

文章编号:1002-2082(2006)04-0315-04

端面泵浦掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器

陈吉欣^{1,2}, 隋展², 陈福深¹, 王凤蕊²,
李明中², 王建军², 刘志强³, 罗亦鸣²

(1. 电子科技大学 通信与信息工程学院光纤重点实验室, 成都 610054; 2. 中国工程物理研究院
激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 3. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 从双包层光纤激光器的速率方程出发, 得到了光纤中泵浦光与激光的功率分布、输出功率与泵浦功率的关系、腔镜反射率及光纤长度对输出功率的影响。研究表明: 输出激光功率与光纤长度及后腔镜反射率有很强的依赖关系, 存在一个输出功率最大的最佳光纤长度。后腔镜反射率越大, 输出激光功率越小; 当光纤长度较短时, 在输出端放置反射镜使泵浦光高反射, 可以提高输出功率和效率。通过对端面泵浦掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器进行理论分析和实验研究, 得到输出激光的中心波长为 1 088.3 nm, 斜率效率为 33.7%, 最大输出功率为 1.75 W。

关键词: 端面泵浦; 双包层光纤激光器; 数值分析

中图分类号: TN248

文献标志码: A

End-pumped Yb³⁺ doped double clad fiber laser

CHEN Ji-xin^{1,2}, SUI Zhan², CHEN Fu-shen¹, WANG Feng-rui²,
LI Ming-zhong², WANG Jian-jun², LIU Zhi-qiang³, LUO Yi-ming²

(1. Key Lab of Optical Fiber, School of Communication and Information Engineering, UESTC, Chengdu 610054, China; 2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China; 3. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Theoretical analysis and experiment of end-pumped Yb³⁺ doped double-clad fiber laser are presented in this paper. Based on rate equations, the distribution of pump power and laser power in the fiber, the effect of fiber length and reflectivity of cavity minor on output power are studied. The maximum output laser power can be obtained with the optimum fiber length and fiber end as output coupling. That is, the higher the reflectivity of rear-cavity mirror is, the lower the laser output power will be. For short fiber, the output laser power and slope efficiency can be improved when a reflective mirror is set at output end to reflect the pump light. In the experiment, the laser with a central wavelength of 1 088.3 nm, the slope efficiency of 33.7% and the maximal output power of 1.75 W were obtained.

Key words: end-pumping; double clad fiber laser; numerical analysis

引言

光纤激光器在工业加工、印刷、打标、医疗和通信等领域有着广泛的应用^[1]。双包层光纤激光器可

提供几十瓦甚至上百瓦的单模连续输出^[2-3]。与普通单模光纤相比, 双包层光纤增加了 1 个内包层(内包层的形状有矩形、D 形、梅花形等), 其横向尺

收稿日期: 2005-12-28; 修回日期: 2006-02-22

基金项目: 中国工程物理研究院双百人才基金资助项目(2004R0205)

作者简介: 陈吉欣(1977-), 男, 上海人, 电子科技大学博士研究生, 主要从事光纤激光器与放大器的研究工作。E-mail: jixinc@163.com

寸和数值孔径都比较大,可以有效地将更多的泵浦光耦合进纤芯,从而提高输出功率。由于Yb³⁺具有较宽的吸收光谱和发射光谱、较高的吸收截面及无激发态吸收和无浓度淬灭等优点,因而光纤激光器中的掺杂离子大多采用Yb³⁺[4]。本文对掺Yb³⁺端面泵浦双包层光纤激光器的特性进行了研究,分析了光纤中的功率分布、输出功率与泵浦功率的关系,腔镜反射率及光纤长度对输出功率的影响,并进行了初步的实验研究。

1 速率方程

对于高功率双包层光纤激光器,泵浦光和激光都是窄线宽的,可认为他们都是单波长的。在强泵浦条件下,可以不考虑自发辐射的影响。图1是端

面泵浦双包层光纤激光器的示意图。

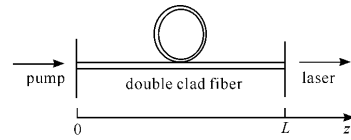


图1 端面泵浦双包层光纤激光器示意图

Fig.1 Schematic diagram of end-pumped double-clad fiber laser

泵浦光从光纤端面注入,经双包层光纤从右边腔镜输出。设光纤长度方向的坐标为 z ,光纤长度为 L ,纤芯的截面积为 A ,纤芯的掺杂浓度为 N ,前后腔镜对激光的反射率分别为 R_1 和 R_2 ,后腔镜对泵浦光的反射率为 R_3 。在稳态条件下,双包层光纤激光器的速率方程^[5]为

