

文章编号 1004-924X(2015)12-3316-06

外腔调谐的全固态 Cr : LiSAF 激光器

栾昆鹏*, 于力, 沈炎龙, 黄超, 陶蒙蒙

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘要: 由于调谐元件置于主腔外时, 插入损耗影响小, 可以扩展调谐范围, 本文采用外腔棱镜和光栅调谐结构研制了全固态 Cr : LiSAF 激光器。分析了外腔调谐结构的基本原理, 分别选用棱镜和光栅作为调谐元件, 研制了棱镜外腔调谐 Cr : LiSAF 激光器和光栅外腔调谐 Cr : LiSAF 激光器。分析对比了棱镜和光栅调谐的输出功率、光谱、调谐范围等特性以及镜片镀膜对输出特性的影响。进行了调谐实验, 结果显示: 选用棱镜作为外腔调谐元件时, 在 325 mW 的吸收泵浦功率下实现了 785~985 nm 的调谐, 输出功率最高达 21 mW。选用光栅作为调谐元件时, 亦可实现 785~985 nm 的调谐, 最大输出功率为 20 mW, 光谱的半峰全宽(FWHM)为 0.12 nm。得到的结果表明外腔全固态 Cr : LiSAF 激光器可以实现窄线宽、宽谱调谐输出。

关键词: 固体激光器; 调谐激光器; Cr : LiSAF; 外腔调谐

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152312.3316

Widely tunable all-solid-state Cr : LiSAF lasers with external cavities

LUAN Kun-peng*, YU Li, SHEN Yan-long, HUANG Chao, TAO Meng-meng

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter,
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

* Corresponding author, E-mail: luankunpeng@nint.ac.cn

Abstract: When tuning components are placed out of the main cavity structure in a tunable all-solid-state laser, it will has a smaller insertion loss and is conducive to extend the tuning range. This paper develops a all-solid-state Cr : LiSAF laser to realize its wide tunability. The principle of a external-cavity configuration was explored. A prism and a grating were chosen tunable elements, the Cr : LiSAF lasers with prism-controlled external cavity and the Cr : LiSAF laser with grating-controlled external cavity were presented. The tuning characteristics such as tuning ranges, spectra and output powers of the two kinds of lasers were studied and the effect of coating on their output characteristics was analyzed. Finally, the tuning characteristics of prism-controlled laser and grating-controlled laser were compared. The results under an absorption power of 325 mW show that the tuning range of the Cr : LiSAF laser with prism-controlled external cavity is 785—985 nm and its maximum output power is 21 mW. Moreover, the tuning range of the Cr : LiSAF laser with grating-controlled external cavity is also 785—985 nm, its maximum output power is 20 mW and the Full Width at Half Maximum (FWHM) is 0.12 nm. These results demonstrate that the tunable all-solid-state Cr : LiSAF lasers

收稿日期: 2015-06-19; 修订日期: 2015-08-10.

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目 (No. SKLLIM1511-02)

with external cavities realize narrower linewidths and wider tuning ranges.

Key words: solid-state laser; tunable laser; Cr : LiSAF; external cavity tuning

1 引言

宽谱调谐的激光器在光谱学、非线性光学、光通信、生物医学等领域有着广泛的应用^[1-5]。与 Ti : Sapphire 激光器相比, Cr : LiSAF 激光器具有相近的宽谱调谐范围,此外还具有被动损耗小、泵浦阈值低、效率高、上能级寿命长、可用红光 LD 泵浦等优点^[6-7]。

通常,全固态的 Cr : LiSAF 激光器的调谐是通过在折叠腔内插入双折射滤光片来实现的^[8-9]。但是,近年来外腔或者耦合腔调谐结构的 Cr : LiSAF 激光器也得到了长足发展。此类激光器将调谐元件置于与主谐振腔隔离的外腔中,从而降低了调谐元件插入损耗的影响^[9];而且较短的主腔和大的纵模间隔有利于实现单纵模输出^[10]。此外,外腔调谐结构还广泛应用于固体、光栅、半导体激光器的双波长输出^[1,3,11]。Zhang 等首先将外腔调谐结构应用于 Cr : LiSAF 激光器,实现了 850~935 nm 的调谐,调谐元件为双折射滤光片^[12]。Aoshima 等用棱镜外腔结构实现了 822~922 nm 的调谐^[13]。M. Ihara, Masaki 等用光栅外腔结构实现了 814~962 nm 的调谐并理论计算了外腔结构激光器的振荡阈值^[14-15]。Haroldo Maestre 和 Luan 等报道了外腔结构的 Cr : LiCAF/Cr : LiSAF 激光器的双波长振荡^[16-17]。

