

# 高能掺镱离子光纤激光器的研究\*

张 亮<sup>1,3</sup> 张 健<sup>2</sup> 秦 莉<sup>1,3</sup> 许 武<sup>4</sup> 王立军<sup>1,3</sup>

(1 中科院激发态物理重点实验室, 长春 130022)

(2 吉林大学电子科学与工程学院, 长春 130021)

(3 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 13002)

(4 中国科学技术大学, 合肥 230026)

**摘 要** 从激光器的速率方程出发, 对光纤激光器的工作原理以及输出特性进行了研究, 得到了光纤激光器在稳态条件下阈值条件和激光器输出功率的表达式. 利用数值模拟结果对光纤激光器基本参量进行分析和论证. 为光纤激光器的优化设计提供理论依据. 并提出了全光纤型光纤激光器的实验方法. 获得了最大功率 7.5 W、波长 1080 nm、峰值半宽 0.11 nm 的连续单模激光输出.

**关键词** 掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤; 光纤光栅; 双包层光纤激光器; 全光纤结构

**中图分类号** TN248; TN253 **文献标识码** A

## 0 引言

光纤激光器自问世以来在光纤通讯等领域以其独有的优势而倍受人们的青睐, 但以往光纤激光器利用单模光纤, 泵浦耦合效率比较低. 近年来, 随着双包层结构光纤的出现, 以及半导体激光器的发展, 以这种双包层光纤实现高能光纤激光器已经成为研究的热点<sup>[1~8]</sup>.

光纤激光器是以泵浦光激励增益介质, 在纤芯实现粒子数反转发光. 对于有源增益介质的掺杂元素荧光位于 1060 nm 附近的只有钕(Nd)或镱(Yb)离子, 由于掺杂这两种离子的激光器在工业加工、医用治疗、光谱检测等方面有巨大的应用潜力, 所以这个波段的激光器得到了大力发展. 早期主要是以 Nd 离子掺杂光纤激光器为主, 它是四能级跃迁系统, 但由于其吸收带比较窄, 对泵浦波长的要求比较苛刻. 而镱(Yb)离子只有两个能级, 属于三能级系统, 具有吸收光谱宽、增益带宽、量子效率高、无激发态吸收、无浓度淬灭等特点. 所以上世纪末期以 Yb 离子掺杂光纤作为增益介质的光纤激光器得到了长足的发展, 美国 SDL 公司的科学家使用端泵浦技术获得了 110W 的高功率输出<sup>[9]</sup>, 2002 年报道了实现 135W 单模光纤激光器<sup>[10]</sup> 而德国 IPG 公司已经实现了千瓦级光纤激光器的产品化.

在光纤激光器端泵浦技术中, 在整个光纤长度上泵浦光是一种非均匀的分布, 一般结构采用光纤一端输入泵浦光, 激光从光纤的另外一端输出. 本文中采用了一种简单的光纤激光器结构模型, 并从激光器的速率方程出发, 建立了激光器内部泵浦光与激光在光纤谐振腔内分布表达式, 对光纤激光器

激光阈值, 输出功率与光纤长度, 光纤输出耦合率之间的关系进行了分析和讨论. 利用数值计算所得结论, 结合实验研究了掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的输出特征, 为进一步提高光纤激光器的输出功率和优化器件参数提供了依据. 并进行了 970 nm 抽运的全光纤激光器的实验. 获得了 7.5 W 光纤激光输出, 波长为 1.08 μm, 峰值半宽(FWHM)为 0.11 nm 的连续单模输出. 这个结果与理论分析基本一致.