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p\lambda_p}{hcA} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_s\lambda_s}{hcA}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p\lambda_p}{hcA} + \frac{1}{\tau} + \frac{[P_s^+(z) + P_s^-(z)](\sigma_{as} + \sigma_{es})\Gamma_s\lambda_s}{hcA}} \quad (1)$$

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

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

式中, P_s^+ 和 P_s^- 分别为腔内正、反向激光功率; P_p^+ 和 P_p^- 分别为正、反向泵浦光功率; $N_2(z)$ 为上能级Yb³⁺浓度; Γ_p 和 Γ_s 为功率填充因子; Γ_p 为泵浦光耦合进纤芯百分比,可由纤芯面积与内包层面积比得到; Γ_s 为激光在纤芯中的百分比,可由光纤的模式理论得到; σ_{ap} 和 σ_{ep} 分别为泵浦光的吸收截面和发射截面; σ_{as} 和 σ_{es} 分别为激光的吸收截面和发射截面; τ 为自发辐射寿命; h 为普朗克常量; c 为真空中的光速; α_p 和 α_s 分别为泵浦光和激光的散射损耗系数(与位置无关); λ_p 和 λ_s 为泵浦光和激光的波长。

在强泵浦光功率条件下,有 $N_2(z) \ll N$ ^[5]。利用这个条件,若泵浦光从左端面注入,则由(3)式可得正向泵浦光功率分布:

$$P_p^+(z) = P_p^+(0)\exp[-(\Gamma_p\sigma_{ap}N + \alpha_p)z] \quad (4)$$

$P_s^+(z)$ 和 $P_s^-(z)$ 与边界条件有关,其表达式为

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0) \quad (5)$$

$$P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \quad (6)$$

2 数值计算

利用四阶龙格-库塔法并结合边界条件进行数

值模拟,可得到双包层光纤激光器的特性。计算中的有关参量^[5-6]: $L = 50$ m, $\lambda_p = 975$ nm, $\lambda_s = 1090$ ms, $\tau = 1$ ms, $\sigma_{ap} = 2.5 \times 10^{-20}$ cm², $\sigma_{ep} = 2.5 \times 10^{-20}$ cm², $\sigma_{es} = 2 \times 10^{-21}$ cm², $\sigma_{as} = 1.4 \times 10^{-23}$ cm², $A = 5 \times 10^{-7}$ cm², $N = 4 \times 10^{19}$ cm⁻³, $\alpha_p = 3 \times 10^{-5}$ cm⁻¹, $\alpha_s = 5 \times 10^{-5}$ cm⁻¹, $\Gamma_p = 0.0012$, $\Gamma_s = 0.82$, $R_1 = 0.98$, $R_2 = 0.04$ 。

2.1 无泵浦光反射($R_3=0$)的情况

当泵浦功率 $P_p^+(0) = 25$ W时,光纤内正反向激光功率和泵浦功率的分布如图2所示。输出功率与光纤长度的关系如图3所示。由图2可以看出,光

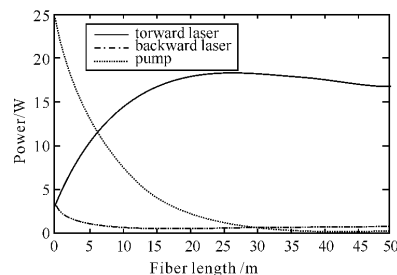


图2 光纤内泵浦光和激光功率分布

Fig.2 Power distribution of pump light and laser in the fiber

纤内反向激光功率变化不大,正向激光功率变化显著。 $z < 27$ m时,正向激光功率上升较快;在 $z = 27$ m时,泵浦光几乎被完全吸收,正向激光功率达到增益饱和,随后功率值随着 z 的增加开始减小。因此,最佳光纤长度为27 m,这也可从图3得出。

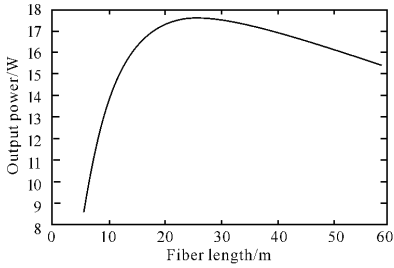


图3 输出功率与光纤长度的关系

Fig. 3 Output power versus fiber length

在原光纤输出端放置反射镜完成激光输出反射时,在不同泵浦功率下,输出功率与 R_2 的关系如图4所示。由图可以看出,后腔镜对激光的反射率越高,输出功率越小。因此,存在1个可使输出激光功率达到最大的最佳反射率。在光纤激光器中,为了提高输出功率,经常用光纤解理面作为输出耦合($R_2 = 0.04$)。

