

## Er : YAP 晶体多波长激光运转及偏振特性研究

权 聪<sup>1,2</sup>, 孙敦陆<sup>1\*</sup>, 罗建乔<sup>1</sup>, 张会丽<sup>1,3</sup>, 方忠庆<sup>1,2</sup>, 赵绪尧<sup>1,2</sup>,  
胡伦珍<sup>1,2</sup>, 韩志远<sup>1,2</sup>, 程毛杰<sup>1</sup>, 殷绍唐<sup>1</sup>

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. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031
3. 华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015

**摘 要** 研究了  $b$  轴 10 at. % Er : YAP 晶体的偏振吸收和输出特性以及多波长激光运转特性。首次测量了 Er : YAP 晶体的偏振吸收光谱, 结果显示晶体对偏振方向平行于  $a$  轴和  $c$  轴的偏振光在  $^4I_{11/2}$  能级对应的吸收峰附近的最大吸收系数分别为  $4.6063\text{ cm}^{-1}$  (975.2 nm 处) 和  $2.9366\text{ cm}^{-1}$  (967.6 nm 处), 因此选择合适波长的线偏振光作为泵浦光有利于提高晶体对泵浦光的吸收效率, 从而改善激光性能; 在氩灯泵浦的激光实验中, 自由运转条件下实现了 2 710, 2 728, 2 795 和 2 918 nm 等 4 条谱线的激光输出, 并分别研究了各谱线的偏振特性和起振的阈值特性。通过在谐振腔内加 JGS 石英片、云母片、K9 镜片等选择性吸收片分别实现了 2 918 nm 单波长, 2 710, 2 821, 2 837 和 2 862 nm 等四波长和 2 710 nm 单波长的激光输出。测量了自由运转和不同选择性吸收片条件下的激光光谱, 并与不同选择性吸收片的透过谱及之前报道的荧光光谱进行对照分析, 证明通过调节谐振腔能够对 Er : YAP 晶体中的起振谱线进行选择。偏振激光实验结果表明除谱线 2 918 nm 是偏振方向平行于  $a$  轴的线偏振光, 谱线 2 728 nm 有时是偏振方向平行于  $c$  轴的线偏振光, 有时又是偏振椭圆长轴平行于 YAP 晶体  $a$  轴的部分偏振光外, 谱线 2 710 和 2 795, 2 821, 2 837 和 2 862 nm 均为偏振方向平行于  $c$  轴的线偏振光; 在 LD 端面泵浦条件下, 得到 2 710, 2 728, 2 750 和 2 795 nm 四条谱线的激光输出, 其中谱线 2 750 nm 首次在 Er : YAP 晶体中实现激光输出, 这四条谱线均为偏振方向平行于晶体  $c$  轴的线偏振光; 此外, 首次测量了该晶体在 8 K 低温下的吸收光谱, 利用 Gauss 函数对光谱进行分峰拟合, 根据拟合结果对激光上下能级各斯塔克子能级进行了能级指认, 并结合 Er : YAP 晶体激光光谱、荧光光谱对可能的谱线跃迁进行了辨认。Er : YAP 晶体偏振特性和多波长激光运转特性的研究以及对后续 Er : YAP 晶体调 Q 等技术的实现和电光调 Q 晶体的选择具有一定的指导意义。

**关键词** 掺铒铝酸钇晶体; 偏振特性; 多波长激光运转; 能级指认

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)08-2325-07

## 引 言

稀土离子  $\text{Er}^{3+}$  掺杂激光晶体通过能级跃迁  $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  能够实现 2.7~3  $\mu\text{m}$  激光输出, 该波段激光在生物医疗<sup>[1-2]</sup>、空间科学研究<sup>[3]</sup>、激光遥感与激光雷达<sup>[4]</sup>等领域均有着重要应用; 还可用于泵浦非线性晶体, 通过光参量振荡(OPO), 实现 3~5 和 8~15  $\mu\text{m}$  的激光输出<sup>[5]</sup>。然而其过长的下能级寿命极大地限制了 2.7~3  $\mu\text{m}$  波段的激光输出, 称为“自限

制效应”。为此, 通常会采用提高  $\text{Er}^{3+}$  的掺杂浓度或者掺入具有与激光下能级相近能级的能级耦合离子的方法, 降低下能级寿命, 从而提高激光效率, 减小激光阈值<sup>[6]</sup>。

$\text{Er}^{3+}$  掺杂  $\text{YAlO}_3$  (Er : YAP) 作为一种优良的中红外激光晶体, 很好的结合了 YAP 基质晶体优良的热力学与机械性能、较高地热导率<sup>[7]</sup>、较低的声子能量<sup>[8]</sup>等优点与  $\text{Er}^{3+}$  掺杂晶体具有丰富荧光谱线的特点。实验发现 YAP 中所需要的  $\text{Er}^{3+}$  掺杂浓度较低, 如早在 1987 年于桂芳等<sup>[9]</sup>和 Stalder 等<sup>[10]</sup>就分别在 10 at. % Er : YAP 中实现了多波长激光输

