

文章编号: 0258-7025(2004)09-1025-05

# LD 抽运准三能级自倍频激光器的 计算与分析

薛迎红<sup>1</sup>, 王清月<sup>1</sup>, 柴 路<sup>1</sup>, 张志刚<sup>1</sup>, 孙 虹<sup>2</sup>

(天津大学<sup>1</sup> 精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室,<sup>2</sup> 理学院, 天津 300072)

**摘要** 对二极管激光器端面抽运的准三能级自倍频激光系统进行了详细的理论研究。首先,利用准三能级的速率方程和缓变包络近似,从 Maxwell 方程出发,建立了准三能级自倍频激光器空间耦合波方程。然后结合典型二极管激光器抽运 Yb:YAB 激光器的相关参数,用计算机模拟了该激光系统的数值解,理论结果显示自倍频光和基频光受晶体的温度影响很大,当晶体温度升高时,激光输出迅速降低;在有效倍频长度内,分别存在不同的最佳晶体长度使自倍频光和基频光输出最大;同时也得到了自倍频光与基频光强度成二次方变化的普遍倍频规律。最后利用  $M^2$  因子对自倍频光和基频光的相对强度受抽运光光束质量的影响作了定量分析。

**关键词** 激光技术;自倍频激光器;准三能级系统;耦合波方程;Yb:YAB 晶体

**中图分类号** O 437.4      **文献标识码** A

## Theoretical Calculation and Evaluation of Laser Diode Pumped Quasi-Three-Level Self-Frequency-Doubled Laser

XUE Ying-hong<sup>1</sup>, WANG Qing-yue<sup>1</sup>, CHAI Lu<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-gang<sup>1</sup>, SUN Hong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,

Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science, Ministry of Education,

<sup>2</sup>School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Based on Maxwell's equation, spatially coupling wave equation of self-frequency-doubled (SFD) lasers with quasi-three energy levels was derived by virtue of the rate equation of quasi-three energy levels system and the slowly varying envelop approximation, with the situation that the media end pumped. Characterization of SFD Yb:YAB [YAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>] lasers typically pumped by laser diode (LD) was numerically simulated. The simulation showed that intensity of SFD harmonic increased quadratically with the increase of intensity of fundamental harmonic, while intensity of SFD harmonic and fundamental harmonic decreased sharply with the increase of temperature. Within the effective doubled-frequency length, there are different optimal crystal lengths for fundamental and SFD harmonic output being maximum, respectively. Influence of quality of pumping beam on the fundamental and SFD harmonic output of laser was quantificationally evaluated by means of  $M^2$  factor.

**Key words** laser technique; SFD laser; quasi-three-level system; coupling-wave equations; Yb:YAB crystal

## 1 引 言

随着光电子技术的发展,人们对自倍频晶体及其器件产生了极大的兴趣。1969年,美国 Bell 实验

室首次制备了 Ti:LiNbO<sub>3</sub><sup>[1]</sup>,成功实现了自倍频运转。接着,又出现了 Nd:LiNbO<sub>3</sub>, Mg:Nd:LiNbO<sub>3</sub> 等<sup>[2]</sup>自倍频晶体的激光运转。1986年,陆宝生教授等<sup>[3]</sup>实现了 1.06 μm 到 0.53 μm 的自倍频绿光运

收稿日期:2003-06-10;收到修改稿日期:2003-07-17

基金项目:国家自然科学基金(60178008)和国家重点基础研究项目特别基金(G1999075201-2)资助课题。

作者简介:薛迎红(1978—),女,河北省景县人,天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光实验室硕士研究生,主要从事超短脉冲激光技术的研究。E-mail:xyh228@eyou.com

转。20 世纪 80 年代后期,半导体激光器得到了快速发展<sup>[4]</sup>,2002 年,赵圣之等<sup>[5]</sup>采用氙灯抽运自倍频晶体  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  (简称:  $\text{Nd}:\text{GDCOB}$ ),实现了被动调 Q 激光运转。

有关自倍频激光器的理论,文献[6,7]分别给出了一些理论结果。但是他们的理论模型都是基于 NYAB 给出的模型。而隶属四能级系统的 NYAB 不易获得高光学质量的单晶且在绿光波段有较强的吸收,对自倍频绿光输出不利。

