

用于惯性约束核聚变激光驱动器的激光二极管抽运 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 激光放大器的实验研究

唐熊忻 邱基斯 樊仲维 王昊成 刘悦亮 刘昊 苏良碧

Experimental study of diode-pumped Nd, Y:CaF<sub>2</sub> amplifier for inertial confinement fusion laser driver

Tang Xiong-Xin Qiu Ji-Si Fan Zhong-Wei Wang Hao-Cheng Liu Yue-Liang Liu Hao Su Liang-Bi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 204206 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.204206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于光参量变频与放大的高灵敏红外成像技术

Sensitive detection of ultra-weak infrared image using parametric frequency up-conversion and amplification

物理学报.2016, 65(1): 014209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014209>

基于 MgO:APLN 的 1.57 μm/3.84 μm 连续波内腔多光参量振荡器研究

Continuous-wave 1.57 μm/3.84 μm intra-cavity multiple optical parametric oscillator based on MgO:APLN

物理学报.2015, 64(22): 224215 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224215>

基于 MgO:QPLN 的多光参量振荡器电场调谐特性理论与实验研究

Electric field tuning characteristic of multiple optical parametric oscillator based on MgO:QPLN

物理学报.2015, 64(16): 164208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164208>

高效率内腔式 2 μm 简并光学参量振荡器

High-efficiency intracavity 2 μm degenerate optical parametric oscillator

物理学报.2015, 64(8): 084207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084207>

激光熔覆铜锰合金选择性脱合金制备纳米多孔涂层的研究

Fabrication of nanoporous metal by selective electrochemical dealloying from laser cladding Cu-Mn alloys

物理学报.2012, 61(9): 094211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.094211>

# 用于惯性约束核聚变激光驱动器的激光二极管 抽运Nd, Y:CaF<sub>2</sub>激光放大器的实验研究\*

唐熊忻<sup>1)2)3)</sup> 邱基斯<sup>1)2)3)†</sup> 樊仲维<sup>1)2)‡</sup> 王昊成<sup>1)2)</sup> 刘悦亮<sup>1)</sup>  
刘昊<sup>1)2)</sup> 苏良碧<sup>4)5)</sup>

1)(中国科学院光电研究院, 北京 100094)

2)(国家半导体泵浦激光工程技术研究中心, 北京 100094)

3)(中科和光(天津)应用激光技术研究所有限公司, 天津 300304)

4)(中国科学院上海硅酸盐研究所人工晶体研究中心, 上海 201899)

5)(中国科学院透明光功能无机材料重点实验室, 上海 201899)

(2016年5月6日收到; 2016年7月31日收到修改稿)

对Nd, Y:CaF<sub>2</sub>晶体作为激光放大器的增益介质进行了报道. 研制了一台采用激光二极管面阵五向水平侧面抽运 $\phi 5\text{ mm} \times 70\text{ mm}$  Nd, Y:CaF<sub>2</sub>的激光放大器, 对其进行了实验研究. 测量了Nd, Y:CaF<sub>2</sub>晶体的吸收谱、发射谱、以及放大器的荧光分布. 在相同的抽运功率下, 测量了Nd, Y:CaF<sub>2</sub>与Nd:Glass放大器分别工作在10 Hz和1 Hz重复频率时的小信号增益, 在抽运功率为9.63 kW时, Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器的小信号增益达6.12, 为Nd:Glass的1.5倍. 与Nd:Glass相比, Nd, Y:CaF<sub>2</sub>晶体的重复工作频率不仅大大提高, 而且增益性能也更强. 测量了种子光和经Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器后的光谱, 能量放大前后光谱几乎无变化.

