

LD 端面抽运 $1.5 \mu\text{m}$ $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 激光器

李渊骥¹ 焦月春¹ 冯晋霞¹ 张宽收¹ 陈雨金² 林炎富² 黄艺东²

(¹山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

²中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002

摘要 报道了一种基于 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 晶体的 $1.5 \mu\text{m}$ 固体激光器。为了解决由晶体严重的热效应所导致的激光器转化效率较低以及无法连续运转的问题, 对控温炉设计以及抽运光源参数, 如调制频率、占空比和腰斑尺寸等, 进行了实验优化, 从而减小了晶体的热负载, 提高了准连续激光器的输出性能。在抽运源调制频率为 40 Hz, 占空比为 10%, 抽运光腰斑半径为 $80 \mu\text{m}$, 注入功率为 17.6 W 时, 获得了 2.6 W 的准连续 $1.5 \mu\text{m}$ 激光输出, 斜率效率为 18.1%; 同时在抽运功率为 5 W 时, 实现了 290 mW 的连续单横模 $1.5 \mu\text{m}$ 激光输出, 斜率效率为 8.5%。

关键词 激光器; $1.5 \mu\text{m}$ 激光; $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ 晶体; 热效应; 抽运光腰斑半径

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201340.0102007

A Diode-End-Pumped $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ Laser at $1.5 \mu\text{m}$

Li Yuanji¹ Jiao Yuechun¹ Feng Jinxia¹ Zhang Kuanshou¹ Chen Yujin²

Lin Yanfu² Huang Yidong²

¹ State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China
² Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Science, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract A diode-pumped solid-state laser at $1.5 \mu\text{m}$ by use of the $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal is presented. Initially, the laser efficiency is quite low and can not be operated continuously owing to the serious thermal effect. To solve these problems, the oven design and pumping source parameters including operation frequency, duty cycle and waist radius are optimized for reducing the crystal's thermal deposition. A more efficient quasi continuous-wave (CW) laser which can produce output power of 2.6 W at $1.5 \mu\text{m}$ is realized when the pumping source is set as modulated frequency of 40 Hz, duty cycle of 10%, pumping waist radius of $80 \mu\text{m}$ and incident power of 17.6 W. Furthermore, a CW single-transverse-mode laser with output power of 290 mW and slope efficiency of 8.5% is also demonstrated under pumping power of 5 W.

Key words lasers; $1.5 \mu\text{m}$ laser; $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ crystal; thermal effect; pumping waist radius

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.6810

1 引 言

$1.5 \mu\text{m}$ 激光光源的输出波长对应着大气和光纤的低损耗传输窗口, 同时又具有人眼安全的性质, 因此它在光纤通信、激光测距以及遥感探测等领域

均有着广泛的应用^[1~3]。利用 Yb^{3+} 对 976 nm 抽运光的大的吸收截面以及 $\text{Er}^{3+} {}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 能级的跃迁辐射, 采用激光二极管(LD)端面抽运钇镱共掺激光介质的固体激光器是获得高质量 $1.5 \mu\text{m}$ 激光输

收稿日期: 2012-08-01; 收到修改稿日期: 2012-09-10

基金项目: 国家重大科学研究计划(2010CB923101)、国家自然科学基金(61227015)资助课题。

作者简介: 李渊骥(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: shanxiluyuanji@yahoo.cn

导师简介: 张宽收(1965—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事量子光学及全固态激光技术方面的研究。

E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn(中国光学学会会员号: S040420365S)

出的一种有效方式。这种方法具有结构紧凑、激光转化效率高、光束质量好、可调谐以及成本较低等优点,因而在激光测距仪等小型化的人眼安全激光器件中得到了广泛的应用。此外,与 $1.5\ \mu\text{m}$ 半导体激光器和掺铒光纤激光器相比, $1.5\ \mu\text{m}$ 固体激光器,特别是在实现单频运转之后,能够提供优越的低噪声性能,这使得它在引力波探测、高精度度光谱、精密测量、量子光学研究,以及量子通讯等对光源噪声要求严格的领域均有着广阔的应用前景^[4~6]。