## 1 工作原理及其特性分析

众所周知, 掺杂镱 Yb 离子的硅基玻璃光纤的能级结构比较简单, 如图 1, 在整个可见及红外光谱区只有一个基态  $2F_{7/2}$  和一个亚稳态  $2F_{5/2}$ , 间隔大约  $10,000 \text{ cm}^{-1}$ , 其它的能级都在紫外区, 由于没有高能级的存在, 因此以镱 Yb 离子掺杂光纤可以消除多光子弛豫及激发态吸收(ESA)的影响, 适合于发展高功率激光器件, 许多高功率固体激光器也利用镱掺杂晶体作为激活介质. 同时镱离子 Yb<sup>3+</sup> 也具有相当高的吸收和发射横截面积. 镱掺杂光纤激光器一般被泵浦到其亚稳态  $2F_{5/2}$  多重态较高的次能级上(如图 1 右侧), 当发射波长小于 990 nm 时, 其行为是一种真实的三能级跃迁系统(跃迁 A), 而

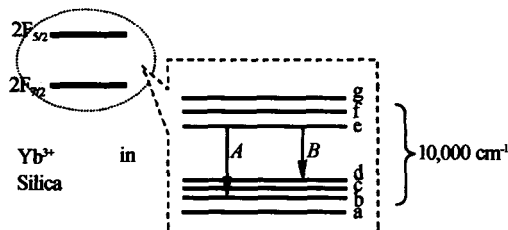


图 1 硅基掺镱离子能级图

Fig. 1 Energy level diagram of Yb<sup>3+</sup> in silica

在较长的波长, 从 ~1000 nm 到 ~1200 nm 时(跃迁), 其行为更象是一种准四能级系统<sup>[11,12]</sup>, 对于长波长(1060 nm 左右)的镱掺杂双包层高功率光纤激光器多以建立其四能级系统速率方程进行数值分析.

对于光纤激光器的(F-P)谐振腔, 采用在双腔

\*中科院创新基金、吉林省自然科学基金(批准号: K04M092)资助项目  
Tel: 0431-6176348-82 Email: zhangliang1217@yahoo.com.cn  
收稿日期: 2004-06-10

镜(反射率分别为  $R_1$  和  $R_2$ ) 之间, 增益介质长度为  $l$  的线形腔结构. 如图 2, 其中  $P_+$  和  $P_-$  分别是在谐振腔内产生的激光前后向传播功率强度, 对于稳态时激光器的特性, 考虑均匀四能级系统, 激光跃迁属于均匀加宽特性, 在激光器谐振腔中支持泵浦光, 前向和后向部分激光束的传播, 进一步假设认为无偏振影响, 无激发态吸收, 不考虑自发发射效应, 镜面的损耗和邻近离子间作用忽略不计, 光纤中横向能量分布是均匀的.

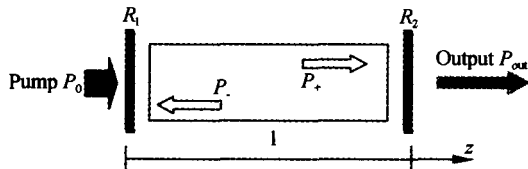


图 2 F-P 腔型光纤激光器原理图  
Fig. 2 Schematic diagram of F-P cavity fiber laser

对于均匀加宽系统, 两个相向传输的激光分量  $P_+(z)$  和  $P_-(z)$  (取泵浦光传播方向为  $z$  方向) 在  $z$  方向的分布服从速率方程, 形式为

$$\frac{\partial P_{\pm}(z)}{\partial z} = \pm \left( \frac{P_p(z)}{1 + P_+(z) + P_-(z)} - 1 \right) P_{\pm}(z) \quad (1)$$

式中  $P_p(z)$  表示泵浦光在光纤中的分布, 式(1)中  $P_+$  和  $P_-$  满足下列边界条件

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

光纤激光器由从光纤一端进入的外部泵浦能量沿光纤轴是非均匀泵浦, 我们知道泵浦功率沿光纤呈指数衰减, 可表示为  $P_p(z) = P_0 \exp(-\alpha z)$ , 其中  $\alpha$  是泵浦光在光纤中的分布损耗系数, 包括光纤中稀土离子的吸收损耗和光纤的传输损耗.