**关键词:** 激光放大器, 侧面抽运, 小信号增益, Nd, Y:CaF<sub>2</sub>

**PACS:** 42.70.Hj, 42.65.Yj, 42.55.Xi, 42.60.Lh

**DOI:** 10.7498/aps.65.204206

## 1 引言

当前惯性约束核聚变激光驱动装置(ICF laser drivers)采用Nd掺杂玻璃作为增益介质, 由于玻璃热导率低, 限制了激光系统的重复频率工作能力. 在面向惯性聚变能源方面, 要求激光驱动器重复频率不低于10 Hz运行, 现有Nd掺杂的激光玻璃等无法满足聚变能源激光驱动器对重复频率的要求<sup>[1-3]</sup>. 因此, 科研工作者一直在寻找能够替代钕玻璃实现重频运转的增益介质材料. CaF<sub>2</sub>具有较高的热导率(9.7 W/mK)和较低的非线性折射率

系数( $0.43 \times 10^{-13}/\text{esu}$ )<sup>[4]</sup>, 而且生长工艺成熟<sup>[5,6]</sup>, Nd:CaF<sub>2</sub>是一种非常有潜力实现重频运行、大功率激光输出的晶体. 但是单掺的Nd:CaF<sub>2</sub>晶体具有很强的浓度淬灭效应, 在生长过程中, 当把Nd<sup>3+</sup>离子掺入CaF<sub>2</sub>晶体中时, 晶体会产生团簇效应, 阻止激光发射<sup>[7,8]</sup>. 实验表明, 当Nd<sup>3+</sup>掺杂浓度达到0.05%时就会形成明显的团簇效应. 为了打破这种消极的团簇效应, 往掺杂的CaF<sub>2</sub>晶体中加入Y<sup>3+</sup>离子, 可以打破团簇结构, 提高晶体的发光量子效率, 降低浓度淬灭效应<sup>[9]</sup>. 加入Y<sup>3+</sup>离子后的Nd, Y:CaF<sub>2</sub>晶体与之前相比, 各方面的性能有了很大的提高. 例如: 分凝吸收大, 能掺入较高浓度

\* 国家重大科研仪器设备研制专项(批准号: ZDYZ2013-2)、科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(批准号: 2014RA4051)和中国科学院青年创新促进会资助的课题.

† 通信作者. E-mail: keith0311@163.com

‡ 通信作者. E-mail: fanzhongwei@aoe.ac.cn

的  $\text{Nd}^{3+}$  离子; 具有较宽的抽运吸收带, 有利于激光二极管抽运, 而且不需要严格的温度控制; 荧光谱线变宽, 有利于超短脉冲的实现; 激光性能受温度影响小, 在温度升高时依旧能保持较高的能量转换效率.

围绕 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 晶体已经开展了一系列的研究. 2013年, Su 等<sup>[10]</sup> 报道了 Nd, Y 共掺的 CaF<sub>2</sub> 晶体的光谱特性, 与掺钕玻璃相比, Y<sup>3+</sup> 离子的加入增加了发射谱线的宽度. 2014年, Qin 等<sup>[11]</sup> 采用 Nd, Y 共掺的 CaF<sub>2</sub> 晶体, 在重复频率 100 MHz 时, 得到了脉宽 103 fs, 输出功率 89 mW 的超短激光脉冲. 2015年, Zhu 等<sup>[12]</sup> 采用 Nd, Y 共掺的无序 CaF<sub>2</sub> 晶体研制了一台被动锁模飞秒激光器, 在重复频率 85 MHz 时, 得到了脉宽为 264 fs, 能量为 180 mW 的激光输出. 同年, Zhang 等<sup>[13]</sup> 采用 0.5%Nd, 10%Y:CaF<sub>2</sub> 和 0.6% Nd, 10%Y:CaF<sub>2</sub> 晶体研制出斜效率分别为 30% 和 27% 的高效激光器, 最大输出功率为 901 mW.

然而, 采用 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 晶体研制的激光放大器及其相关特性未见报道. 本文研制了一台采用激光二极管阵列侧面抽运, 口径为  $\phi 5$  mm 的棒状 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 放大器. 测量了 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 晶体在室温下的吸收谱、发射谱及放大器荧光分布. 在相同的抽运功率下, 测量了 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 与 Nd:Glass 放大器分别工作在 10 和 1 Hz 重复频率时的小信号增益. 在抽运功率为 9.63 kW 时, Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 放大器的小信号增益达 6.12, 为 Nd:Glass 的 1.5 倍. 分别测量了种子光和经 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 放大器后的光谱, 能量放大前后光谱几乎没有发生变化.

