

## 激光与光电子学进展

## 基于光栅腔的 Er:YSGG 固体激光器单模输出特性

李凤, 韩利琪, 余嘉晨, 刘志军\*

电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 611731

**摘要** 针对稀土晶体红外激光器的模式选择和波长控制问题,提出了一种基于光栅耦合的两面镜谐振腔。利用光栅周期性表面的高反射率、频率选择性和角度调谐性质实现了掺铒钇钪镱石榴石晶体(Er:YSGG)的单一激光模式输出和波长控制。实验结果表明,当光栅角度在 $21.1^\circ\sim 21.6^\circ$ 范围变化时,Er:YSGG激光器输出单一模式,波长从2796.8 nm切换到2824.4 nm,输出功率为4.3 mW。该光栅两面镜腔为稀土晶体红外激光器的单模输出提供了一种简易且有效的技术方案。

**关键词** 激光器; 稀土晶体; 波长切换; 光栅谐振腔

中图分类号 O434.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213392

## Single-Mode Output Characteristics of Er:YSGG Solid State Laser Based on Grating Cavity

Li Feng, Han Liqi, Yu Jiachen, Liu Zhijun\*

School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, 611731 Sichuan, China

**Abstract** For the mode-selection and wavelength control of rare-earth crystal infrared lasers, two-sided mirror resonator based on grating-coupling is proposed in this paper. The single laser mode output and wavelength control of yttrium-scandium-gallium-garnet (Er:YSGG) crystals are realized by utilizing the high reflectivity, frequency selectivity and angle tuning properties of the periodic surface of the grating. The experimental results show that when the grating angle varies from  $21.1^\circ\sim 21.6^\circ$ , the Er:YSGG laser exhibited single-mode operation, and its wavelength is switched from 2796.8 nm to 2824.4 nm. The obtained laser output power is 4.3 mW. The grating two-sided mirror cavity provides a simple and effective technical solution for the single-mode output of the rare-earth crystal infrared laser.

**Key words** lasers; rare-earth crystal; wavelength switching; grating cavity

## 1 引言

基于稀土晶体的激光器是红外波段一类重要的光源器件,其辐射波长在 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 之间,涵盖了C—H、O—H和N—H等化学键的特征吸收指纹,在化学物质探测、光谱学和医疗检测等领域具有重要应用。稀土晶体的掺杂元素通常有铥(Tm)<sup>[1-3]</sup>、钬(Ho)<sup>[4-5]</sup>、铒(Er)<sup>[6-8]</sup>等,其辐射波长大多在 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 之间。其中,掺铒离子( $\text{Er}^{3+}$ )激光器的波长在 $2.7\sim 3\ \mu\text{m}$ 波段,能被水分子强烈吸收,在生物和医学方面具有很大的应用潜力。此外,铬离子( $\text{Cr}^{3+}$ )也是 $2\sim 4\ \mu\text{m}$ 红外波段常见的

掺杂离子<sup>[9-11]</sup>。关于掺 $\text{Er}^{3+}$ 中红外固体激光器的研究较多,单掺杂 $\text{Er}^{3+}$ 的激光器输出波长在 $2.79\ \mu\text{m}$ 附近<sup>[12-14]</sup>,当 $\text{Er}^{3+}$ 与其他离子共掺时,激光器输出的波长有单波长<sup>[15]</sup>和双波长<sup>[16]</sup>,但这些激光器通常采用固定的谐振腔,模式间的自然竞争导致激光输出为多个模式和多个波长,无法准确控制激光的波长,限制了稀土晶体激光器在分子传感等方面的实际应用。

针对红外固体激光器的模式和波长控制问题, Moskalev等<sup>[17]</sup>提出了Z型光栅腔,实验装置由1个光栅和3个镜面按照Z型光路排列而成,Cr:ZnS晶体的尺寸为 $7\ \text{mm}\times 7\ \text{mm}\times 2.6\ \text{mm}$ ,在1560 nm波长泵浦

收稿日期: 2021-11-30; 修回日期: 2022-01-04; 录用日期: 2022-01-17; 网络首发日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(61875030)、国家光电子晶体材料工程技术研究中心开放基金(20-01)、中国科学院光电材料化学与物理重点实验室基金

