

Tm:YAP 激光抽运 ZGP 晶体光参量振荡器

魏磊 肖磊 韩隆 吴军勇 王克强

(华北光电技术研究所固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要 简要分析了掺铥铝酸钇(Tm:YAP)晶体的能级结构及吸收光谱特性和磷化锗锌(ZGP)晶体的相位匹配特性,报道了一种在室温条件下工作的中红外光参量振荡器(OPO)。激光器输出的波长为 3.88、4.00、4.14 μm ,在脉冲频率为 10 kHz 时,最大输出功率为 7.16 W,OPO 抽运源到中波输出激光的光-光转换效率为 49.4%、斜率效率为 48.9%。激光单脉冲宽度为 81.47 ns,单脉冲能量为 0.71 mJ,单脉冲峰值功率为 8.78 kW,光束质量 M^2 在 X 方向为 3.8,Y 方向为 4.0。

关键词 激光器;中红外激光器;掺铥铝酸钇;磷化锗锌;光参量振荡器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0702006

ZGP Optical Parametric Oscillator Pumped by Tm:YAP Laser

Wei Lei Xiao Lei Han Long Wu Junyong Wang Keqiang

(Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract The energy level diagram and absorption spectrum of Tm:YAP crystal and phase-matching properties of ZeGeP crystal are analyzed, and a middle-infrared optical parametric oscillator (OPO) under room temperature is presented. The wavelength of laser is 3.88, 4.00 and 4.14 μm , and the output power is 7.16 W at 10 kHz, the corresponding optical-optical conversion efficiency is up to 49.4%, and the slope efficiency is 48.9%. The single pulse width is 81.47 ns, the energy of single pulse is 0.71 mJ, the peak power of single pulse is 8.78 kW, the quality of middle infrared laser beam is 3.8(horizontal) and 4.0(vertical).

Key words lasers; middle infrared laser; Tm:YAP; ZoGeP; optical parametric oscillator

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3540

1 引 言

3~5 μm 波长中红外(MIR)激光位于大气层的透射窗口波段,该波段激光源在激光雷达、遥感、医疗诊断、环境监测、空间光通信、激光光谱学研究以及光电对抗等领域均有重要的应用,因此中红外激光逐渐成为研究的热点,尤其是随着各种新型非线性晶体的出现,使得中红外激光的研究不断进入新的高度。3~5 μm 激光源的实现方式有多种,与自由电子激光器、半导体量子级联激光器(InGaAs/InAlAs)以及直接激励 $\text{Cr}^{2+}/\text{Fe}^{2+}$ 掺杂材料这三种方式相比,通过光参量振荡器(OPO)方式可实现高重复频率、高功率、多波长的中波激光输出^[1~4]。

近年来,国内外在中红外激光参量振荡器研究

方面开展了很多工作,尤其是在以周期极化铌酸锂(PPLN/PPMgLN)晶体和磷化锗锌(ZGP)晶体为工作物质的 OPO 研究上取得了很大进展。2004 年,新加坡 DSO 实验室^[5]报道了光纤激光器抽运的 PPLN OPO,3 μm 至 5 μm 平均功率大于 100 mW。2009 年,英国牛津大学^[6]采用 1.064 μm 激光源抽运 PPLN OPO,获得了 200 μW 的 3.08 μm 激光输出,转换效率达 12.3%。2007 年美国 BAE^[7]报道了掺 Tm 光纤激光器抽运的 ZGP OPO,输出波长 3.4~3.8 μm 和 4.1~4.7 μm ,转换效率 22%,斜率效率在 35%以上。同年荷兰 Twente 大学和德国 Munster 大学^[8]以 Ho:YAG 激光(2.09 μm)抽运 I 类单谐振的 ZGP OPO,输出波长 5.2 μm ,光-光转

