

文章编号 1004-924X(2013)04-0835-06

## LD 端面泵浦 Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体的主动调 Q 脉冲激光特性

程秀凤, 陈丽娟, 韩树娟, 王继扬, 王正平\*

(山东大学 晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

**摘要:**加工了不同切向的 Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体, 测量并分析了它们的连续和主动调制激光特性。实验采用激光二极管(LD)端面泵浦的两镜直腔, 其输出镜的耦合透过率为 2%。在连续运转条件下, *a* 切和 *c* 切晶体的最大输出功率分别为 733, 550 mW, 对应的光光转换效率分别为 11.3% 和 6.7%。在声光调 Q 脉冲运转条件下, *a* 切和 *c* 切晶体的最大平均输出功率分别为 180, 135 mW, 对应的光光转换效率分别为 2.8% 和 1.7%。当重复频率为 10 kHz 时, 获得了最佳的脉冲实验结果, 即: 最大单脉冲能量和最高峰值功率来自 *a* 切晶体, 分别为 15.8 J 和 85 W; 最小的脉冲宽度来自 *c* 切晶体, 为 153 ns。实验结果还显示, 不同切向的 Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体具有不同的输出波长, *a* 切晶体为 1 061 nm, *c* 切晶体为 1 068 nm, 这种多波长发射特性有助于该类晶体在 THz 波领域的应用。

**关键词:**激光晶体; Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体; 主动调 Q; 脉冲激光; LD 泵浦

**中图分类号:** TN244; TN248 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0835

## Actively Q-switched pulse laser from LD end-pumped Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystals

CHENG Xiu-feng, CHEN Li-juan, HAN Shu-juan, WANG Ji-yang, WANG Zheng-ping\*

(State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100, China)

\* Corresponding author, E-mail: zpwang@sdu.edu.cn

**Abstract:** The Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal samples with different orientations were machined, and their Continuous Wave (CW) and actively modulation laser characteristics were measured and analyzed. A laser diode (LD) end-pumped double mirror cavity was used in the experiment, in which the coupling transmittance of the output mirror was 2%. In CW operation conditions, the maximum output powers of *a*-cut and *c*-cut crystals were 733 mW and 550 mW, respectively, corresponding optical conversion efficiencies of 11.3% and 6.7%. In acousto-optic (A-O) operation conditions, the maximum output powers of *a*-cut and *c*-cut crystals were 180 mW and 135 mW, respectively, corresponding optical conversion efficiencies of 2.8% and 1.7%. The optimum pulse experimental results are obtained when the pulse repetition frequency (PRF) is 10 kHz. It is shown that the largest pulse energy and the highest peak power are 15.8 J and 85 W, respectively, which come from the *a*-cut sample. The shortest pulse width is 153 ns, which comes from the *c*-cut sample. Experimental results indicate

**收稿日期:** 2012-10-31; **修订日期:** 2012-12-29.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 60978027, 61178060); 教育部新世纪优秀人才计划资助项目 (No. NCET-10-0552); 山东省自然科学基金杰出青年基金资助项目 (No. JQ201218); 山东大学自主创新基金资助项目 (No. 2010JC015, 2012TS215); 山东大学研究生自主创新基金资助项目 (No. 11250071613045)

that Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystals with different orientations can output different wavelengths in 1061 nm for the  $\alpha$ -cut sample and in 1068 nm for  $c$ -cut sample. The multi-wavelength emission property of the Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal will help its applications to the THz-wave domain.

**Key words:** laser crystal; Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal; actively Q-switched; pulse laser; LD pumping

