

文章编号 2095-1531(2016)05-0563-06

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 全固态中红外激光器

王云鹏, 王 飞, 赵东旭*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:建立了一种高质量、高效率全固态中红外激光系统,并对激光输出的效率、光束质量等指标进行了测试。首先,以二极管激光器为泵浦源, $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 晶体为增益介质,搭建了输出波长为 $1.97\ \mu\text{m}$ 的近红外激光器。然后,以 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光器为泵浦源,自行开发研制的 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 单晶为增益介质,搭建了全固态中红外激光器。最后,测试了全固态中红外激光器的光束质量及激光器出光效率,并对谐振腔光效率的理论输出值与实际的激光器出光参数进行了对比。实验结果表明:此全固态中红外激光器的光光转换效率为17.2%,斜率效率为20%,在最高输出能量为3 W时的光束质量(M^2)在 x 和 y 方向分别为1.7和1.73,光束基本为圆形的高斯光斑。

关键词:全固态中红外激光器; $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 晶体; $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 单晶;谐振腔

中图分类号:TN216 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20160905.0563

All solid state Mid-IR laser of $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$

WANG Yun-peng, WANG Fei, ZHAO Dong-xu*

(State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail zhaodx@ciomp.ac.cn

Abstract: A kind of all solid state Mid-IR laser system with high quality and high efficiency is built. Firstly, we use diode laser as the pump source, $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ crystal as the gain medium, to build a NIR laser with the wavelength of $1.97\ \mu\text{m}$. Secondly, we use NIR laser as the pump source, a self-made $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ single crystal as the gain medium, to build an all solid state Mid-IR laser. Finally, we test the quality and efficiency of output laser, and comparison of the theoretical output efficiency of the laser with the actual parameters is carried out. The experimental results show that light-light conversion efficiency of the all solid state Mid-IR laser is 17.2%; slope efficiency is 20%; the beam quality(M^2) of the highest output at 3 W are respectively 1.7 and 1.73 in x and y direction; the Gaussian beam is circular.

Key words: all solid state Mid-IR laser; $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ crystal; $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ single crystal; resonant cavity

收稿日期:2016-04-29;修订日期:2016-06-10

基金项目:科技部国际合作资助项目(No. 2014DRR10420)

Supported by International Cooperation Project of Ministry of Science and Technology of China (No. 2014DRR10420)

1 引言

中红外波段(2~6 μm)激光主要用于遥感、痕量气体分析、污染测量、军事对抗等方面,并在生物医学诊断和医学治疗方面有很大的应用价值^[1-5]。在中红外激光器领域,全固态激光器因其具有高效率、大功率、波长可调谐范围宽、光束质量好、体积小、性能可靠及长寿命等优点被广泛应用。其中过渡金属离子 Cr^{2+} 掺杂的 II-VI 族化合物晶体 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 为增益介质、输出波长为 2.5 μm 左右的全固态激光器是最受关注的中红外激光器之一。

20 世纪 90 年代, Ralph H. Page 等人对掺杂二价过渡金属离子 (Cr^{2+}) 的 II~VI 硫化物中的光谱特性进行了细致的研究^[6]。目前国外对 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器的研究已经取得了一定的成果^[6-13]。2001 年, G. J. Wagner 等人用 1.93 μm 泵浦源泵浦 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体, 获得了平均功率为 1.7 W 的中红外激光, 效率达到了 36%^[11]。2004 年, T. J. Carrig 等人以调 Q 的 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光器泵浦 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体, 获得了平均脉冲功率为 18.5 W 的中红外激光^[10]。2008 年, I. S. Moskalev 等人研制的 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 连续激光器输出功率达到了 12.5 W^[14], 出光效率达到了 43.5%, 这是目前报导的输出功率最大的连续激光器。国内在近十几年的 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 全固态中红外激光器的发展中, 由于激光器增益介质的尺寸及掺杂均匀度等参数一直受热扩散法晶体生长方法限制, 很难使 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 全固态中红外激光器的出光效率、光束质量等关键指标达到要求。改变晶体的生长方法从而提高激光器性能是目前要解决的一个难题。