收稿日期: 2019-07-06, 修订日期: 2020-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51872290, 51702322, 51802307), 国家重点研发计划项目(2016YFB1102301), 固体激光技术重点实验室开放基金项目资助

作者简介: 权 聪, 1994 年生, 中国科学技术大学博士研究生 e-mail: 15156097440@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: dlsun@aiofm.ac.cn

出;近两年, Hiroki Kawase 等<sup>[11]</sup>在 LD 泵浦 5 at. % Er : YAP 中实现了 0.95 W 的 2.92  $\mu\text{m}$  激光输出, 激光斜率效率高达 31%。

另外, 钽酸钇(YAP)在结构上, 属于正交晶系,  $P_{6mm}$  空间群, 晶格常数为  $a=5.180 \text{ \AA}$ ,  $b=5.330 \text{ \AA}$ ,  $c=7.371 \text{ \AA}$ , 为畸形的钙钛矿型结构, 具有结构各向异性, 是双折射率较高的负双轴晶体<sup>[12]</sup>, 不仅有利于降低热双折射所引起的影 响, 还使其能够直接实现线偏振的激光输出<sup>[13]</sup>。直接输出的线偏振光更有利于调 Q 激光的实现, 如凌铭等<sup>[14]</sup>用具有偏振特性沿 b 轴切割的 Nd : YAP 激光晶体, 在脉冲 LD 阵列侧面抽运的同时, 作为电光调 Q 的起偏器件, 获得了 1.02 mJ, 70 ns 的 1.341  $\mu\text{m}$  调 Q 激光输出, 该结果比加格兰-福科棱镜作为起偏器得到的结果更好; Michael Bass<sup>[15]</sup>通过在 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光棒端面上沿一定角度切割, 加上材料的高双折射, 使得激光棒可以作为自己的腔内偏振器, 并实现调 Q 激光输出。

此前, 于桂芳等<sup>[9]</sup>已经在氙灯泵浦 a 轴 10 at. % Er : YAP 晶体中实现了 2 711, 2 730 和 2 795 nm 三条谱线的激光输出, 并研究了三条谱线的偏振性能。Stalder 等<sup>[10]</sup>研究了不同轴向 Er : YAP 晶体在氙灯泵浦条件下的多波长激光输出特性, 并通过在腔内加布儒斯特窗的方法研究了晶体的偏振特性。但关于该晶体的偏振吸收光谱和该晶体在 LD 端面泵浦条件下的偏振特性未报道。本工作通过在腔外加格兰激光棱镜作为检偏器的方式进一步研究了氙灯泵浦 10 at. % Er : YAP 晶体的多波长输出特性以及输出激光的偏振特性, 还测量了晶体的偏振吸收光谱, 并研究了晶体在 LD 端面泵浦 b 轴 Er : YAP 晶体的多波长输出特性, 以及输出激光的偏振特性; 其中, 在 LD 端面泵浦 Er : YAP 晶体的实验中获得了新谱线 2 750 nm 的激光输出; 最后测量了晶体在 8 K 的低温条件下的吸收光谱, 并据此对激光上下能级的斯塔克子能级进行了指认, 从而对本实验中实现起振的 8 条谱线进行了辨认。

## 1 实验部分

氙灯泵浦激光实验装置如图 1(a)所示, 实验采用高光学质量, 尺寸为  $\Phi 4 \times 100 \text{ mm}^3$  的 Er : YAP 晶体棒, 棒两端精密抛光且镀有 2.79  $\mu\text{m}$  附近波长的增透膜, 并采用单一氙灯泵浦[图 1(a)], 内径为 5 mm, 弧长 80 mm 的氙灯和 Er : YAP 晶体棒均置于陶瓷腔内, 腔内通有恒温 20  $^{\circ}\text{C}$  的循环冷却水; 输入镜( $M_1$ )为 K9 材质, 并镀有对 2.6~3  $\mu\text{m}$  波段光的全反膜( $R \geq 99.5\%$ ), 输出镜( $M_2$ )为  $\text{CaF}_2$  材质, 并镀有对 2.6~3  $\mu\text{m}$  波段光的部分反射膜, 其在 2.79  $\mu\text{m}$  附近波长处的透过率为 15%。谐振腔内分别添加了 JGS 石英片(厚度 2 mm)、云母片(厚度 0.1 mm)、K9 镜片(厚度 1 mm)等作为选择性吸收片, 从而实现不同波长的激光输出。LD 泵浦激光实验装置如图 1(b)所示, 实验采用高光学质量, 2 mm $\times$ 2 mm $\times$ 5 mm 的 Er : YAP 晶体小长方体, 晶体未镀膜, 采用中心波长为 962 nm 的 LD 作为泵浦光, 并通过耦合系统将泵浦光聚焦后, 打入谐振腔内, 将晶体置于如图 1(b)所示的