以准三能级形式实现运转的  $\text{Yb}^{3+}$  激光系统,主要吸收峰在 980 nm 附近,与 InGaAs 制作的激光二极管(LD)的发射波长匹配,可以用 InGaAs 制作的 LD 作抽运源,而且晶体的浓度淬灭小,量子效率高,无可见光吸收。因而  $\text{Yb}^{3+}$  近来成为一种备受重视的激活离子。作为优良基质的 YAB 可以实现  $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$  最大的非线性光学效率。两者结合而生成的  $\text{Yb}:\text{YAB}$  晶体不论在基频光输出还是倍频光方面都处于领先水平,因此,LD 抽运的  $\text{Yb}:\text{YAB}$  激光器有着很广阔的应用前景。对于这种新型的激光系统目前还没有详细的理论研究。

本文报道了准三能级系统自倍频激光器的理论研究结果,从准三能级速率方程出发,采用缓变包络近似,建立了准三能级自倍频激光器空间耦合波方程。用计算机模拟了  $\text{Yb}:\text{YAB}$  激光器的数值解。获得了输出的倍频光随基频光、输入的抽运光强度以及晶体长度的变化而改变的函数关系,计算结论与文献[8]试验结果基本相符。还讨论了该激光器的基频光和倍频光相对强度受温度以及抽运光光束质量的影响情况。

## 2 速率方程理论

对于一个准三能级激光器,如果只考虑单向抽运,则取决于该系统的速率方程为<sup>[9]</sup>

$$\frac{d\Delta N}{dt} = -\frac{\Delta N + f_a N_0}{\tau} + (f_b + f_a)R(x, y, z, t) - (f_b + f_a)\Delta N \sigma C_n S(x, y, z, t) \quad (1)$$

$$\frac{dS(x, y, z, t)}{dt} = \Delta N \sigma C_n S - \frac{S(x, y, z, t)}{T} \quad (2)$$

其中,  $\Delta N$  为激光器的反转粒子数密度,  $N_0$  为介质的掺杂浓度,  $f_b, f_a$  分别为参与激光作用的上下激光能级粒子数占所在整个能级粒子数的比值,一般情况下它决定于玻尔兹曼分布率。 $\tau$  为激光上能级寿命,  $\sigma$  为介质的激光发射截面,  $C_n$  为介质内的基频光传播速度,  $T$  为激光的光子寿命,  $R(x, y, z, t)$  为

抽运速率密度。一般  $R(x, y, z, t) = R(t)r(x, y, z)$ , 式中  $R(t)$  为整个谐振腔的抽运速率,可以唯象地认为,它由下式决定:  $R = \eta_p \eta_a P_{in} / h\nu_p$ ,  $\eta_p$  为量子效率,  $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha_p l)$  为吸收效率,  $\alpha_p$  为介质对抽运光的吸收系数。  $P_{in}$  为输入的抽运光功率。  $r(x, y, z)$  为归一化抽运速率空间分布函数(这里只考虑激光器工作在连续或准连续的状态下,这个函数没有时间因子)。考虑到纵向抽运时,增益介质对抽运光的吸收,利用归一化条件得到抽运光的光场分布函数为

$$r(x, y, z) = \frac{2\alpha_p \exp(-\alpha_p z)}{\pi \omega_p^2(z) \eta_a} \exp\left\{-2\left[\frac{x^2 + y^2}{\omega_p^2(z)}\right]\right\},$$

$$\omega_p(z) = \omega_{p0} + \theta|z - z_p|$$

为抽运光的光斑半径。  $S(x, y, z, t) = S(t)s_0(x, y, z)$  是所有横模光子数密度之和,在稳态激光腔内  $S(x, y, z, t) \propto s_0(x, y, z)$ , 而基模光场分布为高斯分布,得到归一化的激光场空间分布函数为:  $s_0(x, y, z) = \frac{2}{\pi \omega_0^2(z)} \times \exp\left[-2\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2(z)}\right]$ , 一般情况下固体激光器抽运用的 LD 输出光是高次横模,所以采用  $M^2$  因子的表示

方法,模式匹配时  $\omega_0(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda z}{\pi \omega_0}\right)^2}$  是  $z$  处的激光光斑半径。它和后面要讨论的激光器的  $M^2$  因子是一致的。

