

文章编号: 0258-7025(2008)10-1495-05

# Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 的激光输出和调谐性能

杨勇 唐玉龙 徐剑秋 杭寅

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 具有很宽的吸收带和发射带,是中红外波段优秀的可调谐激光材料。从吸收光谱、发射光谱以及角度调谐输出对 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体的激光输出性能进行了研究。采用真空高温扩散法制备 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体,获得了高浓度的 Cr<sup>2+</sup> 离子掺杂的厚 1.7 mm,直径 10 mm 的薄片 ZnSe 晶体。使用中心波长 2.05 μm,最大输出功率 8 W 的 Tm 离子掺杂的光纤激光器抽运,使用平凹腔结构搭建谐振腔,获得了最大平均功率 1.034 W,中心波长 2.367 μm,线宽 10 nm 的连续激光输出。利用角度调谐的方法,对 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 晶体的调谐性能进行了研究,在 100 nm 范围内获得了调谐输出。

**关键词** 材料;中红外;ZnSe 晶体;调谐激光

**中图分类号** O472<sup>+</sup>.3;TN244 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083510.1495

## Laser Output and Tuning Ability of Cr<sup>2+</sup>:ZnSe

Yang Yong Tang Yulong Xu Jianqiu Hang Yin

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Cr<sup>2+</sup>:ZnSe having a wide range of absorption and emission spectra, is an excellent tuning laser material in mid-IR wavelength range. In this paper, lasing abilities of Cr<sup>2+</sup>:ZnSe had been studied by analyzing the absorption spectrum, emission spectrum and tuning ability. The Cr<sup>2+</sup>:ZnSe poly-crystal laser material is prepared by physical vapour transport (PVT) technique. The sample is cut and polished in thickness of 1.7 mm and with diameter of 10 mm. Pumped by a 2.05 μm Tm-ion doped silica fiber laser, delivering maximum output power of 8 W, maximum average output power of 1.034 W around 2.367 μm was demonstrated in a plate-concave resonate. The laser bandwidth was measured as 10 nm. At the same time, the laser can be tuned in 100 nm range by angle-tuning method in research of tuning ability of the laser material.

**Key words** materials; Mid-IR; ZnSe crystal; tunable laser

## 1 引言

1~3 μm 超短脉冲和金属掺杂晶体超宽带连续激光器在过去的十年里获得了巨大的进步。金属离子掺杂的超宽脉冲中红外固体激光器越来越多地应用在气体检测、遥感、通信、眼科医学、神经外科等领域。宽带激光二极管抽运激光器的发展中,最重要的进步是发现了掺 Cr<sup>2+</sup> 的硫化物晶体,特别是宽带调谐。中心波长在 2.5 μm 附近的连续输出的 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器。在 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 系统中可以获得峰值

功率为千瓦级的皮秒脉冲和 1100 nm 的连续波调谐带宽。所有固态激光材料中它的增益带宽最大,掺 Cr<sup>2+</sup> 激光器最终可以产生 1~2 个光学周期的超短脉冲,所以飞秒激光科学也是 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器一个十分重要和新颖的应用领域<sup>[1,2]</sup>。

Ralph H. Page 等<sup>[1]</sup>在上世纪 90 年代,已经对作为中红外激光材料的 II-VI 硫化物中掺杂二价过渡金属离子(Cr<sup>2+</sup>)的光谱特性进行了细致的研究。目前国外对 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 激光器的研究也已经取得了相当的成果<sup>[1~8]</sup>;G. J. Wagner 等<sup>[6]</sup>获得了

