

氙灯抽运 Er:YAP 晶体的中红外激光性能

权聪^{1,2}, 孙敦陆^{1*}, 罗建乔¹, 张会丽¹, 方忠庆^{1,2}, 赵绪尧^{1,2}, 胡伦珍^{1,2}, 程毛杰¹, 张庆礼¹, 殷绍唐¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所光子器件与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 采用氙灯抽运研究了原子数分数为 10% 的 Er³⁺ 掺杂的 YAP 晶体在 2.7~3 μm 波段的激光性能, 使用 3 种不同透射率的输出镜, 实现了最大输出能量为 1173 mJ@1 Hz、1284 mJ@5 Hz、495 mJ@10 Hz、104 mJ@20 Hz 的激光输出, 对应的斜率效率分别为 0.80%、0.99%、0.84% 和 0.44%。当重复频率为 5 Hz, 透射率为 15% 时, 该晶体具有最大的输出能量和激光效率, 相应的平均输出功率达到了 6.42 W, 约是目前已报道最好结果的 4 倍。测量了不同输入功率下 Er:YAP 激光的光束质量, 随着输入功率的增加, 其光束质量逐渐下降。在输出激光中观察到了波长分别为 2710、2728、2795、2918 nm 的 4 条激光谱线。因此, Er:YAP 晶体可以实现优良的多波长中红外激光输出。

关键词 激光器; 钕激光; Er:YAP 晶体; 氙灯抽运; 吸收光谱; 激光光束表征

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0401003

Mid-Infrared Laser Performances of Er:YAP Crystals Pumped by Xenon Lamp

Quan Cong^{1,2}, Sun Dunlu^{1*}, Luo Jianqiao¹, Zhang Huili^{1,2}, Fang Zhongqing^{1,2},
Zhao Xuyao^{1,2}, Hu Lunzhen^{1,2}, Cheng Maojie¹, Zhang Qingli¹, Yin Shaotang¹

¹Key Laboratory of Photonic Devices and Materials of Anhui Province, Anhui Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract We demonstrate the laser performances of Er-doped YAP crystals with the atom fraction of Er³⁺ of 10% pumped by an xenon lamp in the region of 2.7-3 μm. The output mirrors with three different transmissivities are adopted, and the maximum single pulse energies of 1173 mJ @ 1 Hz, 1284 mJ @ 5 Hz, 495 mJ @ 10 Hz, and 104 mJ @ 20 Hz with the corresponding slope efficiencies of 0.80%, 0.99%, 0.84% and 0.44% are achieved, respectively. Under the conditions of a repetition rate of 5 Hz and output mirror transmission of 15%, the highest laser output energy and laser efficiency can be obtained in the Er:YAP crystals and the corresponding average output power is 6.42 W, which is about four times the existing best result reported by literatures. In addition, the laser beam quality of the Er:YAP solid-state laser with different input powers is measured, which decreases with the increase of input power. Moreover, the four laser spectral lines at 2710, 2728, 2795, and 2918 nm are observed. Therefore, the excellent multi-wavelength mid-infrared laser output can be realized with Er:YAP crystals.

Key words lasers; erbium laser; Er:YAP crystal; xenon lamp pumping; absorption spectra; laser beam characterization

OCIS codes 140.3500; 300.1030; 140.3295

1 引 言

近年来,激光晶体作为固体激光材料获得 2.7~3 μm 波段激光的研究引起了广泛的关注,该波段激

光具有广泛的应用:1)2.7~3 μm 波段处于水的强吸收带,该波段调 Q 激光能够实现高功率、窄脉冲宽度的中红外激光输出,已经在生物医疗中得到了实际应用^[1-3];2)由于高空中水汽含量较少,2.7~3 μm 激光

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2018-12-27; 录用日期: 2019-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(51872290, 51702322, 51802307)、国家重点研究与发展计划(2016YFB1102301)