将上式代入(2)式,在稳态情况下可以得到激光的空间变化方程

$$\frac{dI}{dz} = \frac{2\sigma f \eta_p \alpha_p \exp\left[-2\frac{x^2 + y^2}{\omega_p^2(z)} - \alpha_p z\right] I_{in} - \sigma f_a N_0}{1 + \frac{\sigma f I}{h\nu_1}} I$$

$$\frac{\delta I}{L} \quad (3)$$

其中,  $f = f_a + f_b$ ,  $I_{in}$  为输入的抽运光强度。

自倍频晶体作为非线性介质,在 I 类相位匹配,且有一定的相互作用长度时,要实现高效率转换应满足以下条件:1) 耦合波是共线相位匹配的;2) 介质几乎无损耗;3) 缓变包络近似成立。这里假设基频光和倍频光都沿  $z$  傍轴传播,从 Maxwell 方程,可以推导出二次谐波产生的非线性耦合方程

$$\frac{dI_1(z)}{dz} = -A_1 d_{\text{eff}}^{(2)} I_1(z) \sqrt{I_2(z)}$$

$$\frac{dI_2(z)}{dz} = A_1 d_{\text{eff}}^{(2)} I_1(z) \sqrt{I_2(z)} \quad (4)$$

其中,  $A_1 = \frac{8\pi \omega_1}{n_1 c} \sqrt{\frac{2}{cn_2 \epsilon_0}}$ ,  $c$  为真空中的光速,  $n_1, n_2$  分别为介质对基频光和倍频光的折射率,  $d_{\text{eff}}^{(2)}$  为介

质的二阶有效非线性系数。

在自倍频激光器中,基频光在介质内传播得到增益,同时,由于非线性效应,部分能量转化成倍频光的能量,即二次谐波的产生是消耗基频光的能量得到的。另外,基频光和倍频光都存在损耗,尤其倍频光输出损耗很大。而对于 Yb:YAB 晶体,没有倍频光的吸收损耗。鉴于以上考虑,可以得到下面准三能级自倍频激光器的空间非线性耦合波方程组

$$\frac{dI_1}{dz} = \frac{A_2 I_{in} \exp\left[-2 \frac{x^2 + y^2}{w_p^2(z)} - \alpha_p z\right] - A_3}{1 + I_1/I_s} I_1 - \frac{\delta_1}{L} I_1 - A_1 d_{eff}^{(2)} I_1 \sqrt{I_2} \quad (5)$$

$$\frac{dI_2}{dz} = A_1 d_{eff}^{(2)} I_1 \sqrt{I_2} - \frac{\delta_2}{L} I_2 \quad (6)$$

式中,  $A_2 = \frac{2\sigma f \eta_p \alpha_p}{\pi h \nu_p}$ ,  $A_3 = \sigma f_a N_0$ ,  $I_s = \frac{f \tau \sigma}{h \nu_1}$  为基频光的可饱和光强,  $\delta_1$  和  $\delta_2$  分别为基频光和倍频光的损耗总和,  $L$  为激光器的腔长。

### 3 计算结果和讨论

对于这种典型的准三能级激光系统,表 1<sup>[10,11]</sup> 给出了 Yb:YAB 激光器的优化设计参数。

表 1 Yb:YAB 激光器的相关参数  
Table 1 Parameters of Yb:YAB laser

$n_1$	1.78	$n_2$	1.73
$\sigma$	$0.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$	$d_{eff}^{(2)}$	1.4 pm/V
$\nu_1$	$2.82 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$\nu_2$	$5.64 \times 10^{14} \text{ Hz}$
$\nu_p$	$3.074 \times 10^{14} \text{ Hz}$	$\eta_p$	1
$\tau$	$6.8 \times 10^{-4} \text{ s}$	$\alpha_p$	17.052/cm
$N_0$	$3.1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$	$L$	100 cm

采用数值方法求解上述准三能级自倍频激光器的耦合波方程,得出了激光器主要参数之间的关系。

图 1 给出了基频光和倍频光强度随吸收的抽运光强度的变化曲线。从图中可以看出,基频光的强度与输入的抽运光强度成线性关系,而倍频光与抽运光强度成二次方关系。这与四能级系统得出的结论尽管相同,但是却有着不同的物理意义。文献[3]在利用表 1 中的掺杂浓度和腔结构条件下得到基频光斜率效率为 48%,倍频光转换效率约等于 10%,与本文的计算结论基本一致。因为倍频系数的计算没有考虑其他方面的影响,所以比起实验值倍频光强度(11.5%)稍微偏高一些。图 2 显示的是倍频绿