通信作者: liuzhijun@uestc.edu.cn

条件下,通过改变光栅的角度实现了激光波长在 1940~2780 nm 范围内的单模输出,且取得了良好的波长控制和调谐效果。Vermeulen 等<sup>[18]</sup>提出一种 X 型光栅谐振腔的激光波长控制方案,实验系统由 1 个光栅或棱镜和 3 个镜面按照 X 型光路排列而成,使用的激光晶体为 Cr:ZnSe 晶体,在 1800 nm 波长泵浦条件下,通过改变光栅或棱镜的角度实现了波长在 2230~2630 nm 范围内的单模激光输出。

上述报道的 Z 型和 X 型光路的光栅谐振腔腔型复杂,均由多个元件组成,在实验装置搭建和光路调整方面不够简易灵活,且都是针对掺铬离子的晶体,激光波长受限在 1940~2780 nm 范围。因此,本文针对掺铒钇钆石榴石晶体(Er:YSGG)激光晶体,提出了结构相对简单的两面镜光栅腔,在 980 nm 波长泵浦条件下,通过控制光栅的空间角度,实现了波长为 2796.8 nm 和 2824.4 nm 单模激光的动态切换。

## 2 基本原理

### 2.1 Er<sup>3+</sup>能级结构

稀土原子特殊的电子层结构使其在形成离子时具有未填满的 4f 电子层,从而产生丰富的能级结构和长寿命激发态,为红外波长的发光提供了能级基础。掺 Er<sup>3+</sup>稀土晶体的能级结构如图 1 所示。可以发现,在 980 nm 波长泵浦下,离子从基态 <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 能级跃迁到 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 能级,随后从激发态 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 跃迁到 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级,辐射波长为 2790 nm 附近的光子。此外,Er<sup>3+</sup>还可以从激发态 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 跃迁到更低的 <sup>4</sup>I<sub>15/2</sub> 能级,辐射 1530 nm 附近的光子。实验采用原子数分数为 30% 的 Er:YSGG 晶体作为增益介质,其激光上能级寿命约为 5.65 ms,激光下能级寿命约为 1.58 ms<sup>[13]</sup>。按照激光的经典理论,激光上能级寿命  $\tau_2$  大于下能级寿命  $\tau_1$  时才能实现粒子数反转,但该结论建立在激光上能级只产生激光跃迁的假设。如果激光上能级还有其他跃迁,则上能级寿命  $\tau_2$ 、下能级寿命  $\tau_1$  以及上能级到下能级的寿命  $\tau_{21}$  只要满足  $\tau_2 > \xi \tau_1$  ( $\xi = \tau_2 / \tau_{21}$ ) 就能达到粒子数反转条件<sup>[19]</sup>。

### 2.2 衍射光栅

光栅是一种常见的分光元件,其表面具有周期性

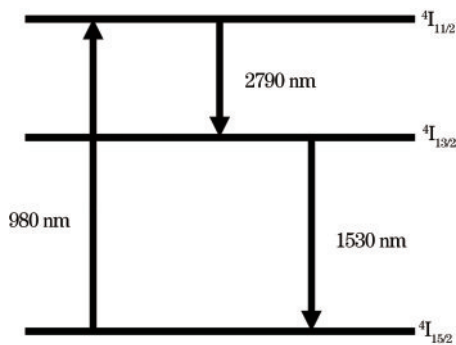


图 1 Er<sup>3+</sup>的能级图

Fig. 1 Energy level diagram of the Er<sup>3+</sup>

的刻槽。由夫琅禾费衍射理论可知,光在光栅刻槽表面以不同的角度反射,对应不同的衍射级次和波长。入射光与衍射光在光栅同侧时,反射光栅的光栅方程可表示为

$$d(\sin \varphi + \sin \theta) = m\lambda, \quad (1)$$

式中: $d$ 为光栅常数; $\varphi$ 为入射角; $\theta$ 为衍射角; $\lambda$ 为光栅波长; $m$ 为级次。当  $m=0$  时,光栅无色散作用,不能用于分光,光能量集中在 0 级,而高级次谱线能量只占很小一部分,闪耀光栅的刻槽面与光栅面不平行,两者形成的夹角(闪耀角  $\gamma$ )在衍射中可以使能量集中在特定级次上。利用光栅在 Littrow 条件下的 1 级衍射使入射光的方向  $\varphi$  与衍射光的方向一致,此时光栅方程可表示为