收稿日期:2007-10-12;收到修改稿日期:2007-12-20

基金项目:国家自然科学基金(60678016)资助项目。

作者简介:杨勇(1982-),男,山西人,硕士研究生,主要从事中红外固体激光器研究。E-mail: xianji@siom.ac.cn

导师简介:徐剑秋(1969-),男,陕西人,研究员,博士生导师,主要从事激光技术和物理的研究。

E-mail:jqxu@siom.ac.cn

最大 1.7 W 的平均连续输出功率, T. J. Carrig 等<sup>[5]</sup>获得了最大 18.5 W 的平均脉冲功率, Sorokina 等<sup>[7,8]</sup>得到最大 1100 nm 的调谐范围和最窄 4 ps 的脉宽。而国内对于该激光器的研究才刚刚开始。本文对  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  晶体的激光输出特性进行了研究, 并搭建了平凹谐振腔获得了 2.367  $\mu\text{m}$  中红外波段的激光输出。

## 2 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体材料的制备和工作特性

采用真空高温扩散法制备  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  晶体, 它被加工成厚 1.7 mm, 直径 10 mm 的薄片<sup>[9]</sup>。 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  晶体呈深红色, 吸收光谱如图 1(插图为其发射光谱)所示, 在 1776 nm 处的吸收系数为  $13.5 \text{ cm}^{-1}$ , 吸收带很宽, 达到 400 nm。在  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  中观察到的红外吸收和发射谱线均来自于  $\text{Cr}^{2+}$  离子中  $^5T_2 \rightarrow ^5E$  能级间的吸收和跃迁。能级加宽受到振动和电子-声子相互作用影响。根据 Laporte 规则, 上转换和上能级吸收很微弱, 可忽略<sup>[10]</sup>。

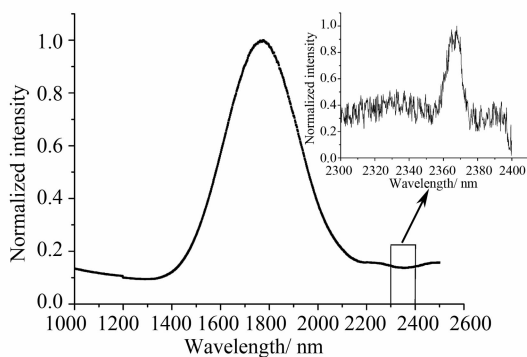


图 1 多晶  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  的吸收光谱和发射光谱(插图)  
Fig. 1 Absorption spectrum and emission spectrum (insert drawing) of poly-crystal  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$

用输出波长在 2.05  $\mu\text{m}$  附近, 最大功率 8 W 的 Tm 离子掺杂的光纤激光器抽运, 实验中设计了一个平凹谐振腔对  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  的激光输出性能进行了研究, 激光器整体结构如图 2 所示。 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  多晶薄片的一个表面镀 1.9  $\mu\text{m}$  和 2.4  $\mu\text{m}$  增透膜 ( $T > 99.8\%$ ); 另一表面镀 1.9  $\mu\text{m}$  高反(抽运光  $R \approx 97\%$ ), 2.4  $\mu\text{m}$  部分反射膜(激光  $R \approx 95\%$ ,  $T \approx 5\%$ ), 并将这一面作为激光器的输出端。使用一个曲率为 500 mm 的凹面镜作为谐振腔的后反射镜。ZnSe 薄片出射面通过导热银胶固定在铜制热沉上, 自然冷却, 热沉中心开有直径 3 mm 的通光孔。抽运光束以与光轴小于  $10^\circ$  的夹角近似垂直入射到晶

体入射面。抽运光束通过焦距为 13 mm 和 22.5 mm 的两个氟钨酸盐红外高透过率透镜准直和聚焦, 聚焦后光纤激光器输出的激光在晶体表面形成一个直径小于 0.5 mm 的入射光斑耦合进晶体内部。激光器整个谐振腔长约 26 mm。

