量大、计算时间长的问题,使之能够利用该模型快速准确地对激光器抽运方式进行设计,并将其与微分方程数

值解法的结果进行了比较和误差分析。

2 理论模型及算法

大功率光纤激光器空间多点抽运模式如图 1 所示。

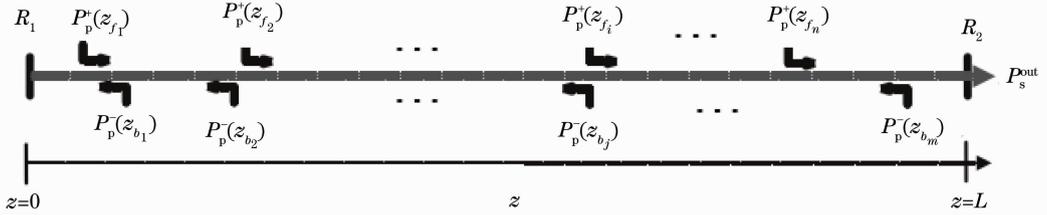


图 1 大功率光纤激光器空间多点抽运模型

Fig. 1 Multipoint-pump model based on high-power fiber laser

其中光纤长度为 L , R_1, R_2 分别为前、后腔镜对激光的反射率。在光纤 $z = z_{f_1}, z_{f_2}, z_{f_3}, \dots, z_{f_i}, \dots, z_{f_n}$ 处按顺序依次注入 n 个正向抽运光, 功率分别为 $P_p^+(z_{f_1}), P_p^+(z_{f_2}), P_p^+(z_{f_3}), \dots, P_p^+(z_{f_i}), \dots, P_p^+(z_{f_n})$ 。同样, 在光纤 $z = z_{b_1}, z_{b_2}, z_{b_3}, \dots, z_{b_j}, \dots, z_{b_m}$ 处按顺序依次注入 m 个反向抽运光, 功率分别为 $P_p^-(z_{b_1}), P_p^-(z_{b_2}), P_p^-(z_{b_3}), \dots, P_p^-(z_{b_j}), \dots, P_p^-(z_{b_m})$ 。假设注

入的抽运光为入纤功率, 实际所需的抽运功率等于该入纤功率除以抽运耦合系统的耦合效率, 并且不考虑剩余抽运光在端面的反射。

综合考虑 Yb^{3+} 离子速率方程和空间多点抽运模型, 在不考虑光纤内自发辐射光 (ASE) 效应影响下, 可得到稳态情况下, 描述大功率光纤激光器抽运光和激光的速率方程组可以表示为^[4~6]

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_s}{h\nu_s A}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p}{h\nu_p A} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)](\sigma_{as} + \sigma_{es})\Gamma_s}{h\nu_s A}}, \quad (1)$$

$$\pm \frac{dP_p^\pm(z)}{dz} = \Gamma_p [(\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z) - \sigma_{ap}N]P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z), \quad (2)$$

$$\pm \frac{dP_s^\pm(z)}{dz} = \Gamma_s [(\sigma_{as} + \sigma_{es})N_2(z) - \sigma_{as}N]P_s^\pm(z) - \alpha_s P_s^\pm(z), \quad (3)$$

式中 $P_p^+(z), P_p^-(z)$ 是在光纤长度为 z 处的正、反向抽运光功率分布; $P_s^+(z), P_s^-(z)$ 是在光纤长度为 z 处的正、反向激光功率分布。 α_p, α_s 分别是抽运光和激光的散射损耗系数。

分方程组; 2) 抽运点到抽运反方向边界的不含 (2) 式的微分方程组。如此对每个抽运点需要求解两个变值问题的常微分方程组, 运用两重迭代打靶算法, 运算非常繁琐, 且抽运点数越多, 计算所需时间越多。

下面推导一种近似解法进行替代。由激光器的原理可知, 光纤激光器中增益为

$$G_s(z) = (\sigma_{es} + \sigma_{as})\Gamma_s \int_0^z N_2(z) dz - (\sigma_{as}\Gamma_s N + \alpha_s)z. \quad (6)$$