本文分析了外腔调谐激光器的基本原理,分别选用棱镜和光栅作为调谐元件对外腔调谐的全固态 Cr : LiSAF 激光器进行了研究。对比了棱镜和光栅调谐的输出功率、光谱、调谐范围等特性,研究了镜片镀膜对输出特性的影响。

2 基本原理和实验装置

2.1 基本原理

图 1 为激光器原理图。M₁ 和 M₂ 之间是主谐振腔,晶体置于 M₁ 和 M₂ 之间,主腔可以实现独立振荡,M₂ 为主腔的输出镜。M₂ 与 M₃ 之间构成外腔,在 M₂ 和 M₃ 之间插入调谐元件,M₃

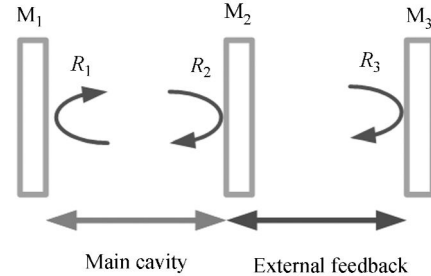


图 1 外腔调谐 Cr : LiSAF 激光器的结构图

Fig. 1 Schematic diagram of tunable Cr : LiSAF laser with external cavity

将主腔溢出的光经过选频后反馈回主腔。M₃ 为整个激光器的输出镜。外腔反馈增加了调谐波长处 M₂ 的反射率,其有效反射率为^[15]:

$$R_{\text{eff}} = \left[\frac{r_2 + e^{-\delta} r_3}{1 + r_2 \cdot e^{-\delta} r_3} \right]^2 > R_{M_2}, \quad (1)$$

式中: r_2 和 r_3 分别为主腔输出镜 M₂ 和外腔反馈镜 M₃ 的反射率(幅度), R_{M_2} 和 R_{eff} 分别为主腔输出镜 M₂ 的反射率和有效反射率(强度)。因为存在光学损耗 $e^{-\delta}$, 外腔的反馈比率为 $e^{-2\delta} R_{M_3}$, 小于 R_{M_3} 。主腔能够独立起振,通常称为主腔的自由运转。但是增加了外腔后,随着调谐波长处反射率的增加,在调谐波长处起振阈值会降低,即先于主腔自由运转起振,从而实现了对外腔波长的调控。

2.2 实验装置

棱镜、光栅等均可作为外腔中的调谐元件。图 2(a) 和 2(b) 分别为外腔棱镜和光栅调谐的 Cr : LiSAF 激光器结构图。泵浦源是波长为 671 nm 的连续输出的 Nd : YVO₄/LBO 激光器,泵浦功率为 0~1 W 可调,光束质量因子 $M^2 \approx 1.5$,发散角约为 1.5 mrad,偏振度超过 100 : 1,通过半波片调整泵浦光的偏振态使它以 π 偏振态射入晶体,此时吸收系数最大。焦距为 50 mm 的非球面透镜将泵浦光耦合进晶体。增益介质 Cr : LiSAF 晶体双面 Brewster 角切割以减小端面反射损耗,中心长度为 6 mm,实验测得晶体对 π 偏振的 671 nm 泵浦光有 91% 的吸收。晶体被铜箔包裹放置在紫铜热沉中。凹面镜 M₁ 和 M₂ 的曲率半径均为 50 mm, M₁ 和 M₂ 之间构成主谐振

腔,主腔长为 96 mm。从主腔透过的激光经过准直透镜变为准平行光,再经棱镜色散(图 2(a)),被 M_3 反射后沿原光路反馈回主腔,通过旋转 M_3 来控制反馈光的波长。 M_3 是激光器的输出镜。实验所用的棱镜为 F_2 材料的等边色散棱镜。