* E-mail: dlsun@aiofm.ac.cn

传输损耗小,因此该波段激光可直接用于太空军事及科学研究^[4];3)2.7~3 μm 波段激光还可用作光参量振荡的抽运源,抽运红外非线性晶体,实现 3~19 μm 波段的激光输出,在环境污染监测和光电对抗等领域具有重要的应用^[5,6];4)该波段激光在激光遥感、激光雷达等方面也都有着良好的应用前景^[7]。

作为一种激光基质晶体, YAlO₃ (YAP) 具有优良的热力学与力学性能,其热导率为 11 W/(m·K),莫氏硬度为 8.5,能在较高重复频率下工作,可满足激光对基质晶体的要求。YAP 基质为光学负双轴晶体,属于正交晶系,具有光学各向异性,能获得线偏振光,且能通过其本身的自然双折射抑制激光热效应引起的热双折射现象^[8-9]。而且, Er:YAP 的声子能量约为 570 cm⁻¹, 低于 Er:YAG (846 cm⁻¹)、Er:GSGG (741 cm⁻¹) 和 Er:GYSGG (732 cm⁻¹) 的声子能量,这有利于减少激光上下能级间的无辐射跃迁,从而降低激光阈值^[10]。此外, Er³⁺ 掺杂的 YAP 还具有荧光谱线丰富、能够直接输出线性偏振激光等优点^[11]。综上所述, Er:YAP 晶体是一种优异的中红外激光增益介质。

1987 年, Stalder 等^[12] 研究了 Er:YAP 晶体的光谱和偏振性能,并实现了多个波长的激光输出;曾瑞荣等^[13] 研究了 *a* 轴原子数分数为 10% 的 Er:YAP 晶体在 2.7~3 μm 波段的激光性能,采用氙灯抽运的方式获得能量为 240 mJ@1 Hz 的激光输出;游振宇等^[14] 在原子数分数为 20% 的 Er:YAP 晶体中实现了最大输出能量为 700 mJ@1 Hz,最大平均输出功率为 1.56 W@5 Hz 的激光输出。但这些研究所获得的激光输出能量较低,且没有对其激光光束质量进行表征。因此,本文研究了原子数分数为 10% 的 Er:YAP 在氙灯抽运条件下的激光性能,并获得了较高平均功率的激光输出,同时测量了其光束质量和激光光谱。

2 实验方法

采用提拉法成功生长出高光学质量、尺寸为 Φ (直径) 29 mm × 70 mm 的 *b* 轴(空间群为 Pbnm) Er:YAP 晶体,并将其加工成 Φ4 mm × 100 mm 的晶体棒,棒的两端抛光并镀有 2.7 μm 附近波长的增透膜。实验装置如图 1 所示,采用单一氙灯抽运,内径为 5 mm,弧长为 80 mm 的氙灯和 Er:YAP 晶体棒均置于陶瓷腔内,腔内通有 20 °C 的恒温循环冷却水;输入镜(M₁)镀有 2.7~3 μm 波段光的全反膜,输出镜(M₂)采用在 2.79 μm 附近波长处的透射率

分别为 5%, 15% 和 30% 的镜片;实验过程中,整个谐振腔的长度(输入镜与输出镜的距离)为 248 mm。用能量计(Ophir PE50-DIF-C, OPHIR 公司,以色列)测量激光输出能量,采用激光光束分析仪(Ophir-Spiricon PY-III-HR, OPHIR 公司,美国)测量激光光束质量;在室温下,使用分光光度计(PE lambda 950, PerkinElmer 公司,美国)测量晶体在 320~1100 nm 波段的吸收光谱,采用荧光光谱仪(FLSP 920, 爱丁堡仪器公司,英国)测量实验输出激光光谱。

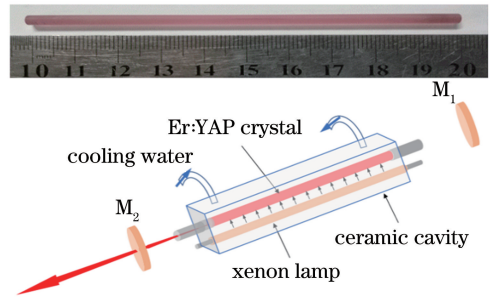


图 1 Er:YAP 单晶棒图片和氙灯抽运实验装置图
Fig. 1 Photograph of Er:YAP single crystal rod and experimental setup with xenon lamp pumping