在光纤饱和泵浦跃迁时, 光纤激光器中最大饱和功率  $P_{max}$  是指整个吸收长度  $L_a$  上的饱和泵浦功率, 可表示为

$$P_{sat, pump} = (h\nu_p / \sigma\tau_f)(A/G), \sigma NGL_a = 1 \quad (3)$$

式中  $h\nu_p$  是指泵浦光子能量,  $\sigma$  是稀土离子对应泵浦波长的吸收横截面,  $A$  是双包层光纤纤芯的横截面积,  $\tau_f$  为室温下荧光衰减时间(即光子寿命).  $G = (R_c/R_i)^2$  是泵浦光光束的截面上的几何填充因子, 可以表示为双包层光纤的纤芯与内包层的截面积之比. 经过推导, 最大泵浦饱和功率:  $P_{max} = h\nu_p \cdot A \cdot N/\tau_f$ . 其中  $N = 2N_a \cdot d \cdot \rho/M$ ,  $N_a = 6.023 \times 10^{23}/\text{mol}$  为阿佛加德罗常数,  $d$  为纤芯材料的密度, 对于石英材料  $d = 2.2 \cdot \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\rho$  为掺杂浓度(重量比), 对于实验选择的  $\text{Yb}^{+3}$  掺杂光纤为 2.5 wt%,  $M$  为稀土掺杂氧化物分子量, 单位为  $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ . 可以得出  $P_{max} = 1.5 \text{ W/m}$ . 所以在选用 20 m 这种光纤中泵浦功率远低于饱和情况, 因此方程中也假设光纤激光器在低于饱和条件下工作.

在式(1)中  $P_+$  和  $P_-$  满足如下的守恒条件

$$\frac{1}{P_+} \cdot \frac{\partial P_+}{\partial z} + \frac{1}{P_-} \cdot \frac{\partial P_-}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

由式(2)和(3)可得

$$P_+(l) = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} P_+(0), P_-(z) = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{P_+^2(0)}{P_+(z)} \quad (5)$$

定义增益饱和系数:  $G(z) = \frac{P_p(z)}{1 + P_+(z) + P_-(z)}$

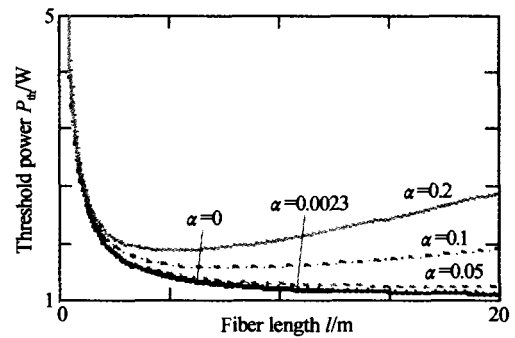
在激光阈值条件时,  $P_+(z)$ ,  $P_-(z)$  远小于 1, 因此, 当泵浦光传播经过一个振荡周期后应该满足

$$R_1 R_2 \exp \left( 2 \int_0^l G_p(z) dz - 2l \right) - 1 = 0 \quad (6)$$

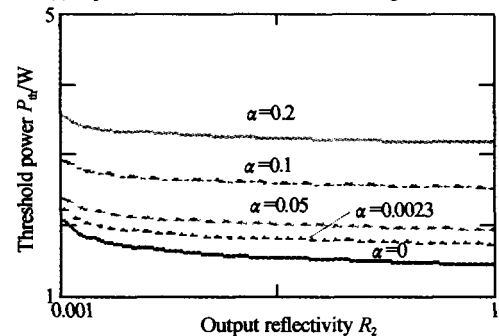
从而推得激光器阈值条件

$$P_{th} = \frac{\alpha l}{1 - \exp(-\alpha l)} \left( 1 + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (7)$$

