

大口径快速生长 KDP 晶体三倍频性能研究

王 芳 周丽丹 韩 伟* 李恪宇 王礼权 冯 斌 贾怀庭 向 勇 栗敬钦 景 峰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 主要研究大口径 KDP 晶体的高强度三倍频性能。采用正交偏振干涉法测量了晶体的光轴均匀性分布,并在神光 III 原型装置上利用快速生长二倍频晶体开展了高强度三倍频实验,验证了折射率均匀性分布对三倍频效率和近场的影响。实验结果表明,大口径快速生长 KDP 晶体的三倍频性能基本上满足神光 III 装置的要求,但快速生长晶体的受激拉曼散射增益系数和激光损伤阈值等性能仍有待进一步考核。

关键词 激光光学;快速生长技术;大口径;KDP 晶体;三倍频

中图分类号 O437 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s106005

Third Harmonic Generation with Large-Scale Rapid Growth KDP Crystals

Wang Fang Zhou Lidan Han Wei Li Keyu Wang Liquan Feng Bin
Jia Huaiting Xiang Yong Su Jingqin Jing Feng

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The frequency conversion performance of a large scale rapid growth KDP crystal is studied. Using the orthogonal polarization interferometry (OPI) technique, the spatial refractive-index non-uniformities which prohibit the attainment of phase matching at all locations in the crystal is measured. Then third harmonic generation (THG) experiments with the large scale rapid growth KDP doubler on the prototype of SG-III laser facility to estimate the influence of refractive-index non-uniformities on conversion efficiency and 3ω beam near-field are conducted. According to the experimental results, this large scale rapid growth KDP crystal meets the basic requirements. But for specific applications, other aspects such as the stimulated Raman scattering gain coefficient and laser-induced damage threshold should be further considered.

Key words laser optics; rapid-growth technology; large-scale; KDP crystal; third harmonic generation

OCIS codes 190.4223; 190.4400; 140.3515

1 引 言

在惯性约束聚变领域,利用短波长激光打靶可以提高束靶耦合效率。高功率激光驱动器如美国的 NIF 装置^[1]、法国的 LMJ 装置^[2]以及我国的神光 III 装置^[3],通常将钨玻璃放大器产生的激光三倍频(THG)来获得高强度短波长激光,频率转换器也因此成为激光装置中最关键的器件。激光驱动器为满足聚变实验对输出能力的要求以及自身对负载能力的要求,必须尽可能扩大输出光束口径,如 NIF 装置的光束口径为 360 mm×360 mm,晶体口径大于 400 mm。目前只有 KDP 晶体和 DKDP 晶体能够

生长出足够大的尺寸。但采用传统方法生长晶体的速度非常慢,生长一块大口径晶体需要 1~2 年的时间,并且生产成本高,难以满足大型激光驱动器的需求。美国利弗莫尔实验室在 20 世纪 80 年代初着手研究晶体的快速生长技术,目前已成功获得快速生长的大口径开关晶体和二倍频(SHG)晶体^[4~6]。我国也计划发展快速生长技术为神光 III 装置提供大口径 KDP 晶体,并在小口径条件下对快速生长晶体的热稳定性以及损伤特性等开展了初步研究^[7~9]。

由于快速生长晶体的紫外吸收较传统晶体强,波长为 351 nm 的三倍频光损伤阈值较低^[10],目前

收稿日期: 2011-08-01; 收到修改稿日期: 2011-09-06

作者简介: 王 芳(1983—),女,助理研究员,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。E-mail: wfoowf@yahoo.com.cn

* 通信联系人。E-mail: tonyhan2000@163.com

快速生长方法只用于生产二倍频晶体,三倍频晶体仍采用传统生长方法来获得。本文采用快速生长二倍频晶体与传统生长三倍频晶体级联的方式开展了快速生长 KDP 晶体的性能验证实验。

2 快速生长晶体的光轴均匀性分析

晶体生长过程中的结构缺陷,包括组成成分的差异、晶体培养过程中基团不同以及晶体生长速度的不一致,都可能导致晶体内部的光轴方向发生微小变化,并引起 e 光折射率扰动。这种扰动使得晶体的不同位置最佳匹配角不同,导致三倍频转换效率下降以及光束质量退化。光轴均匀性是制约快速生长晶体性能的重要指标之一。

2.1 正交偏振干涉法

正交偏振干涉(OPI)方法可用于测量晶体的光轴均匀性分布^[11,12]。其基本原理是利用晶体的双折射特性,晶体光轴方向扰动只引起 e 光折射率变化而对 o 光没有影响,通过分别测量 e 光和 o 光的透射面形可以推导出 e 光折射率扰动分布,即

$$\delta n_e = \frac{\lambda_0 \Delta \phi}{L}, \quad (1)$$

式中 δn_e 为 e 光的折射率扰动量, λ_0 为检测激光波长, $\Delta \phi$ 为 e 光和 o 光的折射率差, L 为晶体厚度。如果用晶体内部失谐角 $\Delta \theta$ 来表示晶体光轴的局部变化,则有

$$\Delta \theta = \frac{\delta n_e}{(\partial n_e / \partial \theta)_{\lambda_0}}. \quad (2)$$