收稿日期: 2012-02-13; 收到修改稿日期: 2012-03-26

作者简介: 魏磊(1983—),男,本科,工程师,主要从事激光二极管抽运固体激光器及光参量振荡技术等方面的研究。

E-mail: weilai2006@163.com

换效率 56%，斜率效率 64%。2010 年挪威国防研究局^[9]采用三镜环形 OPO 谐振腔实现了 22 W 的 3~5 μm 输出，从 2.1 μm 到中波激光的转换效率为 58%，斜率效率 75%。2011 年，澳大利亚国防科技组织的 A. Hemming 等^[10]以掺 Tm 光纤激光抽运 Ho:YAG 晶体获得 2.09 μm 激光作为光源抽运 ZGP OPO，最终获得 27 W 的 3~5 μm 激光。国内的研究人员对中红外激光 OPO 的研究在近年也不断取得进展，2009 年中国工程物理研究院^[11]报道了 1.06 μm 激光抽运的 PPMgLN OPO，输出波长 3.84 μm，输出平均功率 8.3 W(7.5 kHz)，光-光转换效率为 14.1%。2011 年，该院^[12]还报道了最大输出 5.7 W 的 ZGP OPO，斜率效率达 46.6%， $M^2 < 1.8$ 。2010 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[13]以 Nd:YVO₄ 激光器的 1064 nm 波长抽运 PPMgLN OPO，获得了 1.13 W 的中红外输出，光-光转换效率达 17%。同年哈尔滨工业大学可调谐激光国家重点实验室^[14]报道了以 2049 nm Tm:Ho:GdVO₄ 激光源抽运的 ZGP OPO，输出波长 3.80 μm 和 4.45 μm，最大输出功率 6.1 W，光-光转换效率 33%。

本文采用掺铥铝酸钇(Tm:YAP)晶体为工作

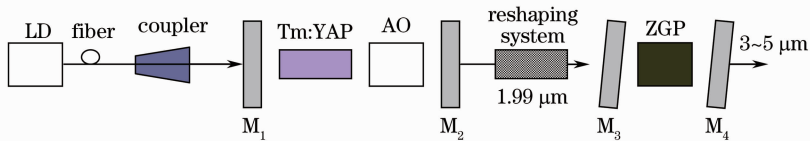


图 1 中红外激光器结构

Fig. 1 Structure of the mid-infrared laser

M_2 输出的 1.99 μm 脉冲激光通过光束整形系统后再进入 OPO 谐振腔，以获得最佳的 OPO 输出效果。如果整形后的 1.99 μm 光束发散角太大，一方面可能会降低 OPO 腔振荡阈值，另一方面则会导致 1.99 μm 光束在 ZGP 晶体内的有效工作区域过短，使得 1.99 μm 激光到中波激光的转换效率过低；如果发散角太小，束腰太粗，则会大大提高中波激光输出阈值，同样影响光-光转换效率。OPO 采用平-平腔、双谐振工作方式， M_3 所镀膜层对 1.99 μm 高透，对 3~5 μm 高反； M_4 所镀膜层对 1.99 μm 高反，对信频光和闲频光均部分透过；为了避免 OPO 腔镜反向传播的 1.99 μm 激光进入 Tm:YAP 激光谐振腔，使 M_3 和 M_4 镜面与整形后的 1.99 μm 激光轴向成 5°角放置。ZGP 晶体两端面均镀有对 1.99 μm 和 3~5 μm 高透膜层。为了降低破坏阈值，将 ZGP 晶体置于整形后的 1.99 μm 光束束

物质、声光调 Q 方式实现 1.99 μm 的线偏脉冲激光输出，再以此为抽运源、ZGP 为 OPO 工作物质实现 3~5 μm 激光输出，激光重复频率 10 kHz，输出功率 7.16 W。

2 实验装置

激光二极管(LD)输出的中心波长在 795 nm 的激光通过光纤导入光束耦合系统进行扩束整形。1.99 μm 激光振荡阈值与抽运光耦合系统的放大倍率有关。倍率越大，阈值越高，从而影响 795 nm 到 1.99 μm 激光的转换效率；倍率过小则容易导致 1.99 μm 激光输出过早饱和并降低 Tm:YAP 晶体及腔镜 M_1 和 M_2 的破坏阈值。本文选用的耦合系统放大倍率为 1.5，芯径为 400 μm。光纤输出的光束经放大后的束腰为 600 μm；Tm:YAP 晶体尺寸为 φ5 mm×15 mm，两端面镀有 795 nm 和 1.99 μm 增透膜层； M_1 所镀膜层对 795 nm 高透、对 1.99 μm 高反， M_2 所镀膜层对 1.99 μm 透射率为 10%；声光 Q 开关通光孔径大于 3 mm×3 mm，晶体两端面镀有 795 nm 和 1.99 μm 增透膜层，对 1.99 μm 光透射率在 99% 以上，声光(AO)调制器驱动器可以提供频率在 1~20 kHz 之间连续调谐的调制信号。