本文在高温高压下, 在全石墨腔内运用布里奇曼缓慢生长晶体的方法, 生长出了高质量 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 单晶, 这种生长方法异于国内现有的在 ZnSe 晶体生长完成后再对其晶体进行 Cr^{2+} 离子注入的生长技术, 不仅避免了 Cr^{2+} 掺杂的不均匀性, 而且将小面积片状晶体变成大的块状晶体, 增加了泵浦光的径向吸收长度, 从而能够有效提高激光的输出效率, 进一步为国内 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 全固态

中红外激光器技术的发展奠定基础。

对 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 进行抽运的波长为 2 μm 左右, $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光器无疑是合适的泵浦源。 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 是最早被研究的波长为 2 μm 激光晶体之一。1995 年 R. C. Stoneman 和 L. Esterowitz 等人用 Ti:sapphire 激光器泵浦 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 晶体, 获得了 1.93~2.0 μm 波长的连续可调激光输出^[14]; 1998 年, Payne M. J. 等人用二极管泵浦 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 晶体, 得到了 730 mW, 波长范围为 1.97~2.02 μm , 激光器效率为 42% 的连续激光输出^[15]; 2010 年, J. Li 等人用 793 nm 波长光纤耦合二极管泵浦 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 晶体, 获得了 344 mW、1.99 μm 、效率为 33% 的红外激光输出^[16]。与传统的灯泵浦方式相比, 采用波长为 790 nm 激光二极管泵浦 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 晶体, 不仅大大改善了激光器的效率和热效应, 而且具有寿命长、体积小、稳定度高等优点。因此, 随着激光二极管泵浦源的大力发展, 以二极管激光器泵浦的 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光器亦得到了广泛的发展与应用。为实现高质量的 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 全固态中红外激光器的激光输出, 本文中首先搭建了 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光器作为中红外全固态激光器泵浦源, 以高温高压下布里奇曼方法缓慢生长的 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体为激光器的增益介质, 最终获得高功率、高光束质量、输出波长为 2.5 μm 的全固态中红外连续激光输出。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示, 首先运用输出波长在 1.97 μm 附近的 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光器作为 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 全固态中红外激光器泵浦源。波长为 0.79 μm 、输出功率为 40 W LIMO 二极管激光器作为 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光器泵浦源, 以 400 μm 光纤耦合输出并经过光纤聚焦镜 (FF) 聚焦于原子百分比为 3% 的 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 晶体柱 (C1) 中 (由中电十一所购得), 聚焦光斑约为 12 μm 。晶体尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 12 mm, c 轴切割, 前后表面分别镀 790 nm 及 1.97 μm 波长增透膜。谐振腔搭建为平凹腔 (输入端腔镜 M1 镀 $R \approx 99\%$ 的 1.97 μm 波长全反膜和 $T \approx 80\%$ 的 970 nm 波长增透膜, 输出

