

掺铥光纤激光器抽运的可调谐窄线宽 Cr:ZnSe 激光器

卜祥宝, 师红星, 程昭晨, 彭志刚, 刘江, 王璞

北京工业大学激光工程研究院, 北京市激光应用技术工程技术研究中心, 北京 100124

摘要 搭建了由国产 1908 nm 掺铥光纤激光器抽运的中红外可调谐窄线宽 Cr:ZnSe 激光器。该激光器为 X 型腔结构, 在抽运功率 6.8 W 时连续光最大输出功率为 1.6 W, 对应的斜效率为 26.7%, 中心波长为 2420 nm。采用 Littrow 结构实现了 2284~2716 nm 的连续可调谐, 调谐范围为 432 nm, 半峰全宽(FWHM)为 0.13 nm; 抽运功率 5 W 时采用输出比 22% 的耦合输出镜在 2350~2510 nm 范围内获得了大于 500 mW 的输出。采用 Littman 结构实现了 2305~2658 nm 的连续可调谐, 调谐范围为 353 nm, FWHM 小于 0.05 nm; 抽运功率 5 W 时可在 2350~2520 nm 范围内实现 300 mW 以上激光功率输出。

关键词 激光器; Cr:ZnSe; 可调谐激光器; 光纤激光器; 中红外波段

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0201014

Tunable Narrow-Linewidth Cr:ZnSe Laser Pumped by Thulium-Doped Fiber Laser

Bu Xiangbao, Shi Hongxing, Cheng Zhaochen, Peng Zhigang, Liu Jiang, Wang Pu

Beijing Engineering Research Center of Laser Applied Technology, Institute of laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract A tunable, narrow linewidth mid-infrared Cr:ZnSe laser consisting of X-type cavity pumped by a home-made 1908 nm thulium-doped fiber laser is built. The maximum continuous wave output power is 1.6 W at central wavelength of 2420 nm with respect to incident pump power of 6.8 W, and the corresponding slope efficiency is 26.7%. Littrow configuration is adopted to realize the continuous tuning between 2284 nm to 2716 nm with a tuning range of 432 nm, the full width at half maximum (FWHM) is 0.13 nm. The output power of more than 500 mW is achieved in the range from 2350 nm to 2510 nm by using 22% output ratio of coupling output mirror with respect to incident pump power of 5 W. Littman configuration is adopted to realize the continuous tuning from 2305 nm to 2658 nm with a tuning range of 353 nm, and the FWHM is less than 0.05 nm. The output power of more than 300 mW is achieved in the range from 2350 nm to 2520 nm.

Key words lasers; Cr:ZnSe; tunable lasers; fiber lasers; mid-infrared band

OCIS codes 140.5680; 140.3600; 140.3510; 140.3070

1 引言

中红外激光在分子光谱学、多光子显微、人眼安全雷达、工业加工控制、非入侵医疗诊断、石油及气体探测等方面有着重要应用。目前,中红外波段激光的获取主要有非线性频率变换、铅盐及铋化物半导体激光器、量子级联半导体激光器、稀土离子掺杂晶体及光纤激光器、过渡金属离子掺杂半导体激光器等方法。其中,过渡金属离子掺杂半导体激光器相比其他几种方法具有系统相对简单、超宽带连续可调谐及功率扩展性

收稿日期: 2016-09-20; 收到修改稿日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器项目(61527822)、国家自然科学基金重点项目(61235010)

作者简介: 卜祥宝(1988—),男,博士研究生,主要从事中红外固体激光器、光纤激光器等方面的研究。

E-mail: bu_boa@126.com

导师简介: 王璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

能优良等优点。自 1996 年劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)报道以来,过渡金属离子(Cr^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 、 Fe^{2+})掺杂的 II-VI 族半导体主体材料(ZnSe 、 ZnS 、 ZnTe 、 CdSe 和 CdMnTe)表现出了较好的中红外激光特性。特别是 Cr^{2+} 掺杂的 II-VI 族半导体晶体,以 $\text{Cr}:\text{ZnSe}/\text{S}$ 为典型代表;它具有四能级结构、无激发态吸收、近 100% 的室温荧光量子效率等特性,且其宽带吸收谱覆盖多种光纤激光源,超宽带发射谱可支持中红外周期量级超短脉冲及大范围可调谐激光的产生。 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 相比 $\text{Cr}:\text{ZnS}$ 热膨胀系数稍高,但因其荧光寿命淬灭温度高,更适于连续光放大^[1-6]。同时,许多有机气体分子(如 CO_2)有着窄带吸收特性,因此,位于分子指纹区($2\sim 20\ \mu\text{m}$)内的可调谐窄线宽中红外 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 固体激光器可广泛应用于大气中气体与污染物的遥感探测及高分辨分子光谱学等领域^[7]。