如图 3(a) 所示为光纤激光器阈值  $P_{th}$  与光纤长度  $l$  的关系随泵浦光吸收系数的变化图. 由图中可以看出, 当  $\alpha$  为 0 时即泵浦光沿光纤均匀分布时阈值随光纤长度递减, 当存在泵浦光损耗时存在一个最低的阈值, 在传输损耗系数很小时 ( $\alpha = 0.0023$ ), 阈值随光纤长度的变化平缓, 这是由于非均匀泵浦及分布损耗共同引起的, 改变泵浦光的传输损耗对于阈值影响比较大, 对于大功率要求的长光纤长度



(a) Dependence of the threshold on the lengths of the fiber



(b) Dependence of the threshold on the output reflectivity

图 3 光纤激光器的阈值特性

Fig. 3 Threshold characteristics of the fiber laser

分布损耗显得尤其重要, 因此制作低损耗的光纤是实现高功率效率光纤激光器的关键之一. 同时从图 3(a) 中可以看出, 对于一个给定的长度, 阈值随损耗系数增加而增加. 图 3(b) 为激光器阈值  $P_{th}$  与光纤输出镜反射率  $R_2$  之间的关系, 可以看出随光纤输出耦合率的减少(即反射率的增加), 阈值减少趋势比较缓慢, 而在给定的输出反射率下激光器的阈值随传输损耗系数的增大而增大.

通过对上述方程进行推导, 可以得到光纤激光

器的输出功率表达式,可表示为

$$P_{\text{out}} = P_+(l) \cdot (1 - R_2) = (1 - R_2) \frac{\partial P_+(l)}{\partial P_0} \Big|_{P_{\text{th}}} (P_0 - P_{\text{th}}) = \frac{1 - R_2}{1 + R_2} \left[ \frac{P_0(1 - \exp(-\alpha l))}{\alpha l \left(1 + \frac{1}{2l} \ln \frac{1}{R_1 R_2}\right)} - 1 \right] \quad (8)$$

图 4 为在输出反射率  $R_2 = 0.04$  时光纤激光输出功率与光纤长度的关系,由图可看出,随着光纤长度的增加,在一定的泵浦吸收系数下,输出功率逐渐增加,当光纤长度达到某一长度时,输出功率趋于饱和,如图中所示,在  $\alpha = 0.0023 \text{ m}^{-1}$  时,在光纤长度  $l = 20 \text{ m}$  时有最大的输出功率. 当光纤超过这个长度时,由于功率在光纤中的吸收损耗输出功率反而下降,损耗越大,降低的越快.

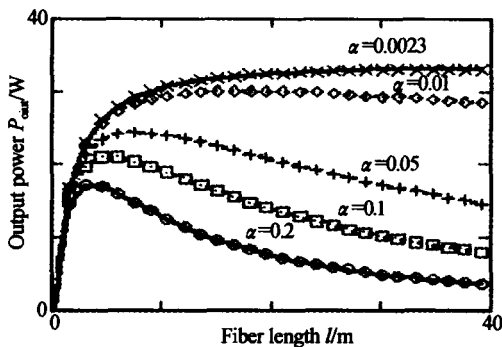


图 4 在  $R_2 = 0.04$  时,激光器输出功率与光纤长度的关系  
Fig. 4 Output power of fiber laser via fiber length at  $R_2 = 0.04$

图 5 为光纤输出功率与输出耦合即输出反射率之间的关系,并设定光纤泵浦功率  $P_0$  为  $40 \text{ W}$ ,光纤分布损耗  $\alpha$  为  $0.0023 \text{ m}^{-1}$ ,由图知,在某一长度的光纤时,存在一最佳的输出反射率使得光纤输出功率有最大值,当反射率超过这一值时,输出功率逐渐变小,而当光纤的长度达到  $50 \text{ m}$ ,输出功率几乎随输出反射率的增加单调减小,这主要是由于光纤本身分布损耗非常小( $\alpha = 0.0023 \text{ m}^{-1}$ ).