耦合镜 M2 选 $r = -150$ mm 的凹面镜并镀有 $R \approx 96.3\%$ 的 $1.97 \mu\text{m}$ 波长高反膜。

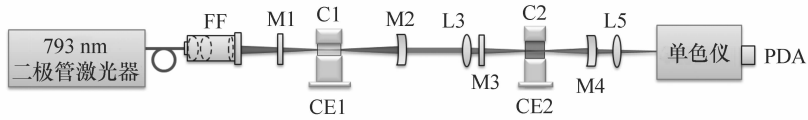


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

晶体制冷系统如图1中CE1、CE2,以紫铜为晶体承载架包覆晶体,后置TCE1-12706制冷片,其后固定散热器。此散热器为商用CPU水冷循

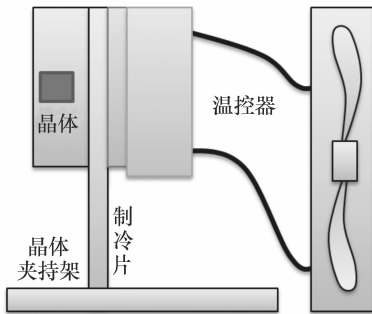


图2 晶体制冷装置

Fig. 2 Schematic of crystal cooling device

环散热器,由散热泵头、短水管、散热网、风扇及内置散热液组成,结构如图2所示。工作时,散热泵头使散热液在系统内循环,经过与散热片热端接触的紫铜传热头后迅速升华并带走大量热量,当散热液循环至散热网时,通过风扇给散热液降温并流至泵头导热端,继续进行循环散热。这种散热装置比起单风扇散热更高效,而且在移动激光器本体时比有外接循环水系统的激光器装置更加方便,不再受水管的长度限制,可在不增大激光器体积的前提下增大激光器的使用自由度。将温度探头装置于紫铜晶体承载器中,由改装的STC-8080A+温控器连接制冷片和散热器风扇,在实时观测晶体温度情况下调节风扇转速及制冷片输入电流,对晶体温度进行精确调控,调节精度为 $0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。调节晶体温度保持 $(22 \pm 0.5) \text{ } ^\circ\text{C}$,其温变参数如图3所示。

将Tm³⁺:YAP激光器发射的波长为 $1.97 \mu\text{m}$ 的红外激光用 $f = 50$ mm 氟化钙透镜(L3)聚焦于

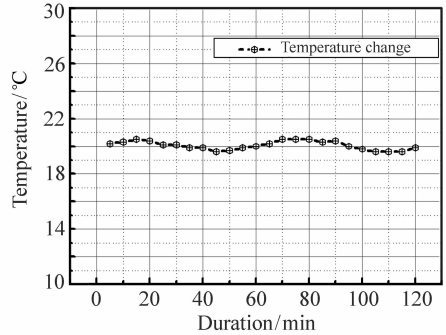


图3 晶体温变参数

Fig. 3 Curve of temperature change parameter of the crystal

尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ 的Cr²⁺:ZnSe晶体中,Cr²⁺:ZnSe晶体为本组在高温高压下全石墨腔内运用布里奇曼缓慢方法生长的原子百分比为3%的单晶^[17]。谐振腔依然利用平凹腔,谐振腔的人光端镜(M3)镀 $R \approx 98.6\%$ 的 $2 \sim 2.9 \mu\text{m}$ 波长全反膜和 $T \approx 78\%$ 的 $1.97 \mu\text{m}$ 波长增透膜;耦合输出镜(M4)镀 $R \approx 96.2\%$ 的 $2 \sim 2.9 \mu\text{m}$ 波长高反膜,依然运用与Tm³⁺:YAP激光器相同结构的晶体制冷系统使晶体恒温。利用 $f = 100$ mm的氟化钙透镜将输出激光聚焦进卓立汉光 omni-λ 中红外光谱仪中,并由Thorlabs公司的PDA20Ha中红外光电探测器探测,对各波长进行单点相对强度的探测。

3 实验结果与讨论

图4(a)为Tm³⁺离子的能级谱图,当Tm³⁺离子吸收790 nm光后,先从基态³H₆跃迁到³H₄能级,由于³H₄、³F₄、³H₆三能级相距很近,Tm³⁺将从³H₄态到基态发生能量转移,中间产生2个到³F₄

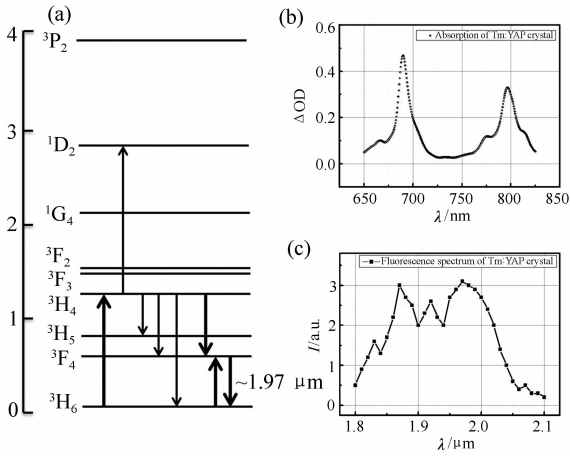


图 4 Tm^{3+} 发光能级谱图 (a) 及 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 晶体的吸收 (b) 及荧光光谱 (c)

Fig. 4 Diagram of Tm^{3+} energy level transition (a) and absorption (b)/luminescent (c) spectrum of $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ crystal