光输出强度随基频光强度的变化,当基频光逐渐增加时,倍频光强度几乎以二次方关系迅速增强。这符合倍频效应的基本特征。

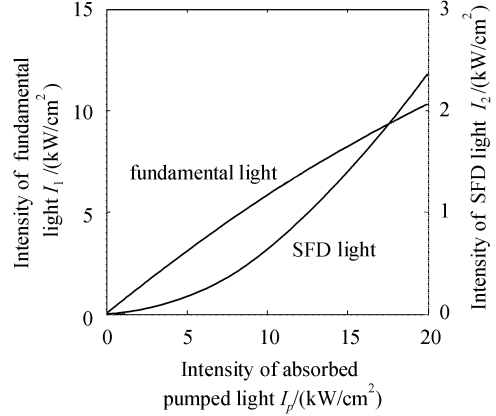


图 1 激光强度随抽运光强度的变化曲线

Fig. 1 Output laser intensity as a function of absorbed pumped light intensity

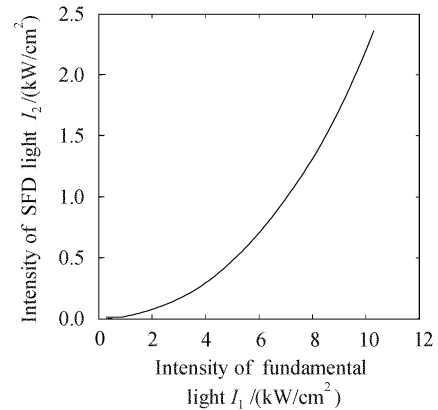


图 2 倍频光随基频光强度变化的曲线

Fig. 2 Output frequency-doubled intensity versus fundamental intensity

图 3 表示基频光和倍频光的强度随晶体长度变化的曲线。从图中可以看出对于输出基频光和倍频光强度,都存在一个最佳晶体长度使激光强度最大。但是,两者并不重合,对应的倍频光的最佳长度比基频光稍长,而且变化趋势也比较平缓。这是因为介质对可见光没有吸收,当基频光开始降低时,倍频光仍在不断累加,而当它的增益与散射等其他方面的损耗接近,甚至小于损耗时,其强度逐渐减小。

对于准三能级系统而言,激光下能级的粒子数分布是不能忽略的,而它受温度的影响很大,所以图 4 给出了基频光和倍频光输出的相对强度随温度的变化曲线。从图中可以看出,倍频光随温度的增加衰减得非常快,因此,应用准三能级自倍频激光器工

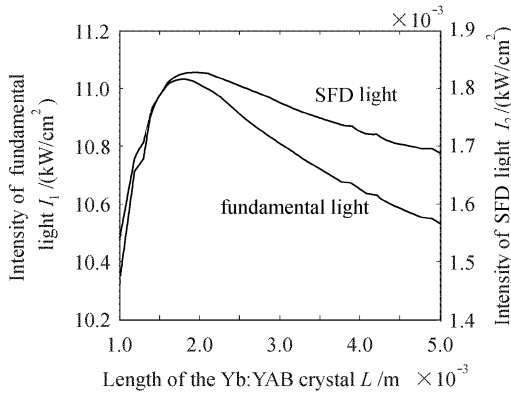


图 3 基频光和倍频光受晶体长度影响的曲线  
Fig. 3 Output laser intensity versus crystal length

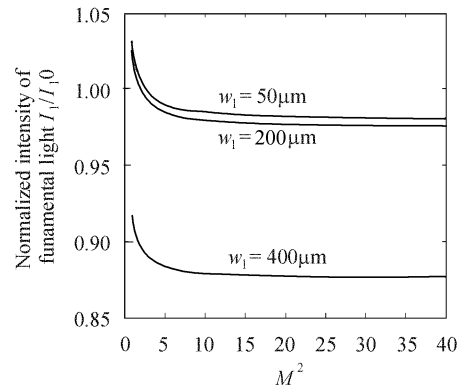


图 6 基频光相对强度随抽运光 M² 因子的变化  
Fig. 6 Fundamental-frequency intensity versus M² factor