3 结果与讨论

3.1 Er³⁺ 能级跃迁示意图和 Er:YAP 晶体吸收光谱

Er³⁺ 作为激活离子通过 ⁴I_{11/2} → ⁴I_{13/2} 能级跃迁可以实现 2.7~3 μm 波段的激光输出,但是其上能级寿命远小于下能级寿命(自终止效应),这就抑制了该跃迁过程的发生。通过掺杂高离子浓度 Er³⁺ 的方式诱导上转换(UC₁) (⁴I_{13/2} → ⁴I_{15/2}) + (⁴I_{13/2} → ⁴I_{9/2} → ⁴I_{11/2}) 和交叉弛豫(CR) [⁴S_{3/2} (²H_{11/2}) → ⁴I_{15/2}] + (⁴I_{15/2} → ⁴I_{13/2}) + (⁴I_{15/2} → ⁴I_{9/2} → ⁴I_{11/2}) 过程,可消除该自终止效应^[15]。图 2(a) 为 Er³⁺ 的能级跃迁示意图。

Er:YAP 晶体在 320~1100 nm 范围内的吸收光谱如图 2(b) 所示,其相对应的能级跃迁已在图 2(a) 中标出。可以看出,晶体在 379, 408, 450 (443), 490, 521, 543, 657, 788, 972 nm 处有较强的吸收峰,分别对应基态能级 ⁴I_{15/2} 与激发态能级 ⁴G_{11/2}, ²H_{9/2}, ⁴F_{5/2} (⁴F_{3/2}), ⁴F_{7/2}, ²H_{11/2}, ⁴S_{3/2}, ⁴F_{9/2}, ⁴I_{9/2}, ⁴I_{11/2} 间的跃迁,与氙灯的发射波长(190~1100 nm)相吻合,因此较适宜采用氙灯抽运。

3.2 激光性能

不同输出镜透射率 *T* (5%, 15%, 30%) 和不同重复频率(1, 5, 10, 20 Hz) 条件下,输出能量随抽运

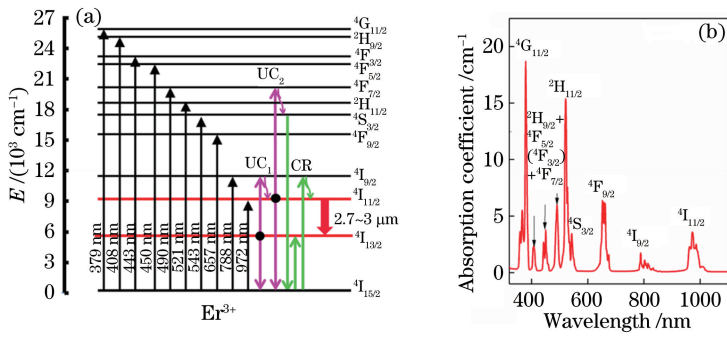


图 2 Er³⁺ 的能级跃迁示意图和 Er:YAP 晶体的吸收光谱。(a) 能级跃迁示意图; (b) 320~1100 nm 范围内的吸收光谱

Fig. 2 Energy transfer diagram of Er³⁺ and absorption spectra of Er:YAP crystal.

(a) Energy transfer diagram; (b) absorption spectra at 320-1100 nm

能量的变化曲线如图 3 所示。实验中不同重复频率、不同输出镜透射率条件下的最大输出能量和对应的激光效率如表 1 所示。当脉冲频率为 5 Hz, 输出镜透射率为 15% 时, 获得的最大输出能量为 1284 mJ, 约是目前已报道最好结果的 4 倍^[11], 对应的平均功率为 6.42 W, 电-光转换效率和斜率效率分别为 0.87% 和 0.99%; 此外, 当脉冲频率为 10 Hz, 输出镜透射率为 5% 时, 其最大的输出激光能量为 495 mJ, 相应的平均功率为 4.95 W; 当脉冲频率为 1 Hz, 输出镜透射率为 15% 时, 其最大的输

