

文章编号: 100124322 (2004) 1021259204

掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的数值分析^x

彭跃峰^{1,2}, 唐 淳², 蒋建锋²

(1. 中国工程物理研究院 研究生部, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 对掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器不同参数情况下的输出功率和增益分布进行了数值模拟, 分析了一端泵浦和双端泵浦方式下输出特性的差异, 激光沿光纤长度方向的分布, 输出功率与光纤长度、腔镜反射率及泵浦功率的关系。结果显示: 两端泵浦较一端泵浦增益更加平坦, 输出功率也稍高; 当泵浦光波长为 975nm 时, 输出激光功率对光纤长度更为敏感, 最佳光纤长度相对于泵浦光波长为 915nm 时短且转化效率高; 在大功率长光纤的情况下, 光纤有损耗时输出功率随输出腔镜反射率的增加单调地减小, 无损耗时输出功率不随输出腔镜反射率变化。

关键词: 光纤激光器; 掺 Yb³⁺ 双包层光纤; 数值分析

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

近年来, 由于双包层光纤的出现, 光纤激光器取得了较大进展, 输出功率得到了大幅度提高。利用包层泵浦技术, 光纤激光器的光-光转化效率达 50% 以上, 输出功率达百 W 级, 并且具有近衍射极限的光束质量^[1]。目前, 单模连续输出已经超过了 270W^[2], 多模输出 1 014W^[3]; 最近国内很多单位已经开展了这一领域的研究工作, 其中上海光机所和清华大学均获得了百 W 级功率输出^[4,5]。

本文通过建立光纤微分计算模型, 对双包层光纤激光器的输出特性进行了数值模拟和讨论, 主要分析了激光沿光纤长度的分布、输出功率与泵浦功率、光纤长度及腔镜反射率的关系, 同时也分析了一端及双端泵浦方式下激光功率和增益分布的差异, 最后对实验和数值模拟结果进行了比较。

1 输出特性方程

图 1 是光纤激光器计算模型示意图, 光纤的长度为 l , 泵浦光从 $z=0$ 处耦合进内包层, 泵浦功率耦合进纤芯的比例由 η_p 确定, 其约等于纤芯与内包层横截面积之比, R_1 和 R_2 分别为全反腔镜和输出腔镜对激光的反射率。取光纤 z 到 $z+dz$ 的一小段进行分析, 可以得到方程组^[6~8]

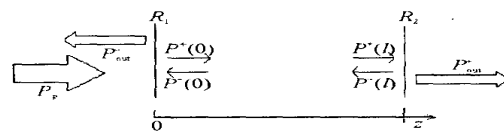


Fig. 1 Schematic illustration for the simulation of a fiber laser

图 1 光纤激光器计算模型示意图

$$\frac{dP^+(z)}{dz} = + \frac{s_f}{h_p} a P_p \exp[-(a_p + \eta_p)z] \frac{\eta_p}{A_f} \frac{P_0 + P^+(z)}{1 + [P^+(z) + P^-(z)]/P_s} - P^+(z) \quad (1a)$$

$$\frac{dP^-(z)}{dz} = - \frac{s_f}{h_p} a P_p \exp[-(a_p + \eta_p)z] \frac{\eta_p}{A_f} \frac{P_0 + P^-(z)}{1 + [P^+(z) + P^-(z)]/P_s} + P^-(z) \quad (1b)$$

$$g(z) = \frac{s_f}{h_p} a P_p \exp[-(a_p + \eta_p)z] \frac{\eta_p}{A_f} \frac{1}{1 + [P^+(z) + P^-(z)]/P_s} \quad (1c)$$

式中: $P^+(z)$ 和 $P^-(z)$ 分别为正向传播和反向传播的激光功率; $g(z)$ 是激光沿光纤的增益系数; a 是掺杂芯径对泵浦光的吸收系数; P_p 是耦合进光纤的泵浦功率; η_p 是光纤对泵浦光除 a 的其它损耗总和; s 是激光的受激发射截面; f 是荧光寿命; h_p 是泵浦光子的能量; A_f 是纤芯横截面积; α 是光纤对激光的吸收系数; $P_s = (h\nu_s / s_f) \cdot A_f$ 是饱和输出功率, ν_s 是激光的中心频率, 自发辐射对激光功率的贡献^[7] $P_0 = h\nu_s c^2 / (2\nu_s^3)$, λ_s 为激光中心波长。