在激光器稳态工作时, 其稳定条件可表述为单程的损耗与增益相均衡, 即腔内能量达到平衡, 可由下式表示为

$$R_1 R_2 \exp[2G_s(L)] = 1, \quad (7)$$

激光 $z = 0, z = L$ 处的边界条件分别为

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0), \quad (4)$$

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L). \quad (5)$$

(1)~(3) 式为含代数表达式的常微分方程组, (4), (5) 式为其边值条件。这样模型解算就演变成了常微分方程组的边值问题求解, 需要在 Matlab 中运用 ODE45 函数及边值问题求解中常用的打靶算法。由于空间多点抽运的存在, 使得多个抽运光功率合成后的 $P_p^+(z), P_p^-(z)$ 为不连续函数, 不能直接整体运用模型求解, 需针对每点抽运光建立两个微分方程组, 1) 抽运点到抽运方向边界的含 (2) 式的微

联立(6),(7)式,令 $K = \frac{1}{L} \int_0^L N_2(z) dz$, 则可得

$$K = \frac{\frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}}\right) + (\sigma_{as} \Gamma_s N + \alpha_s)}{(\sigma_{as} + \sigma_{es}) \Gamma_s}. \quad (8)$$

在强抽运光功率条件下,有 $N_2(z) \ll N$,用 $N_2(z)$ 在 L 上的平均值 K 代替 $N_2(z)$,代入(1)~(3)式可解得正、反向抽运光功率分布以及

$$\begin{aligned} & \frac{dP_s^+(z)}{dz} - \frac{dP_s^-(z)}{dz} + \alpha_s [P_s^+(z) + P_s^-(z)] + \\ & \frac{\nu_s}{\nu_p} \left\{ \frac{dP_p^+(z)}{dz} - \frac{dP_p^-(z)}{dz} + \alpha_p [P_p^+(z) + P_p^-(z)] \right\} + \\ & \frac{h\nu_s AK}{\tau} = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\alpha_s [P_s^+(z) + P_s^-(z)]$ 项为激光散射引起的功率损耗。先不考虑激光散射的影响,即令 $\alpha_s = 0$,利用边界条件(5),(6)式,对(9)式在 $[0, z]$ 上积分,可得在不考虑激光散射的情况下,激光沿光纤的分布和激光输出功率。但是在实际激光器中,激光散射是不可忽略的。再分析激光散射对激光器输出特性的影响,即令 $\alpha_s \neq 0$ 。

由于激光散射系数比较小,因此用不考虑激光散射求出的 $P_s^+(z), P_s^-(z)$ 代替考虑激光散射情况下的激光沿光纤的正反分布 $P_{sy}^+(z), P_{sy}^-(z)$, 即

$$\begin{aligned} \eta(z) &= \int_0^z \alpha_s [P_{sy}^+(z) + P_{sy}^-(z)] dz \approx \\ & \int_0^z \alpha_s [P_s^+(z) + P_s^-(z)] dz, \end{aligned} \quad (10)$$

将(10)式代入到(9)式在 $[0, z]$ 上的积分中即可求得激光沿光纤的正反分布和激光输出功率。

3 数值仿真结果

分别利用近似解法和微分方程数值解法对大功率光纤激光器空间多点抽运模型进行仿真计算,针对模型中多种抽运模式(正反向注入抽运光、抽运光注入位置、抽运光数目以及抽运光功率),得出抽运光和激光在整个光纤上的分布以及输出功率,近似解法所得的结果为实线,其抽运光功率为 P_{P-a} ,激光正向传输功率为 P_{s-a}^+ ,激光反向传输功率为 P_{s-a}^- ,激光输出功率为 P_{s-a}^{out} ,求解所用时间为 T_a ;微分方程数值解法所得结果为菱形线、方形线和圆点线,其抽运光功率为 P_{P-n} ,激光正向传输功率为