出激光能量为 1173 mJ, 相应的平均功率为 1.173 W; 当脉冲频率为 20 Hz, 输出镜透射率为 5% 时, 其最大的输出激光能量 104.2 mJ, 相应的平均功率为 2.08 W。通过比较不同重复频率条件下的实验结果发现, 重复频率为 5 Hz 时, 该固体激光器具有更高的输出功率和激光效率。此外, 在 5, 10, 20 Hz 脉冲频率下, 其单脉冲输出能量的增长趋势仍呈线性, 表明其吸收仍未达到饱和, 此时增加抽运能量, 应还可以获得更高能量的激光输出, 但是为了保护晶体及表面膜层, 没有继续增大抽运能量。

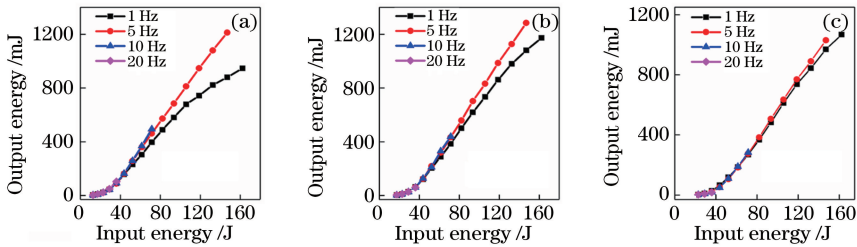


图 3 不同重复频率和不同输出镜透射率条件下, Er:YAP 晶体激光输出能量随抽运能量的变化曲线。

(a) $T=5\%$; (b) $T=15\%$; (c) $T=30\%$

Fig. 3 Output energy of Er:YAP crystal versus input energy under different repetition rates and transmissivity of output mirrors. (a) $T=5\%$; (b) $T=15\%$; (c) $T=30\%$

表 1 氙灯侧面抽运 Er:YAP 晶体的激光参数

Table 1 Laser parameters of Er:YAP crystal side-pumped by xenon lamp

Repetition rate	Corresponding parameter	$T=5\%$	$T=15\%$	$T=30\%$
1 Hz	Maximum output energy /mJ	947	1173	1068
	Electro-optical efficiency /%	0.58	0.72	0.66
	Slope efficiency /%	0.63	0.80	0.76
5 Hz	Maximum output energy /mJ	1212	1284	1030
	Electro-optical efficiency /%	0.82	0.87	0.7
	Slope efficiency /%	0.9	0.99	0.83
10 Hz	Maximum output energy /mJ	495	439	283
	Electro-optical efficiency /%	0.69	0.61	0.4
	Slope efficiency /%	0.84	0.81	0.58
20 Hz	Maximum output energy /mJ	104.2	59.2	17.3
	Electro-optical efficiency /%	0.29	0.16	0.05
	Slope efficiency /%	0.44	0.32	0.13

3.3 热分布模拟与热焦距

由于热效应,抽运过程中晶体的中心温度较高,外表面有冷却水循环冷却,温度较低,导致晶体内部的温度分布不均匀,应力发生变化,这种温度和应力的改变使晶体折射率发生改变,此时晶体近似为一个正的薄透镜,即产生热透镜效应。热透镜效应严重影响了晶体的激光性能,甚至可能导致晶体的破裂。

为了表征晶体在抽运过程中的热分布情况,利用多物理场耦合分析软件 COMSOL 对氙灯侧面抽运作用下 Er:YAP 晶体的温度分布进行数值模拟计算。当输入功率为 500 W 时,晶体表面、晶体轴向

截面及晶体径向截面上的热分布模拟结果如图 4 所示。模拟中所用到的参数如表 2 所示。结果显示,晶体内的最高温度、最低温度及晶体内最大温度差分别为 376.7, 316.8, 59.9 K。此外,还模拟研究了不同抽运功率下,晶体内最大温度差的变化特性如图 5 所示。相应功率下,测量得到了重复频率为 5 Hz 和 $T=15\%$ 条件下的热焦距,通过分析这两条曲线发现,随着输入功率的增加,晶体中的最大温度差值不断增大,表明其因温度分布不均所引起热变形增大,即热透镜效应增强,因此热焦距随着抽运功率的增大逐渐变短。