钇镱共掺激光材料中,研究较早的是钇镱共掺磷酸盐玻璃,在过去的几十年中,人们已经对它进行了大量的理论和实验研究,并获得了 $350\ \text{mW}$ 的连续 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光输出和峰值功率为 $100\ \text{MW}$ 的调 Q 输出^[7~11]。但是由于玻璃基质抗激光损伤能力和热传导性能差,这一类激光器很难实现较高的输出能量和重复工作频率。相比于磷酸盐玻璃,硼酸盐晶体具有更好的热性质,特别是 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4(\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB})$ 晶体,它的热传导率是钇镱共掺磷酸盐玻璃的 7 倍左右,热冲击波参数比钇镱共掺的磷酸盐玻璃高 7 倍左右,从而可以承受更高的抽运功率^[12]。最近几年,国内外诸多科研人员^[12~16] 均对 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ 晶体的制备和激光性能进行了实验研究。2006 年,Chen 等^[15] 利用 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ 晶体,在抽运功率为 $15.5\ \text{W}$, 占空比为 2% 的条件下,实现了 $2\ \text{W}$ 的准连续 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光输出^[15]。2007 年,Tolstik 等^[16] 报道了利用 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ 晶体实现 $1\ \text{W}$ 的连续 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光输出,斜率效率为 35%。

2009 年,本课题组也开展了 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ 固体激光器的研究工作。在最初的实验中,由于未采取良好地温度控制措施,再加上共协上转换(CUP)、激发态吸收(ESA)等过程均会消耗激光上能级的反转粒子数并且导致大量的无辐射跃迁过程,晶体内的热沉积严重,激光器只能在准连续抽运下工作,并且激光效率较低。为了减小晶体的热负载,对晶体的散热方式进行了优化设计,并实验对比了不同的抽运源调制频率、占空比以及抽运光腰斑半径下的准连续激光输出性能。在抽运功率为 $17.6\ \text{W}$, 调制频率为 $40\ \text{Hz}$, 占空比为 10%, 抽运光腰斑半径为 $80\ \mu\text{m}$ 的条件下,获得了 $2.6\ \text{W}$ 的准连续 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光输出。同时通过对晶体热效应的改善,在抽运功率为 $5\ \text{W}$ 时,实现了 $290\ \text{mW}$ 的连续单横模 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光运转。

2 实验与讨论

2.1 实验设计

图 1 为 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ 激光器的实验装置图。抽运源采用尾纤输出的高功率 LD (型号为 JOLD-30-FC-12-980), 通过控制可脉冲调制的恒流源, 实现占空比可调的准连续抽运和连续抽运。采用自制控温仪将 LD 温度控制在 $24\ ^\circ\text{C}$, 使其输出中心波长位于 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ 晶体的吸收峰 ($976\ \text{nm}$)。LD 尾纤芯径为 $200\ \mu\text{m}$, 数值孔径为 0.22。采用两片焦距为 $50\ \text{mm}$ 的透镜 (f_1, f_2) 对抽运光进行整形聚焦, 聚焦在晶体上的抽运光腰斑半径约为 $100\ \mu\text{m}$ 。激光谐振腔采用凹凹腔, 输入耦合镜为平凹镜 (曲率半径 $\rho_1 = -51.8\ \text{mm}$, 对 $1560\ \text{nm}$ 激光高反), 输出耦合镜为平凹镜 (曲率半径 $\rho_2 = -100\ \text{mm}$, 对 $1560\ \text{nm}$ 激光的透射率 $T = 2\%$), 两个激光腔镜之间的距离为 $102\ \text{mm}$, 输入镜与晶体之间的距离为 $4\ \text{mm}$ 。使用自制控温仪将晶体的温度控制在 $15\ ^\circ\text{C}$ 。

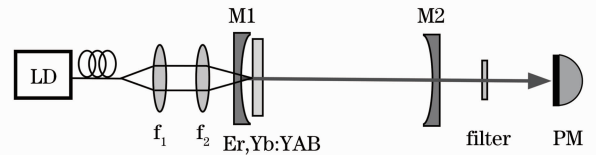


图 1 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ 激光器实验装置

Fig. 1 Experimental setup of $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ laser

2.2 晶体掺杂浓度的选择

实验中分别采用 3 块不同参数的 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ 晶体作为增益介质进行激光性能的实验研究, 3 块晶体均未镀膜, 并沿 c 轴切割。晶体的掺杂浓度(原子数分数)及长度如表 1 所示。

表 1 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ 晶体参数

Table 1 Parameters of the $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAB}$ crystals