铜块夹具内, 铜夹具内通有恒温 18  $^{\circ}\text{C}$  的循环冷却水; 输入镜( $M_3$ )为 K9 材质, 并镀有 2.6~3  $\mu\text{m}$  波段光的全反膜( $R \geq 99.5\%$ )和 970 nm 附近的增透膜( $T \geq 99.5\%$ ), 输出镜  $M_1$  同样镀有对 2.6~3  $\mu\text{m}$  波段光的部分反射膜, 其在 2.79  $\mu\text{m}$  附近波长处的透过率为 5%。输出激光用格兰激光棱镜进行检偏, 然后通过焦距为 300 mm 的  $\text{CaF}_2$  透镜将激光聚焦在 Omni- $\lambda$ 200i 单色仪的入口狭缝上, 用单色仪进行波长的选择和确定, 所用光栅型号为 300  $\text{g} \cdot \text{mm}^{-1}$  (闪耀波长为 3 000 nm), 其倒线色散为 15.77  $\text{nm} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 仪器的最高分辨率可达 1.12 nm。氙灯泵浦的激光输出能量采用能量计(Ophir PE50-DIF-C)进行测量, LD 泵浦的激光输出采用功率计(Ophir 30A-BB-18)进行测量。在室温下利用格兰激光棱镜和 PE lambda 950 分光光度计测量了室温下该晶体在 300~3 000 nm 范围内的偏振吸收光谱, 步长为 0.2 nm。利用制冷机和 PE lambda 950 分光光度计在 8 K 的低温下测量了晶体在 300~2 000 nm 范围内的低温吸收光谱, 步长为 0.2 nm。

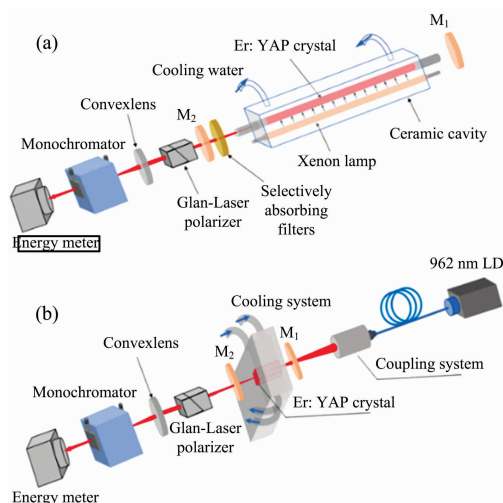


图 1 激光实验装置图

(a): 氙灯泵浦 Er : YAP 晶体; (b): LD 泵浦 Er : YAP 晶体

Fig. 1 Laser experimental setups

(a): Xenon lamp pumped Er : YAP crystal;

(b): 962 nm LD pumped Er : YAP crystal

## 2 结果与讨论

### 2.1 Er : YAP 晶体偏振吸收光谱

在室温下利用格兰激光棱镜和 PE lambda 950 分光光度计测量了室温下该晶体在 300~3 000 nm 范围内的偏振吸收光谱, 其中  $P \parallel a$  和  $P \parallel c$  表示格兰激光棱镜的透振方向分别平行于晶体的 a 轴和 c 轴, 如图 2 所示。从图中可以看出, 晶体对偏振方向平行于 a 轴的偏振光吸收更强, 以  $^4 I_{11/2}$  能级对应的吸收峰为例, 晶体对  $P \parallel a$  偏振光的最大吸收系数为 4.606 3  $\text{cm}^{-1}$  (975.2 nm 处), 而晶体对  $P \parallel c$  偏振光的最大吸收系数为 2.936 6  $\text{cm}^{-1}$  (967.6 nm 处), 前者约是后者的 1.57 倍, 而且二者均高于相应波长处晶体对非偏振光的吸收系数<sup>[16]</sup>。以上结果表明 Er : YAP 晶体对于线偏光的吸收更强。因此, 在 LD 泵浦实验中, 使用中心波长在 975.2 nm 附

近的偏振激光作为泵浦源，并使晶体  $a$  轴平行于泵浦光偏振方向，能够提高晶体对泵浦光的吸收效率，从而改善激光性能。

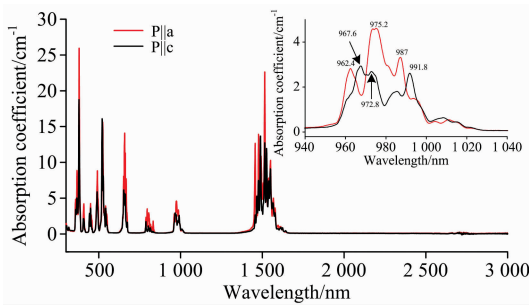


图 2 Er : YAP 晶体在 300~3 000 nm 范围内的偏振吸收光谱 (插图: 940~1 040 nm 范围内的偏振吸收光谱)

Fig. 2 Polarization absorption spectrum of Er : YAP crystal (Illustration: polarized absorption spectra at 940 ~ 1 040 nm)

### 2.2 氙灯泵浦 Er : YAP 晶体多波长激光输出和偏振特性

实验测量了氙灯泵浦 Er : YAP 晶体的多波长激光运转特性，此前已经在频率 5 Hz，输出镜透过率为 15% 条件下实现了 2 710, 2 728, 2 795 和 2 918 nm 四个波长的激光输出。通过图 1(a) 所示实验装置图进行实验(选择性吸收片)，并研究了不同波长的运转特性如图 3(a,b) 和表 1 所示，从中可以发现谱线 2 710 和 2 795 nm 为偏振方向平行 YAP 晶体的  $c$  轴的线偏振光，谱线 2 918 nm 为偏振方向平行 YAP 晶体的  $a$  轴的线偏振光，谱线 2 728 nm 是部分偏振光，椭圆的长轴平行于 YAP 晶体的  $a$  轴，椭圆的短轴平行于 YAP 晶体的  $c$