腰附近。考虑到 1.99 μm 激光束在 ZGP 晶体内的焦移，可以使 ZGP 晶体中心远离 1.99 μm 束腰一些。

实验装置中需要冷却的元件有 Tm:YAP 晶体、Q 开关、ZGP 晶体，对这 3 个元件统一采用 20 °C 水冷方式。

3 方案分析

3.1 Tm:YAP 的特性

掺铥铝酸钇^[15](Tm:YAP)晶体具有优秀的物理化学性能，硬度、机械强度和相对密度较高，化学性能稳定，热导率和扩散系数较大。YAP 是光学负双轴晶体，属正交晶系结构，具有各向异性，因此可以抑制热负荷引起的双折射效应，并获得线偏振激光输出。

观察图 2 中 Tm:YAP 的吸收谱线，有两个较高的吸收峰，689 nm 和 794 nm，因为 794 nm 和激

光二极管发射光谱重叠较多,因而选用 794 nm 作为 Tm:YAP 的抽运源。在该吸收峰处,它的吸收截面约为 $1.35 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ (Tm³⁺ 掺杂原子数分数为 4%),吸收线宽约为 30 nm,另外以 YAP 为基质,Tm³⁺ 可以实现较高的掺杂浓度,这些都有利于降低振荡阈值,提高抽运源到 1.99 μm 的光-光转换效率。

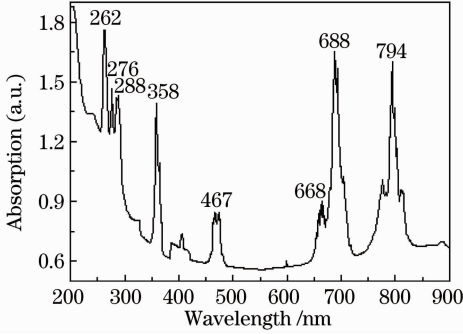


图 2 Tm:YAP 晶体的非偏振吸收光谱

Fig. 2 Unpolarized absorption spectrum of Tm:YAP

图 3 为 Tm:YAP 晶体中 Tm³⁺ 的粒子跃迁过程。抽运激光光子被吸收后,Tm³⁺ 从³H₆ 跃迁到³H₄ 能级,然后再跃迁到³F₄ 能级,同时进行的另一个过程就是 Tm³⁺ 从³H₆ 到³F₄ 能级的直接跃迁。这个交叉弛豫的结果就是一个³H₄ Tm³⁺ 与周围的 Tm³⁺ 横向弛豫产生两个³F₄ Tm³⁺,使得 Tm³⁺ 的量子效率接近 2。

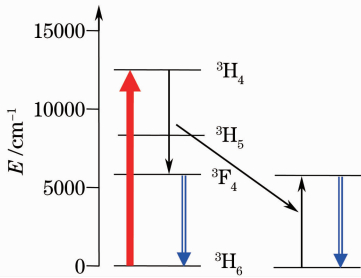


图 3 Tm³⁺ 在 YAP 中的能级结构及交叉弛豫

Fig. 3 Energy level diagram and cross relaxation of Tm³⁺ in YAP

3.2 ZGP 及相位匹配

在众多非线性晶体中,ZGP 因其较高的非线性系数(75 pm/V)、较宽的透明范围(0.7~12.0 μm)、高热导性[0.35 W/(cm·K)]、较低的振荡阈值和较高的损伤阈值,成为中红外波段光参量振荡器的首选工作物质^[16,17]。作为一种可调谐激光晶体,除了通过改变晶体工作温度以获得需要的激光波长外,还可以选择特定的相位匹配角度实现特定波长的激光输出。