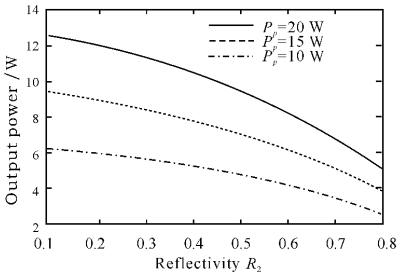


图4 反射率 R_2 与输出功率的关系

Fig. 4 Reflectivity R_2 versus output power

图5为 $R_2 = 0.04$, 0.5和0.8时输入泵浦功率与输出功率的关系曲线图,其对应的斜效率分别为

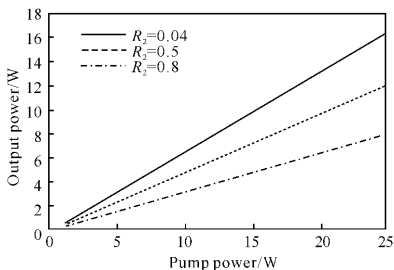


图5 泵浦功率与输出功率的关系

Fig. 5 Pump power versus fiber power

65.25%, 47.6%和31.4%。由图可以得出,在高于阈值的情况下,输出激光功率随泵浦功率线性增大。对于输出端是光纤自然解理面的情况下,输出激光功率和斜效率都比其他情况高。

2.2 泵浦光被高反射($R_3 = 0.95$)的情况

由于Yb³⁺对波长为975 nm的泵浦光的吸收截面较大,因此当光纤长度较长时,泵浦光几乎被完全吸收(见图2)。但由图3得出光纤长度较长不利于提高输出功率,另外,实验中用太长的光纤会导致造价昂贵。为了用较短的光纤得到较高的输出功率,可以在光纤输出端放置1个反射镜,使它对泵浦光高反射,而对输出激光没有影响,这样剩余的泵浦光就会再次回到光纤中被吸收,提高了泵浦光的利用率^[7]。

设泵浦光在出射端的反射率为 R_3 ,则反向泵浦光功率分布为

$$P_p^-(z) = P_p^+(0)R_3 \exp[-(\Gamma_p \sigma_{ap} N + \alpha_p)(2L - z)] \quad (7)$$

因此,当 $R_3 \neq 0$ 时,光纤内的泵浦光分布为

$$P_p(z) = P_p^+(z) + P_p^-(z) \quad (8)$$

式中, $P_p^+(z)$ 由(4)式给出。

取光纤长度 $L = 15$ m, $R_3 = 0.95$,在其他参数不变情况下,光纤内的泵浦光和正、反向激光功率分布如图6所示。泵浦光在腔内保持较高的功率有利于提高被吸收的泵浦功率。泵浦功率与输出激光功率的关系如图7所示。为了便于比较,在图7中给出了 $L = 15$ m时, $R_3 = 0$ 和 $R_3 = 0.95$ 的情况。由图可知,在其他条件相同情况下, $R_3 = 0.95$ 的输出功率要比 $R_3 = 0$ 高。 $R_3 = 0$ 时,光-光转换效率为63.53%,斜效率为64.75%; $R_3 = 0.95$ 时,光-光转换效率为73.81%,斜效率为75.04%,比 $R_3 = 0$ 的情况高出约10%。