轴。其中，偏振方向平行于 YAP 晶体  $c$  轴的 2 710 nm 谱线和平行于 YAP 晶体  $a$  轴和  $c$  轴的 2 728 nm 谱线的阈值相当，但前者输出能量较低，且随输入能量增加，前者输出能量逐渐下降。偏振方向平行于 YAP 晶体  $c$  轴的 2 795 nm 谱线和偏振方向平行于 YAP 晶体  $a$  轴的 2 918 nm 谱线尽管起振阈值相对较高，但谱线起振后其输出能量随输入能量的增加而迅速增长，并超过 2 710 和 2 728 nm 谱线输出能量，其中 2 918 nm 谱线阈值最高，但其斜效率也较高，输出能量在输入能量为 52.215 J 时已超过其他所有谱线。

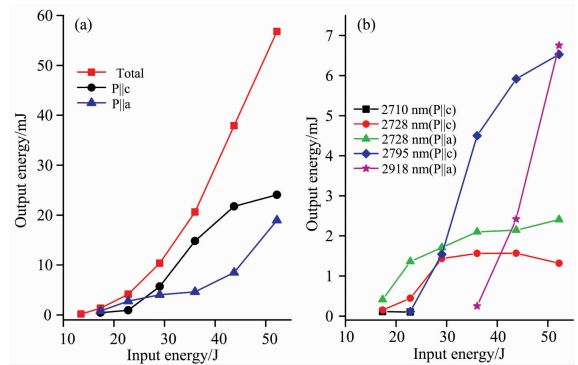


图 3 氙灯泵浦 Er : YAP 晶体的激光输出特性

(a): 总激光输出能量和通过透振方向分别平行于  $a$  轴和  $c$  轴的格兰激光棱镜后的激光能量; (b): 经单色仪分光后不同波长激光的输出能量

Fig. 3 Laser output characteristics of xenon lamp pumped Er : YAP crystal

(a): Total laser output energy and the laser energy pass through the Glan-laser polarizer with polarization orientation of  $P \parallel a$  and  $P \parallel c$ ; (b): Laser output energy of different wavelength after monochromator

表 1 Er : YAP 激光不同谱线的偏振输出特性

Table 1 Polarization output characteristics of different spectral lines of Er : YAP laser

Input energy/J	Output energy/mJ										
	Total	$P \parallel a$	$P \parallel c$	2 710 nm		2 728 nm		2 795 nm		2 918 nm	
				$P \parallel a$	$P \parallel c$	$P \parallel a$	$P \parallel c$	$P \parallel a$	$P \parallel c$	$P \parallel a$	$P \parallel c$
13.5	0.158										
17.34	1.34	0.807	0.456	0	0.11	0.41	0.15				
22.82	4.16	2.75	0.95	0	0.12	1.36	0.445	0	0.115		
29.04	10.37	4.03	5.7	0	0.1	1.71	1.435	0	1.54		
36.015	20.6	4.62	14.81			2.1	1.563	0	4.5	0.25	0
43.74	37.9	8.5	21.75			2.145	1.57	0	5.92	2.42	0
52.215	56.8	18.95	24.06			2.406	1.32	0	6.53	6.75	0

利用如图 1(a) 所示实验装置，通过插入 JGS 石英片、云母片、K9 镜片等选择性吸收片进行实验，成功实现了 2 710, 2 728, 2 795, 2 821, 2 837, 2 862 和 2 918 nm 等共 7 条谱线的激光输出。三种选择性吸收片在 2 500~3 100 nm 范围内的透过率如图 4 所示，JGS 石英片在 2 650~2 850 nm 范围内有较强的吸收，使得该波段范围内的谱线损耗较大，从而被抑制，最终在该条件下，仅实现了 2 918 nm 一条谱线的激光输出；同理，在插入云母片条件下，2 720~2 800 nm 范围内的谱线被抑制，得到了 2 710, 2 821, 2 837 和 2 862 nm 等

4 条谱线的激光输出；在插入 K9 镜片条件下，2 730~3 000 nm 的谱线均被抑制，仅得到了 2 710 nm 一条谱线的激光输出。 $T=15\%$ ，5 Hz 条件下不添加和添加不同选择性吸收片后的激光光谱已通过 FLSP 920 荧光光谱仪进行测量，如图 5 所示。其中，谱线 2 862 nm 在通过光谱仪测量时未被检测到，是在进行激光实验时通过单色仪确认的波长。

利用图 1(a) 所示的实验装置进行了多次实验，分别表征了不同谱线的偏振性能，结果如表 2 所示。除谱线 2 710 和 2 795 nm 外，谱线 2 821, 2 837 和 2 862 nm 同样是偏振方向