Sample	Doped concentration of $\text{Er}^{3+} / \%$	Doped concentration of $\text{Yb}^{3+} / \%$	Length / mm
Crystal 1	1.1	25	0.74
Crystal 2	1.0	15	0.90
Crystal 3	1.5	10	1.58

在准连续抽运的条件下进行对比实验, 设定抽运源占空比为 25%, 调制频率为 $30\ \text{Hz}$, 分别测试 3 块晶体的输出功率特性, 实验结果如图 2 所示。使用晶体 1 作为增益介质时, 激光输出的阈值为 $1.9\ \text{W}$, 比晶体 2 和 3 低 $1.2\ \text{W}$; 斜率效率为 12.5%, 高于晶体 2 的 2.6% 和晶体 3 的 4.5% 的斜率效率。根据理论计算结果, 晶体 1 和 2 对应的反转粒子数密度

非常接近,并且明显高于晶体 3。对于晶体 2,虽然较大的晶体尺寸使其对应的反转粒子数密度较小,但是其 Er^{3+} 掺杂浓度与理论计算的最优值相差并不大,因此估计导致晶体 2 输出性能差的主要原因是晶体内部掺入的其他杂质带来的损耗。晶体 3 较高的 Er^{3+} 掺杂浓度导致离子间的共协上转换效应严重,而且较低的 Yb^{3+} 掺杂浓度使得能量转移效率降低,所以该晶体的激光输出斜率效率较低^[17]。综合考虑以上因素,在后续实验中选择晶体 1 作为激光器的增益介质。

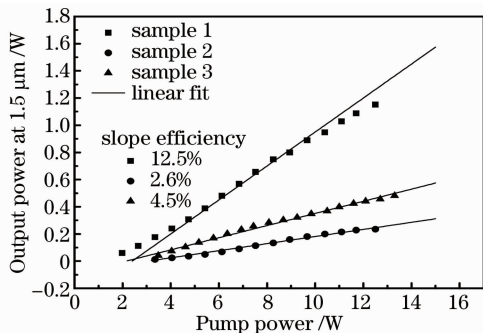


图 2 25% 占空比下,使用 3 块不同晶体获得的 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YAB}$ 激光输出功率特性曲线

Fig. 2 Output power characteristic curves of $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YAB}$ laser with three different crystals under duty cycle of 25%

2.3 控温炉优化设计

在本文设计的晶体控温装置中,激光晶体被 2 片抛光的、中心有通光孔的紫铜薄片紧密夹持并固定在通水热沉上。然后在炉体与热沉之间放置半导体制冷器(TEC)并压紧,最后通过一台自制的控温仪驱动 TEC 将晶体温度稳定控制在 15°C 。考虑到该控温系统的效率很高,可以对晶体表面与炉体接触的部分做恒温近似,即将晶体等效为一段长度很短、直径与炉体通光孔径相同的圆柱。因此在晶体内部生热率不变的条件下,如果减小控温炉通光孔径,晶体中心温度将大幅降低,而相对的温度梯度也会随之降低,从而能够有效地减轻晶体的热效应^[18]。

利用 2 个通光孔径分别为 2 mm 和 1 mm 的控温炉在准连续抽运的条件下进行对比实验,设置抽运源占空比为 25%,调制频率为 30 Hz。图 3 为相关的实验结果,在采用通光孔径为 1 mm 的控温炉之后,激光输出的斜率效率相比于控温炉通光孔径为 2 mm 时的实验结果有了明显的提高,达到了 14%,并在抽运功率为 14.6 W 时获得了 1.54 W 的准连续激光输出。

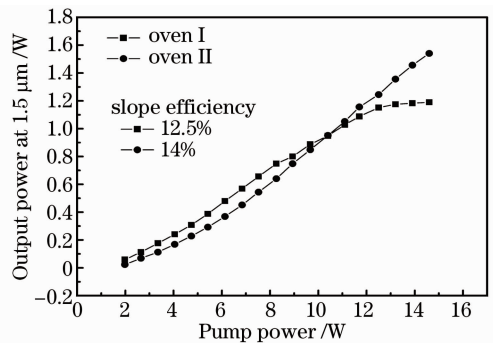


图 3 不同控温炉通光孔径下 $1.5 \mu\text{m}$ 激光器的输出功率特性曲线(控温炉 I: 2 mm; 控温炉 II: 1 mm)