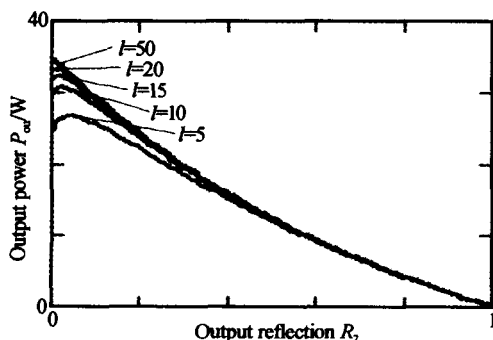


图 5 在  $\alpha = 0.0023 \text{ m}^{-1}$  时,光纤激光器输出功率与输出反射率  $R_2$  之间的关系  
Fig. 5 Output power of fiber laser via output reflection  $R_2$  at  $\alpha = 0.0023 \text{ m}^{-1}$

图 3、4 和 5 中所示可以从简单的物理事实推出:在较短的光纤长度时,为了达到激射条件,需要

提供足够高的反射系数,这主要是因为较短的光纤产生的单程增益较小所致,同样当光纤较长时光纤的单程增益非常高,很容易达到增益饱和条件,在一个较低的输出反射系数时就可以获得最大的输出功率,因此在一般的高功率光纤激光器的有源光纤介质的长度在几十米时,输出端只需要非常小的反射率,一般采用光纤输出端抛光平面的 4% 的非涅尔反射提供增益反射. 同时实现高功率光纤激光器的技术也得益于低损耗光纤制作技术的完善.

图 6 为光纤输出功率与泵浦功率的关系. 分布损耗  $\alpha$  为  $0.0023 \text{ m}^{-1}$ ,光纤长度  $l = 20 \text{ m}$ ,当输出反射率  $R_2 = 0.04$ 、输入泵浦功率  $P_0 = 40 \text{ W}$  时,激光器阈值  $P_{\text{th}} = 1.2 \text{ W}$ ,光纤的输出功率  $P_{\text{out}} = 32.5 \text{ W}$ . 激光器斜效率为 83.8%. 而当输出反射率  $R_2 = 0.2$ 、输入泵浦功率不变的情况下,激光器阈值  $P_{\text{th}} = 1.05 \text{ W}$ ,光纤输出功率  $P_{\text{out}} = 24.4 \text{ W}$ ,激光器的斜效率为 62.6%,可以看出,在输出反射率增加时,激光器的阈值降低,输出功率下降,激光器的斜效率也随之降低.

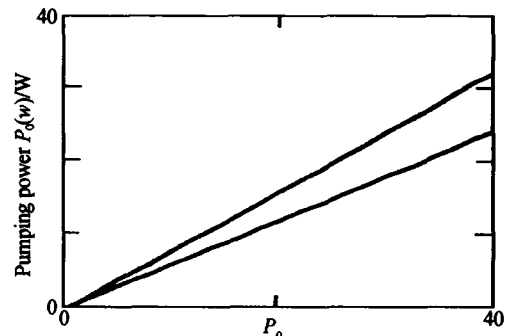
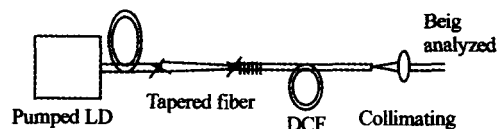


图 6 光纤输出功率与泵浦功率之间的关系  
Fig. 6 Curve of fiber output power via pumping power

## 2 实验方法及装置

实验装置如图 7,实验所用半导体激光二极管(LD)光纤耦合模块为自行制作,中心波长为  $970 \text{ nm}$ ,输出光纤光束直径为  $400 \mu\text{m}$ ,最大输出功率  $30 \text{ W}$ . 双包层光纤为纤芯、内包层、外包层结构,内包层直径为  $85 \sim 90 \mu\text{m}$ ,形状为梅花瓣型(也称准圆型),数值孔径  $NA = 0.22$ ,纤芯直径  $7 \mu\text{m}$ ,数值孔径  $NA = 0.15$ ,外包层直径为  $125 \mu\text{m}$ . 所用光纤长度为  $20 \text{ m}$ .