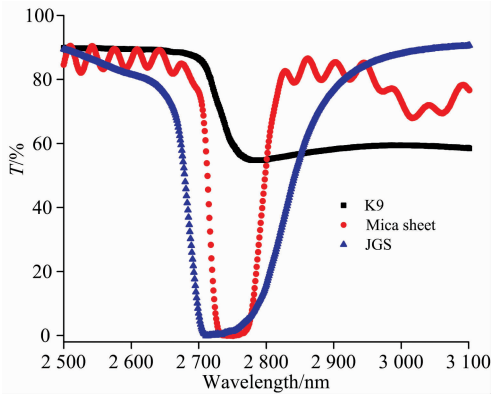


图 4 JGS 石英片 (2 mm)、云母片 (0.1 mm) 和 K9 镜片 (1 mm) 在 2 500~3 100 nm 波段的透过率

Fig. 4 Transmittance of JGS piezoid, mica sheet and K9 optic in the waveband of 2 500~3 100 nm

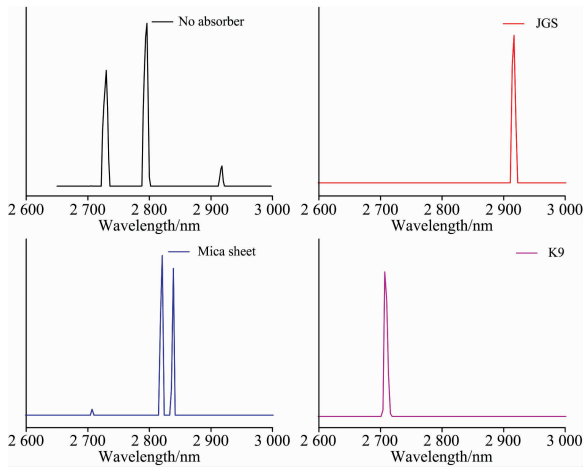


图 5 不同选择性吸收片条件下氙灯泵浦 Er : YAP 晶体的激光光谱

Fig. 5 Laser spectrum of Er : YAP crystal pumped by xenon lamp under different selective absorption conditions

表 2 不同谱线的偏振度

Table 2 Polarization degree of different laser lines

Wavelength /nm	Output energy/mJ		$P = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$
	Polarizer    a	Polarizer    c	
2 710	<0.06	5.18	>0.977
2 728	<0.06	3.46	>0.966
	2.46	1.32	0.292
2 795	<0.06	5.33	>0.977
2 821	<0.06	1.263	>0.91
2 838	<0.06	1.762	>0.934
2 862	<0.06	2.15	>0.945
2 918	5.52	<0.06	>0.978

平行于  $c$  轴的线偏振光, 谱线 2 918 nm 是偏振方向平行于  $a$  轴的线偏振光, 值得注意的是谱线 2 728 nm 的偏振状态并不是固定的, 通过调整输出镜多次实验发现, 2 728 nm 有时表现为偏振方向平行于  $c$  轴的线偏振光, 有时又表现为偏振

椭圆长轴平行于 YAP 晶体的  $a$  轴的部分偏振光。

### 2.3 LD 泵浦 Er : YAP 晶体多波长激光输出和偏振特性

实验测量了 962 nm LD 泵浦 Er : YAP 晶体的多波长激光运转特性如图 6 所示, 在  $T=5\%$  输出镜, 300 Hz 频率, 0.8 ms 脉宽条件下进行实验, 得到 2 710, 2 728, 2 750 和 2 795 nm 四条谱线的激光输出, 其中谱线 2 750 nm 是第一次在 Er : YAP 晶体中实现激光输出。该结果与此前我们测量的 LD 泵浦 Er : YAP 晶体激光光谱有所差异, 分析认为主要因此前并未考虑到泵浦功率对激光波长的影响, 仅在较低泵浦功率下进行了测量, 因而只测量到阈值较低的 2 710 和 2 728 nm 激光谱线<sup>[17]</sup>。另外, 在本实验的最高泵浦功率处, 仍未发现 2 918 nm 谱线的激光输出, 可能是因为仍未达到该谱线输出的阈值。利用图 1(b)所示装置测量了 LD 泵浦 Er : YAP 晶体多波长激光的偏振特性, 实验发现虽然分光前总激光输出功率较稳定, 但通过单色仪分光后不同波长的输出功率波动较大(可能是因为该激光单脉冲能量较小, 给分光造成了一定难度), 因此实验中仅对总的激光输出进行了偏振特性的测量, 结果如图 7 所示, 该激光输出为平行于晶体  $c$  轴的偏振光, 可以判定该四条谱线均为偏振方向平行于晶体  $c$  轴的线偏振光。