Fig. 3 Output power characteristic curves of laser at $1.5 \mu\text{m}$ with different oven clear apertures. I: 2 mm; oven II: 1 mm

2.4 抽运源参数的优化

在准连续抽运功率一定的条件下,抽运源的调制频率和占空比直接决定了晶体的热负载,进而影响激光输出性能。使用晶体 1 作为增益介质,研究了在不同调制频率和占空比条件下激光器的输出特性。首先在占空比 25% 的条件下,对抽运调制频率进行了实验优化,实验结果如图 4 所示。当调制频率小于 40 Hz 时,由于每个运转周期内激光工作时间过长,会导致热量积累过多;而调制频率大于 40 Hz 时,每个运转周期内的空闲时间较短,在高抽运功率条件下,晶体内产生的热量也不能在短时间内完全散失。因此,当调制频率为 40 Hz 时,激光晶体的热负载较小,激光器输出性能最佳。

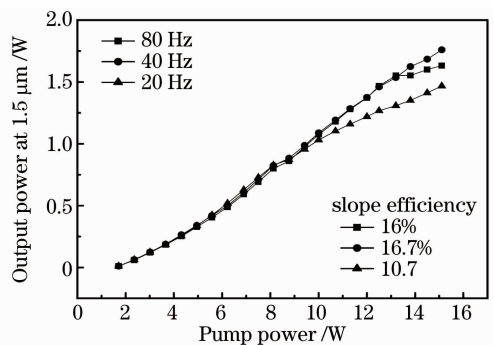


图 4 $1.5 \mu\text{m}$ 激光器在不同抽运频率下的输出功率特性曲线(占空比为 25%)

Fig. 4 Output power characteristic curves of laser at $1.5 \mu\text{m}$ with different pulse repetition rates (duty cycle of 25%)

将抽运调制频率固定为 40 Hz,逐渐改变抽运光的占空比,并使激光器实现连续工作。激光器的输出功率曲线如图 5 所示,可以看到,随着抽运源占空比的增大,由于晶体热负载的增加,激光输出的斜

率效率大幅降低。同时实验观察到,激光晶体达到损伤阈值时抽运功率也从准连续抽运时的22 W降低到连续运转时的8.5 W。由于激光晶体吸收抽运光在晶体内积累热负荷,会产生热分布梯度和热应力。热分布梯度会导致晶体热透镜效应,这是在激光谐振腔设计中必须考虑的。而热应力达到一个临界值时,会导致晶体热损伤。在准连续抽运的条件下,单个抽运周期内的工作时间通常只有几毫秒,热量积累时间相对较短,达到热损伤阈值的抽运功率就比较大。随着抽运光占比提高,晶体热效应也逐渐严重,达到热损伤阈值的抽运功率也随之下降。当激光器连续工作时,晶体热效应最严重,达到热损伤阈值的抽运功率也最小,仅为8.5 W。

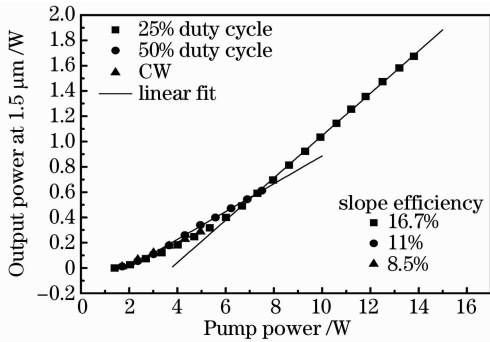


图5 激光器在不同抽运源占空比下的输出功率特性曲线

Fig. 5 Output power characteristic curves of laser with different duty cycles of pump source

当激光器连续运转时,在5 W的抽运功率下,激光器的最大连续输出功率达290 mW,斜率效率为8.5%。利用光束质量分析仪(型号为Spricon M2-200-BB; CCD型号为SP-1550M)测量出激光器输出激光的光束质量为单横模输出,其光束质量因子 $M_x^2 = M_y^2 = 1.18$ 。