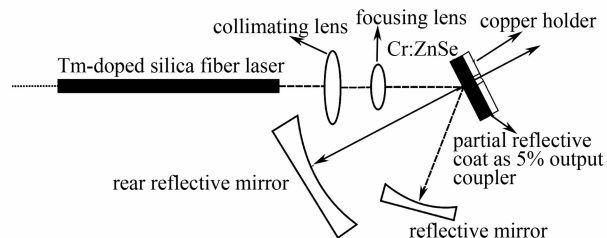


图 2  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光器结构

Fig. 2 setup of  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  laser

## 3 实验结果

### 3.1. 动力学模型

激光器动力学模型是用来预测为了达到设计的输出功率和效率所需要的抽运功率水平的一维模拟。为了简化, 一般假设腔内的抽运光和激光在增益介质中有很好的模式重叠。如果这些假设成立的话, 动力学模型获得的数据比较符合实际。

端抽运的驻波激光器模型大量应用在  $\text{Cr}^{2+}$  掺杂的激光器建模中。激光器由激光增益介质、两个腔镜构成, 如图 3 所示。后腔镜起高反作用, 另一个是对激光部分反射, 作为输出镜。模型是一维的, 完

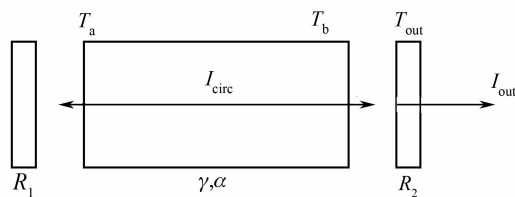


图 3 激光器模型的谐振腔结构图

Fig. 3 Cavity resonator schematic of laser model

全忽略了横向光场分布的不同。图中  $R_1, R_2$  是两个腔镜的反射率, 取 99.5% 和 95%,  $T_a, T_b$  是激光介质棒两端面的透射率, 考虑到晶体端面镀增透膜和部分反射膜作为输出, 分别取 99% 和 1,  $T_{\text{out}} = 1 - R_2$  是输出镜的透射率,  $I_{\text{circ}}$  为振荡光强,  $I_{\text{out}}$  为输出,  $\gamma$  为增益系数,  $\alpha$  为光损失率。

根据图 3 所示的激光器模型, 阈值  $\gamma_{\text{th}}$  可由下式得到

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

$$\gamma_{\text{th}} = \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2 T_a^2 T_b^2} \right) + \alpha. \quad (2)$$

如果激光介质在足够功率的抽运光照射下小信号增益高于激光阈值增益,就会有激光输出。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,可以通过估算,小信号增益与阈值相等时,得到振荡光强

$$I_{\text{circ}} = I_{\text{sat}} \left( \frac{\gamma_0}{\gamma_{\text{th}}} - 1 \right), \quad (3)$$

在腔内,  $I_{\text{circ}}$  表示通过激光介质放大后前向和反向光场强度之和

$$I_{\text{circ}} = I_{\text{F}} + I_{\text{B}}. \quad (4)$$

可以假设前向、后向的光场强度是相等的

$$I_{\text{circ}} = 2I_{\text{F}} = 2I_{\text{B}}. \quad (5)$$

所以,实际的输出功率密度,就是向输出镜方向传输光场能量的百分比。 $\sigma_{\text{em}}$  取  $9.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ,  $\tau$  取  $8 \mu\text{s}$ <sup>[11]</sup>

$$I_{\text{out}} = \frac{I_{\text{circ}}}{2} T_{\text{b}} T_{\text{out}} = \frac{I_{\text{sat}}}{2} T_{\text{b}} T_{\text{out}} \left( \frac{P_{\text{abs}} \sigma_{\text{em}} \tau}{\gamma_{\text{th}} V h \nu_{\text{p}}} - 1 \right), \quad (6)$$