## 1 引言

多波长激光在医疗、工业、国防、通讯、光谱分析等领域有广泛应用,目前已成为激光技术的重要发展方向<sup>[1-5]</sup>。钼酸盐晶体是一类易产生双波长运转的激光材料,近年来其性质和应用逐渐受到人们的关注。钼酸盐激光晶体主要分为两类:一类是具有类白钨矿结构的、化学式为 AX(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>的晶体,其中 A 代表碱金属离子(Li, Na),X 是三价过渡族元素或稀土元素 Y,La,Gd 等;另一类是具有钾钠铅矾型结构的、化学式为 A<sub>5</sub>X(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>的晶体,其中 A 代表 K,Rb,X 代表 Bi,Y,Re 等。LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 属于类白钨矿结构的钼酸盐晶体,四方晶系,空间点群为 I41/a<sup>[6]</sup>。LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 具有熔点相对较低,生长过程中没有结构相变等优点<sup>[7]</sup>,目前用提拉法已经生长出了高质量的 Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup> : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub><sup>[8]</sup>, Yb<sup>3+</sup> : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub><sup>[9]</sup> 和 Er<sup>3+</sup> : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub><sup>[10]</sup>。Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 作为激光增益材料早在 1972 年首次被报道<sup>[11]</sup>,但是直到 2008 年才有其详细的晶体生长、热性质和偏振光谱特性的相关报道<sup>[12]</sup>,而 Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体的调 Q 脉冲激光性能至今未见报道。

本文研究了不同切向 Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体的主动调 Q 脉冲激光性能。 $a$  切与  $c$  切晶体的激光发射波长分别为 1061 和 1068 nm,连续输出功率分别达到 733 和 550 mW,调 Q 平均输出功率分别为 180 和 135 mW,相应的光光转换效率为 2.8% 和 1.7%。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,谐振腔是由 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 组成的双镜腔。泵浦源为光纤耦合的激光二极管,中心波长约为 808 nm。通过一个聚焦系统,泵浦光聚焦到激光晶体表面上的光斑半径约为 800  $\mu$ m。输入镜 M<sub>1</sub> 是一个平凹镜,泵浦端为一

平面,镀以 808 nm 增透膜,另一面是曲率半径为 200 mm 的凹面,镀以 808 nm 增透膜和 1.06  $\mu$ m 高反膜。M<sub>2</sub> 为一平面镜,镀以对 1.06  $\mu$ m 透过率为 2% 的介质膜。实验采用的 Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 为提拉法生长,Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 1% 原子数分数,尺寸为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 8 mm,分别沿  $a$  向和  $c$  向切割。晶体的两通光端面均抛光但未镀膜。为了减小晶体在高泵浦功率下产生的热效应,用锡箔包好晶体并放于水冷的铜块中,冷却水的温度设定为 15  $^{\circ}$ C。输出激光的功率用 Molec-tron 公司的 EPM2000 型功率/能量计进行测量,光谱用 Ocean Optics 公司的 HR4000CG-UV-NIR 型光谱仪进行测量,脉冲特性用 Tektronix 公司的 DPO7104 型示波器监测。声光 Q 开关的长度为 24 mm,同样用循环冷却水来控制,冷却水的温度设定为 20  $^{\circ}$ C。

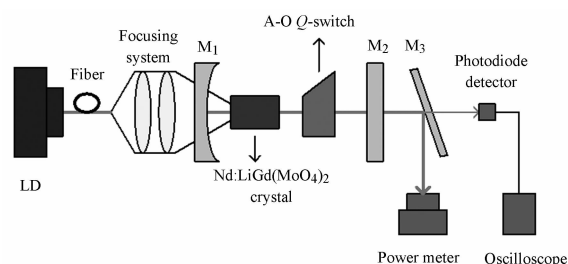


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

## 3 结果与讨论

将声光开关从谐振腔内移出,并将谐振腔长度缩短至 2.2 cm,测量了连续波激光输出,实验结果如图 2、图 3 所示。对于  $a$  切晶体,阈值为 0.76 W,在最大入射泵浦功率为 6.48 W 时,最大连续波输出功率为 733 mW,相应的光光转换效率为 11.3%,斜效率为 12.8%,用光谱仪监测到的激光波长为 1061 nm。对于  $c$  切晶体,阈值为 1.34 W,在入射泵浦功率为 8.18 W 时,最大输出功率为 550 mW,光光转换效率为 6.7%,斜