抽运光源的另一个重要参数是抽运光腰斑半径,它对抽运速率和晶体温度的空间分布均有重要影响。通过改变准直聚焦系统中聚焦透镜的焦距控制抽运光腰斑半径大小,研究准连续1.5 μm激光输出的斜率效率 η 和抽运阈值 P_{th} 随抽运光腰斑半径 ω_p 的变化关系。其中抽运源占空比设置为25%,调制频率为40 Hz。根据如图6所示的实验结果, $\eta-\omega_p$ 与 $P_{th}-\omega_p$ 曲线均为缓变的“峰形”,且极值点均位于 $\omega_p = 80 \mu\text{m}$ 附近,但变化趋势完全相反。在 $\omega_p = 80 \mu\text{m}$,抽运功率为15 W时,准连续激光输出具有最高的斜率效率和最低的阈值抽运功率,分别为17.5%和1.1 W。根据理论分析结果,当

抽运光腰斑半径大于100 μm时,过大的抽运光腰斑半径会导致反转粒子数大幅减小,低增益造成了激光器的高阈值和低的斜率效率;而在抽运腰斑半径小于60 μm时,由于抽运光能量更为集中,在高抽运功率下会导致晶体对抽运光功率的吸收饱和以及更大的温升,同样不利于高效率激光运转。

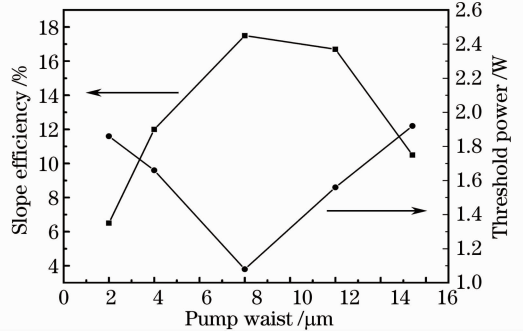


图6 激光斜效率和抽运阈值随腰斑半径的变化关系
Fig. 6 Slope efficiency and threshold power versus pumping waist radius

2.5 激光输出

在抽运光腰斑半径为80 μm,抽运频率为40 Hz时,将占空比减小为10%,可以预计晶体的热负载必然进一步减弱,因此将抽运功率增加到17.6 W。此时的实验结果如图7所示,准连续激光输出功率达到2.6 W,斜率效率为18.1%,阈值为2.2 W。与图5中占空比为25%时的结果相比,输入输出曲线在整个抽运范围内都具有良好的线性性质,这也表明在进一步降低占空比之后,晶体热效应随抽运功率的变化已经对激光输出几乎没有影响。此外,利用数字示波器监视了抽运功率为17.6 W时的抽运光波形和输出激光波形(如图8所示),可以看到,输出激光相比于抽运光的延迟极短,同时也具有较好的波形平整度。因此,该激光器可以在毫秒时间的工作应用中替代连续1.5 μm激光器。

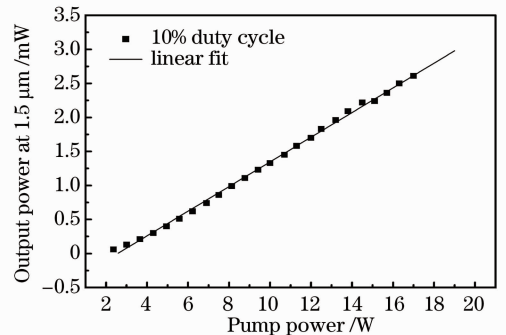


图7 1.5 μm激光输出功率特性曲线($\omega_p = 80 \mu\text{m}$)
Fig. 7 Output power characteristic curves of laser at 1.5 μm ($\omega_p = 80 \mu\text{m}$)

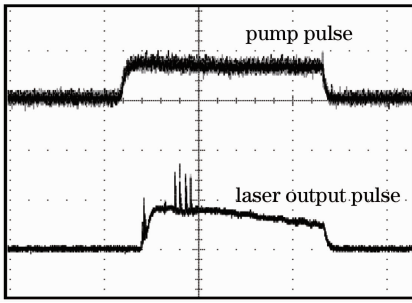


图 8 抽运脉冲和 $1.5 \mu\text{m}$ 激光输出波形(抽运功率为 17.6 W)

Fig. 8 Oscillograms of the pump pulse and laser output pulse at $1.5 \mu\text{m}$ with pump power of 17.6 W