1999 年, Wagner 等^[8]采用输出功率 1 W 的 $\text{Tm}:\text{YALO}$ 激光器抽运 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 及棱镜调谐方法,实现了激光波长 $2138\sim 2760\ \text{nm}$ 的调谐范围。此后, $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 激光器的调谐范围逐渐拓宽,线宽大幅压窄,输出功率不断增加。2006 年, Demirbas 等^[9]采用线宽 1 kHz 的 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器利用光学参量振荡器(OPO)产生的 1570 nm 纳秒脉冲为抽运源、腔内棱镜调谐的方法获得了波长 $1880\sim 3100\ \text{nm}$ 的调谐范围。2008 年, Moskalev 等^[10]采用 Littrow 及 Littman 结构,在单晶 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 中实现了功率为 150 mW、半峰全宽(FWHM)为 120 MHz 的输出;多晶实现了波长 $2120\sim 2770\ \text{nm}$ 的调谐输出。2010 年, Sorokin 等^[11]采用波长 1607 nm 掺铒光纤激光器抽运,在 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 中实现了波长 $1973\sim 3349\ \text{nm}$ 之间 1376 nm 的调谐范围。2012 年, Coluccelli 等^[12]通过单光栅环形腔实现了波长 $2.12\sim 2.58\ \mu\text{m}$ 的调谐输出,FWHM 为 100 kHz。2016 年, Mirov 等^[13]采用旋转 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 增益介质实现了功率 140 W 的连续光输出,光光效率为 63%。然而受限于中红外镀膜、抽运源以及晶体质量等,国内在 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 激光器方面的研究还不成熟,与国外相比存在明显差距。2008 年, 杨勇等^[14]采用波长 $2.05\ \mu\text{m}$ 掺铋光纤激光器抽运并通过棱镜调谐实现了调谐范围 100 nm 的输出。2013 年, Dai 等^[15]采用 $\text{Tm}:\text{YLF}$ 激光器抽运并通过棱镜调谐实现了波长 $2179\sim 2720\ \text{nm}$ 之间的调谐输出。

本文利用 1908 nm 掺铋光纤激光器抽运单晶 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$,连续光可获得最大输出功率为 1.6 W,对应斜效率为 26.7%;利用 Littrow 光栅结构实现了 $2284\sim 2716\ \text{nm}$ 之间的 432 nm 连续可调谐,利用 Littman 结构,实现了 FWHM 小于 0.05 nm 的窄线宽激光输出。

2 实验装置

图1为 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 激光器装置图。1908 nm 掺铋光纤激光器振荡腔由一对光纤布拉格光栅(FBG)分别与掺铋增益光纤的两端熔接而构成;高反 FBG(HPR-HR1907.7-1.5-98-N25/400DN-P300-2, TeraXion, 加拿大)对 1908 nm 信号光反射率为 98%,部分反射 FBG(HPR-OC1907.7-0.5-10-N25/400DN-P300-2, TeraXion, 加拿大)对信号光透射率为 10%。增益纤采用长度为 3 m 的双包层掺铋保偏光纤(PLMA-TDF-25P/400-HE, Nufern, 美国),纤芯和内包层直径分别为 $25,400\ \mu\text{m}$,纤芯数值孔径为 0.09,抽运光中心波长为 793 nm,包层吸收系数为 2.4 dB/m。增益纤部分缠绕在直径为 20 cm 的冷却盘上,水冷温度为 $13\ ^\circ\text{C}$ 。9 个最大功率为 12 W、中心波长为 793 nm 的 LD 经 $(18+1)\times 1$ 合束器合成一束。光纤激光器经准直隔离器(HPIC1-95-50-5.0-A-2-2-D, Optizone, 深圳)输出后为非偏振光,采用格兰棱镜起偏,四分之一波片对光纤激光器输出的椭