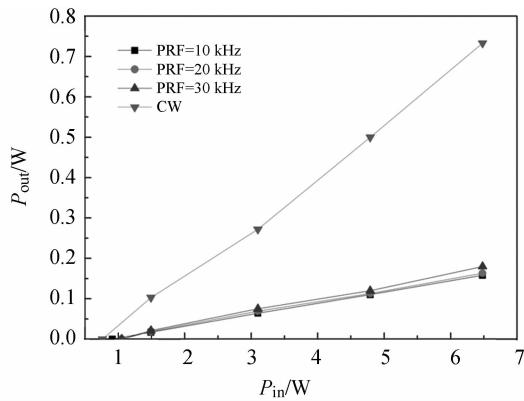


图 2  $\alpha$  切晶体输出功率随入射泵浦功率的变化  
Fig. 2 Variation of average output power with incident pump power for  $\alpha$ -cut crystal

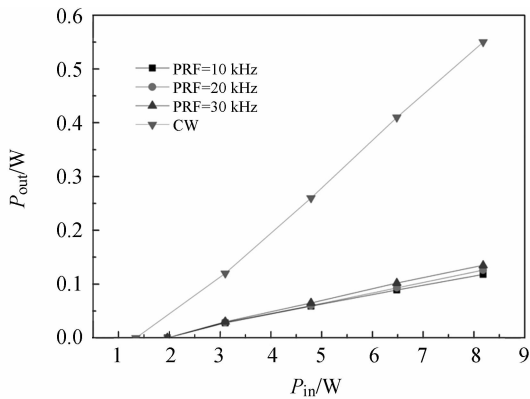


图 3  $c$  切晶体输出功率随入射泵浦功率的变化  
Fig. 3 Variation of average output power with incident pump power for  $c$ -cut crystal

效率为 8%，相应的激光波长为 1 068 nm。参考 Nd:LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体的偏振荧光光谱<sup>[12]</sup>，可以解释不同切向晶体激光发射波长不同的原因：Nd:LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体的  $\pi$  偏振发射峰位于 1 061 nm 附近， $\sigma$  偏振发射峰位于 1 068 nm 附近，而且  $\pi$  偏振发射强于  $\sigma$  偏振发射，因此  $\alpha$  切晶体的最大发射截面对应于  $\pi$  偏振发射的 1 061 nm，而  $c$  切晶体的发射是  $\sigma$  偏振发射，为 1 068 nm。用格兰棱镜监测输出激光的偏振态发现  $\alpha$  切晶体输出的 1 061 nm 激光为沿  $c$  轴的线偏振，而  $c$  切晶体输出的 1 068 nm 激光为非偏振，这些现象也与该晶体的偏振荧光光谱相符。此外，由于  $\pi$  偏振的发射截面大于  $\sigma$  偏振，所以与  $c$  切晶体相比， $\alpha$  切晶体具有更低的阈值、更大的输出和更高的效率。

拉长谐振腔将声光开关放进谐振腔内，位于晶体和输出耦合镜之间，根据输出功率最大化的原则将腔长优化至 5.3 cm，实现主动调 Q 运转。

平均输出功率随入射泵浦功率的变化如图 2、图 3 所示。在较高泵浦功率下，高脉冲重复频率的平均输出功率略高于低重复频率的平均输出功率。在脉冲重复频率 (Pulse Repetition Frequency, PRF) 为 30 kHz 时， $\alpha$  切晶体的最大平均输出功率为 180 mW，相应的光光转换效率为 2.8%； $c$  切晶体的最大平均输出功率为 135 mW，相应的光光转换效率为 1.7%。由于输出耦合对激光的透过率较低 (2%)，因此腔内的热效应比较严重，特别是在高泵浦功率和高重复频率时。由功率计测得的平均输出功率和示波器测得的脉冲重复频率可以得到  $\alpha$  切和  $c$  切晶体的单脉冲能量随入射泵浦功率的变化，如图 4、图 5 所示。

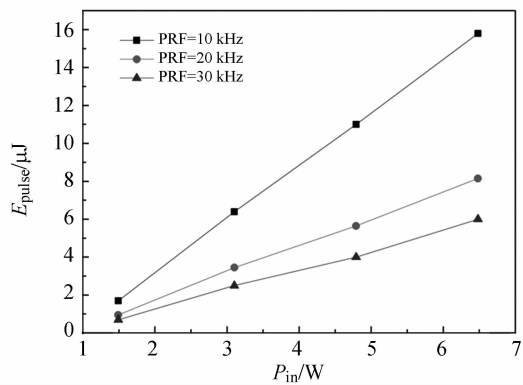


图 4  $\alpha$  切晶体在不同脉冲重复频率下单脉冲能量随入射泵浦功率的变化  
Fig. 4 Variation of single pulse energy with incident pump power at different pulse repetition frequencies for  $\alpha$ -cut crystal