## 2 实验结果与分析

棒状 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 放大器结构如图 1 所示, 采用激光二极管面阵五向水平 (Bar 方向平行于 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 棒) 侧面抽运, 每个激光二极管面阵包括 15 个 Bar 条, 单 Bar 最大输出功率 300 W, 快轴发散角  $35^\circ \pm 2^\circ$  (半高全宽, FWHM), 慢轴发散角  $8^\circ \pm 2^\circ$  (FWHM). 所用的 0.5%Nd, 5%Y:CaF<sub>2</sub> 由中国科学院上海硅酸盐研究所制备, 尺寸为  $\phi 5$  mm  $\times$  70 mm, 有效抽运长度为 50 mm.

0.5%Nd, 5%Y:CaF<sub>2</sub> 晶体在室温下的吸收谱如图 2 所示, 具有较宽的吸收带宽, 其吸收主峰在 796 nm 处, 与商业化激光二极管的波长相匹配, 可实现高效率的激光输出. 室温下 0.5%Nd, 5%Y:CaF<sub>2</sub> 晶体在 1032—1078 nm 波段的发射谱如图 3 所示, 两个发射峰处于 1049 nm 和 1055 nm 附近.

用 Zemax 光学设计软件建立了激光二极管面阵五向对称侧面抽运棒状 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 的模型, 激光棒的尺寸为  $\phi 5$  mm  $\times$  70 mm, 激光二极管阵列的发光面到激光棒表面的距离为 5 mm 时, 抽运功率为 9.63 kW, 模拟了 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 截面的抽运光强分布, 如图 4 所示, 可见抽运光强分布均匀. 同时, 实测了 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 放大器的荧光分布, 如图 5 所示, 可见放大器中的抽运光强分布均匀, 所测的抽运光强分布形态与图 4 的模拟计算结果较为符合. 由于 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 晶体棒表面被打毛发生散射和抽运光在漫反射腔内多次反射的原因, 实测的抽运光分布比实际计算的更均匀.

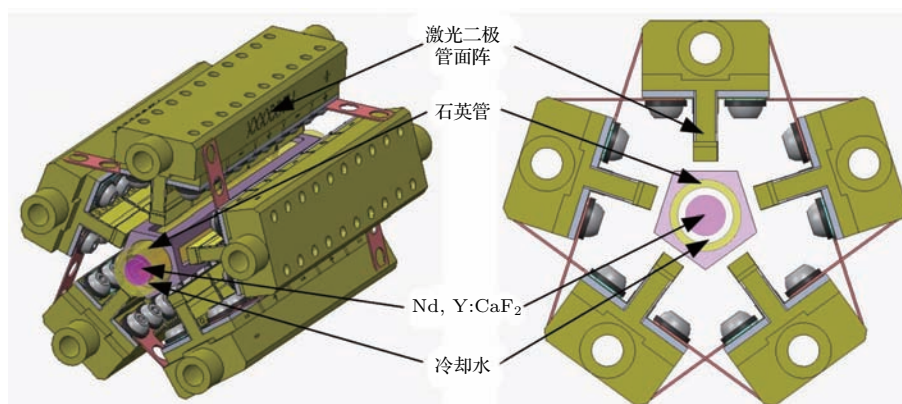


图1 五向对称侧面抽运的棒状 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 放大器结构图

Fig. 1. Structure of the Nd, Y:CaF<sub>2</sub> amplifier.