折射率椭球公式为

$$\frac{1}{n_c^2(\theta)} = \frac{\cos^2\theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_e^2}, \quad (1)$$

能量守恒

$$\omega_p n_p = \omega_s n_s + \omega_i n_i, \quad (2)$$

式中 θ 为相应的匹配角, $\omega_p, \omega_s, \omega_i$ 分别为抽运光、信号光和闲频光的频率。

$$n_o^2 = 4.473 + \frac{5.266\lambda^2}{\lambda^2 - 0.134} + \frac{1.491\lambda^2}{\lambda^2 - 662.6}, \quad (3)$$

$$n_e^2 = 4.633 + \frac{5.342\lambda^2}{\lambda^2 - 0.143} + \frac{1.458\lambda^2}{\lambda^2 - 662.6}, \quad (4)$$

式中 n_o 为 ZGP 晶体内垂直光轴方向的折射率, n_e 为 ZGP 晶体内沿光轴方向的折射率。综合(1)~(4)式可以得出 1.99 μm 抽运 ZGP OPO 时的相位匹配曲线。图 4 给出了 1.99 μm 激光抽运 ZGP OPO 时的 I 类和 II 类相位匹配曲线,由图可知,要同时获得多波长中波激光输出,应该选择 I 类相位匹配(o \rightarrow e+e)。

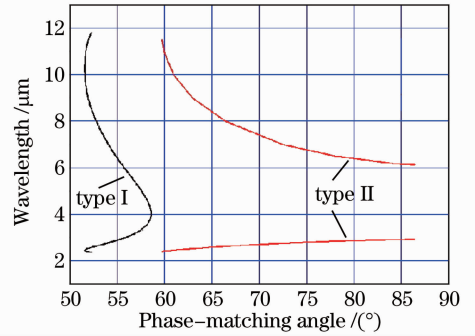


图 4 1.99 μm 激光源抽运 OPO 时 ZGP 的相位匹配曲线

Fig. 4 Phase-matching properties of ZGP at 1.99 μm pump

4 实验结果及分析

4.1 3~5 μm 激光输出效率与 1.99 μm 脉冲频率的关系

根据 1.99 μm 脉冲激光的功率密度公式

$$p/s = \bar{P}/(\pi \cdot f \cdot \Delta t \cdot \omega^2), \quad (5)$$

式中 p 为脉冲光峰值功率, s 为光斑面积, \bar{P} 为平均光功率, f 为重复频率, Δt 为脉宽, ω 为光斑半径。降低脉冲频率,会提高 1.99 μm 激光脉冲的功率密度,从而降低 3~5 μm 激光阈值,提高 1.99 μm 到 3~5 μm 激光的光-光转换效率。观察图 5 可得,当脉冲频率从 4 kHz 逐渐增加到 20 kHz 时,中波激光的输出效率线性递增。然而,降低重复频率、提高 1.99 μm 功率密度的同时,会增加 OPO 部分损坏的可能性,为了提高破坏阈值而又不降低中波激光输

出效率,在 10 kHz 调制下逐步增加 2 μm 脉冲激光注入,中波激光输出功率随之呈现线性增长趋势,这说明整套实验装置是稳定的。在 1.99 μm 注入功率约为连续 14.5 W、脉冲 13.7 W 时,3~5 μm 激光最大输出功率为 7.16 W,光-光转换效率为 49.4%,斜率效率为 48.9%。

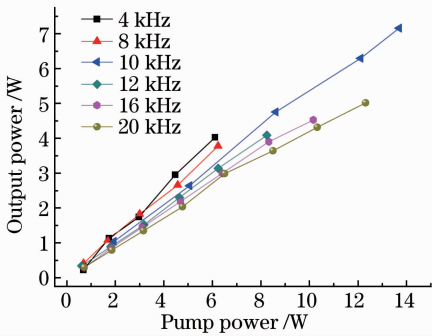


图 5 不同调制频率下的 MIR 激光输出功率与 1.99 μm 脉冲激光功率的关系

Fig. 5 Relationship between output power of MIR laser and pump power of 1.99 μm pulse laser under different frequencies