将吸收的抽运功率  $P_{\text{abs}}$  和阈值功率  $P_{\text{th}}$  代入,得到输出功率密度的表达式

$$I_{\text{out}} = \frac{I_{\text{sat}}}{2} T_{\text{b}} T_{\text{out}} \left( \frac{P_{\text{abs}} \sigma_{\text{em}} \tau}{\gamma_{\text{th}} V h \nu_{\text{p}}} - 1 \right) = \frac{\nu_{\text{L}}}{\nu_{\text{p}}} \frac{T_{\text{b}} T_{\text{out}}}{\ln \left( \frac{1}{R_1 R_2 T_{\text{a}}^2 T_{\text{b}}^2} \right)} \frac{l_{\text{g}}}{V} (P_{\text{abs}} - P_{\text{th}}). \quad (7)$$

由(7)式可得

$$P_{\text{th}} = I_{\text{sat}} \frac{\nu_{\text{b}}}{\nu_{\text{L}}} \frac{V}{2l_{\text{g}}} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2 T_{\text{a}}^2 T_{\text{b}}^2} \right), \quad (8)$$

而

$$I_{\text{out}} = \eta_{\text{slope}} (I_{\text{abs}} - I_{\text{th}}), \quad (9)$$

由(7),(9)式可得

$$\eta_{\text{slope}} = \frac{\nu_{\text{L}}}{\nu_{\text{p}}} \frac{T_{\text{b}} T_{\text{out}}}{\ln \left( \frac{1}{R_1 R_2 T_{\text{a}}^2 T_{\text{b}}^2} \right)}, \quad (10)$$

由(8)式可得

$$I_{\text{th}} = \frac{I_{\text{sat}}}{2} \frac{\nu_{\text{p}}}{\nu_{\text{L}}} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2 T_{\text{a}}^2 T_{\text{b}}^2} \right). \quad (11)$$

(9),(11)式对于近似定量分析的连续工作和准连续工作的激光器动力学是比较适用的。考虑到腔内损失分布的不均匀性,输出功率密度的表达式要更复杂些<sup>[12,13]</sup>。由式(10),(11)计算得到激光器的斜率效率可以达到 56%,阈值在  $540 \text{ W/cm}^2$  附近。

### 3.2. 输出功率

图 4 给出了  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光器的输出功率曲线。在 8 W 泵浦光激励下,获得了最大 1034 mW 的

平均输出功率。相对于加载到晶体表面的抽运光能量,斜率效率达到 13.9%。由于激光器器件的限制导致抽运光束不能垂直入射而损失掉部分抽运能量; $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  增透膜是按照  $1.9 \mu\text{m}$  和  $2.4 \mu\text{m}$  设计的,因此在实际的光纤激光器的输出峰值  $2.05 \mu\text{m}$  处,透射率较低而损失掉部分抽运能量。考虑到这两点后,以及相对于吸收的抽运功率,斜率效率能够达到 30%。

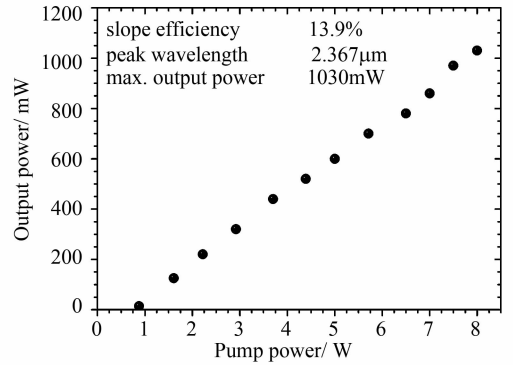


图 4  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光器的输出功率曲线

Fig. 4 Output curve of  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  laser

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  晶体输出面的部分反射膜透过输出带很窄,使得激光输出的线宽变窄,使用 Omni- $\lambda 500$  型光栅光谱仪测得其线宽只有 10 nm 左右,如图 1 中插图所示。这一结果要小于国外报道的非选模工作下的 30~50 nm 的输出线宽<sup>[1,4,5]</sup>。当把光纤激光器输出端贴近晶体表面进行照射时,由于大大减小了入射到晶体表面的抽运光斑直径而可以有效地提高激光功率,但是对激光器的膜会造成严重的损坏。通过优化抽运光束的准直与聚焦结构,减小抽运光束光斑大小和优化腔内光学元件结构可以进一步提高激光器的输出功率,降低阈值和提高斜率效率。