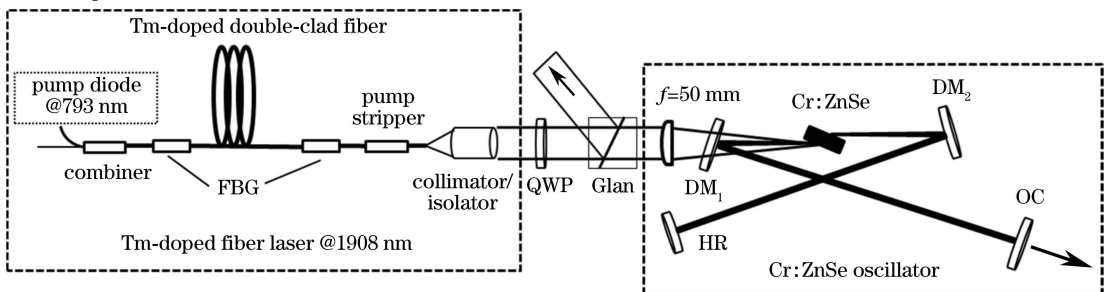


图 1 $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ 激光器装置图

Fig. 1 Schematic of the $\text{Cr}:\text{ZnSe}$ laser

圆偏振光起优化作用。直径为5 mm的1908 nm抽运光经焦距为50 mm的CaF₂透镜聚焦,晶体上的束腰半径为25 μm。通光面尺寸为5 mm×10 mm,长度为5 mm的单晶Cr:ZnSe按布儒斯特角摆放,铬离子掺杂离子数为8×10¹⁸ cm⁻³。晶体采用钢箔包裹并夹持于通水冷的紫铜热沉上,温度控制在13 ℃。Cr:ZnSe谐振腔由曲率半径为75 mm的双色镜DM1与DM2、平面高反镜(HR)以及耦合输出镜(OC)组成,双色镜与高反镜镀膜对抽运光高透(1900~2050 nm),信号光高反(2350~2550 nm),总腔长为1.2 m。

图2为Littrow及Littman结构Cr:ZnSe激光器装置图。图2(a)为Littrow光栅结构,将图1中高反镜换为线密度为450 lp/mm、中心波长为3.1 μm中红外衍射光栅,按Littrow结构装配。图1(b)为Littman光栅结构,聚焦透镜焦距换为150 mm,缩短腔长至36 cm。衍射光栅按75°入射角摆放,一级衍射方向光栅距高反镜2 cm,并将OC换为高反镜。

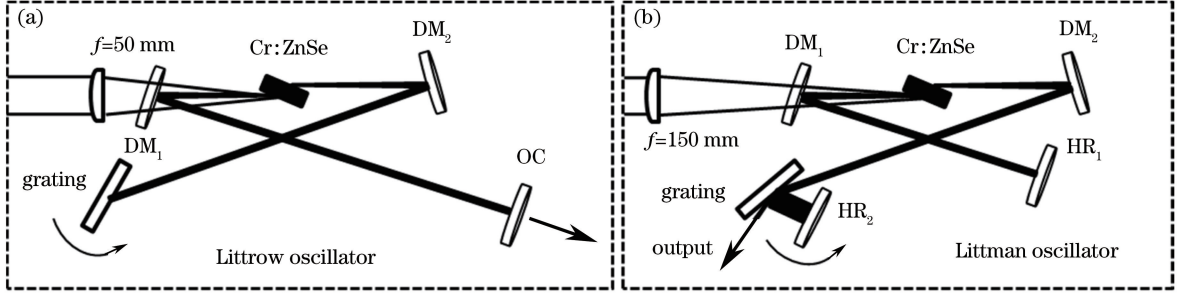


图2 (a) Littrow 结构装置图; (b) Littman 结构 Cr:ZnSe 激光器装置图

Fig. 2 (a) Schematic of the Littrow; (b) schematic of Littman Cr:ZnSe laser

3 实验结果及分析

掺铥光纤激光器为准三能级系统,通常情况下波长短于1950 nm则受重吸收作用影响,波长越短,重吸收效应越明显。为获得高效的短波长1908 nm激光输出,保持良好散热的同时必须选择合适的增益光纤长度,光纤过短会导致抽运光吸收不充分,过长则会引起严重的重吸收作用^[16]。最终选择增益光纤长度为3 m,对应7.2 dB的吸收。1908 nm光纤激光器阈值抽运功率为18 W;对部分反射FBG的输出光进行腔外双色镜剥离抽运光,中心波长为790 nm的LD在抽运功率108 W时可获得输出功率33 W,对应斜效率为37.5%,输出功率随抽运功率线性增加。采用光谱仪(OSA205, Thorlabs, 美国)对其进行光谱测量,中心波长为1907.06 nm,FWHM为0.2 nm,如图3(a)所示。为防止后向反馈对掺铥光纤激光器效率及稳定性的影响,采用抽运剥离器结合带尾纤的准直隔离器输出;此时相同抽运功率下1908 nm输出功率减小且随着抽运功率的增加输出功率呈现滚降现象。由于FBG可由基模激发出多模,不同功率条件下高阶模式不同,经包层抽运剥离器后出现功率下降和滚降现象。实验中,5 mm长的Cr:ZnSe晶体对1908 nm抽运光的吸收率为75%,对图1中Cr:ZnSe激光器进行优化后,对比了OC输出比分别为4.5%,22%以及39%时连续光功率的输出特性。输出功率随抽运功率的变化曲线如图3(b)所示,抽运功率为6.8 W时,采用22%的