为解方程组(1), 必须确定其边界条件

$$P^+(0) = R_1 P^-(0), \quad P^-(l) = R_2 P^+(l) \quad (2)$$

X 收稿日期: 2004204207; 修订日期: 2004205219

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 彭跃峰(1978—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为二极管泵浦固体激光器; 绵阳 91921013 信箱。

借助 Matlab 中的微分计算工具,可以求出方程组(1)满足边界条件方程组(2)的数值解,得出一些非常有用的结论,比如激光输出功率与泵浦功率和光纤长度的关系,腔镜反射率对激光输出功率的影响等等。

2 数值计算和讨论

根据上面的方程组,我们就光纤激光器输出功率和增益与泵浦功率、光纤长度以及腔镜反射率的关系进行了数值计算,计算中所用参数如下: $\lambda_s = 1080\text{nm}$, $\lambda_p = 915\text{nm}$, $\tau_f = 0.95\text{ms}$, $\sigma_s = 6 \times 10^{-25} \text{m}^2$, $\sigma_p = 915\text{nm}$ (975nm), $\alpha_p \cdot \sigma_p = 0.6\text{dB/m}$ (915nm) 或 2.0dB/m (975nm), $\alpha_p = 13\text{dB/km}$, $\alpha_s = 10\text{dB/km}$, $A_f = 3.142 \times 10^{-10} \text{m}^2$, $P_p = 30\text{W}$, $l = 40\text{m}$ 。

图 2 是 $R_1 = 1.00$, $R_2 = 0.04$, 泵浦光波长为 915nm, 从光纤两端同时泵浦(每端耦合进光纤的泵浦光功率为 15W)和从光纤一端泵浦的情况下所获得激光功率((a)图)和增益((b)图)沿光纤的分布曲线。一端泵浦情况下获得的激光输出功率会稍低一些,这是因为沿着光纤长度方向,泵浦功率下降而激光功率增强,从而引起增益系数单调较快下降,在光纤的后端部分,损耗大于增益的原因。两端泵浦时增益曲线不是单调的,有一个最小值点,主要是因为光纤中部泵浦功率最小;该增益曲线也不是对称的,主要是激光功率不同引起的。

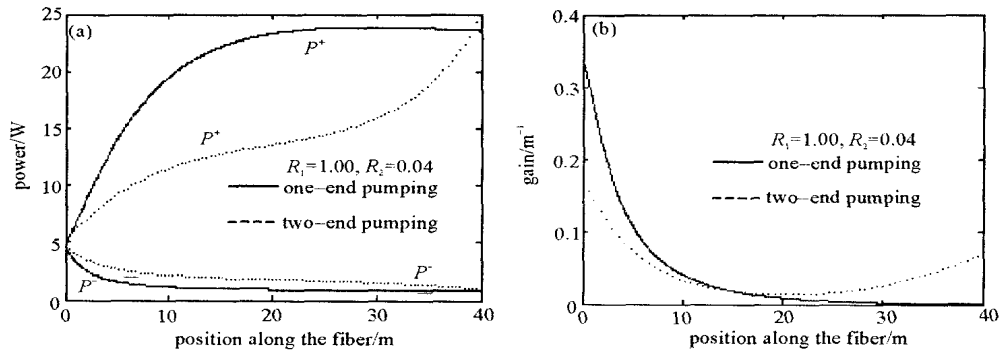


Fig. 2 Laser power (a) and gain factor (b) distribution along the fiber

图 2 激光功率(a)和增益(b)沿光纤的分布曲线

图 3 是模拟计算的激光输出功率与光纤长度的关系曲线图。当泵浦波长为 975nm 时,输出功率对光纤长度更为敏感,光纤的最佳长度比较短,为 10m 左右;当泵浦波长为 915nm 时,光纤的最佳长度在 30m 附近,这是光纤对波长为 975nm 的泵浦光的吸收系数比对 915nm 的泵浦光的吸收系数大 2 倍多的关系造成的。用 975nm 的泵浦光对光纤进行泵浦时,光2光转换效率较高,主要是因为最佳光纤长度短,从而整体损耗比较小,并且相对于 915nm 来说,量子效率也较高。根据这个曲线,可以选择光纤的最佳长度使激光的输出功率最大。从图中也可以了解到,如果光纤长度过长,激光输出功率会有所下降,但下降得比较缓慢,这是因为光纤对激光损耗非常小的原因。