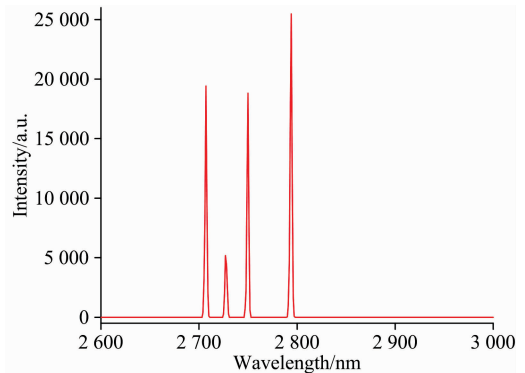


图 6 LD 泵浦 Er : YAP 晶体的激光光谱

Fig. 6 Laser spectrum of LD pumped Er : YAP crystal

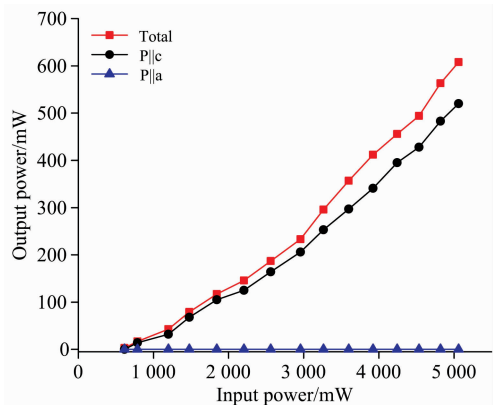


图 7 LD 泵浦 Er : YAP 晶体的偏振输出特性

Fig. 7 Polarization output characteristic of LD pumped Er : YAP crystal



2.4 Er : YAP 晶体的低温吸收光谱及激光上下能级的指认

利用制冷机和 PE lambda 950 分光光度计测量了 Er : YAP 晶体在 8 K 低温下 320~2 000 nm 范围内的吸收光谱, 并分别对激光上下能级的吸收谱进行了分峰拟合, 结果如图 8(a,b)所示, 950~1 000 和 1 440~1 520 nm 吸收带分别对应了从基态能级( $^4I_{15/2}$ )到激光上能级( $^4I_{11/2}$ )和激光下能级( $^4I_{13/2}$ )的各斯塔克子能级间的跃迁。由于是在 8 K 的低温

下进行测量, 可认为基态粒子皆填充在  $E=0$  的第一斯塔克子能级上, 因此可通过吸收波长直接确定激光上下能级的各斯塔克子能级的位置。根据低温吸收光谱, 利用 Gauss 函数对谱线进行分峰拟合, 根据拟合结果分别对  $^4I_{11/2}$  和  $^4I_{13/2}$  能级的 6 个和 7 个斯塔克子能级进行了指认, 对激光上下能级各斯塔克子能级间的跃迁波长进行了计算, 并根据计算结果对本实验中的 8 条起振谱线进行了辨认, 结果如图 9 所示。

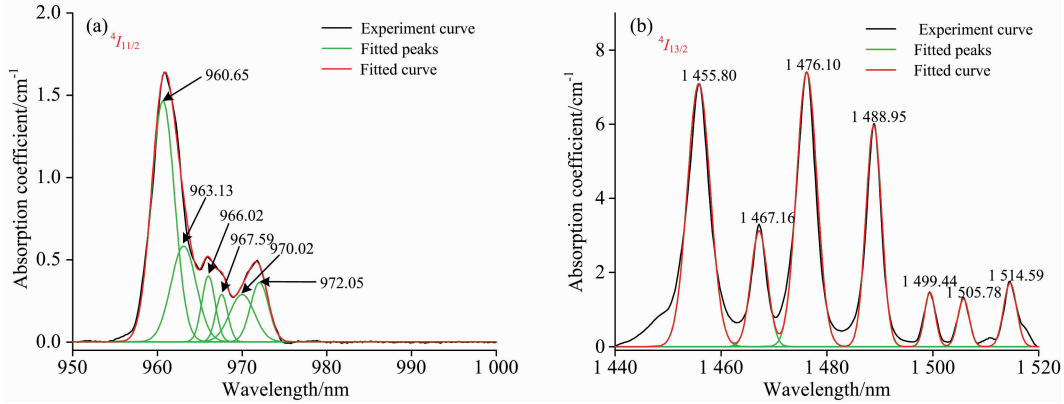


图 8 Er : YAP 晶体在 8 K 低温条件的吸收光谱及分峰拟合结果

(a):  $^4I_{11/2}$  能级; (b):  $^4I_{13/2}$  能级

Fig. 8 Absorption spectrum of Er : YAP crystal at 8 K

(a):  $^4I_{11/2}$  energy level; (b):  $^4I_{13/2}$  energy level

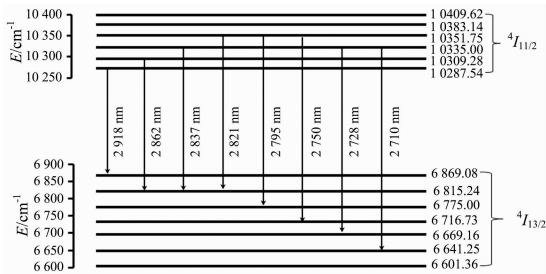


图 9 激光谱线跃迁示意图

Fig. 9 Diagram of laser spectral line transitions

对比 10 at. % Er : YAP 晶体的荧光光谱<sup>[16]</sup>, 发现实验所有起振谱线均能在荧光光谱中找到对应的荧光峰(荧光光谱中 2 918 nm 荧光峰处于泵浦光的三级衍射峰位置附近, 有很强的干扰信号, 无法准确测量)。本实验通过调节谐振腔实现了对荧光谱线的选择, 从而获得了相应谱线的激光输出, 证明调节谐振腔确实能够对起振谱线进行选择, 而 Er : YAP 晶体丰富的荧光谱线也说明了其具有实现更多谱线激光输出的潜力。