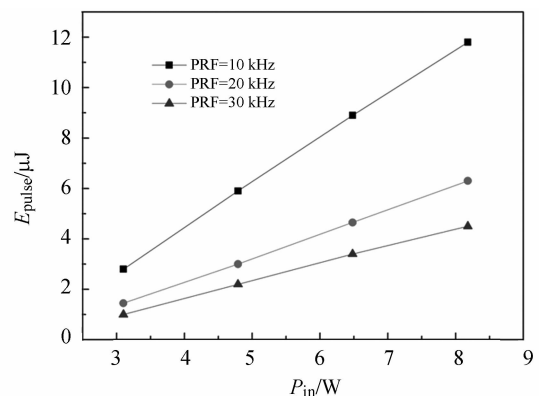


图 5  $c$  切晶体在不同脉冲重复频率下单脉冲能量随入射泵浦功率的变化  
Fig. 5 Variation of single pulse energy with incident pump power at different pulse repetition frequencies for  $c$ -cut crystal

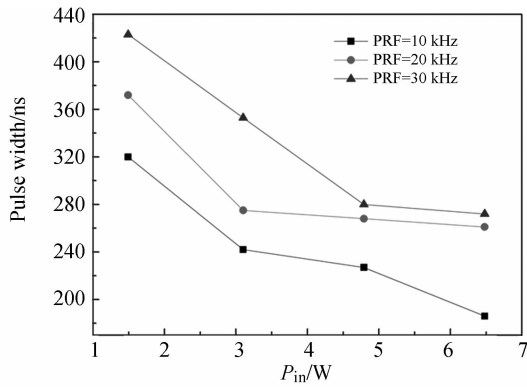


图 6  $\alpha$ 切晶体不同脉冲重复频率下单脉冲宽度随入射泵浦功率的变化

Fig. 6 Variation of single pulse width with incident pump power at different pulse repetition frequencies for  $\alpha$ -cut crystal

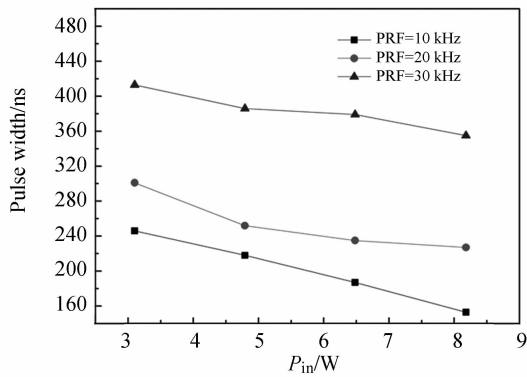


图 7  $c$ 切晶体不同脉冲重复频率下单脉冲宽度随入射泵浦功率的变化

Fig. 7 Variation of single pulse width with incident pump power at different pulse repetition frequencies for  $c$ -cut crystal

在相同的入射泵浦功率下,单脉冲能量随着 PRF 的增加而显著降低。对于  $\alpha$ 切晶体,在 PRF 为 10, 20 和 30 kHz 时的最大脉冲能量分别为 15.8, 8.2 和 6  $\mu$ J; 对于  $c$ 切晶体,分别为 11.8, 6.3 和 4.5  $\mu$ J。

脉冲宽度随入射泵浦功率的变化如图 6、图 7 所示。随着入射泵浦功率的增加,脉冲宽度变窄,当 PRF 为 10 kHz,入射泵浦功率由 1.49 W 增加到 6.48 W 时, $\alpha$ 切晶体的脉冲宽度由 320 ns 下降到 186 ns; 当  $c$ 切晶体的入射泵浦功率由 3.1 W 增加到 8.18 W 时,脉冲宽度由 246 ns 下降到 153 ns。图 8 为脉宽 153 ns 的脉冲波形,其中插图是 PRF 为 10 kHz 时的脉冲序列。由图 6、图 7