图 4 是泵浦光波长为 915nm, $R_1 = 1.00$ 时,没损耗和损耗为 10dB/km 的情况下,激光输出功率与输出腔镜反射率 R_2 的关系曲线。图中显示当光纤对激光没有损耗时, R_2 对输出功率没有影响;当损耗为 10dB/km 时, R_2 对输出功率的影响较大,并且是随着 R_2 的增加单调地下降,这是因为随着 R_2 的增加更多的激光被反射回光纤,光程增加,从而引起损耗增加。

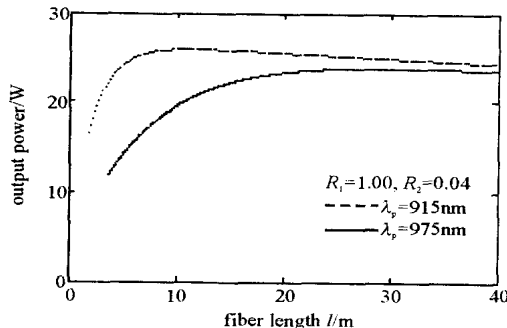


Fig. 3 Laser output power vs the fiber length

图 3 激光输出功率与光纤长度的关系曲线

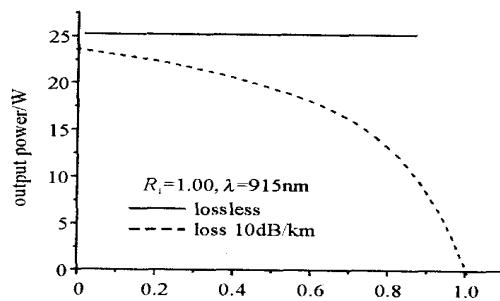


Fig. 4 Laser output power vs R_2

图 4 激光输出功率与输出镜反射率 R_2 的关系曲线

图 5 是在 $R_1 = 1.00, R_2 = 0.04$, 泵浦光波长为 915nm 的情况下获得的激光输出功率与泵浦功率的关系曲线, 其中虚线和实线分别为无损耗和损耗为 10dB/km 的情况下计算的曲线, 斜率效率分别为 84.5 % 和 77.16 %。在无损耗的情况下, 斜率效率接近量子效率 $h_s / h_p = 84.7 %$ 。