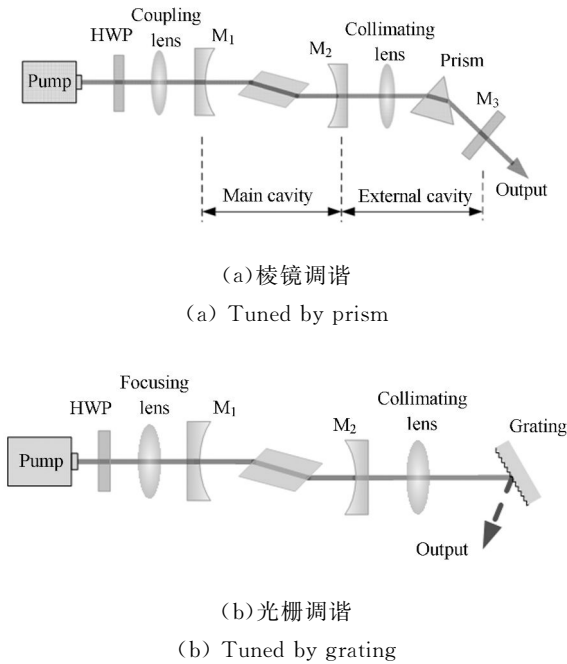


图 2 外腔调谐 Cr : LiSAF 激光器的结构图

Fig. 2 Configuration of tunable Cr : LiSAF laser with external cavity

相较于棱镜,光栅的分辨力更高,因而光栅调谐激光器的线宽较窄,甚至能实现单纵模输出。图 2(b)为光栅外腔调谐(Littrow 结构)Cr : LiSAF 激光器的结构图。在 Littrow 结构中,光栅的一级衍射光直接反馈回主腔,通过旋转光栅来调控波长,输出光栅的零级衍射。实验所用的反射式衍射光栅闪耀波长为 500 nm,刻线密度为 1 800 l/mm,在 800~1000 nm 波段的衍射效率为 65%~85%。

3 外腔 Cr : LiSAF 激光器的调谐特性

3.1 棱镜调谐

本文研究了棱镜和光栅外腔调谐 Cr : LiSAF 激光器。图 3(a)和 3(b)分别为不同镜片组合时棱镜外腔调谐激光器的泵浦阈值和输出功率。图 3(a)中的虚线为主腔自由振荡的阈值,主腔自由振荡的波长为 860 nm。可见增加外腔反

馈后,阈值明显下降,调谐达 785~985 nm。调谐下限约为 780 nm,受到 Cr : LiSAF 晶体的自吸收限制;调谐上限约为 980 nm,这是因为镀膜曲线超过 980 nm 后透过率较大,难以起振。由图 3(a)可知, T_{M_2} 相同时, T_{M_3} 越大,则泵浦阈值越高。这是因为 T_{M_3} 越大,有效反射率越低,从而激光器阈值升高。

图 3(b)中,在 325 mW 的吸收泵浦功率下,输出功率最高为 21 mW,在 825~975 nm,输出功率在 14 mW 以上。由图 3 可知,在 925 nm 和 850 nm 附近,激光器的泵浦阈值曲线有突起,输出功率曲线有凹陷。这是因为 M_1 镜片的镀膜曲线有起伏,透过率高的点起振阈值高。图 4 是腔镜 M_1 的镀膜曲线,在 925 nm 和 850 nm 处,镀膜透过率曲线有明显突起,使得这两处阈值增大,输出功率下降。

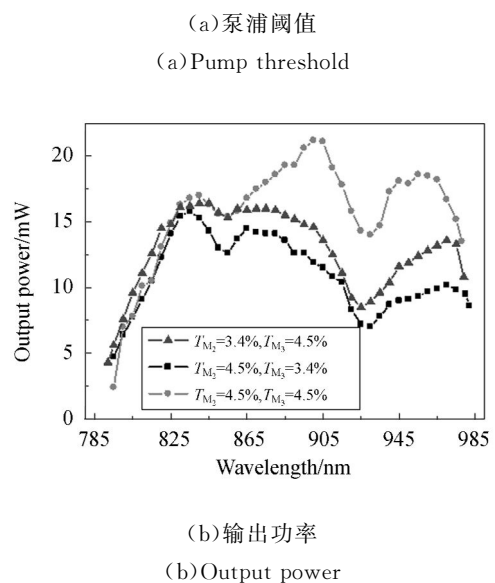
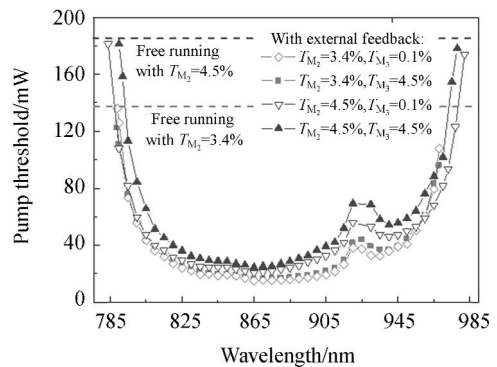