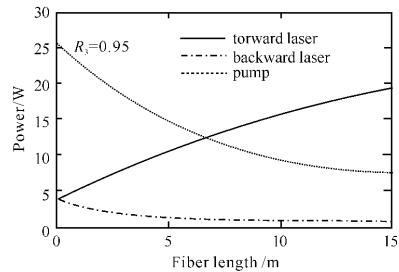


图6 光纤内泵浦光和激光功率的分布

Fig. 6 Power distribution of pump light and laser in the fiber

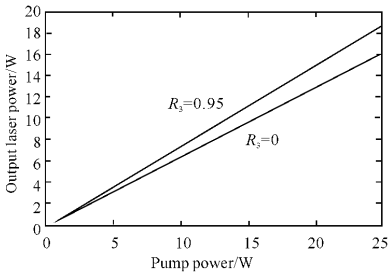


图7 泵浦光与输出激光功率的关系

Fig. 7 Pump power versus output laser power

3 实验研究

利用掺Yb³⁺双包层光纤进行了端面泵浦的实验,实验示意图见图1。采用中心波长为975 nm的半导体激光器(LD)作为泵浦源,LD发出的光经过由透镜组构成的耦合系统准直聚焦后进入双包层光纤中。温控系统将LD的温度控制在20℃左右,使LD的输出波长保持稳定。双包层光纤的内包层为D形,尺寸为320 μm×400 μm,数值孔径为0.35;纤芯直径约为3.5 μm,数值孔径为0.152;光纤的长度约为100 m。光纤的掺杂浓度不确定(经粗略测定,975 nm泵浦光的吸收系数约为0.1 dB/m)。实验采用1个二色镜作为谐振腔的前腔镜,它对975 nm泵浦光的透射率高于95%,而对1 050~1 100 nm的光的反射率高于99%。输出端直接使用光纤解理面。双包层光纤放置在2个五维的光纤精密调整架上,它可以精密地调节光纤端面的位置,以达到理想状态。实验中,光纤的前端面与二色镜紧密贴在一起。用量热型的光功率计和光谱仪测量输出激光的功率和光谱。

实验得到的输出光谱如图8所示。可以看到,除了输出中心波长为1 088.3 nm的激光外,还有少量未吸收的泵浦光。为了保证测量输出激光功率的准确性,在光纤输出端放置1个与前腔镜完全一

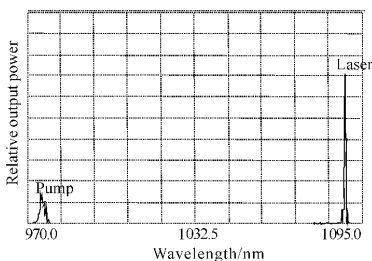


图8 输出激光和泵浦光光谱

Fig. 8 Spectra of output laser and pump light

致的镜子,并将它倾斜45°,使输出的激光被反射,而未吸收的泵浦光被透射。此时激光器的输出特性如图9所示。阈值功率为0.2 W,斜率效率为33.7%,最大输出功率为1.75 W。实验中没有发现输出激光功率达到饱和的现象,因此增加泵浦功率可以提高输出激光功率。

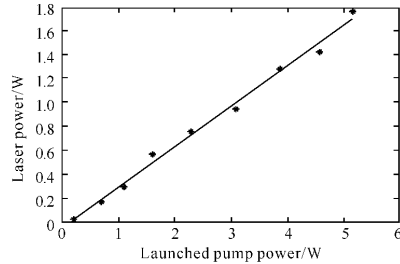


图9 光纤激光器的输出特性

Fig. 9 Output characteristic of fiber laser

4 结论

从速率方程出发,分析了掺Yb³⁺双包层光纤激光器的特性。结果表明,输出激光功率与光纤长度及后腔镜反射率有很大关系,存在一个可使输出功率达到最大的最佳光纤长度。后腔镜反射率越大,输出激光功率越小;当光纤长度较短时,在输出端放置反射镜使泵浦光高反射,可以提高输出功率和效率。实验研究了端面泵浦掺Yb³⁺双包层光纤激光器,得到输出激光的中心波长为1 088.3 nm,斜率效率为33.7%,最大输出功率为1.75 W。

参考文献:

- [1] 黄绣江,刘永智,隋展,等.超短脉冲光纤激光器新进展及其应用[J].应用光学,2004,25(6):16-21.
- [2] DOMINIC V, MACCORMACK S, WAARTS R, et al. 100 W fiber laser [J]. Electron Lett, 1999, 35(14):1158-1160.
- [3] ZENTENO I. High power double clad fiber laser [J]. J Lightwave Technology, 1993, 11(9):1435-1447.
- [4] 胡贵军,邓小英,张亮,等.掺镱双包层高功率光纤激光器输出特性研究[J].半导体光电,2003,24(6):402-405.
- [5] KELSON I, HARDY A A. Strongly pumped fiber lasers [J]. IEEE J Quantum Electron [J]. 1998, 34(9):570-577.
- [6] PASCHOTTA R, NILSSON J, TROPPEL A C, et al. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. IEEE J Quantum Electron, 1997, 339(7):1049-1056.
- [7] KELSON I, HARDY A A. Optimisation of strongly pumped fiber lasers [J]. J Lightwave Technology, 1999, 17(5):891-897.