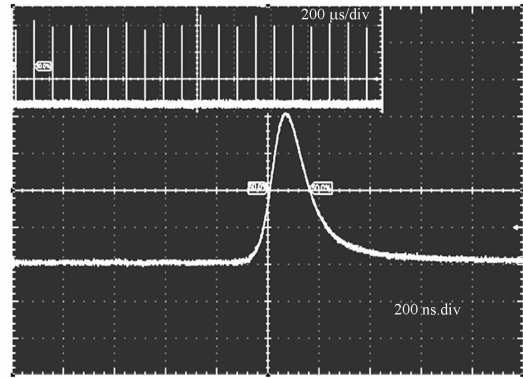


图 8 脉宽为 153 ns 的脉冲波形(插图为重复频率为 10 kHz 时的脉冲序列)

Fig. 8 Pulse profile with width of 153 ns (Inset: pulse train with repetition rate of 10 kHz)

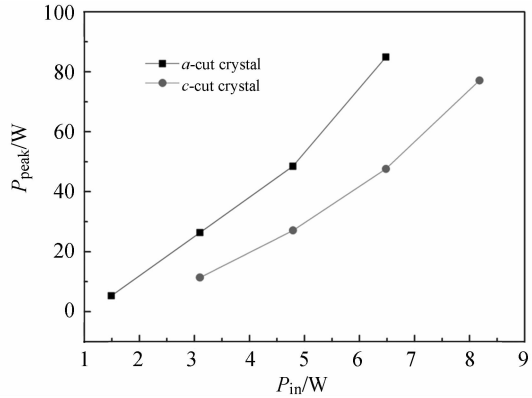


图 9 脉冲重复频率为 10 kHz 时, $\alpha$ 切晶体和  $c$ 切晶体的峰值功率随入射泵浦功率的变化

Fig. 9 Variation of peak power with incident pump power for  $\alpha$ -cut and  $c$ -cut crystals at repetition rate of 10 kHz

可知,对于  $\alpha$ 切和  $c$ 切晶体,脉宽均呈现出随 PRF 增加而变宽的趋势。由图 4、图 5 的脉冲能量和图 6、图 7 的脉宽可以得到相应条件下的峰值功率。图 9 给出了当 PRF 为 10 kHz 时, $\alpha$ 切晶体和  $c$ 切晶体的峰值功率随入射泵浦功率的变化。由图可知,峰值功率随入射泵浦功率的增加而增大,最大的峰值功率为 85 W,是由  $\alpha$ 切晶体在 6.48 W 的入射泵浦功率下获得的。

### 4 结 论

本文报道了不同切向的 Nd : LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 晶体的连续和主动调 Q 脉冲激光性能。 $\alpha$ 切晶体

的激光输出为1 061 nm的线偏振光,最大连续波输出功率为733 mW,光光转换效率和斜效率分别为11.3%和12.8%;但由于晶体对泵浦光的吸收率约为70%,所以如果用吸收泵浦功率计算,光光转换效率和斜效率分别为16.1%和18.3%。*c*切晶体的激光输出为1 068 nm的非偏振光,最大连续波输出功率为550 mW,光光转换效率和斜效率分别为6.7%和8%。在主动调Q运转条件下,*a*切与*c*切晶体的平均输出功率分别为180 mW和135 mW,相应的光光转换效率分别为

2.8%和1.7%。在10 kHz的脉冲重复频率下,采用*a*切晶体获得了最大单脉冲能量和最高峰值功率,分别为15.8 μJ和85 W;采用*c*切晶体获得了最窄脉冲宽度,为153 ns。通过晶体镀膜以及谐振腔的进一步优化,有望获得更佳的实验结果。本文研究表明,通过选择Nd:LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>晶体的切向可以实现1 061,1 068 nm两种波长的连续激光和脉冲激光的有效运转,利用非线性晶体的进一步差频有望获得1.85 THz的相干辐射。