$$2d \sin \theta = \lambda. \quad (2)$$

从式(2)可以发现,通过改变入射光角度  $\theta$  可实现衍射波长的调节,进而实现激光振荡模式的控制。

## 3 实验装置

实验装置示意图如图 2(a)所示。实验使用的激光晶体是从上海光学精密机械研究所购置的掺杂原子数分数为 30% 的 Er:YSGG 晶体,尺寸为 5 mm×5 mm×10 mm,对 5 mm×5 mm 的端面进行了表面抛光处理,并将晶体放在由铜块和温控台构成的散热装置上。实验采用共轴泵浦,泵浦源为长春新产业光电技术有限公司生产的光纤耦合激光器,型号为 FC-980 nm-25 W-BI90123,波长为 980 nm,输出功率在 0~25 W 之间连续可调。泵浦光经过焦距为 75 mm 的双胶合消色差透镜(M1)、两个凹面镜(M2和M3,曲率半径均为 200 mm)后泵浦晶体,M2和M3凹面镜在 2790 nm 激光波长附近的反射率为 99.7%,在 980 nm 泵浦波长处透射率为 93%。其中:M3作为腔镜和光栅一起形成激光谐振腔;M2放置在激光腔外,将激光输出信号反射耦合到光谱仪。实验采用的光栅刻线密度为 300 g/mm,其闪耀波长为 3000 nm,闪耀角为 26.7°,衍射效率约为 90%。光栅和 M3凹面镜组成两面镜谐振腔,其长度约为 20 mm。整体装置的俯视图如图 2(b)所示,控温装置采用 TEC(Thermoelectric cooler)温控台,利用 TEC 元件和空气对流冷却将激光晶体维持在 17℃温度附近,温度控制精度在 0.1℃以内。图 2(c)为光栅谐振腔的侧视图。其中,温控台上放置一个高度为 30 mm 的铜块,铜块尺寸的设计是为了尽量缩短腔长,减少光学损耗。在晶体旁边放置温度探针,探针连接显示屏,可实时观察晶体温度变化,防止晶体因散热不佳产生损伤。此外,在铜块和晶体之间放上铜纸,以更好地实现散热。当 Er:YSGG 晶体受到一定强度的泵浦后,在凹面镜 M3 和光栅形成的谐振腔中产生激光振荡,输出激光光束由谐振腔外的凹面镜 M2 反射,通过锗滤光片后(滤掉泵浦光)耦

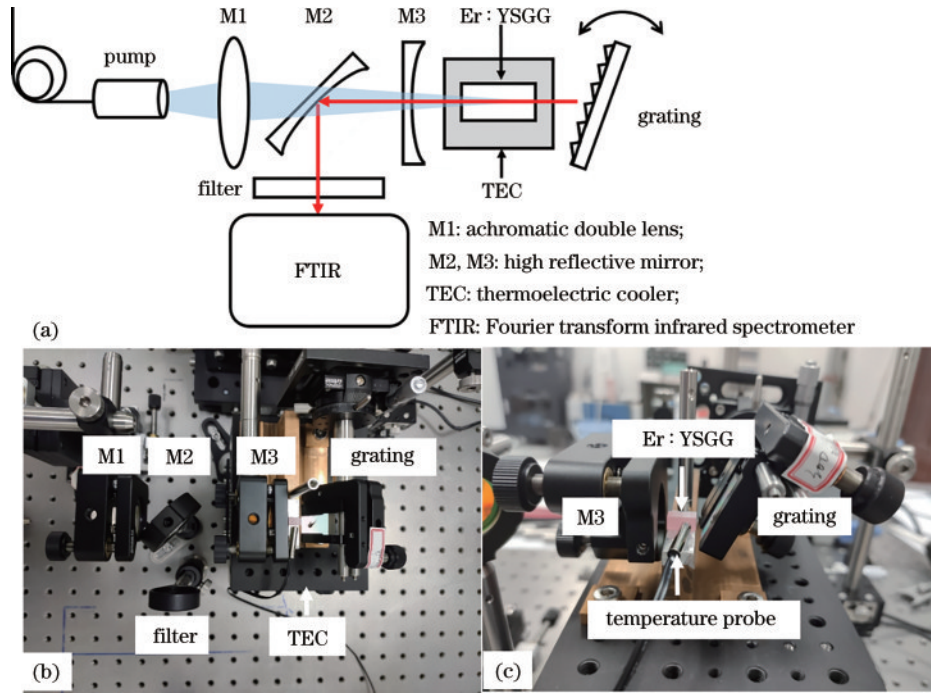


图 2 实验装置的原理。(a)实验装置的示意图;(b)激光器的俯视图;(c)光栅谐振腔的侧视图

Fig. 2 Principle of the experimental setup. (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) vertical view of the laser system; (c) side-view of the grating laser cavity