本实验中共实现了 8 条谱线的激光输出, 波长覆盖了 2 710~2 918 nm 范围, 由于该波段激光位于水的强吸收带, 且水对激光的吸收强度随激光波长的增加而增大, 导致激光

对人体组织的穿透深度随波长的增加而减小, 即较短波长的激光具有更深的穿透深度, 因此 Er : YAP 激光器可以作为可调谐穿透深度的手术刀使用<sup>[10]</sup>。

3 结 论

Er : YAP 晶体的偏振吸收光谱表明该晶体对不同方向的偏振光的吸收强度有很大差异, 选择合适波长和偏振方向的泵浦光有利于提高泵浦效率, 从而改善激光性能; 氙灯泵浦 Er : YAP 晶体的激光实验表明, 该晶体能够实现不同波长的激光输出, 且不同谱线的阈值有所不同, 除谱线 2 728 nm 有时表现为偏振方向平行于 c 轴的线偏振光, 有时又表现为偏振椭圆长轴平行于 YAP 晶体的 a 轴的部分偏振光, 谱线 2 918 nm 表现为偏振方向平行于 a 轴的线偏振光外, 其他谱线均表现为偏振方向平行于 c 轴线偏振光; LD 泵浦 Er : YAP 晶体的激光实验表明, 四条谱线均为偏振方向平行于晶体 a 轴的线偏振光; 根据 Er : YAP 晶体的低温吸收谱对激光上下能级的各子能级进行了指认, 并据此对激光跃迁谱线进行了辨认。另外, 本论文对 Er : YAP 晶体偏振特性和多波长输出特性的研究结果为 Er : YAP 晶体激光调 Q 的实现以及电光调 Q 晶体的选择提供了指导。

## References

- [ 1 ] Walsh J T, Flotte T J, Deutsch T F. Lasers in Surgery and Medicine, 1989, 9: 314.
- [ 2 ] Wang L, Wang J T, Yang J W, et al. Optics Letters, 2013, 38: 2150.
- [ 3 ] Sun D L, Luo J Q, Xiao J Z, et al. Chinese Physics Letters, 2012, 29: 054209.
- [ 4 ] Zhang H L, Sun D L, Luo J Q, et al. CrystEngComm, 2016, 18: 5826.
- [ 5 ] Hu S W, Wang L, Guo Y W, et al. Optics Letters, 2019, 44: 2201.
- [ 6 ] Chen J K, Sun D L, Luo J Q, et al. Optics Express, 2013, 21: 23425.
- [ 7 ] Zhang H L, Sun D L, Luo J Q, et al. Optics Materials, 2014, 36: 1361.
- [ 8 ] Yang H G, Dai Z W, Sun Z W. Journal of Luminescence, 2007, 124: 207.
- [ 9 ] YU Gui-fang, SHEN Hong-yuan, ZHOU Yu-ping, et al(于桂芳, 沈鸿元, 周玉平, 等). Laser Technology(激光技术), 1989, 13: 41.
- [10] Stalder M, Lüfthy W, Weber H P. Optics Letters, 1987, 12: 602.
- [11] Kawase H, Yasuhara R. Optics Express, 2019, 27: 12213.
- [12] Weber M J, Bass M, Andringa K, et al. Applied Physics Letters, 1969, 15: 342.
- [13] ZHAO Kai-hua(赵凯华). Optics(光学). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2004. 289.
- [14] LING Ming, ZHANG Jian-wen, ZHANG Shi-jun, et al(凌 铭, 张建文, 章世骏, 等). Laser and Infrared(激光与红外), 2013, 43: 163.
- [15] Michael B. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1975, 11(12): 938.
- [16] Quan C, Sun D L, Luo J Q, et al. Optics Materials, 2018, 84: 59.
- [17] Quan C, Sun D L, Luo J Q, et al. Optics Express, 2018, 26: 28421.

## Investigation on the Multiwavelength Laser Operation and Polarization Characteristics of Er : YAP Crystal

QUAN Cong<sup>1,2</sup>, SUN Dun-lu<sup>1\*</sup>, LUO Jian-qiao<sup>1</sup>, ZHANG Hui-li<sup>1,3</sup>, FANG Zhong-qing<sup>1,2</sup>, ZHAO Xu-yao<sup>1,2</sup>, HU Lun-zhen<sup>1,2</sup>, HAN Zhi-yuan<sup>1,2</sup>, CHENG Mao-jie<sup>1</sup>, YIN Shao-tang<sup>1</sup>

1. Anhui Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China
3. Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