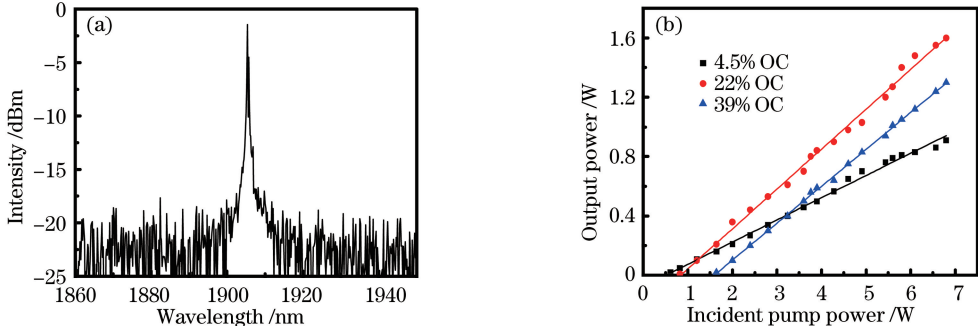


图3 (a) 掺铥光纤激光器光谱;(b) Cr:ZnSe 激光器连续输出功率与抽运功率关系曲线

Fig. 3 (a) Spectrum of the Tm-doped fiber laser; (b) continuous output power versus pump power of the Cr:ZnSe laser

OC 可获得 1.6 W 最大输出功率,对应斜效率为 26.7%;采用 4.5%OC 输出比时,最大输出功率为 0.9 W,对应斜效率为 14.3%;采用 39%OC 输出比时,激光器阈值增加至 1.6 W,最大输出功率为 1.3 W,对应斜效率为 25%。得益于掺铈光纤激光器功率输出的稳定性,Cr:ZnSe 激光器输出功率随抽运功率的增加过程中并没有出现波动现象。采用扫描狭缝仪器测量了 Cr:ZnSe 激光器的光束质量,光束质量因子 $M^2 = 1.06$,如图 4 所示,插图为束腰处光斑轮廓。

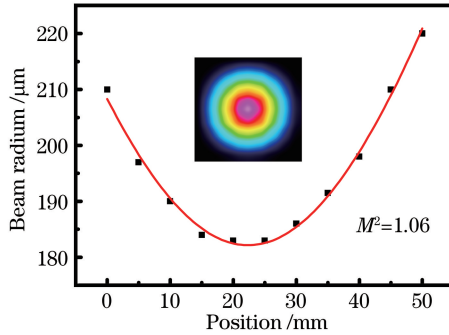


图 4 Cr:ZnSe 激光器光束质量拟合曲线

Fig. 4 Beam quality fitting curve of the Cr:ZnSe laser

为研究 Cr:ZnSe 晶体的光谱特性,采用图 2(a)所示 Littrow 结构,缓慢调节光栅角度,实现了从 2284~2716 nm 之间的连续调谐,调谐范围 432 nm,如图 5(a)所示;光谱仪采用 OSA205,分辨率约 0.15 nm。图 5 (b)为抽运功率 5 W 时三种不同 OC 输出比情况下的输出功率随波长的变化关系曲线。Littrow 结构光栅端输出角度随光栅调谐过程而变化,实际应用中带来诸多不便,因此采用 X 型腔的另一端作为输出,如图 2 (a)所示。采用 22%OC 输出比,抽运功率 5 W 时可在 2350~2510 nm 范围内获得大于 500 mW 的激光输出,效率相比连续光情况下较低,主要受限于衍射光栅效率。同时,腔内双色镜及 OC 标称镀膜范围为 2350~2550 nm,与图 5(b)中光谱 2350 nm 以下及 2550 nm 以上功率变化相符。后续调谐范围的扩展可通过更宽带的镜片镀膜实现。采用光谱仪(AQ6375, YOKOGAWA, 日本)对可调谐光谱的线宽进行测量。为提高测量精度,将光谱调谐至 2400 nm 以下并采用最小分辨率 0.05 nm;测得 Littrow 结构下光谱 FWHM 为 0.13 nm;但输出光谱不稳定,伴有多峰现象。