合到傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)中进行光谱测试。

### 4 实验结果与分析

图 3 为 Er:YSGG 晶体在没有谐振腔条件下测试的荧光光谱。可以发现:荧光波长分布在 2600~2950 nm 范围内,2639、2704、2796、2824 nm 处的荧光较强,为多段分离的谱线;当泵浦功率从 0.6 W 增加至 2.0 W 时,荧光强度在整个光谱范围均有所增强。

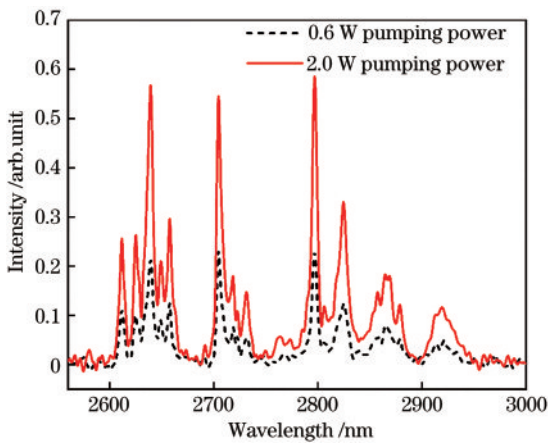


图 3 Er:YSGG 晶体在不同泵浦功率下的荧光谱

Fig. 3 Photoluminescence spectra of Er:YSGG crystal under different pumping powers

当泵浦功率为 6.5 W,晶体温度维持在 17 °C 附近时,利用光栅谐振腔系统测试的激光光谱如图 4 所示。可以发现:当光栅角度为 21.1°时,激光在 2796.8 nm

处单波长输出;当光栅角度为 21.6°时,激光峰向右移动,在 2824.4 nm 处单波长输出,实现了波长切换,波长移动范围达 27.6 nm。为了验证上述光栅角度对激光波长的调控机理,计算了满足 Littrow 条件下的光栅角度。将实验测得的激光波长  $\lambda_1 = 2796.8 \text{ nm}$  和  $\lambda_2 = 2824.4 \text{ nm}$  代入式(2),得到

$$2d \sin \theta_1 = \lambda_1, \tag{3}$$

$$2d \sin \theta_2 = \lambda_2, \tag{4}$$

式中,光栅常数  $d$  由光栅闪耀角  $\gamma = 26.7^\circ$  和闪耀波长  $\lambda_0 = 3000 \text{ nm}$  计算。由式(3)和式(4)计算得出激光波长为 2796.8 nm 和 2824.4 nm 时对应的光栅角度  $\theta_1 = 24.8^\circ$  和  $\theta_2 = 25.0^\circ$ ,比实验读取的光栅角度(21.1°和

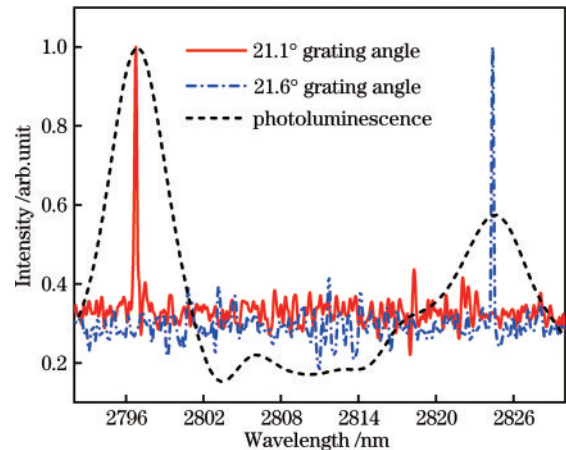


图 4 光栅谐振腔的激光输出光谱

Fig. 4 Laser output spectra of the grating cavity

21.6°)略大。该差异由光栅角度读取时选取的初始参考位置误差导致,激光波长随光栅角度增加发生的红移现象与 Littrow 条件下的光栅方程吻合,证实了光栅的选模特性。值得注意的是,在光栅角度变化过程中,激光波长的移动并不连续,实验采用的 Er:YSGG 晶体荧光是多段分离的谱线,增益谱线不连续,因此在光栅旋转角度时未能实现精细的波长连续调谐,仅观察到了激光在 2796 nm 与 2824 nm 附近有输出,这两个激光波长与荧光光谱的峰值重合,表明该晶体在这两个波长处的增益较大,在其他波长处的增益不足以实现激光振荡。关于增益谱线更确切的理解需要对 Er<sup>3+</sup>的 <sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 和 <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 能级精细结构和特性进行深入了解。