**Abstract** In this paper, the polarization absorption and output characteristics and the multi-wavelength laser operation characteristics of 10 at. % Er : YAP crystal are studied. The polarization absorption spectra of Er : YAP crystal is measured for the first time, the result indicated that the maximum absorption coefficients of crystal to linearly polarized light parallel to axis a and axis c in the absorption peak corresponding to the  $^4I_{11/2}$  energy level are  $4.6063\text{ cm}^{-1}$  (at 975.2 nm) and  $2.9366\text{ cm}^{-1}$  (at 967.6 nm), respectively. Therefore, the absorption efficiency of Er : YAP crystal to pump light can be improved by choosing linearly polarized pump light with properly wavelength, which is conducive to improving the laser performance. In the xenon lamp pumped laser experiments, four spectral lines of 2 710, 2 728, 2 795 and 2 918 nm are realized laser output under the free operation condition, the polarization and threshold characteristics of each spectral line are studied respectively. The laser output of single wavelength of 2 918 nm, four spectral lines of 2 710, 2 821, 2 837, 2 862 nm and single wavelength of 2 710 nm are achieved by adding JGS quartz plate, mica plate and K9 lens selective absorber respectively in the resonator cavity. The laser spectra are measured under the conditions of free operation and different selective absorbers, As well by contrasting with the transmittance spectra of different selective absorbers and the previously reported fluorescence spectra, it is proved that the oscillation is starting spectrum lines in Er : YAP crystal could be selected by adjusting the resonator cavity. The experimental results show that the polarization direction of 2 918 nm spectral line is parallel to axis c and the polarization direction of 2728 nm spectral line sometimes parallel to the axis c and sometimes parallel to the axis a, besides, the polarization direction of all other spectral lines like 2 710, 2 795, 2 821, 2 837 and 2 862 nm are parallel to the axis c. The four laser spectral lines of 2 710, 2 728, 2 750 and 2 795 nm are obtained under LD end-pumping condition, in which the spectral line of 2 750 nm is realized laser output in Er

: YAP crystal for the first time. All these four spectral lines are linearly polarized light with polarization direction parallel to the  $c$  axis of the crystal. In addition, the absorption spectrum of Er : YAP crystal is measured in 8 K low temperature, the spectrum was peak fitted by Gauss function, according to the fitting results the stark level of the upper and lower level are identified. And combining the laser spectra and fluorescence spectra, the possible laser spectral line transitions are also recognized. In this paper, the research of the Er : YAP crystal polarization characteristics and multi-wavelength laser operating characteristics have instructive significance for the realization of Er : YAP crystal Q-switching technique and the selection of electro-optic Q-switching crystal.

**Keywords** Er : YAP crystal; Polarization characteristics; Multi-wavelength laser operation; Energy levels identify

\* Corresponding author

(Received Jul. 6, 2019; accepted Jan. 22, 2020)

欢迎投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告

## 《光谱学与光谱分析》2020年征订启事

国内邮发代码：82-68

国外发行代码：M905

《光谱学与光谱分析》1981年创刊，国内统一刊号：CN 11-2200/O4，国际标准刊号：ISSN 1000-0593，CODEN码：GYGFED，国内外公开发行，大16开本，332页，月刊；是中国科协主管，中国光学学会主办，钢铁研究总院、中国科学院物理研究所、北京大学、清华大学共同承办的学术性刊物。北京大学出版社出版，每期售价95元，全年1140元。刊登主要内容：激光光谱测量、红外、拉曼、紫外、可见光谱、发射光谱、吸收光谱、X射线荧光光谱、激光显微光谱、光谱化学分析、国内外光谱化学分析领域内的最新研究成果、开创性研究论文、学科发展前沿和最新进展、综合评述、研究简报、问题讨论、书刊评述。

《光谱学与光谱分析》适用于冶金、地质、机械、环境保护、国防、天文、医药、农林、化学化工、商检等各领域的科学研究单位、高等院校、制造厂家、从事光谱学与光谱分析的研究人员、高校有关专业的师生、管理干部。

《光谱学与光谱分析》为我国首批自然科学核心期刊，中国科协优秀科技期刊，中国科协择优支持基础性、高科技学术期刊，中国科技论文统计源刊，“中国科学引文数据库”，“中国物理文摘”，“中国学术期刊文摘”，同时被国内外的CJCR, CNKI, CSCD, SCI, AA, CA, Ei, AJ, PJK, MEDLINE, Scopus等文献机构收录。根据中国科学技术信息研究所发布信息，中国科技期刊物理类影响因子、引文量及综合评价总分《光谱学与光谱分析》都居前几位。欢迎国内外厂商在《光谱学与光谱分析》发布广告（广告经营许可证：京海市监广登字20170260号）。

《光谱学与光谱分析》的主编为高松院士。

欢迎新老客户到全国各地邮局订阅，若有漏订者可直接与《光谱学与光谱分析》期刊社联系。

联系地址：北京市海淀区学院南路76号（南院），

《光谱学与光谱分析》期刊社

邮政编码：100081

联系电话：010-62181070, 62182998

电子信箱：chnghpxygpfx@vip.sina.com

修改稿专用邮箱：gp2008@vip.sina.com

网 址：<http://www.gpxygpfx.com>