Interference pattern of fiber's cross section

图 7 光纤激光器实验装置和光纤截面  
Fig. 7 Experimental setup of fiber laser and fiber's cross section

由于双包层光纤纤芯中掺杂的镱( $Yb^{3+}$ )离子在 970 nm 处的吸收系数为 0.2 dB/m,所以光纤吸收谱的中心波长在 976 nm.

光纤激光器的谐振腔是利用光纤光栅的反射特性实现的谐振腔,光纤光栅在光纤激光器中的运用使得光纤激光器的结构简单、紧凑.构成谐振腔前腔镜的光纤光栅.如图 8,其中心反射波长为 1080.00 nm,对泵浦光(970 nm)的透射率为 99%,对激光光(1080 nm)反射率 $>90\%$ .后腔镜是利用光纤的后输出端经过抛光处理,形成的镜面,存在的菲涅尔反射(4%)形成的.

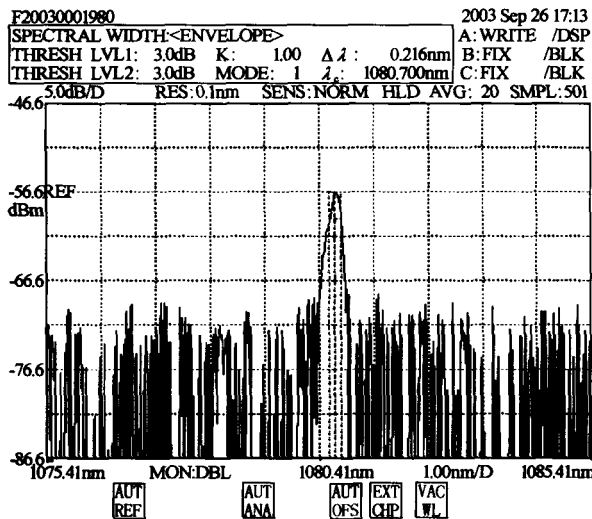


图 8 均匀 Bragg 光纤光栅的反射光谱  
Fig. 8 The reflective spectrum of Bragg grating

激光器工作时,LD 尾纤输出的 970 nm 激光通过光纤耦合,直接经光纤光栅进入掺  $Yb^{3+}$  双包层光纤中.在光纤的内包层里传播,进入纤芯后被其中的镱  $Yb^{3+}$  离子吸收,在纤芯中形成粒子数反转,产生受激辐射,满足谐振腔作用的激光最终从光纤输出端输出.在这个实验中采用了锥度光纤实现了光纤之间的低损耗连接,实验测定锥形光纤的传输效率为 90%.

### 3 实验结果与分析

实验中所用的半导体激光泵浦模块的输出光纤直径是 400  $\mu m$ ,其数值孔径是 0.22.掺  $Yb^{3+}$  双包层光纤的内包层直径为 210  $\mu m$ ,内、外包层之间的数值孔径都为 0.45.其中内包层的梅花瓣形结构与其他非对称内包层结构一样有着非常高的耦合效率<sup>[12]</sup>.而锥形光纤的输入端直径 400  $\mu m$ ,数值孔径 0.22.输出端的光纤直径为 200  $\mu m$ .光纤锥形区长度为 2.5 m,总计长为 3.5 m.利用光纤熔接机将泵浦模块输出光纤、锥形光纤和双包层光纤融接起来,形成全光纤型结构.