图 3 外腔棱镜调谐 Cr : LiSAF 激光器的调谐特性
Fig. 3 Tuning characteristics of tunable Cr : LiSAF laser with prism-controlled external cavity

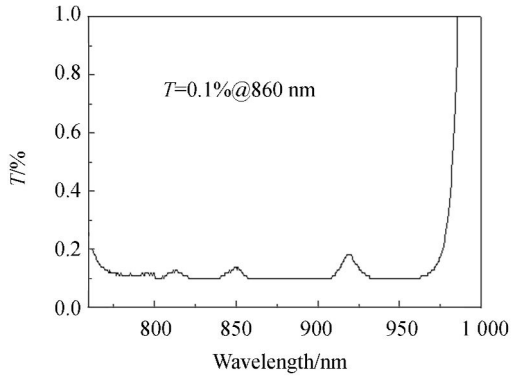
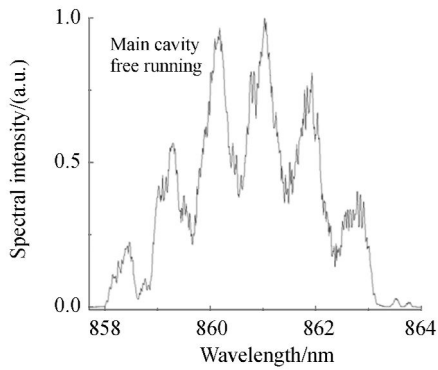
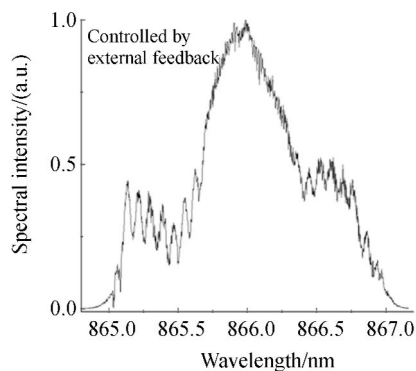