### 3.3 调谐性能

$\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  晶体有优异的调谐性能,在  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  晶体中获得激光输出后,对其调谐性能进行了研究。由于输出膜通带带宽的限制,所以通过角度调谐的方法对该晶体的调谐性能进行了研究。

在实验中旋转  $\text{ZnSe}$  晶体,抽运光入射到  $\text{ZnSe}$  晶体表面的角度也随之改变,由于入射面所镀增透膜的增透波段与实际振荡激光的波长不符合,实际上起到了一个部分反射膜的作用。 $\text{ZnSe}$  两个表面构成了一个准法布里-珀罗标准具,对激光模式起到了选择和调谐的作用。法布里-珀罗谐振腔有两个平行的光学平面,在这两个表面  $M_1$  和  $M_2$  之间发生

多次反射,波的各个分量相互干涉。如果离开  $M_2$  的所有分量都同相位相加,则在  $M_2$  上就会发生相长干涉。在此特定方向上,由  $M_1$  反射的分量将产生相消干涉,因而所有的入射光能量都经标准具传输。对于透射或者反射的每一个波分量,波函数的相位与前一个相位的相位差值与波两次通过波片相对应。相位差值  $\delta$  为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2nd \cos \Theta, \quad (12)$$

式中  $nd$  为两个反射表面之间的光学厚度,  $\Theta = \Theta'/n$  是材料内的光束折射角,  $\lambda$  为波长。法布里-珀罗谐振腔的透射率为

$$T = \left[ 1 + \frac{4r}{(1-r)^2} \sin^2 \left( \frac{\delta}{2} \right) \right]^{-1}, \quad (13)$$

式中  $r$  为每个反射表面的反射率。当透射光束的光程差是波长的几倍(见下式)时,透射率就达到最大值<sup>[11]</sup>

$$T_{\max} = 1, \\ 2nd \cos \Theta = m\lambda, m = 1, 2, 3 \dots \quad (14)$$

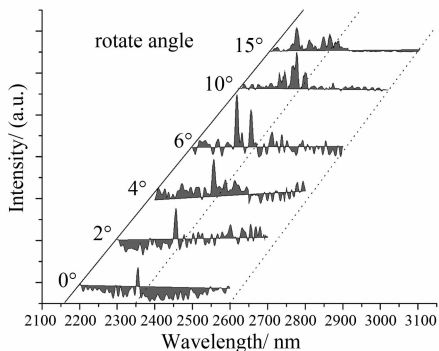


图5 角度调谐光谱。改变抽运浦光入射角度时,激光输出波长发生了变化

Fig. 5 Angle tunable spectra. The change of output wavelength when changing the angle of  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  disk

如图5所示,当旋转  $\text{ZnSe}$  晶体而改变抽运光入射角度时(角度指晶体法线方向与腔内光轴的夹角,  $0^\circ \rightarrow 15^\circ$ ),激光束在晶体内的折射角发生变化,谐振波长也相应改变,使得激光的输出波长可以在 100 nm(2272→2383 nm)的范围内得到调谐,并且由于抽运光与激光束的重叠状态被改变,在不同输出波长的激光阈值也不同。当入射角度为  $0^\circ$  时,表示入射抽运光束近似垂直入射到  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  晶体表面,此时,抽运光束入射方向与激光振荡方向重合较好,输出功率最大,输出谱线中只有单一的峰值。当倾斜较小( $2^\circ$ )时,抽运光束与激光振荡方向大体重合,激光波长峰值略有红移。当倾斜角度逐渐增加( $4^\circ$ )