光纤输出光束经透镜后进入光谱分析仪和功率计进行分析.将光纤输出激光经过准直后经衰减器输入光谱分析仪测量其光谱特性.如图 9(a)为光纤激光器的输出光谱,其中心波长为 1080.704 nm,谱线宽度为 0.11 nm.图 9(b)为用 CCD 镜头拍得的输出近衍射单横模接近衍射极限的高斯光束分布光斑,用 MATLAB 进行数据处理得到的三维强度分布,输出光束为 TEM<sub>00</sub> 模式.图 10 为光纤激光

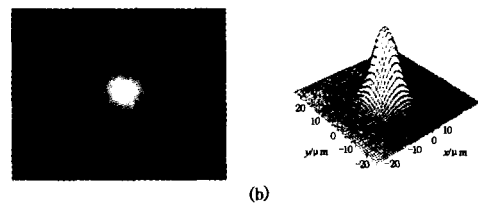
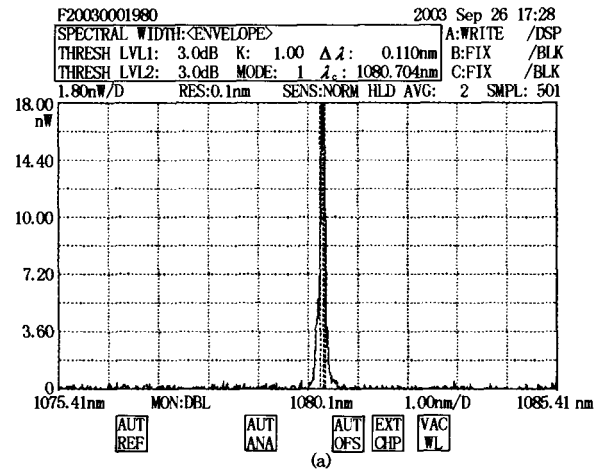


图 9 光纤激光器输出光谱(a)和光斑(b)  
Fig. 9 Output spectrum (a) and spot (b) of fiber laser

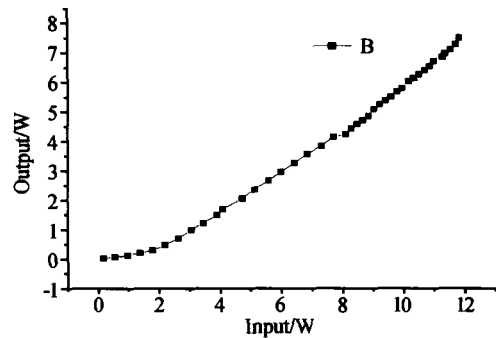


图 10 光纤激光器的输出功率特性曲线  
Fig. 10 Curve of output power characteristics of fiber laser

器的输出功率特性曲线.泵浦阈值功率为 1.5 W,最大入纤功率为 11.8 W,最大激光输出功率 7.5 W.斜效率 62.6%.同时光纤输出光谱上长波长侧远处出现几个较弱的次峰,这主要是由于在光纤光栅末端有一段较长普通光纤的散射作用所致.

### 4 结论

本文从激光器的速率方程出发对光纤激光器的工作原理以及输出特性进行了研究,得到了激光器



在稳态条件下阈值条件和激光器的输出功率的表达式. 利用数值模拟结果对光纤激光器基本参量进行分析和论证, 结果表明随光纤输出耦合率的减少, 阈值减少趋势比较缓慢, 在给定的输出反射率下激光器的阈值随传输损耗系数的增大而增大; 同时在输出反射率增加时, 激光器的阈值降低, 输出功率下降, 激光器的斜效率也随之降低. 为获得最佳能量输出和减小腔内功率密度, 应选择很低的输出镜反射率和很高的输入镜反射率. 对于一定的泵浦功率存在着一个最佳光纤长度. 得到在大于阈值条件下, 输出功率随泵浦功率的增加而线性增大, 这为光纤激光器的优化设计提供有效依据, 并在此基础上建立了全光纤型光纤激光器的实验装置. 利用半导体激光器光纤耦合模块进行了高能量双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器的实验研究. 谐振腔利用在双包层光纤一端熔接一只光纤光栅和光纤端面构成. 实验获得了 7.5 W, 波长为 1080 nm, 峰值半宽为 0.11 nm 的连续单模激光输出. 斜效率为 62.6%. 这个实验结果基本与理论分析相符合.