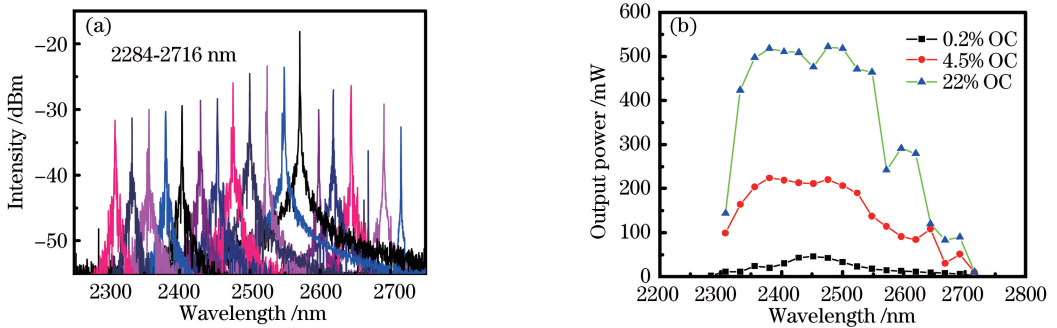


图 5 Littrow 结构。(a)调谐光谱;(b)波长-功率关系曲线

Fig. 5 Structure of Littrow. (a) Tunable spectrum; (b) output power versus wavelength

为实现稳定的窄线宽输出,采用 X 型腔搭建了 Littman 结构振荡器并将腔长缩短至 36 cm,受腔内器件所限,并没有进一步缩短腔长;Littman 结构采用大角度掠入射光栅结构,在保证光栅上光斑尺寸的同时也有效利用了光栅的角色散分辨能力。如图 2(b)所示,光栅的一级衍射方向上高反镜 2、光栅、晶体及高反镜 1 构成色散腔,提供窄线宽种子及增益。光栅掠入射角度 75° ,为保证效率没有进一步扩大角度;缓慢调节高反镜 2 的角度,在抽运功率 5 W 时实现了调谐范围 2305~2658 nm 之间的窄线宽可调谐输出,如图 6(a)所示;2350~2520 nm 范围内可实现功率 300 mW 以上输出,在波长 2450 nm 处可获得最大输出功率 460 mW。为对其线宽进行测量,仍采用分辨率为 0.05 nm 的光谱仪(AQ6375, YOKOGAWA, 日本),测得 FWHM 为 0.354 nm,受限于光谱仪分辨率,可确定 FWHM 小于 0.05 nm。

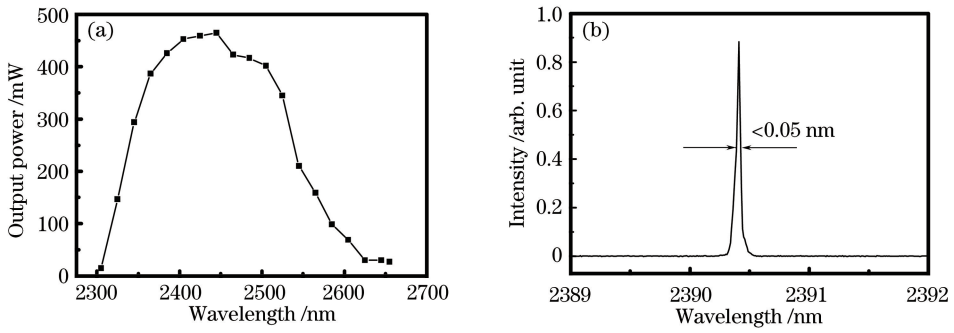


图 6 Littman 结构。(a)波长-功率关系曲线;(b) Littman 光谱

Fig. 6 Structure of Littman. (a) Output power versus wavelength; (b) Littman spectrum