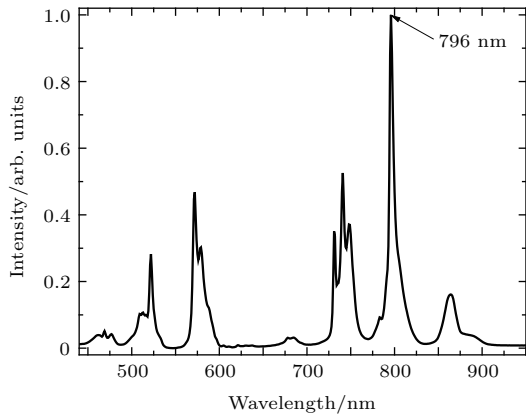


图2 0.5%Nd, 5%Y:CaF<sub>2</sub> 晶体在室温下的吸收谱  
Fig. 2. Room-temperature absorption spectrum of the 0.5%Nd, 5%Y:CaF<sub>2</sub> crystal.

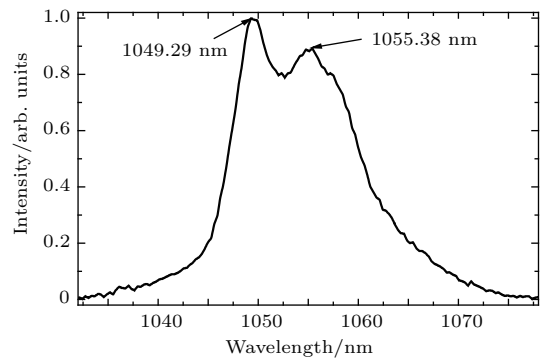


图3 室温下0.5%Nd, 5%Y:CaF<sub>2</sub> 晶体在1032—1078 nm 波段的发射谱  
Fig. 3. Room-temperature emission spectrum of the 0.5%Nd, 5%Y:CaF<sub>2</sub> crystal(over the spectral range 1032—1078 nm).

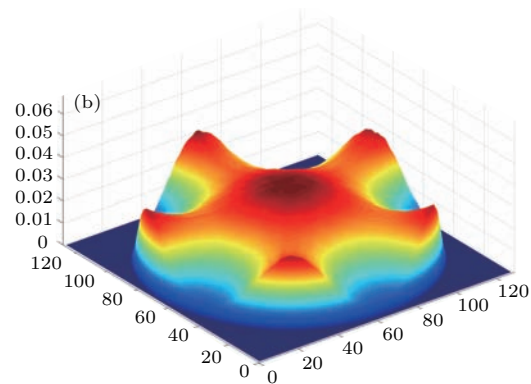
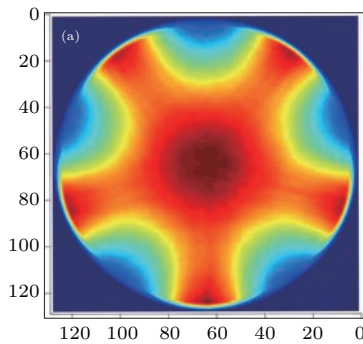


图4 (网刊彩色) 激光棒横截面抽运光分布图 (a) 二维; (b) 三维

Fig. 4. (color online) Laser rod cross-section pumped-light distribution map: (a) Two-dimensional; (b) three-dimensional.

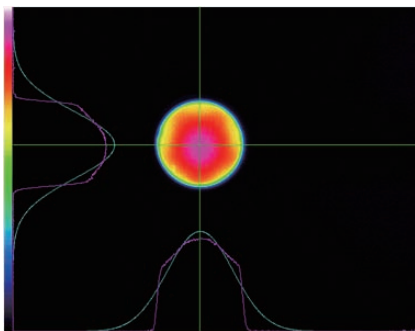


图5 (网刊彩色) Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 放大器的荧光分布  
Fig. 5. (color online) Fluorescence distribution of Nd, Y: CaF<sub>2</sub> amplifier.