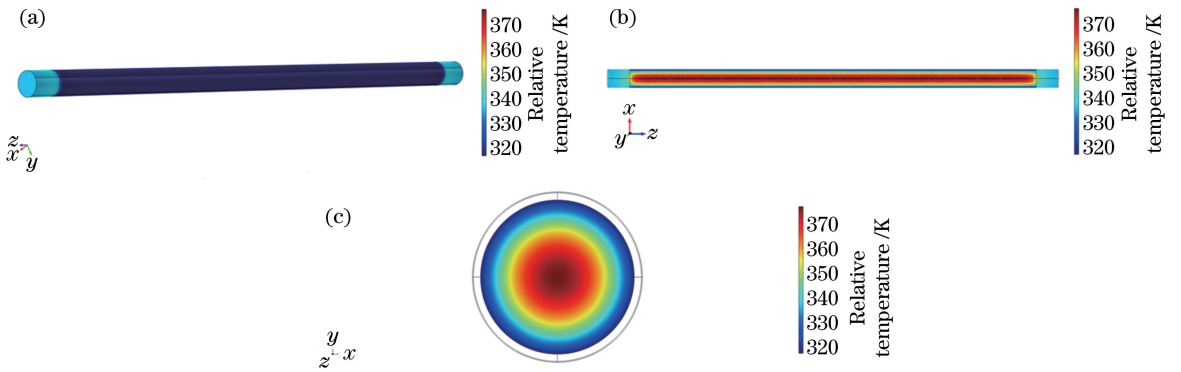


图 4 Er:YAP 单晶棒内的温度分布。(a)晶体表面;(b)晶体轴向截面;(c)晶体径向截面

Fig. 4 Relative temperature distributions of single Er:YAP crystal rod. (a) At crystal surface; (b) at axial cross section of crystal; (c) at radial cross section of crystal

表 2 温度分布模拟参数

Table 2 Parameters for temperature distribution simulation

Parameter	Value
Thermal conductivity (κ) / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	7.5 ^[16]
Pump power (P_{in}) / W	500
Heat transfer coefficient between crystal and cooling water (h_1) / ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	1.8
Heat transfer coefficient between crystal and air (h_2) / ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.005
Temperature of cooling water (T) / K	293.15
Size of crystal / mm	$\Phi 4\times 100$

3.4 质量因子 M^2

测量分析了重复频率为 5 Hz,输出镜透射率为 15%,抽运功率为 114 W 条件下 Er:YAP 激光的光束质量,当激光光束通过焦距为 400 mm 的透镜后,将激光光束分析仪移动到透镜焦点附近位置,以记录光束在水平和垂直方向上的直径。然后对数据进行双曲线拟合,并计算出其束腰直径 ω 和远场发散角 Θ 等参数。光束质量因子(M^2)可通过以下公式计算:

$$M^2 = \frac{\omega\Theta\pi}{4\lambda}, \quad (1)$$

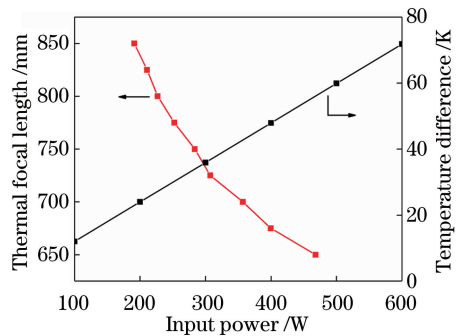


图 5 Er:YAP 晶体的热焦距和晶体内最大温度差随输入功率的变化

Fig. 5 Thermal focal length of Er:YAP crystal rod and relative maximum temperature difference within crystal versus input power