4.2 输出频谱

使用光栅单色仪对中波激光光谱进行测量,结果如图 6 所示,输出激光 3 个波长分别为:简并波长 4.00、3.88、4.14 μm,与光参量振荡公式 $1/\lambda_p = 1/\lambda_s + 1/\lambda_i$ 完全吻合。根据图 4 中 ZGP 晶体 I 类相位匹配曲线,要获得波长小于 3.88 μm 或大于 4.14 μm 的中波输出,可以通过减小匹配角度来实现。

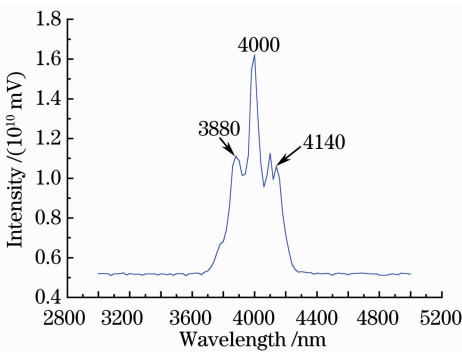


图 6 ZGP OPO 的输出光谱

Fig. 6 Spectrum of the ZGP OPO

4.3 光束特征

使用 SPIRICON 公司生产的 CCD 光束分析仪观察 3~5 μm 激光输出光斑,二维光斑分布如图 7 所示。采用聚焦透镜法测量光束质量 M^2 因子,在 X 方向为 3.8, Y 方向为 4.0。图 8 为 10 kHz 声光 Q 开关调制后的脉冲波形,测得 3~5 μm 激光脉冲宽度为 81.47 ns,激光单脉冲能量为 0.71 mJ,单脉

冲峰值功率为 8.78 kW。

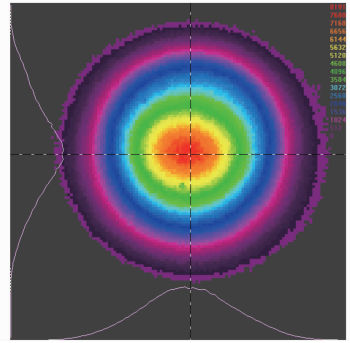


图 7 光斑分布图

Fig. 7 Intensity distribution of laser beam

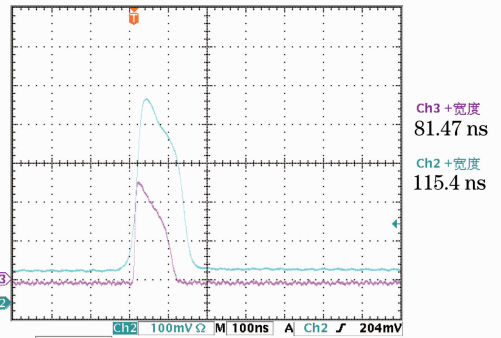


图 8 1.99 μm 脉冲(ch2)与 3~5 μm 激光(ch3)脉冲
Fig. 8 Pulse of 1.99 μm laser (ch2) and 3~5 μm laser (ch3)

5 结 论

对于 3~5 μm 中红外激光工作方案,包括对 1.99 μm 激光晶体和中波激光晶体的选择进行了讨论,水冷条件下获得重复频率为 10 kHz 的 7.16 W 最大功率输出、49.4% 的光-光转换效率和 48.9% 的斜率效率,同时获得 4.00、3.38、4.14 μm 多波长输出,光束发散角分别为 X 方向 24.3 mrad, Y 方向 23.6 mrad,测得中波脉冲宽度为 81.47 ns,验证了先进行 1.99 μm 激光振荡再通过 OPO 方式获得高效率、高重复频率中红外激光输出方案的可行性。同时,在不引起破坏的前提下,可以通过改变 1.99 μm 脉冲频率来获得更高效的中波输出,为将来大功率中红外激光输出提供了一条可行的思路。