图 4 腔镜 M₁ 的镀膜曲线
Fig. 4 Coating curve of M₁

图 5(a)和 5(b)所示分别为激光器自由运转和棱镜调谐的光谱。在主腔自由运转时光谱底宽约为 5 nm;加入棱镜外腔调谐时,光谱底宽压缩至约 2 nm。



(a) 自由运转
(a) Free tuning



(b) 棱镜调谐
(b) Prism control

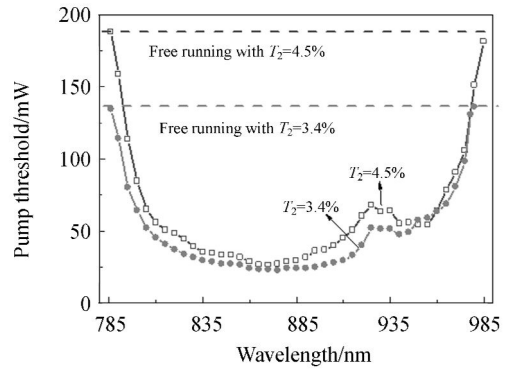
图 5 激光器自由运转和棱镜调谐光谱

Fig. 5 Spectra of free-running and prism-controlled oscillation

3.2 光栅调谐

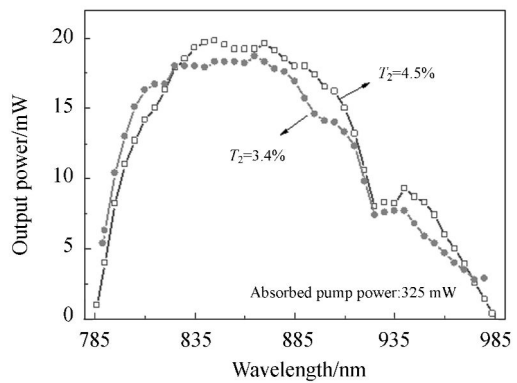
图 6 为 Littrow 结构光栅外腔激光器的调谐曲线。类似外腔棱镜调谐,当外腔控制的振荡阈值小于主腔振荡阈值时,外腔会实现对波长的调谐。输出功率曲线在吸收泵浦光为 325 mW 的条件下测得。激光器的调谐波段为 785~985 nm,输出功率在 850 nm 附近最高,为 20 mW。

对比图 3 和图 6,可见棱镜和光栅调谐的调谐范围相近,输出功率随波长的变化情况基本一致,最大输出功率均在 20 mW 左右。这是因为棱镜外腔和光栅外腔的反馈比相近:尽管棱镜外腔的输出镜 M₃ 的反射率为 95.5%,但是由于棱镜并非 Brewster 角切割和入射,也未镀膜,因而棱镜的插入损耗接近 20%,所以棱镜外腔的反馈比约为 80%;而光栅的一级衍射比率在调谐范围内



(a) 阈值随波长的变化

(a) Variation of wavelength with threshold



(b) 输出功率曲线

(b) Curves of output power

图 6 外腔光栅调谐 Cr : LiSAF 激光器的调谐特性

Fig. 6 Tuning characteristics of tunable Cr : LiSAF laser with grating-controlled external cavity

为 65~85%，因而光栅外腔的反馈比在 75% 上下。所以两种腔结构下，式(1)中输出镜的有效反射率接近，从而使棱镜和光栅调谐的调谐范围和输出功率的变化情况也相近。

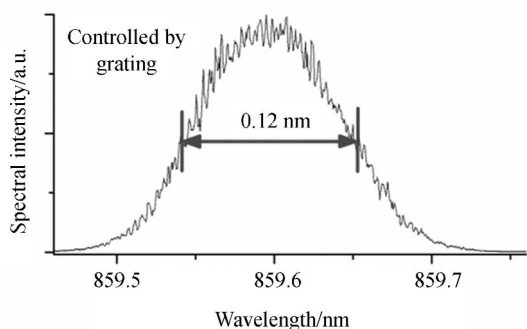


图 7 光栅外腔调谐激光器光谱

Fig. 7 Spectra of grating-controlled oscillation

图 7 为光栅外腔调谐激光器的光谱。其半高全宽(FWHM)为 0.12 nm,底宽为 0.2 nm。对比棱镜外腔调谐 2 nm 的底宽,光栅外腔调谐的线宽明显更窄,这是因为光栅的角色散强于棱镜。因此外腔结构通常用光栅作为调谐元件,以实现

窄线宽甚至单纵模的输出。

当泵浦功率低至 500 mW 以下时,即便没有采用主动冷却措施,晶体也不会因为温度过高而出现热淬灭现象,在 30 min 内输出功率没有明显下降。泵浦输出功率的不稳定度约为 5%,由此造成了激光器输出功率的波动。

4 结 论

本文研究了外腔调谐的全固态 Cr : LiSAF 激光器。外腔调谐结构因为调谐元件置于主腔外,受插入损耗的影响小,可以扩展调谐范围。分别选用棱镜和光栅作为外腔调谐元件,前者在 325 mW 的吸收泵浦功率下,实现了 785~985 nm 的调谐,输出功率最高达 21 mW,光谱底宽为 2 nm;后者的调谐波段为 785~985 nm,最大输出功率为 20 mW,光谱的半高全宽为 0.12 nm。这里调谐范围的上限受到了镜片镀膜曲线的限制,替换长波长高反的镜片还可以进一步拓展调谐范围。实验结果表明,外腔调谐的全固态 Cr : LiSAF 激光器可以实现窄线宽的宽谱调谐输出。

参考文献:

- [1] WANG X, WANG Z, BU Y, *et al.*. A 1064 nm, 1085 nm dual-wavelength Nd : YVO₄ laser using Fabry-Perot filters as output couplers[J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, 26(19): 1983-1985.
- [2] 刘恩超, 郑小兵, 李新, 等. 绝对光谱辐照度仪的波长定标[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(3): 608-615.
- [3] LIU E CH, ZHENG X B, LI X, *et al.*. Wavelength calibration of absolute irradiance spectra-radiometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 608-615. (in Chinese)
- [4] KIM R K, CHU S, HAN Y G. Stable and widely tunable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for optical beat frequency generation [J]. *Photonics Technology Letters*, 2012, 24(6): 521-523.
- [5] 杨勇, 熊伟, 叶擎昊, 等. 空间外差光谱仪的平场波长定标实验与数据处理[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(10): 2508-2513.
- [6] YANG Y, XIONG W, YE Q H, *et al.*. Experiments of flat-field wavelength calibration of spatial heterodyne spectrometer and its data processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2508-2513. (in Chinese)
- [7] 潘其坤. 中红外固体激光器研究进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 557-566.
- [8] PAN Q K. Progress of mid-infrared solid-state laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 557-566. (in Chinese)
- [9] PAYNE S A, CHASE L L, SMITH L K, *et al.*. Laser performance of LiSrAlF₆ : Cr³⁺ [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(3): 1051-1056.
- [10] DURFEE C G, STORZ T, GARLICK J, *et al.*. Direct diode-pumped Kerr-lens mode-locked Ti : sapphire laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 13677-13683.
- [11] DEMIRBAS U, EGGERT S, LEITENSTORFER A. Compact and efficient Cr : LiSAF lasers pumped by one single-spatial-mode diode: a minimal cost approach[J]. *JOSA B*, 2012, 29(8): 1894-1903.
- [12] 栾昆鹏, 于力, 沈炎龙, 等. 宽谱可调谐的全固化 Cr : LiSAF 激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(4): 041009-1-5.

- LUAN K P, YU L, SHEN Y L, *et al.*. Widely tunable all-solid-state Cr : LiSAF lasers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(4): 041009-1-5. (in Chinese)
- [10] TSUNEKANE M, IHARA M, TAGUCHI N, *et al.*. Analysis and design of widely tunable diode-pumped Cr : LiSAF lasers with external grating feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(7): 1288-1296.
- [11] KIM N, SHIN J, SIM E, *et al.*. Monolithic dual-mode distributed feedback semiconductor laser for tunable continuous-wave terahertz generation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(16):13851-13859.
- [12] ZHANG Q, CHAI B, KEAN P, *et al.*. Electronically tuned diode-laser-pumped Cr : LiSrAlF₆ laser [J]. *Optics Letters*, 1992, 17: 43-45 .
- [13] AOSHIMA S, ITO H, OHBAYASHI Y, *et al.*. Cr : LiSAF laser[C]. *In Technical Meeting on Optical and Quantum Devices*, 1992: OQD-92-13.
- [14] IHARA M, TSUNEKANE M, TAGUCHI N, *et al.*. Widely tunable single-longitudinal-mode, diode pumped cw Cr : LiSAF laser[J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(11): 888-889.
- [15] TSUNEKANE M, IHARA M, TAGUCHI N, *et al.*. Analysis and design of widely tunable diode-pumped Cr : LiSAF lasers with external grating feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(7): 1288-1296.
- [16] MAESTRE H, TORREGROSA A J, FERNANDEZ-POUSA C R, *et al.*. Widely tuneable dual-wavelength operation of a highly doped erbium ?ber laser based on diffraction gratings[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2011, 47(9): 1238-1243.
- [17] LUAN K P, YU L, SHEN Y L, *et al.*. Dual-wavelength operation in all-solid-state Cr : LiSAF lasers with grating-controlled coupled-cavities[J]. *Optics and Laser Technology*, 2015, 74(11):1-5.

作者简介:



栾昆鹏(1989—),男,吉林集安人,硕士,研究实习员,2012年于清华大学获得学士学位,2015年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: luankunpeng@nint.ac.cn



于力(1969—),男,陕西西安人,博士,研究员,1991年于陕西师范大学获得学士学位,1998年和2007年于西北核技术研究所分别获得硕士和博士学位,现主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: yuli@nint.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)