式中: λ 为激光波长,本实验中取 $\lambda=2.71\ \mu\text{m}$ ^[8]。输出激光在束腰附近的光斑图像及激光光束直径随测量点与透镜间距离的变化曲线如图 6 所示,通过双曲线拟合得到其水平和垂直方向上的光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为 5.17 和 5.20;水平和垂直方向上的远场发散角 Θ_x 和 Θ_y 分别为 8.84 mrad 和 8.88 mrad。

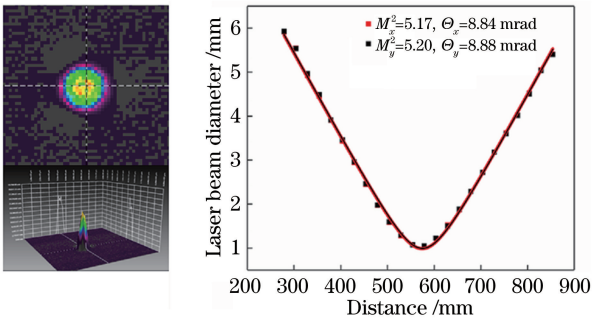


图 6 激光光束直径随测量点与透镜间距离的变化曲线及束腰附近的光斑图像

Fig. 6 Laser beam diameter versus propagation distance and spot image near waist

为了进一步研究输入功率对 Er:YAP 激光光束质量的影响,测量了重复频率为 5 Hz 和 $T=15\%$ 时 Er:YAP 激光光束质量随输入功率的变化关系,结果如图 7 所示,在输入功率分别为 87, 114, 261, 411 W 条件下,得到其光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为 4.24 和 4.23, 5.17 和 5.20, 7.05 和 7.12, 8.92 和 8.67; 其远场发散角 Θ_x 和 Θ_y 为 6.93 mrad 和 6.93 mrad, 8.84 mrad 和 8.88 mrad, 10.39 mrad 和 10.40 mrad, 12.76 mrad 和 12.66 mrad。通过分析发现,随着输入功率的增加,其光束质量逐渐下降,这主要是因为随着输入功率的增加,其热透镜效应逐渐增强,从而使得 Er:YAP 激光的光束质量逐渐降低。此外,较高抽运功率下多模激光的振荡也会使其光束质量下降。

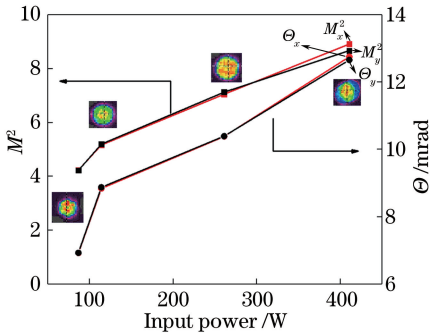


图 7 Er:YAP 激光光束质量因子随输入功率的变化

Fig. 7 Er:YAP laser beam quality factor versus input power

3.5 激光输出波长

将 10 Hz 重复频率和 15% 输出镜透射率条件下输出的激光导入荧光光谱仪中,测量其激光输出波长,结果如图 8 所示,共观察到了 4 条输出谱线,其中心波长分别位于 2710, 2728, 2795, 2918 nm。当抽运能量 W_{in} 为 17.34 J 时,该激光器的输出波长分别为 2710 nm 和 2728 nm;当 W_{in} 为 27.74 J 时,

该激光器的输出波长分别为 2710, 2728, 2795 nm;当 W_{in} 为 34.56 J 时,该激光器的输出波长分别为 2728, 2795, 2918 nm;当 W_{in} 为 65.34 J 时,该激光器的输出波长分别为 2728, 2795, 2918 nm。分析该结果发现,当抽运能量较低时,波长分别为 2710 nm 和 2728 nm 的谱线率先起振,随着抽运能量的增加,2795 nm 和 2918 nm 谱线依次起振,这主要是因为不同谱线的阈值也不同,2710 nm 和 2728 nm 谱线的阈值较低,因此在较低能量抽运时能够起振,2795 nm 和 2918 nm 谱线的阈值相对较高,因此在能量逐渐提高后依次起振,且 2795 nm 和 2918 nm 谱线起振后输出能量迅速增大,特别是当抽运能量为 65.34 J 时,2918 nm 谱线的输出能量远大于其他谱线。综上所述,在 2710~2918 nm 波段内共观察到 4 条输出谱线,由于该波段内不同波长激光的穿透深度不同,较短波长的激光具有更大的穿透深度,因此 Er:YAP 激光器可以作为可调谐穿透深度的“手术刀”^[12]。与激光二极管抽运 Er:YAP 晶体的 2710 nm 和 2728 nm 双波长激光输出相比^[17],氙灯抽运 Er:YAP 晶体实现了 2710, 2728, 2795, 2918 nm 这 4 个波长的激光输出,这主要是因为激光二极管抽运条件下的抽运能量较低,没有达到 2795 nm 和 2918 nm 谱线的阈值,无法实现相应谱线的振荡。