参 考 文 献

1 Li Aizhen. The invention and advancement on unipolar quantum cascade lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2213~2220
李爱珍. 单极量子级联激光器的发明及其进展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2213~2220
2 Y. Bai, S. Slivken, S. R. Darvish *et al.*. High power broad area

- quantum cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(22): 221104
- 3 Yelena Isyanova, Alex Dergachev, David Welford *et al.*. Multi-wavelength, 1.5~10 μm tunable, tandem OPO[C]. in *Advanced Solid-State Lasers*, OSA Trends in Optics and Photonics, 1999, WB4
 - 4 Markus Henriksson, Mikael Tiihonen, Valdas Pasiskevicius *et al.*. ZnGeP₂ parametric oscillator pumped by a linewidth-narrowed parametric 2 μm source[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1878~1880
 - 5 Chia Li Ching Lindy, Ng Hui Khoon. Nanosecond >4-micron PPLN OPO pumped by a Yb fiber laser[C]. OSA/CLEO, 2004
 - 6 Roberto Grilli, Luca Ciaffohi, Cus Harcock *et al.*. Mid-infrared ethene detection using difference frequency generation in a quasi-phase-matched LiNbO₃ waveguide [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(30): 5696~5703
 - 7 Alex Dergachev, Darreu Armstiong, Arlee Snith *et al.*. 3.4 μm ZGP RISTRA nanosecond optical parametric oscillator pumped by a 2.05 μm Ho:YLF MOPA system[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14404~14413
 - 8 A. F. Nieuwenhuis, C. J. Lee, P. J. M. Van Derslot *et al.*. High-efficiency mid-infrared ZnGeP₂ optical parametric oscillator directly pumped by a lamp-pumped, Q-switched CrTmHo:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1): 52~54
 - 9 Espen Lippert, Helge Fonnum, Gunnar Arisholm *et al.*. A 22-watt mid-infrared optical parametric oscillator with V-shaped 3-mirror ring resonator [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26475~26483
 - 10 A. Hemming, J. Richards, A. Davidson *et al.*. A 27 W mid-IR laser source[C]. in *Proceedings of the International Quantum Electronics Conference and Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, 2011. C607
 - 11 Xie Gang, Peng Yuefeng, Wang Weimin *et al.*. High-power mid-infrared 3.8 μm laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(7): 970~972
 - 谢刚, 彭跃峰, 王卫民等. 高功率中红外 3.8 μm 激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(7): 970~972
 - 12 Yuefeng Peng, Xingbin Wei, Weimin Wang. Mid-infrared optical parametric oscillator based on ZnGeP₂ pumped by 2 μm laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(6): 061403
 - 13 Tan Huiming, Lin Hongyi, Zhang Bolin *et al.*. Mid-infrared tunable all-solid-state optical parametric oscillator based on PPMgLN[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2303~2308
 - 檀慧明, 林洪沂, 张搏麟等. 基于 PPMgLN 的中红外全固态可调谐光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2303~2308
 - 14 G. L. Zhu, Y. L. Ju, C. H. Zhang *et al.*. High-power, high-quality ZGP OPO pumped by a Tm, Ho:GdVO₄ laser[J]. *Solid State and Liquid Lasers*, 2010, **20**(6): 1341~1343
 - 15 Lu Yanling, Yang Yang, Wang Jun *et al.*. Spectral properties of Tm:YAP laser crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7): 968~972
 - 陆燕玲, 杨扬, 王俊等. Tm:YAP 激光晶体光谱参数的计算[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 968~972
 - 16 Kevin T. Zawilski, Scott D. Setzler, Peter G. Schunemann *et al.*. Increasing the laser-induced damage threshold of single crystal ZnGeP₂ [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(11): 2310~2316
 - 17 Xia Shixing, Lei Zuotao, Wang Meng *et al.*. Growth and mid-infrared optical parametric oscillator of large ZnGeP₂ single crystals [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2011, **40**(2): 541
 - 夏士兴, 雷作涛, 王猛等. 大尺寸 ZnGeP₂ 晶体生长与中红外光参量振荡[J]. *人工晶体学报*, 2011, **40**(2): 541

栏目编辑: 宋梅梅