P_{s-n}^+ ,激光反向传输功率为 P_{s-n}^- ,激光输出功率为 P_{s-n}^{out} ,求解所用时间为 T_n 。计算中用到的参数如表1所示。

表1 计算所用参数

Table 1 Parameters used in the computation

Quantity	Numerical value
λ_s/nm	1064
λ_p/nm	975
σ_{es}/m^2	2×10^{-25}
σ_{as}/m^2	1.4×10^{-27}
σ_{ep}/m^2	2.5×10^{-24}
σ_{sp}/m^2	2.5×10^{-24}
$A/\mu\text{m}^2$	70
$A_c/\mu\text{m}^2$	6×10^4
R_1	0.95
R_2	0.05
α_s/m^{-1}	5×10^{-3}
α_p/m^{-1}	3×10^{-3}
N/m^{-3}	3×10^{25}
L/m	40
Γ_s	0.8
τ/ms	1

计算结果比对如表2所示,其中误差百分比

$$\Phi = \left| \frac{P_{s-n}^{\text{out}} - P_{s-a}^{\text{out}}}{P_{s-a}^{\text{out}}} \right|,$$

时间百分比

$$\Psi = \frac{T_n}{T_a}.$$

分析数据可以得出,近似解法的数据处理精度基本控制在1%,最优达到0.2%,抽运模式越复杂,抽运光在光纤中的分布越平坦,计算误差越小;近似解法的计算时间基本在1s,各种抽运模式下没有明显的变化,数值解法则在5~70s之间,时间百分比为2%~17%,抽运模式越复杂,时间越长,呈线性关系。选择较典型的1,6,11,13号抽运模型结果示意图如图2所示,从中可以看出,对于光纤内抽运光和正反向激光的分布情况,两种算法的结果之间具有很好的 consistency。

表 2 计算结果比对
Table 2 Results compared

Number	Multipoint-pump model			Numerical algorithm		Approximate fast algorithm		Error percent $\Phi/\%$	Time percent $\Psi/\%$
	Pump direction	Pump position/m	Pump power/W	Output power P_{s-a}^{out}/W	Compute time T_a/s	Output power P_{s-n}^{out}/W	Compute time T_n/s		
	1	+	0	100	71.2831	6.641	69.5117		
2	+	10	100	70.0125	7.562	68.8554	0.969	1.65	12.81
3	-	30	100	70.4965	13.328	69.5254	0.875	1.38	6.57
4	-	40	100	76.0248	14.532	75.4309	0.687	0.78	4.73
5	+, +	0, 10	50, 50	70.4359	12.500	69.3734	0.985	1.51	7.88
6	-, -	30, 40	50, 50	73.0439	36.922	72.5773	0.875	0.64	2.37
7	+, -	0, 30	50, 50	70.6774	19.375	69.7239	1.000	1.35	5.16
8	+, -	10, 40	50, 50	72.8024	21.812	72.3224	0.938	0.66	4.30
9	+, -	0, 40	50, 50	73.4393	20.093	72.9395	0.828	0.68	4.12
10	+, +, -	0, 10, 40	35, 30, 35	72.1330	30.266	71.7714	1.125	0.50	3.72
11	+, -, -	0, 30, 40	35, 30, 35	72.2775	41.828	71.9615	1.328	0.44	3.17
12	+, +, -	0, 10, 40	30, 20, 30	71.6511	43.922	71.5038	0.969	0.21	2.21
13	+, +, +, -	0, 5, 10, 30, 35, 40	28, 14, 8, 8, 14, 28	71.6664	75.688	71.9369	1.438	0.38	1.90