能级的跃迁,而处于 ${}^3\text{F}_4$ 能级的 Tm^{3+} 进一步向基态跃迁产生 $1.97\ \mu\text{m}$ 左右的荧光,这即是 $790\ \text{nm}$ 光泵浦 Tm^{3+} 的发光原理。本文所购得的 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 晶体经瓦里安CARY500紫外可见近红外光谱仪和卓立汉光omni- λ 中红外光谱仪测得吸收光谱及发光光谱如图4(b)、4(c)所示,符合 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光器增益介质条件。

本文搭建的 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光器泵浦源的电流功率(P_{current})与二极管输出功率(P_{output})成线性关系,满足:

$$P_{\text{current}} = 1.1P_{\text{output}}. \quad (1)$$

光功率探测器PDA所测得的二极管输入电流与激光的发射功率的相关曲线如图5(b)所示,利用波长为 $793\ \text{nm}$ 的二极管激光器直接泵浦掺杂原子百分比浓度为3%的 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 晶体实现了 $14.1\ \text{W}$ 的 $1.97\ \mu\text{m}$ 激光输出,激光光谱如图5(a)所示,光光转换效率为36.2%,斜率效率为40%,如图5(b)所示。在最高输出 $14.1\ \text{W}$ 时的光束质量 M^2 在 x 和 y 方向分别为1.10和1.12。将光束扩束至半径约为 $7\ \text{mm}$,以一块带 $200\ \mu\text{m}$ 细孔的黑板纵切光斑并使光束通过小孔,固定黑板于水平/竖直二维平移台上,在 $7\ \text{mm} \times 7\ \text{mm}$ 面积上移动,以光斑中心为探测面积中点,水平/竖直方向每隔 $1\ \text{mm}$ 采集该点透光能量,从而得到

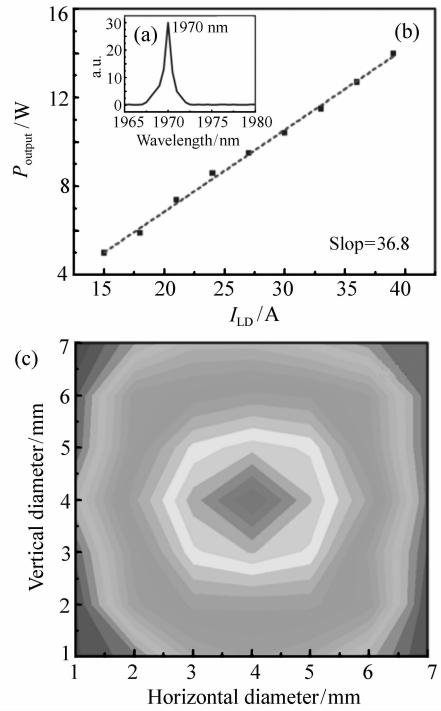


图 5 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光器输出光谱 (a)、输出功率曲线 (b) 及光束质量图 (c)

Fig. 5 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ laser spectrum (a), output power curve (b) and the beam profile (c)

光斑能量分布。图5(c)为 $\text{Tm}^{3+}:\text{YAP}$ 激光光束能量分布示意图。从图中可以看到光束基本为圆形的高斯光斑,因平移台精度的限制使得采集的数据间隔稍大。

利用 $\text{Tm}:\text{YAP}$ 激光器作为一级泵浦源泵浦掺杂浓度原子百分比为3%的 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体,实现了约 $3\ \text{W}$ 的 $2.3\ \mu\text{m}$ 激光输出,如图6(a)所示,光光转换效率为17.2%,斜率效率为20%,如图6(b)所示。在最高输出 $3\ \text{W}$ 时,光束质量 M^2 在 x 和 y 方向分别为1.7和1.73,光束基本为圆形的高斯光斑,如图6(c)所示。

为了与实验中得出的激光输出效率相比较,利用激光器动力学模型推测激光器的理论输出效率。假设腔内抽运光和激光在 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体中有很好的模式重叠,忽略横向光场分布的不同,则激光器模型应满足:

$$R_1 R_2 T_a^2 T_b^2 e^{2\lg(\gamma_{\text{th}} - \alpha)} = 1, \quad (2)$$

式中, R_1 、 R_2 为谐振腔前后端镜的反射率, T_a 、 T_b 为激光介质前后端透射率, γ_{th} 为激光阈值, α 为光损

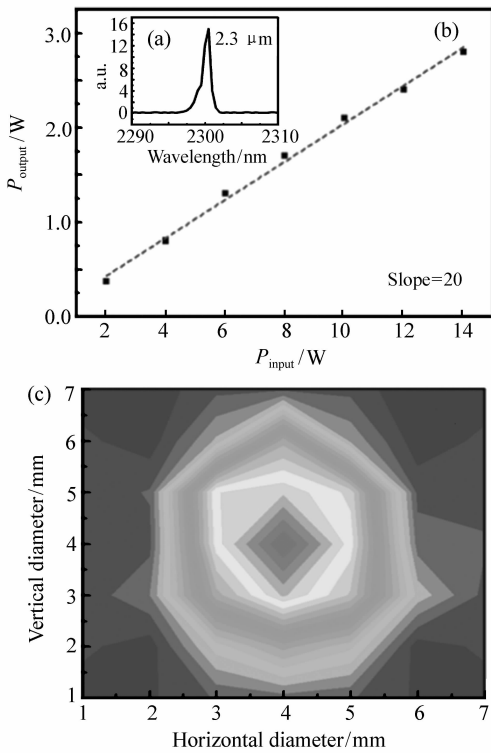


图6 Cr²⁺:ZnSe 激光器输出光谱(a)、输出功率曲线(b)及光束质量图(c)

Fig. 6 Cr²⁺:ZnSe laser spectrum(a) output power curve (b) and the beam profile(c)

失率。如果要实现激光输出,则激光介质要在足够功率的泵浦光照射下,小信号增益高于激光阈值增益。受激发射导致上能级粒子减少而使光增益减小到阈值。当上能级粒子数饱和到阈值水平,腔内振荡增益与损耗抵消,激光器达到动力学平衡。在腔内,振荡光强(I_{oc})为前向(I_f)与后向(I_b)光强之和,假设前后光场强度相等,因此,实际输出功率密度就是顺光方向光场能量的百分比,则输出光光强 I_{out} 应为:

$$I_{out} = \frac{I_{oc}}{2} T_b T_{out}, \quad (3)$$

式中, T_{out} 为输出镜透射率。设 P_{abs} 为吸收光的泵浦功率,阈值为 P_{th} ,则将 P_{abs} 和 P_{th} 代入式(2)、(3)中得到的输出光强为:

$$I_{out} = \frac{v_l}{v_p} \frac{T_b T_{out}}{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_2 T_a^2 T_b^2}\right)} \frac{l_g}{V} (P_{abs} - P_{th}). \quad (4)$$

又因为

$$\eta_{slope} = \frac{I_{out}}{(I_{abs} - I_{th})}, \quad (5)$$

则将式(4)代入式(5)中有:

$$\eta_{slope} = \frac{v_l}{v_p} \frac{T_b T_{out}}{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_2 T_a^2 T_b^2}\right)}. \quad (6)$$

将上述提及的镜面参数与晶体参数代入式(6)中,得到激光器效率最大为40%。考虑到腔内振荡损耗以及腔内损失分布的不均匀性,实际得到的激光效率应略小于激光输出效率的理论值。实验中得到的 Cr²⁺:ZnSe 全固态激光器的光束质量良好,输出效率约为20%。在实验中,相对于理论计算中的参数,如 T_b 、 T_{out} 等参数的绝对数值都受介质膜的制作方法及其作用波长带宽影响,不仅如此,整个谐振过程的热损耗以及机械调制也会影响激光器的整个输出效率。

4 结 论

本文以二极管激光器为泵浦源搭建了波长为 1.97 μm 输出的 Tm³⁺:YAP 激光器,并以此为泵浦源,利用 Cr²⁺:ZnSe 晶体为增益介质,完成了 Cr:ZnSe 全固态中红外激光器的设计与搭建,中红外激光光束质量良好,输出效率达到20%。结果表明,本组自行研发的 Cr²⁺:ZnSe 晶体适用于中红外激光的增益介质。

参考文献:

- [1] GEBBIE H A, HARDING W R, HILSUM C, et al. . Atmospheric transmission in the 1 to 14 μ region[J]. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 1951, 206(1084): 87-107.
- [2] SCOTT D C, HERMAN R L, WEBSTER C R, et al. . Airborne Laser Infrared Absorption Spectrometer (ALIAS-II) for in situ atmospheric measurements of N₂O, CH₄, CO, HCL, and NO₂ from balloon or remotely piloted aircraft platforms[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(21): 4609-4622.