时,抽运光束不能与激光束很好重合,模式之间的竞争不能抑制旁瓣的产生,相邻波长相干增强,出现旁瓣。继续增加角度( $10^\circ \rightarrow 15^\circ$ ),谐振腔对于激光波长的选择性已经变差,依次出现 2 个,3 个,5 个峰值,多个波段同时起振,并伴随着激光输出线宽的增加,具体实验数据见表 1。

表 1  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  角度调谐数据

Tab 1 Angle tunable data of  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$

Tuning angle/( $^\circ$ )	Peak wavelength/nm	FWHM/nm
0	2355	~10
2	2356	~13
4	2357	~11
6	2 peaks, 2318(higher)	~10
10	3 peaks, 2319(lower)	~18
15	5 peaks, 2272,2306, 2345,2360,2383	~15

## 4 结 论

对多晶  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  的激光特性进行了研究,测得其吸收光谱和超荧光光谱。使用  $\text{Tm}$  离子掺杂的光纤激光抽运,获得了 2.4  $\mu\text{m}$  附近中红外波段的瓦级固体连续激光输出。最大输出平均功率 1034 mW,峰值波长 2.367  $\mu\text{m}$ ,线宽 10 nm。使用角度调谐的方法对  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光晶体的调谐性能进行了研究,在 100 nm 的范围内,获得了多个波段的激光输出。进一步优化抽运光聚焦系统,优化激光器结构,可以进一步降低阈值,提高输出功率和效率。

致谢 感谢张龙教授为实验提供了氟锗酸盐玻璃。

## 参 考 文 献

- Ralph H. Page, Kathleen I. Schaffers, Laura D. DeLoach *et al.*.  $\text{Cr}^{2+}$ -doped zinc chalcogenides as efficient, widely tunable mid-infrared lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33** (4): 609~620
- Gregory J. Wagner, Timothy J. Carrig, Richard H. Jarman *et al.*. 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
- Evgeni Sorokin, Irina T. Sorokina. Tunable diode-pumped continuous-wave  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **80** (18): 3289~3292
- Evgeni Sorokin, Sergey Naumov, Irina T. Sorokina. Ultrabroadband infrared solid-state lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11** (3): 690~713

- 5 Timothy J. Carrig, Gregory J. Wagner, William J. Alford *et al.*. Chromium-doped chalcogenide lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5460**: 74~83
- 6 Gregory J. Wagner, Timothy 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
- 7 Irina T. Sorokina, Evgeni Sorokin, Alberto Di Lieto *et al.*. Efficient broadly tunable continuous-wave  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2001, **18** (7): 926~931
- 8 Irina T. Sorokina.  $\text{Cr}^{2+}$ -doped II-VI materials for lasers and nonlinear optics [J]. *Optical Materials*, 2004, **26**: 395~413
- 9 Hang Yin, Xu Jianqiu, Yang Yong *et al.*. Watt-level output in mid-IR range of wavelength from  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):587  
杭 寅, 徐剑秋, 杨 勇等.  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光晶体在中红外波段获得瓦级输出 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 587
- 10 G. Goetz, H. Zimmerman, H.-J. Schultz. Jahn-Teller interaction at  $\text{Cr}^{2+}(d^4)$  centres in tetrahedrally coordinated II-VI lattices studied by optical spectroscopy [J]. *Zeitschrift fur Physik B*, 1993, **91**(4): 429~436
- 11 L. D. DeLoach, R. H. Page, G. D. Wike *et al.*. Transition metal-doped zinc chalcogenides: spectroscopy and laser demonstration of a new class of gain media [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(6): 885~895
- 12 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. 5th rev. and updated ed., Springer, 2006. **89~97**, 236~243
- 13 Jason B. McKay. Power Scaling Feasibility of Chromium-Doped II-VI Laser Sources and the Demonstration of a Chromium-Doped Zinc Selenide Face-Cooled Disk Laser [D]. US: The Air Force Institute of Technology, 2003. 29~41