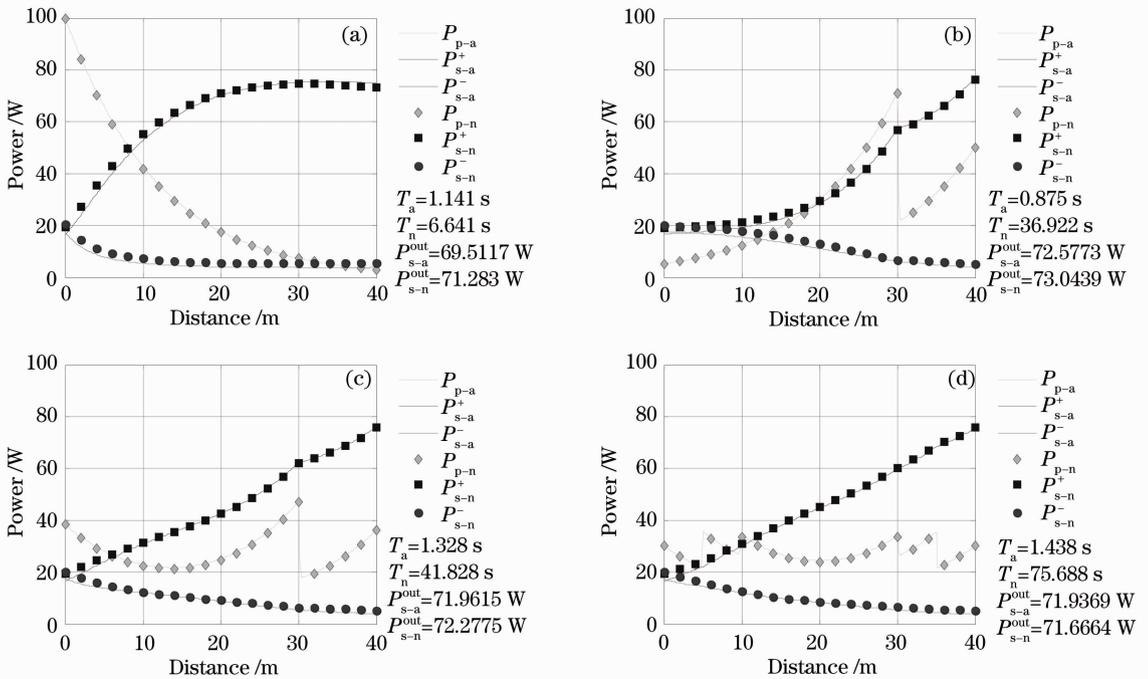


图 2 多种抽运模型结果示意图。(a) 1号, (b) 6号, (c) 11号, (d) 13号

Fig. 2 Results schematic of pump models. (a) No. 1, (b) No. 6, (c) No. 11, (d) No. 13

4 结 论

通过以上对两种算法仿真数据的比对分析,说明采用本文所提出的近似算法研究大功率光纤激光器空间多点抽运模型简便、高效,结果可靠。这种近似算法和微分方程数值解法在结果等方面均表现一

致,主要优势在于速度较快,对于6点抽运模型而言,微分方程数值解法需要75 s,而这种近似解法仅需1.5 s,模型中注入的抽运点数越多,这种优势就越明显。

参 考 文 献

- 1 Chen Miaohai. Research progress of high-power fiber lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(7): 589~592
陈苗海. 高功率光纤激光器的研究进展[J]. 激光与红外, 2007, **37**(7): 589~592
- 2 Zhao Chujun, Chen Guanghui, Mu Wei *et al.*. Research progress of pumping technology for high power fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(3): 35~43
赵楚军, 陈光辉, 慕伟等. 高功率光纤激光器抽运耦合研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(3): 35~43
- 3 Shang Liang, Song Zhiqiang, Mao Qinghe *et al.*. Experimental-research on output characteristics of high power Yb³⁺ doped double clad fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 755~758
尚亮, 宋志强, 毛庆和等. 高功率掺镱光纤激光器输出特性的实验研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 755~758
- 4 A. Hardy, R. Oron. Signal amplification in strongly pumped fiber amplifiers[J]. *J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(3): 307~313
- 5 I. Kelson, A. Hardy. Strongly pumped fiber lasers [J]. *J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(9): 1570~1577
- 6 I. Kelson, A. Hardy. Optimization of strongly pumped fiber lasers [J]. *J. Quantum Electron.*, 1999, **17**(5): 891~897