4 结 论

Er³⁺ 能级跃迁机制和 Er:YAP 晶体的吸收光谱表明,该晶体在氙灯发射波长范围内存在多个强吸收峰,适宜使用氙灯抽运;激光实验结果显示,当重复频率为 5 Hz,输出镜透射率为 15% 时,Er:YAP 晶体具有更高的输出功率和激光效率,其最大单脉冲能量为 1284 mJ,相应的平均功率为 6.42 W,约是目前已报道最好结果的 4 倍,对应的电-光转换效率和斜率效率分别为 0.87% 和 0.99%;晶体内热分布模拟结果表明,抽运过程中,随着输入功率的增加,晶体内的温度分布差值逐渐增大,导致其热焦距变短,热透镜效应加重;测量并研究了输入功率对激光光束质量的影响,结果显示随着输入功率的增加,热透镜效应逐渐加剧,激光光束质量逐渐下降;激光光谱中共观察到 4 条激光谱线,其中心波长分别位于 2710, 2728, 2795, 2918 nm。综上所述,本研究通过氙灯抽运 *b* 轴 Er:YAP 单晶棒的方式,实现了较高功率的中红外激光输出。在未来的研究工作中,期望通过提高 Er³⁺ 的掺杂浓度,或掺入敏化离子

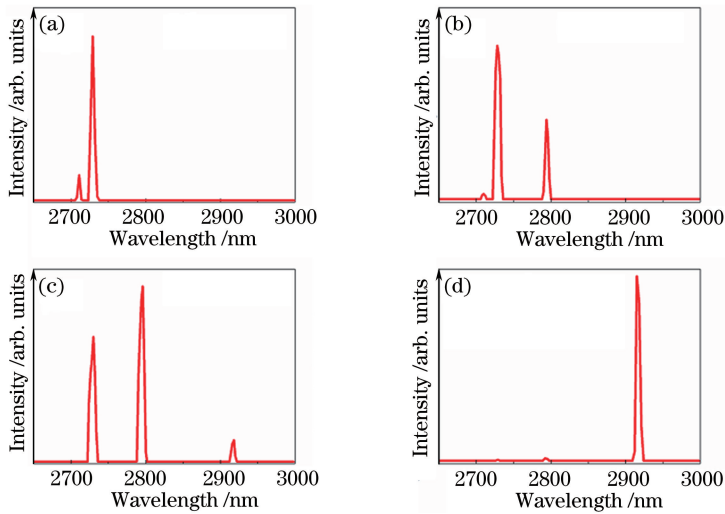


图 8 不同抽运能量下氙灯抽运 Er:YAP 晶体的激光光谱。(a) $W_{in}=17.34$ J; (b) $W_{in}=27.74$ J; (c) $W_{in}=34.56$ J; (d) $W_{in}=65.34$ J
Fig. 8 Laser spectra of Er:YAP crystal pumped by xenon lamps with different pump energies. (a) $W_{in}=17.34$ J; (b) $W_{in}=27.74$ J; (c) $W_{in}=34.56$ J; (d) $W_{in}=65.34$ J

Cr^{3+} 和能级耦合离子 Pr^{3+} , 进一步提高激光输出功率和激光效率, 通过热键合、优化抽运方式及谐振腔参数等进一步提高光束质量, 为其在生物医学、非线性光学等领域的应用提供技术支持。

参 考 文 献

[1] Zajac A, Skorczakowski M, Swiderski J, *et al.* Electrooptically Q-switched mid-infrared Er:YAG laser for medical applications[J]. Optics Express, 2004, 12(21): 5125-5130.