3 实验

我们用美国 Nufern 公司生产的双包层光纤对 CW 双包层光纤激光器进行了初步的实验研究, 实验装置如图 6 所示。光纤的内包层横截面为八

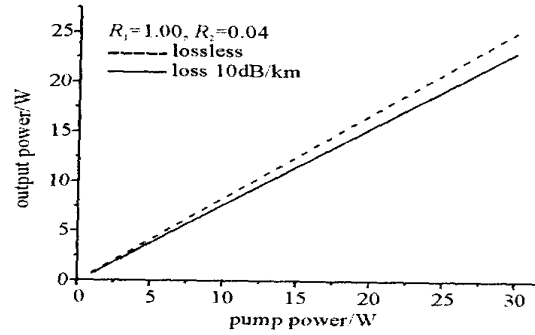


Fig. 5 Laser output power vs pump power

图 5 激光输出功率与泵浦功率的关系曲线

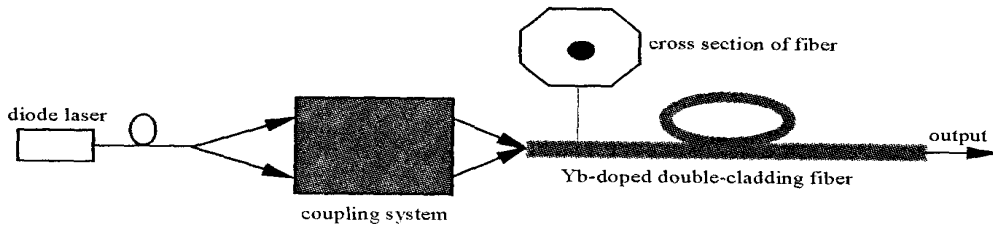


Fig. 6 Experiment setup of double-cladding fiber laser

图 6 双包层光纤激光器实验装置图

边形, 内切圆直径 400 μ m, 数值孔径 0.46, 纤芯直径 20 μ m, 数值孔径 0.06, 吸收系数 0.6dB/m (915nm) 或 2.0dB/m (975nm), 光纤对激光的损耗小于 10dB/km, 长度为 40m; 泵浦源采用输出波长为 910nm, 输出功率为 11.5W 的带尾纤输出半导体激光器; 耦合系统由两块非球面消球差透镜组成, 焦距分别为 11mm 和 4.5mm。光纤两端未加腔镜, 其反射率由光纤和空气界面的菲涅耳反射决定, 即 $R_1 = R_2 = 0.04$ 。当耦合进光纤的最大泵浦功率为 8.84W 时, 我们从光纤的末端测得了 3.34W 的功率输出, 其中有 3116W 的激光 (1080nm) 输出和 0.18W 的剩余泵浦光。图 7 为激光输出功率与泵浦功率的关系曲线, 黑色的方点为实验中所测得数据, 实线为线性拟合曲线, 虚线为相同情况下数值模拟计算得到的关系曲线。从图中可以看出, 实验数据与模拟计算结果基本一致。

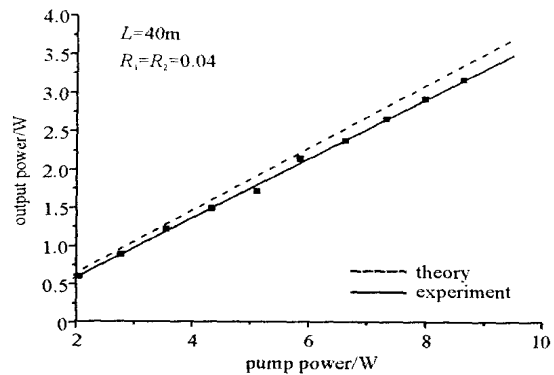


Fig. 7 Laser output power vs pump power

图 7 激光输出功率与泵浦功率的关系曲线

4 结论

对掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的输出特性进行了数值模拟, 结果显示, 两端泵浦较一端泵浦增益更加平坦, 输出功率也稍高; 当泵浦光波长为 975nm 时, 输出激光功率对光纤长度更为敏感, 最佳光纤长度相对于泵浦光波长为 915nm 时短且转化效率高; 在大功率长光纤的情况下, 光纤有损耗时输出功率随 R_2 的增加单调地减小, 无损耗时输出功率不随 R_2 变化。最后通过实验验证了计算模型是正确的, 可以用来对高平均功率光纤激光器的输出特性进行分析计算。

参考文献:

- [1] Dominic V, Maccormack S, Waarts R, et al. 110W fiber laser[J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(14): 1158—1160.
- [2] Johan N, Jayanta K S, Yoonchan J, et al. High power fiber lasers: new developments[J]. *Proc of SPIE*[C]. 2003, 4974: 36—45.
- [3] Ueda K, Sekiguchi H, Kan H. 1kW CW output from fiber-embedded disk lasers[A]. *CLEO 2002*[C].
- [4] 楼祺洪, 周军, 朱健强, 等. 百瓦级掺镱双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2003, 30(12): 1064. (Lou Q H, Zhou J, Zhu J Q, et al. 1122W Yb2)

- doped double-clad fiber laser. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **30**(12):1064)
- [5] 闫平, 巩马理, 袁艳阳, 等. 双端包层抽运光纤激光器实现 137W 激光输出[J]. 中国激光, 2004, **31**(1):80. (Yan P, Gong ML, Yuan Y Y, et al. 1372W two-end cladding-pumped fiber laser. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(1):80)
- [6] Michel J F. Theory of superfluorescent fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1986, **LT4**(11): 1631—1639.
- [7] Kelson I, Hardy A. Optimization of strongly pumped fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(5): 891—897.
- [8] Kim N S, Hamada T, Prabhu M, et al. Numerical analysis of output performance of Nd-doped double-clad fiber lasers[A]. Proc of SPIE[C]. 2000, **3889**: 583—589.

Numerical analysis of Yb-doped double-clad fiber lasers

PENG Yue-feng^{1,2}, TANG Chun², JIANG Jian-feng²

(1. Postgraduate Department, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 91921013, Mianyang 621900, China)

Abstract: Numerical analysis for Yb-doped double-clad fiber lasers is carried out. The simulation results include dependence of laser output power on pump power, fiber length, output mirror reflectivity and the differences of output performance for the cases of one-end and two-end pumps. The fiber laser experiment has been performed in the case of two-end open cavity. When incident pump power was 8.84W, the output power of 3.16W was attained with coupling efficiency of 77% and slope efficiency 3715%. The experimental data are in agreement with numerical analysis results.

Key words: Fiber laser; Yb-doped double-clad fiber; Numerical analysis