#### 参考文献

- 1 Pask H M, Archambault J L, Hanna D C. Operation of cladding-pumped Yb<sup>3+</sup>-doped silica fibre lasers in 1 μm region. *Electronics Letters*, 1994, **30**(11): 863~865
- 2 Inniss D, DiGiovanni D J, Strasser T A, et al. Ultrahigh-power single-mode fiber lasers from 1.065 μm to 1.472 μm using Yb-doped cladding-pumped and cascaded Raman lasers. *CLEO'97*, CPD-31, 1997
- 3 胡贵军, 潘玉寨, 郭玉彬, 等. 基于光纤光栅的高功率光纤激光器. *光子学报*, 2004, **33**(4): 405~408
- 4 Hu G J, Pan W Z, Guo Y B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 405~408
- 5 宁鼎, 傅成鹏, 丁镭, 等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器的实验研究. *光子学报*, 2001, **30**(4): 442~445
- 6 Ning D, Fu C P, Ding L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 442~445
- 7 冯鸣, 阮双琛, 杜晨林, 等. 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器中频率上转换产生可见光的实验研究. *光子学报*, 2004, **33**(6): 648~650
- 8 Feng M, Ruan S S, Du C L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 648~650
- 9 Paschotta R, Nilsson J, Tropper A C, et al. Ytterbium-doped fiber amplifiers. *IEEE J Quantum Electron*, 1997, **33**(7): 1049~1056
- 10 Dominic V, MacCormack S, Waarts R, et al. 100 W fiber laser. *Electron Lett*, 1999, **35**(14): 1158~1160
- 11 Hecht J. Fiber lasers prove versatile. *Laser Focus World*, 1998, **34**(7): 73~77
- 12 Dominic V, Comack S M, Waarts R. 110W fiber laser. *Electronics Letter*, 1999, **35**(14): 1158~1160
- 13 Platonov N, Gapontsev D, Gapontsev V, et al. 135W cw fiber laser with perfect single mode output. *Proc Conference on Lasers and Electro-Optics, USA, 2002*, post-deadline paper CPDC3
- 14 Pask H M, Carman R J, Hanna D C, et al. Ytterbium-doped silica fiber lasers: versatile sources for the 1 - 1.2 μm region. *IEEE J Select Top Quant Electron*, 1995, **1**: 2~13
- 15 Suni P J, Hana D C, Percival R M, et al. Laing characteristics of ytterbium, thulium and other rare earth doped silica based fibers. In: *Fiber Laser Sources and Amplifiers. Proc SPIE*, 1989, **1171**: 244~260

### Study on High-Energy Ytterbium-Ions-Doped Fiber Laser

Zhang Liang<sup>1,3</sup>, Zhang Jian<sup>2</sup>, Qin Li<sup>1,3</sup>, Zhang Chunlin<sup>1,3</sup>, Xu Wu<sup>4</sup>, Wang Lijun<sup>1,3</sup>

1 Key Laboratory of Excited-State Physics, CAS, Changchun 130033

2 Department of Electronics Engineer, Jilin University, Changchun 130026

3 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130022

4 University of Science and Technology of China, HeFei 230026

Received date: 2004-06-10

**Abstract** Operational principle and output characteristics of fiber laser were studied based on the rate equation. The threshold term and expression of output power of fiber laser were given at steady state. Using numerical simulation results, basic parameter of fiber laser was analyzed and demonstrated, and which is the theoretical basis for optimized design of fiber laser. Experimental method of all fiber structure fiber laser was put forward. Single-mode continuous laser output was realized, which is maximal power of 7.5W, wavelength of 1080 nm and half maximum full width of 0.11 nm.

**Keywords** Yb<sup>3+</sup>-doped fibers; Fiber gratings; Double-cladding fiber laser; All fiber structure

**Zhang Liang** was born in January 1971, in Jilin Province. He received the B. S. degree in Department of Physics and M. S. degree in the Department of Electronic Engineering of Jilin University in 1999 and 2002. Now he is studying for Ph. D. degree in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests are high power fiber laser and fiber grating, fiber amplifier.