将重复频率 10 Hz, 波长 1053 nm, 脉宽 5 ns, 能量 50 mJ, 口径为  $\phi 3$  mm 的脉冲光源作为小信号种子光, 测试 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 放大器的小信号增益. 抽运脉冲宽度为 440  $\mu$ s, 抽运功率从 2.32—9.64 kW, 间隔 0.52 kW 记录能量输出值. 同时, 对 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 放大器的小信号增益进行理论计算, 小信号增益可

以表示为

$$G_0 = \exp(g_0 l) = \exp\left(\frac{\eta_{st}\eta_s\eta_q\eta_{a-eff}\eta_t P_p t_p}{E_s A}\right),$$

式中,  $P_p$  为抽运源峰值功率,  $t_p$  为抽运脉宽. 传输效率  $\eta_t = 90\%$ , 该值为侧面抽运结构的经验估算值. 有效吸收效率  $\eta_{a-eff} = 56.4\%$ , 该值为激光通光区域内的 796 nm 光吸收效率, 即增益介质吸收效率乘以模式匹配效率. 量子效率  $\eta_q = 94\%$ , 该值为 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 的材料属性. 斯托克斯效率  $\eta_s = 75.6\%$ , 该值为抽运光波长与激光波长之比 796 nm/1053 nm. 储能效率为

$$\eta_{st} = \frac{1 - \exp(-t_p/\tau_f)}{t_p/\tau_f},$$

式中  $t_p = 440 \mu$ s 为脉宽,  $\tau_f = 350 \mu$ s 为 Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 荧光寿命,  $\eta_{st} = 56.9\%$ . Nd, Y:CaF<sub>2</sub> 晶体的受激发射截面为  $5.17 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 荧光寿命为 350  $\mu$ s. 图 6 分别给出了实测和理论计算的小信号增益倍数与抽运功率的关系图. 当抽运功率为



9.63 kW时, 实测的Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器的增益倍数为6.12.

在重复频率1 Hz时, 相同的抽运功率下, 测量了Nd:Glass(N31)放大器的小信号增益, 其与Nd,

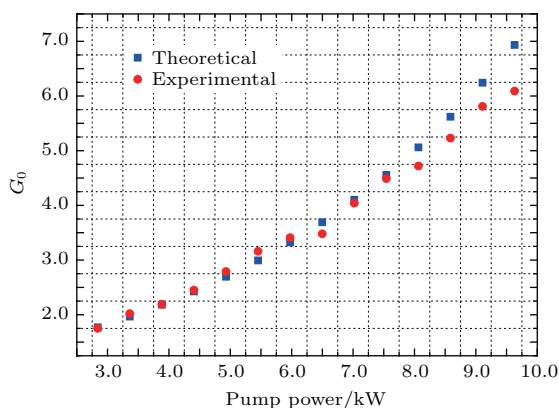


图6 抽运功率对Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器增益倍数的影响  
Fig. 6. Small signal gain of Nd, Y:CaF<sub>2</sub> changing with different pumped power

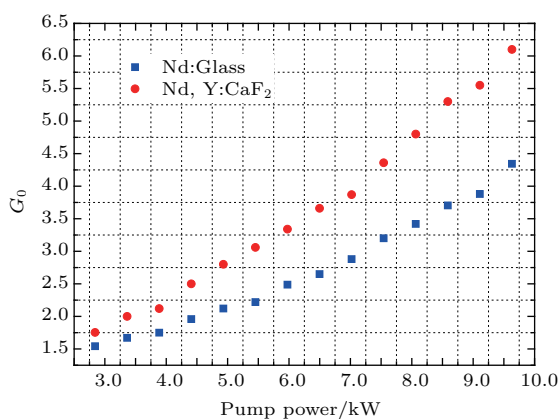


图7 Nd, Y:CaF<sub>2</sub>和Nd:Glass放大器的小信号增益实测值对比  
Fig. 7. Experimental value of small signal gain for Nd, Y:CaF<sub>2</sub> and Nd:Glass amplifier.