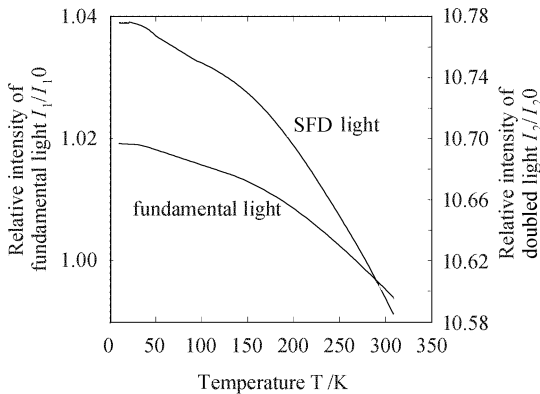


图 4 基频光和倍频光强度随温度的变化  
Fig. 4 Laser intensity versus temperature

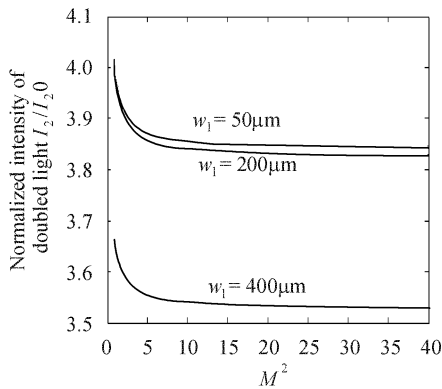


图 5 倍频光相对强度随抽运光 M² 因子的变化  
Fig. 5 Frequency-doubled intensity versus M² factor

作时,若想获得较高效率的基频光和倍频光应该将温度控制在较低的范围。

尽管 LD 抽运激光器是实现全固态激光的理想抽运源,但是,LD 的光束质量却是考虑实验条件时不可忽略的因素。为此,在图 5 和图 6 中分别给出了输出的倍频光和基频光的相对强度受抽运光的光束因子 M² 影响变化的曲线图。该图表明,由于抽运

光的光束质量下降(M² 因子的增加),基频光和倍频光相对强度都快速下降,尤其激光的光腰较大时,激光的相对强度更低。

### 4 结 论

利用准三能级速率方程并从 Maxwell 方程出发,导出了准三能级自倍频激光器的耦合波速率方程。结合典型的激光系统 Yb:YAB 激光器的相关参数得出了该方程的数值解。结果表明,输出激光受抽运光强度的影响较大,尤其是倍频光与抽运光的强度成二次方关系;而基频光和倍频光都存在一个最佳的晶体长度使其强度达到最大;同时,结果还显示当温度升高,或者抽运光源的光束质量下降(M² 因子增大)时,都会导致输出激光的强度急速下降,尤其对于倍频光这些因素的影响更为明显。所以,对于准三能级激光系统,如果想得到较高功率倍频光应该选择适当的晶体长度,控制在较低的温度下,在逐渐提高输入抽运光强度的同时,尽量地改善光源的光束质量。

致谢 作者非常感谢山东大学王继扬教授和李静工程师的有益帮助。

### 参 考 文 献

- 1 L. F. Johnson, A. A. Ballman. Coherent emission from rare earth ions in electro-optic crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**(1): 297~302
- 2 V. G. Dmitriev, E. V. Raevskii, N. M. Rubina *et al.*. Simultaneous emission at the fundamental frequency and the second harmonic in an active nonlinear medium; neodymium-doped lithium metaniobate [J]. *Sov. Technol. Phys. Lett.*, 1979, **5**(11): 590~591
- 3 Lu Baosheng, Wang Jiyang, Pan Hengfu *et al.*. Excited emission and self-frequency-doubling effect of