当光栅角度为 21.1°时,激光输出功率随泵浦功率的变化规律如图 5 所示。可以发现,激光阈值为 3.1 W 时,在 7.4 W 的泵浦功率下,测得的最大输出功率为 4.3 mW。激光输出功率随泵浦功率的增长曲线并非线性关系,在 3~5 mW 功率范围内有较大抖动,原因是空气环境中水分子在 2.6~2.8 μm 范围有强烈的吸收峰<sup>[20]</sup>,实验测量过程中环境水含量的波动会导致测得的激光功率出现变化,实验验证需要对光路系统进行抽真空或充氮气。此外,在增加泵浦功率的过程中,晶体置于 30 mm 高的铜块上,使晶体实际温度不能与温控台温度保持一致,晶体温度的浮动也可能造成激光输出功率发生波动。实验测得的激光功率和光-光转换效率都较低,这与实验设计中采用的高反射输出镜有关。为了降低泵浦阈值实现单模激光振荡,实验采用反射率高达 99.7% 的腔镜 M3,其微弱的透过率导致输出激光功率很小。为提高激光功率,在后续实验中可以考虑增加激光晶体长度(提高单程光学增益)、提高光栅的衍射效率以及优化输出镜透过率。采用的 Er:YSGG 晶体端面未做镀膜处理,光在腔内往返一周产生约 40% 的反射损耗,而在晶体端面制备高透膜有助于减少损耗,进一步提高激光输出功率。

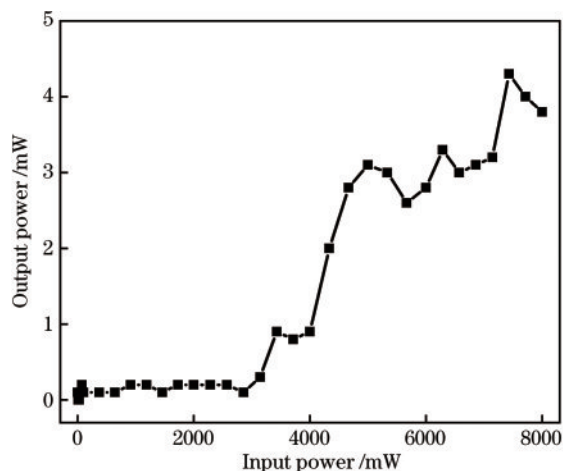


图 5 光栅腔激光器在不同泵浦功率下的输出功率

Fig. 5 Output power of the grating cavity laser under different pump power

## 5 结 论

采用光栅耦合的两镜腔,研究了 Er:YSGG 晶体的红外激光特性,通过使用 Littrow 结构的闪耀光栅实现了激光的选模和波长切换性能,最终实现了激光单模输出。实验结果表明,通过光栅角度的变化,输出激光波长从 2796.8 nm 切换至 2824.4 nm,其最大输出功率为 4.3 mW。由于激光波长可变化的范围与晶体增益和光栅的衍射效率有关,采用荧光光谱较宽且连续的稀土晶体有望实现更宽范围内波长可连续调谐的激光输出,通过优化腔镜结构、晶体尺寸或在端面镀膜也能有效提高激光输出功率。