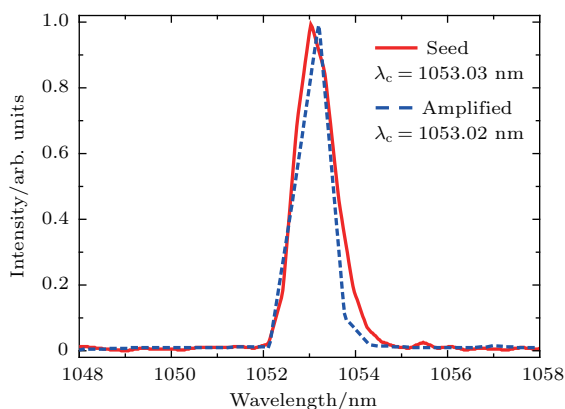


图8 经Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器前后的光谱图  
Fig. 8. Spectra of the input and output laser pulses for the Nd, Y:CaF<sub>2</sub> amplifier.

Y:CaF<sub>2</sub>的对比图如图7所示. 由图7可知, Nd, Y:CaF<sub>2</sub>的小信号增益倍数高于Nd:Glass, 当抽运功率为9.63 kW时, Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器的小信号增益倍数实测值为Nd:Glass的1.5倍.

分别测量了种子光和经Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器后的光谱, 如图8所示, 可见放大前后光谱几乎没有发生变化.

### 3 结 论

本文对激光二极管阵列侧面抽运的棒状Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器进行了数值模拟和实验研究. 研制了一台口径为 $\phi 5$  mm的棒状Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器, 放大器的荧光分布均匀. 在相同的抽运功率下, 测量了Nd, Y:CaF<sub>2</sub>与Nd:Glass放大器分别工作在10和1 Hz重复频率时的小信号增益, 在抽运功率为9.63 kW时, Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器的小信号增益达6.12, 为Nd:Glass的1.5倍. 由于Nd, Y:CaF<sub>2</sub>的热导率、受激发射截面等参数高于Nd:Glass, 因此其重复频率工作能力和增益性能都明显提高. 同时, 分别测量了种子光和经Nd, Y:CaF<sub>2</sub>放大器后的光谱, 能量放大前后光谱几乎没有发生变化.

### 参考文献

- [1] Kuzmin A A, Khazanov E A, Shaykin A A 2011 *Opt. Lett.* **19** 14223
- [2] Peng Y J, Wang J F, Zhang Z X, Huang D J, Fan W, Li X C 2014 *Chin. Opt. Lett.* **12** 41402
- [3] Krupke W F, Shinn M D, Marion J E, Caird J A, Stokowski S E 1986 *J. Opt. Soc. Am. B* **3** 102
- [4] Zhang J T, Zhu J F, Wang J L, Wei Z Y, Su L B, Xu J 2016 *Acta Photon. Sin.* **45** 114001 (in Chinese) [张菊婷, 朱江峰, 王军利, 魏志义, 苏良碧, 徐军 2016 光子学报 **45** 114001]
- [5] Su L B, Yang W Q, Dong Y J, Zhou S M, Zhou G Q, Xu J 2003 *J. Synth. Cryst.* **32** 476 (in Chinese) [苏良碧, 杨卫桥, 董永军, 周圣明, 周国清, 徐军 2003 人工晶体学报 **32** 476]
- [6] Mirela N 2000 *J. Cryst. Growth* **218** 62
- [7] Stephen A P, John A C, Chase L L, Smith L K, Nielsen N D, William F K 1991 *J. Opt. Soc. Am. B* **8** 726
- [8] Fernandez J, Oleaga A, Azkargorta J, Iparraguirre I, Balda R, Voda M, Kaminskii A A 1999 *Opt. Mater.* **13** 9
- [9] Doualan J L, Su L B, Brasse G, Benayad A, Menard V, Zhan Y Y, Braud A, Camy P, Xu J, Moncorge 2013 *J. Opt. Soc. Am. B* **30** 3018