### 参考文献:

- [1] 邵春雷,宋晓峰,张来明,等. 高功率TEA CO<sub>2</sub>激光器的双波长免调切换结构[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 429-436.  
SHAO CH L, SONG X F, ZHANG L M, *et al.*. High power TEA CO<sub>2</sub> laser with two wavelength free shift output structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 429-436. (in Chinese)
- [2] 吕彦飞,张喜和,檀慧明.全固态连续波555 nm黄绿光激光器[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 674-677.  
LÜ Y F, ZHANG X H, TAN H M. 555 nm all solid-state continuous-wave yellow-green laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 674-677. (in Chinese)
- [3] 付喜宏,檀慧明,李义民,等.全固态单纵模593.5 nm和频激光器[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1469-1473.  
FU X H, TAN H M, LI Y M, *et al.*. All-solid-state single-longitudinal-mode 593.5 nm sum-frequency laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1469-1473. (in Chinese)
- [4] 张成,罗正钱,王金章,等.熔锥光纤倏逝场作用石墨烯双波长锁模掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602006.  
ZHANG CH, LUO ZH Q, WANG J ZH, *et al.*. Dual-wavelength mode-locked Yb-doped fiber laser based on the interaction of graphene and fiber-taper evanescent field [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 0602006. (in Chinese)
- [5] 陆婷婷,王君涛,黄敏捷,等. LD端面抽运Nd:YLF/Nd:YAG多波长脉冲激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0902002.  
LU T T, WANG J T, HUANG M J, *et al.*. Simultaneous multi-wavelength pulsed laser in diode-end-pumped Nd:YLF/Nd:YAG [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0902002. (in Chinese)
- [6] 韩永飞,李景照,陈振强,等.钼酸盐激光晶体的研究进展[J]. 人工晶体学报, 2009, 38(1): 190-202.  
HAN Y F, LI J ZH, CHEN ZH Q, *et al.*. Review of research on molybdate laser crystal [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2009, 38(1): 190-202. (in Chinese)
- [7] KLEVTSOV P V, KMOZEEVA L P. Synthesis of double lithium molybdates of rare earths and yttrium [J]. *Inorganic Materials*, 1969, 5(10): 1571-1572.
- [8] HUANG X Y, XU Z S, LIN Z B, *et al.*. Growth and up-conversion emission of Er<sup>3+</sup>/Yb<sup>3+</sup>-codoped LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal [J]. *J. Crystal Growth*, 2005, 276(1-2): 177-181.
- [9] HUANG X Y, WANG G F. Growth and spectral characteristics of Yb<sup>3+</sup>-doped LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal [J]. *Chinese J. Struct. Chem.*, 2010, 29(6): 853-860.
- [10] HUANG X Y, ZHAO W, WANG G F, *et al.*. Polarized spectral analysis of Er<sup>3+</sup> ions in Er<sup>3+</sup>:LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(23): 6578-6584.
- [11] KAMINSKII A A, MAYER A A, NIKONOVA N S, *et al.*. Stimulated emission from the new LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>:Nd<sup>3+</sup> crystal laser [J]. *Phys. Status Solidi A*, 1972, 12(2): K73-K75.
- [12] HUANG X Y, WANG G F. Growth, thermal and spectroscopic characteristics of Nd<sup>3+</sup>:LiGd(MoO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> crystal [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2008, 41(22): 225401.

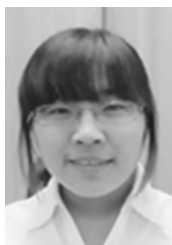
## 作者简介:



**程秀凤**(1969—),女,山东莘县人,学士,高级实验师,主要从事功能晶体的物理性能研究。E-mail: xfcheng@icm.sdu.edu.cn



**陈丽娟**(1985—),女,山东临沂人,博士研究生,2008年于山东大学获得学士学位,主要从事全固态激光器的研究。E-mail: lilac018@163.com



**韩树娟**(1984—),女,山东泰安人,博士,助理研究员,2007年于济南大学获得学士学位,2012年于山东大学晶体材料研究所获得博士学位,主要从事非线性光学晶体的生长和表征的研究。E-mail: shujuanhan84@163.com



**王继扬**(1946—),男,江苏苏州人,学士,教授、博士生导师,1968年毕业于南京大学化学系,长期从事功能晶体材料的生长、表征及应用的研究。E-mail: jywang@icm.sdu.edu.cn



**王正平**(1973—),男,江苏丰县人,博士,教授,主要研究方向为晶体物理、激光与非线性光学。E-mail: zpwang@sdu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)