3 结 论

实验获得了一台高功率的 LD 端面抽运 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YAB}$ 激光器。通过改善晶体控温炉设计,优化抽运源参数设置,实现了 290 mW 的连续单横模 $1.5 \mu\text{m}$ 激光运转和 2.6 W 的准连续 $1.5 \mu\text{m}$ 激光运转。通过对比激光器连续与准连续输出性能,可以看到晶体的热效应非常严重,并且制约了激光器运转效率的提高。因此,通过进一步改善晶体致冷方式,将有望获得更高的连续输出功率,并进而实现 $1.5 \mu\text{m}$ 连续单频激光运转。

参 考 文 献

- 1 M. Arumugam. Optical fiber communication-an overview [J]. *Pramana - J. Phys.*, 2001, **57**(5, 6): 849~869
- 2 Do-Hyun Park, Hyoung-Ha Jeon, Saung-II Oh. Eyesafe microchip laser for laser range finder application [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(s1): 243~245
- 3 A. J. McGrath, J. Munch, G. Smith *et al.*. Injection-seeded, single-frequency, Q-switched erbium: glass laser for remote sensing [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5706~5709
- 4 Jianli Liu, Qing Liu, Hong Li *et al.*. Low noise, continuous-wave single-frequency $1.5 \mu\text{m}$ laser generated by a singly resonant optical parametric oscillator [J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(11): 114215

- 5 T. Eberle, S. Steinlechner, V. Handchen *et al.*. Strong Einstein-Podolsky-Rosen entanglement from a single squeezed light source [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **83**(5): 052329
- 6 M. Mehmet, S. Ast, T. Eberle *et al.*. Squeezed light at 1550 nm with a quantum noise reduction of 12.3 dB [J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(25): 25763~25772
- 7 S. Taccheo, P. Laporta, S. Longhi *et al.*. Diode-pumped bulk erbium-ytterbium lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 1996, **63**(5): 425~436
- 8 S. Taccheo, G. Sorbello, P. Laporta *et al.*. 230-mW diode-pumped single-frequency $\text{Er}:\text{Yb}$ laser at $1.5 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(1): 19~21
- 9 J. Taboada, J. M. Taboada, D. Stolarski *et al.*. 100-megawatt Q-switched Er-glass laser [C]. *SPIE*, 2006, **6100**: 61000B
- 10 E. Tanguy, C. Larat, J. P. Pocholle. Modeling of the erbium-ytterbium laser [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **153**(1-3): 172~183
- 11 P. Laporta, S. Longhi, S. Taccheo *et al.*. Analysis and modeling of the erbium-ytterbium glass lasers [J]. *Opt. Commun.*, 1993, **100**(1-4): 311~321
- 12 N. A. Tolstik, G. Huber, V. V. Maltsev *et al.*. Excited state absorption, energy levels, and thermal conductivity of $\text{Er}^{3+}:\text{YAB}$ [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **92**(4): 567~571
- 13 Li Jing, Wang Jiyang, Zhang Huaijin *et al.*. Optical properties of $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal [J]. *J. Syn. Crystals*, 2004, **33**(3): 367~370
李 静, 王继扬, 张怀金 等. $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 晶体的光谱性质研究 [J]. *人工晶体学报*, 2004, **33**(3): 367~370
- 14 Weixiong You, Yanfu Lin, Yujin Chen *et al.*. Polarized spectroscopy of Er^{3+} ions in $\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal [J]. *Opt. Mater.*, 2007, **29**(5): 488~493
- 15 Y. J. Chen, Y. F. Lin, X. H. Gong *et al.*. 2.0 W diode-pumped $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ laser at $1.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(24): 241111
- 16 N. A. Tolstik, S. V. Kurilchik, V. E. Kisel *et al.*. Efficient 1 W continuous-wave diode-pumped $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(22): 3233~3235
- 17 B. C. Hwang, S. B. Jiang, T. Luo *et al.*. Cooperative upconversion and energy transfer of new high Er^{3+} - and Yb^{3+} - Er^{3+} -doped phosphate glasses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, **17**(5): 833~839
- 18 Chen Zilun, Jiang Zongfu, Yang Huaifeng. Study on thermal effects of end-pumped $\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$ rods [J]. *Laser & Infrared*, 2004, **34**(6): 430~432
陈子伦, 姜宗福, 杨华峰. 纵向泵浦 $\text{Cr}:\text{Nd}:\text{GSGG}$ 激光棒的热透镜效应研究 [J]. *激光与红外*, 2004, **34**(6): 430~432

栏目编辑: 宋梅梅