- [3] 黄晖,潘舜臣,姬荣斌,等. 射线探测用碲锌镉晶体及其器件研究[J]. 发光学报,2005,26(6):807-812.
HUANG H,PAN SH CH,JI R B,*et al.*. Research on the cadmium zinc telluride crystal and its device for radiative ray detection[J]. *Chinese J. Luminescence*,2005,26(6):807-812. (in Chinese)
- [4] 高娟娟,李夏,高松. 石英光子晶体光纤中高功率中红外超连续谱的产生[J]. 发光学报,2015,36(2):226-230.
GAO J J,LI X,GAO S. High power mid-infrared supercontinuum generation in silica photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. luminescence*,2015,36(2):226-230. (in Chinese)
- [5] 贾玉洁,林摇健,张文俊. 氟化物对 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺的碲酸盐玻璃上转换和红外发光性能的影响[J]. 发光学报,2014,35(3):287-292.
JIA Y J,LIN Y J,ZHANG W J. Effect of fluoride on up-conversion and infrared luminescence properties of $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped tellurite glass[J]. *Chinese J. luminescence*,2014,35(3):287-292. (in Chinese)
- [6] PAGE R H,SCHAFFERS K I. Cr^{2+} -doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*,1997,33(4):609-620.
- [7] WAGNER G J,CARRIG T J,JARMAN R H. High-efficiency, broadly tunable continuous-wave $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser[J]. *Trends in Optics and Photonics,Advanced Solid-State Lasers*,1999,26:427-435.
- [8] SOROKIN E,SOROKINA I T. Tunable diode-pumped continuous-wave $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser[J]. *Applied Physics Letters*,2002,80(18):3289-3292.
- [9] SOROKIN E,NAUMOV S,SOROKINA I T. Ultrabroadband infrared solid-state lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*,2005,11(3):690-713
- [10] CARRIG T J,WAGNER G J,ALFORD W J. Chromium-doped chalcogenide lasers[J]. *SPIE*,2004,5460:74-83
- [11] IRINA T. SOROKINA. Cr^{2+} -doped II-VI materials for lasers and nonlinear optics[J]. *Optical Materials*,2004,26:395-413.
- [12] SOROKINA I T,SOROKIN E,DI LIETO A. Efficient broadly tunable continuous-wave $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ laser[J]. *J. Optical Society of America B*,2001,18(7):926-931.
- [13] CARRIG T J,WAGNER G J,CARRIG. Power scaling of $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lasers[J]. *Trends in Optics and Photonics,Advanced Solid-State Lasers*,2001,50:506-511.
- [14] MOSKALEV I S,FEDOROV V V,MIROV S B. Tunable, single-frequency, and multi-watt continuous-wave $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ lasers[J]. *Optics Express*,2008,16(6):4145-4153.
- [15] STONEMAN R C,ESTEROWITZ L. Efficient 1.94- μm Tm:YALO laser[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*,1995,1:78-81.
- [16] ELDER I F,PAYNE M J. Lasing in diode-pumped Tm:YAP, Tm, Ho:YAP and Tm, Ho:YLF[J]. *Optics Communications*,1998,145(6):329-339.
- [17] LI J,YANG S H,ZHANG H Y. Diode-pumped room temperature single frequency Tm:YAP laser[J]. *Laser Physics Letters*,2010,7:203-205.
- [18] 王云鹏,王飞,赵东旭. 高温高压制备 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 单晶及其光学性质[J]. 中国光学,2015,8(4):615-620.
WANG Y P,WANG F,ZHAO D X. Optical properties of $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ single crystal grown under high temperature and high pressure[J]. *Chinese Optics*,2015,8(4):615-620. (in Chinese)

作者简介:



王云鹏(1985—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事红外激光开发研制及超快激光的研制及相关化学、生物超快动力学方面的研究。E-mail: wangyunpeng@ciomp.ac.cn



赵东旭(1974—),男,辽宁新民人,博士,研究员,博士生导师,主要从事晶体生长、纳米结构与器件方面的研究。E-mail: zhaodx@ciomp.ac.cn