4 结 论

报道了采用 1908 nm 掺铈光纤激光器抽运的可调谐窄线宽 Cr:ZnSe 激光器,在 22%OC 输出比时获得了 1.6 W 的连续光最大输出功率,斜效率为 26.7%。利用 Littrow 光栅结构实现了 2284~2716 nm 之间 432 nm 的连续可调谐,在抽运功率 5 W 时,采用 22%OC 输出比在 2350~2510 nm 范围内获得大于 500 mW 的输出。采用 Littman 结构实现了线宽的压窄,获得了小于 0.05 nm 的窄线宽输出,调谐范围为 2305~2658 nm;在抽运功率 5 W 时,可在 2350~2520 nm 范围内实现 300 mW 以上激光功率输出。下一步工作可通过更高效的中红外掠入射光栅结合平行短腔实现单频输出。

参 考 文 献

- [1] Mirov S B, Fedorov V V, Martyshkin D, *et al.* Progress in mid-IR lasers based on Cr and Fe-doped II-VI chalcogenides[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 292-310.
- [2] Vasilyev S, Moskalev I, Mirov M, *et al.* Mid-IR Kerr-lens mode-locked polycrystalline Cr:ZnS and Cr:ZnSe lasers with intracavity frequency conversion via random quasi-phases-matching[C]. SPIE, 2016, 9731: 97310B.
- [3] Mirov S B, Fedorov V V, Martyshkin D V, *et al.* Progress in Cr and Fe doped ZnSe and ZnS polycrystalline materials and lasers[C]. Advanced Solid-State Lasers, 2014: AM4A.6.
- [4] Mirov S B, Fedorov V V, Moskalev I S, *et al.* Recent progress in transition-metal-doped II-VI mid-IR lasers[C]. SPIE, 2007, 6552: 65520Y.
- [5] Mirov S B, Fedorov V V, Martyshkin D V, *et al.* Progress in mid-IR Cr²⁺ and Fe²⁺ doped II-VI materials and lasers [J]. Optical Materials Express, 2011, 1(5): 898-910.
- [6] Moskalev I S, Fedorov V V, Mirov S B, *et al.* Highly-efficient, widely-tunable, mid-IR Cr:ZnS and Cr:ZnSe CW lasers pumped by 1685 nm InP laser diode[C]. Advanced Solid State Photonics, 2010: ATuA11.
- [7] Wagner G J, Tiemann B G, Alford W J, *et al.* Single-frequency Cr:ZnSe laser[C]. Advanced Solid-State Photonics, 2004: 371.
- [8] Wagner G J, Carrig T Y, Page R H, *et al.* Continuous-wave broadly tunable Cr²⁺:ZnSe laser[J]. Opt Lett, 1999, 24(1): 19-21.
- [9] Demirbas U, Sennaroglu A. Intracavity-pumped Cr²⁺:ZnSe laser with ultrabroad tuning range between 1880 and 3100 nm[J]. Opt Lett, 2006, 31(15): 2293-2295.
- [10] Moskalev I S, Fedorov V V, Mirov S B. Tunable, single-frequency, and multi-watt continuous-wave Cr²⁺:ZnSe lasers [J]. Opt Express, 2008, 16(6): 4145-4153.
- [11] Sorokin E, Sorokina I T, Mirov M S, *et al.* Ultrabroad continuous-wave tuning of ceramic Cr:ZnSe and Cr:ZnS lasers [C]. Advanced Solid-State Photonics, 2010: AMC2.
- [12] Coluccelli N, Cassinerio M, Laporta P, *et al.* 100 kHz linewidth Cr²⁺:ZnSe ring laser tunable from 2.12 to 2.58 μm [J]. Opt Lett, 2012, 37(24): 5088-5090.
- [13] Mirov S B, Moskalev I, Mirov M S, *et al.* Transitioning Cr²⁺ and Fe²⁺ doped Zn chalcogenide laser technology to commercial products-lessons learned[C]. CLEO: Applications and Technology, 2016: JF1K.4.
- [14] Yang Yong, Tang Yulong, Xu Jianqiu, *et al.* Laser output and tuning ability of Cr²⁺:ZnSe[J]. Chinese J Lasers,

2008, 35(10): 1495-1499.

杨 勇, 唐玉龙, 徐剑秋, 等. Cr²⁺:ZnSe 的激光输出和调谐性能[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1495-1499.

- [15] Dai Y F, Li Y Y, Zou X, *et al.* High-efficiency broadly tunable Cr:ZnSe single crystal laser pumped by Tm:YLF laser [J]. *Laser Phys Lett*, 2013, 10(10): 105816.
- [16] Frith G, Carter A, Samson B, *et al.* Design considerations for short-wavelength operation of 790 nm-pumped Tm-doped fibers[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(27): 5072-5075.