- $\text{Nd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$  crystal [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1986, **3**(9):413~416
- 4 Xin Guofeng, Chen Guoying, Feng Rongzhu *et al.*. InGaAs/AlGaAs semiconductor laser 2-D arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):684~686  
辛国锋,陈国鹰,冯荣珠 等. InGaAs/AlGaAs 半导体激光器二维阵列[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):684~686
- 5 Zhao Shengzhi, Wang Jiyang, Zheng Jia'an *et al.*. Passively Q-switched self-frequency doubling  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  laser with  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  saturable absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1):50~53  
赵圣之,王继扬,郑加安 等. 新型  $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  自倍频晶体  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 激光特性研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1):50~53
- 6 Yang Aiping, Liu Enquan, Hou Xueyuan *et al.*. Theory and experiment study of nonlinear active multifunctional crystal NYAB laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(2):103~108  
杨爱萍,刘恩泉,侯学元 等. 非线性激活复合功能晶体 NYAB 激光器理论及实验研究[J]. *光学学报*, 1990, **10**(2):103~108
- 7 Zhao Tingjie, Luo Zundu. Space-dependent rate-equations of LD end-pumped NYAB laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(9):1199~1204  
赵挺洁,罗遵度. 激光二极管抽运 NYAB 激光器的空间分布速率方程的研究[J]. *光学学报*, 1995, **15**(9):1199~1204
- 8 Patter Dekker, Judith M. Dawes, James A. Piper *et al.*. 1.1 W CW self-frequency-doubled diode-pumped  $\text{Yb}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  laser [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **195**:431~436
- 9 T. Y. Fan. Heat generation in  $\text{Nd}:\text{YAG}$  and  $\text{Yb}:\text{YAG}$  [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(6):1457~1459
- 10 Huaidong Jiang, Jing Li, Jiyang Wang *et al.*. Growth of  $\text{Yb}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$  crystals and their optical and self-frequency-doubling properties [J]. *J. Crystal Growth*, 2001, **233**(1/2):248~252
- 11 Pu Wang, Judith M. Dawes, Peter Detter *et al.*. Growth and evaluation of ytterbium-doped yttrium aluminum borate as a potential self-doubling laser crystal [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(1):63~69

## 单端抽运国产 D 形双包层光纤激光器实现 输出功率 200 W\*

掺镱双包层光纤激光器是国际上新近发展的一种新型高功率激光器件,由于其具有光束质量好、效率高、易于散热和易于实现高功率等特点,近年来发展迅速,并已成为高精度激光加工、激光雷达系统、光通信及目标指示等领域中相干光源的重要候选者,在军事上也有着广泛的应用潜力。最近我们在百瓦级光纤激光器的技术基础上,在单端抽运的情况下,使得单根光纤激光的输出功率达到 200 W 以上。

实验中采用典型的 F-P 腔结构,中心波长在 975 nm,准直输出的高功率半导体激光器作为抽运源,光斑尺寸约为 40 mm×40 mm。所用双包层光纤为掺 Yb 的石英光纤,内包层形状为 D 形(360/400 μm),数值孔径为 0.48,光纤长度约为 24 m,在光纤的抽运端紧贴一双色片作为腔片。为了保护抽运端面光纤的涂覆层,我们采用空间滤波技术和特殊设计的非球面透镜,用于将抽运光束聚焦,从而得到和光纤内包层相匹配的聚焦光斑。采用这种技术,我们可以将高达 300W 的抽运光成功耦合入双

包层光纤,并实现了 200 W 以上的激光功率输出,光-光转换效率近 70%。

高性能掺镱双包层光纤是高功率光纤激光器的关键技术之一,我们采用国产 D 形内包层的双包层光纤(内包层尺寸约为 400/450 μm,数值孔径为 0.36),借助于上述的抽运耦合系统,实现了 111 W 的激光功率输出,通过选用合适的聚焦透镜和光纤长度,这种国产光纤还望实现更高的激光功率输出。

<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所,  
上海 201800  
<sup>2</sup> 烽火通信科技股份有限公司,  
湖北 武汉 430079  
楼祺洪<sup>1</sup>, 周 军<sup>1</sup>, 朱健强<sup>1</sup>,  
孔令峰<sup>1</sup>, 薛 冬<sup>1</sup>, 吴中林<sup>1</sup>,  
董景星<sup>1</sup>, 魏运荣<sup>1</sup>, 叶震寰<sup>1</sup>,  
凌 磊<sup>1</sup>, 王之江<sup>1</sup>, 李进延<sup>2</sup>, 李诗愈<sup>2</sup>  
收稿日期:2004-08-18