- [10] Su L B, Wang Q G, Li H J, Brasse G, Camy P, Doualan J L, Braud A, Moncorge R, Zhan Y Y, Zheng L H, Qian X B, Xu J 2013 *Laser Phys. Lett.* **10** 035804
- [11] Qin Z P, Xie G Q, Ma J, Ge W Y, Yuan P, Qian L J, Su L B, Jiang D P, Ma F K, Zhang Q, Cao Y X, Xu J 2014 *Opt. Lett.* **39** 1737
- [12] Zhu J F, Zhang L J, Gao Z Y, Wang J L, Wang Z H, Su L B, Zheng L H, Wang J Y, Xu J, Wei Z Y 2015 *Laser Phys. Lett.* **12** 035801
- [13] Zhang Q, Su L B, Jiang D P, Ma F K, Qin Z P, Xie G Q, Zheng J G, Deng Q H, Zheng W G, Qian L J, Xu J 2015 *Chin. Opt. Lett.* **13** 71402

## Experimental study of diode-pumped Nd, Y:CaF<sub>2</sub> amplifier for inertial confinement fusion laser driver\*

Tang Xiong-Xin<sup>1)2)3)</sup> Qiu Ji-Si<sup>1)2)3)†</sup> Fan Zhong-Wei<sup>1)2)‡</sup> Wang Hao-Cheng<sup>1)2)</sup>  
Liu Yue-Liang<sup>1)</sup> Liu Hao<sup>1)2)</sup> Su Liang-Bi<sup>4)5)</sup>

1) (Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

2) (National Engineering Research Center for DPSSL, Beijing 100094, China)

3) (Zhongkeheguang Applied Laser Technology Institute Company, Ltd. Tianjin 300304, China)

4) (Synthetic Single Crystal Research Center, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China)

5) (Key Laboratory of Transparent and Opto-functional Inorganic Materials, Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201899, China)

( Received 6 May 2016; revised manuscript received 31 July 2016 )

### Abstract

In a conventional laser-driven inertial confinement fusion (ICF), Nd-doped phosphate glass is used as a gain medium. However, the repetition frequency operation of such a laser system is restricted by the low thermal conductivity of the phosphate glass. To attain a high ICF performance, the laser driver must be able to operate at a repetition frequency of no less than 10 Hz. Typically, an Nd-doped laser glass operates at a repetition frequency well below 10 Hz. In this paper, an Nd, Y:CaF<sub>2</sub> crystal is taken as a gain medium for the laser amplifier, and experiments are carried out to demonstrate the capability of Nd, Y:CaF<sub>2</sub> crystal to act as a gain medium for ICF laser driver. A laser-diode plane-array five-direction horizontal-side-pumped Nd, Y:CaF<sub>2</sub> laser amplifier  $\phi 5 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$  is developed and an experimental study is carried out. The absorption spectrum and emission spectrum of Nd, Y:CaF<sub>2</sub> crystal and the fluorescence distribution of the amplifier are measured. The Nd:CaF<sub>2</sub> co-doped with Y<sup>3+</sup> ions results in a broad absorption band, which makes the laser diode pumping more efficient. The strongest excitation band peak is centered around 796 nm. The small signal gains of Nd, Y:CaF<sub>2</sub> and Nd:Glass working respectively at repetition frequencies of 10 and 1 Hz under the same pump power are measured. The small signal gain of Nd, Y:CaF<sub>2</sub> amplifier reaches 6.12 under a pump power of 9.63 kW, which is 1.5 times that of Nd:Glass amplifier. The measurements of the spectrum of the seed beam and the spectrum from Nd, Y:CaF<sub>2</sub> amplifier show that the signals have no change before and after being amplified. Most likely the Nd, Y:CaF<sub>2</sub> crystal is a promising laser material for repetitive ICF laser drivers.

**Keywords:** laser amplifier, sidepumped, small signal gain, Nd, Y:CaF<sub>2</sub>

**PACS:** 42.70.Hj, 42.65.Yj, 42.55.Xi, 42.60.Lh

**DOI:** 10.7498/aps.65.204206

\* Project supported by the Special Fund for Research on National Major Research Instruments and Facilities of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. ZDYZ2013-2), the Innovative Talent Promotion Plans for Innovation Team in Priority Fields, China (Grant No. 2014RA4051), and the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences.

† Corresponding author. E-mail: keith0311@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: fanzhongwei@aoe.ac.cn