[2] Skorczakowski M, Swiderski J, Pichola W, *et al.* Mid-infrared Q-switched Er:YAG laser for medical applications[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(7): 498-504.

[3] Wang L, Wang J T, Yang J W, *et al.* 2.79 μm high peak power LGS electro-optically Q-switched Cr,Er:YSGG laser [J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2150-2152.

[4] Sun D L, Luo J Q, Xiao J Z, *et al.* Luminescence and thermal properties of Er:GSGG and Yb,Er:GSGG laser crystals [J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29(5): 054209.

[5] Allik T H, Chandra S, Rines D M, *et al.* Tunable 7-12- μm optical parametric oscillator using a Cr,Er:YSGG laser to pump CdSe and ZnGeP₂ crystals[J]. Optics Letters, 1997, 22(9): 597-599.

[6] Vodopyanov K L, Ganikhanov F, Maffetone J P, *et al.* ZnGeP₂ optical parametric oscillator with 3.8-12.4- μm tunability [J]. Optics Letters, 2000, 25(11): 841-844.

[7] Zhang H L, Sun D L, Luo J Q, *et al.* Growth,

structure, and spectroscopic properties of a Cr^{3+} , Tm^{3+} , Ho^{3+} , and Pr^{3+} co-doped LuYAG single crystal for 2.9 μm laser [J]. CrystEngComm, 2016, 18(31): 5826-5831.

[8] Wang Y Z, Duan X M, Ke L, *et al.* Room temperature efficient continuous wave laser diode-end-pumped Tm:YAP laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1710-1713.
王月珠, 段小明, 柯亮, 等. 室温下高效率连续波激光二极管端面抽运 Tm:YAP 激光器 [J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1710-1713.

[9] Massey G A. Criterion for selection of CW laser host materials to increase available power in the fundamental mode [J]. Applied Physics Letters, 1970, 17(5): 213-215.

[10] Fang Z Q, Sun D L, Luo J Q, *et al.* Thermal analysis and laser performance of a GYSGG/Cr,Er,Pr:GYSGG composite laser crystal operated at 2.79 μm [J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21349-21357.

[11] Zhang H L, Sun D L, Luo J Q, *et al.* Growth and spectroscopic investigations of Yb, Ho:YAP and Yb, Ho, Pr:YAP laser crystals [J]. Journal of Luminescence, 2015, 158: 215-219.

[12] Stalder M, Lüfthy W, Weber H P. Five new 3- μm laser lines in YAlO₃:Er [J]. Optics Letters, 1987, 12(8): 602-604.

[13] Zeng R R, Shen H Y, Huang C H, *et al.* A 2.7 μm Er:YAP laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 1990, 17(S1): 60-62.
曾瑞荣, 沈鸿元, 黄呈辉, 等. 2.7 μm 的 Er:YAP 激光器 [J]. 中国激光, 1990, 17(S1): 60-62.

- [14] You Z Y, Wang Y, Li J F, *et al.* Study on the properties of infrared laser in YAP crystals [C]. Proceedings of National laser conference, 2012.
游振宇, 王燕, 李坚富, 等. Er:YAP 晶体中波红外激光性能的研究[C]. 全国激光学术会议, 2012.
- [15] Chen J K, Sun D L, Luo J Q, *et al.* Spectroscopic properties and diode end-pumped 2.79 μm laser performance of Er, Pr:GYSGG crystal [J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23425-23432.
- [16] Zhang H L, Sun D L, Luo J Q, *et al.* Growth, thermal, and spectroscopic properties of a Cr, Yb, Ho, Eu:YAP laser crystal [J]. Optical Materials, 2014, 36(8): 1361-1365.
- [17] Quan C, Sun D L, Luo J Q, *et al.* 2.7 μm dual-wavelength laser performance of LD end-pumped Er:YAP crystal [J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28421-28428.