## 参 考 文 献

- [1] Guillemot L, Loiko P, Kifle E, et al. Watt-level mid-infrared continuous-wave Tm:YAG laser operating on the <sup>3</sup>H<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>5</sub> transition[J]. Optical Materials, 2020, 101: 109745.
- [2] Wang F, Huang H T, Chen H W, et al. GSA and ESA dual-wavelength pumped 2.3 μm Tm:YLF laser on the <sup>3</sup>H<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>5</sub> transition[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(9): 091405.
- [3] 袁振, 令维军, 陈晨, 等. LD 双端泵浦高功率声光调 Q Tm:YAP 激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501018. Yuan Z, Ling W J, Chen C, et al. A high-power LD double-end-pumped acousto-optic Q-switched Tm:YAP laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501018.
- [4] Berrou A, Kieleck C, Eichhorn M. Mid-infrared lasing from Ho<sup>3+</sup> in bulk InF<sub>3</sub> glass[J]. Optics Letters, 2015, 40(8): 1699-1701.
- [5] Jambunathan V, Mateos X, Loiko P A, et al. Growth, spectroscopy and laser operation of Ho:KY(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>[J]. Journal of Luminescence, 2016, 179: 50-58.
- [6] Liu J J, Liu J, Guo Z N, et al. Dual-wavelength Q-switched Er:SrF<sub>2</sub> laser with a black phosphorus absorber in the mid-infrared region[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 30289-30295.
- [7] Dinerman B J, Moulton P F. 3-μm cw laser operations in erbium-doped YSGG, GGG, and YAG[J]. Optics Letters, 1994, 19(15): 1143-1145.
- [8] 王庆, 高春清. 人眼安全波段全固态单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 0501004. Wang Q, Gao C Q. Research progress on eye-safe all-solid-state single-frequency lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501004.
- [9] MacDonald J R, Beecher S J, Berry P A, et al. Compact mid-infrared Cr:ZnSe channel waveguide laser[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(16): 161110.
- [10] Vermeulen N, Wasylczyk P, Tonchev S, et al. Low-loss wavelength tuning of a mid-infrared Cr<sup>2+</sup>:ZnSe laser using a Littrow-mounted resonant diffraction grating[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(8): 606-612.
- [11] 李永智, 张萌, 闫东钰, 等. 基于 Yb:YAG/YAG/Cr:YAG/YAG 复合晶体的高效被动调 Q 激光器[J]. 中国

- 激光, 2021, 48(21): 2101005.
- Li Y Z, Zhang M, Yan D Y, et al. Highly efficient passively Q-switched laser based on Yb: YAG/YAG/Cr: YAG/YAG composite crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2101005.
- [12] Shen B J, Kang H X, Chen P, et al. Performance of continuous-wave laser-diode side-pumped Er:YSGG slab lasers at 2.79  $\mu\text{m}$ [J]. Applied Physics B, 2015, 121(4): 511-515.
- [13] Hu L Z, Sun D L, Luo J Q, et al. Effect of  $\text{Er}^{3+}$  concentration on spectral characteristic and 2.79  $\mu\text{m}$  laser performance of Er:YSGG crystal[J]. Journal of Luminescence, 2020, 226: 117502.
- [14] Hu L Z, Sun D L, Wang Y L, et al. Laser performance of high repetition frequency on a 970 nm LD side-pumped Er:YSGG crystal operated at 2.79  $\mu\text{m}$ [J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 105: 103224.
- [15] Fang Z Q, Sun D L, Luo J Q, et al. Influence of  $\text{Cr}^{3+}$  concentration on the spectroscopy and laser performance of Cr, Er:YSGG crystal[J]. Optical Engineering, 2017, 56(10): 107111.
- [16] Chen Y Z, Zhang Q L, He Y, et al. Diode end-pumped dual-wavelength Er, Pr:GSAG laser operating at 2696 and 2828 nm[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121: 105811.
- [17] Moskalev I S, Fedorov V V, Mirov S B. 10-watt, pure continuous-wave, polycrystalline  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$  laser[J]. Optics Express, 2009, 17(4): 2048-2056.
- [18] Vermeulen N, Wasylczyk P, Tonchev S, et al. High-performance wavelength tuning of a mid-infrared solid-state laser using a resonant diffraction grating[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8433: 843307.
- [19] Pollack S A, Chang D B. Upconversion-pumped population kinetics for  $^4\text{I}_{13/2}$  and  $^4\text{I}_{11/2}$  laser states of  $\text{Er}^{3+}$  ion in several host crystals[J]. Optical and Quantum Electronics, 1990, 22(1): S75-S93.
- [20] Lackner M, Forsich C, Winter F, et al. *In situ* investigation of laser-induced ignition and the early stages of methane-air combustion at high pressures using a rapidly tuned diode laser at 2.55  $\mu\text{m}$ [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2003, 59(13): 2997-3018.