高效三倍频必须满足相位匹配条件,对于 I/II 级联三倍频装置,其 I 类倍频和 II 类三倍频过程的相位失配因子可以表示为

$$\Delta k_{\text{SHG}}(x, y) = (2\omega/c) [(\partial n_e / \partial \theta)_{2\omega}] \Delta \theta(x, y), \quad (3)$$

$$\Delta k_{\text{THG}}(x, y) = (\omega/c) [3(\partial n_e / \partial \theta)_{3\omega} - 2(\partial n_e / \partial \theta)_{2\omega} - (\partial n_e / \partial \theta)_{\omega}] \Delta \theta(x, y), \quad (4)$$

式中 ω 为基频光频率, c 为光速。

2.2 光轴均匀性测量结果

倍频晶体 WGS0910-KDPRI-1 的折射率均匀性分布如图 1 所示,其折射率分布都存在宝塔型的阶梯结构,晶体光轴均匀性分布峰谷(PV)值为 12×10^{-6} ,均方根(RMS)值为 1.716×10^{-6} ,与传统生长晶体水平相当。晶体等效失谐角的归一化统计直方图如图 2 所示,光轴在 $\pm 100 \mu\text{rad}$ 之间扰动,RMS 值约为 $30 \mu\text{rad}$ 。

2.3 快速生长晶体光轴均匀性对三倍频效率的影响

采用数值模拟方法研究了快速生长二倍频晶体

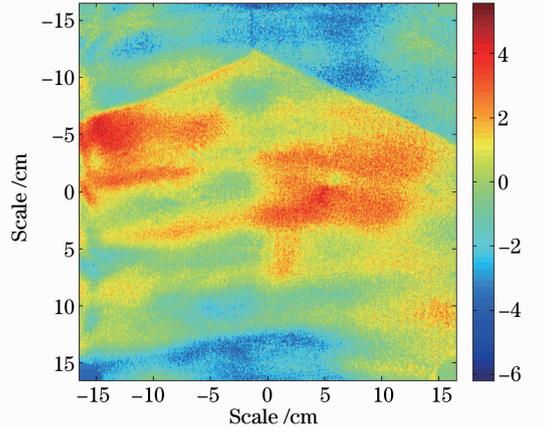


图 1 快速生长晶体折射率均匀性分布

Fig. 1 Measured δn_e distribution for the rapid growth KDP doubler

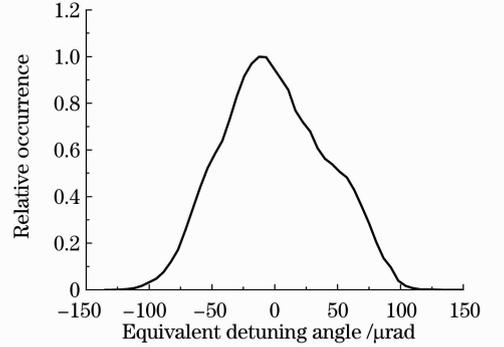


图 2 快速生长晶体等效失谐角分布

Fig. 2 Histogram of equivalent internal detuning angle

对三倍频效率的影响,如图 3 所示。计算条件:基频光功率密度为 2 GW/cm^2 ,光束口径为 $29 \text{ cm} \times 29 \text{ cm}$,脉宽为 1 ns ,时间和空间平顶分布,倍频和三倍频晶体厚度分别为 12 mm 和 11 mm 。考虑快速生长晶体的光轴均匀性时,倍频晶体最佳匹配角偏移 $20 \sim 30 \mu\text{rad}$,与 2.2 节得到的晶体等效失谐角 RMS 值相当。相对于理想晶体,快速生长晶体的光轴均匀性导致三倍频效率下降约 7% ,不过即使是传统方法生长的晶体其光轴均匀性水平也不可能达

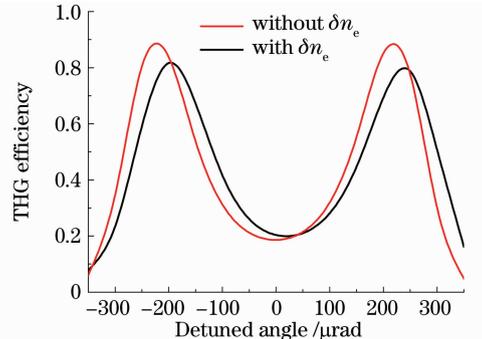


图 3 快速生长晶体光轴均匀性对三倍频效率的影响
Fig. 3 Influence of δn_e distribution on THG efficiency

到理想状态。此外,通过优化晶体厚度增大频率转换器对晶体失谐角的容忍度,也可以降低该指标对三倍频效率和近场的影响。

3 高强度三倍频实验研究

3.1 实验装置

高强度三倍频实验在神光 III 原型装置的 I 型终端系统开展,基频光为波长 1053 nm、光束口径 290 mm×290 mm、脉宽 1 ns/3 ns 的窄带平顶脉冲,

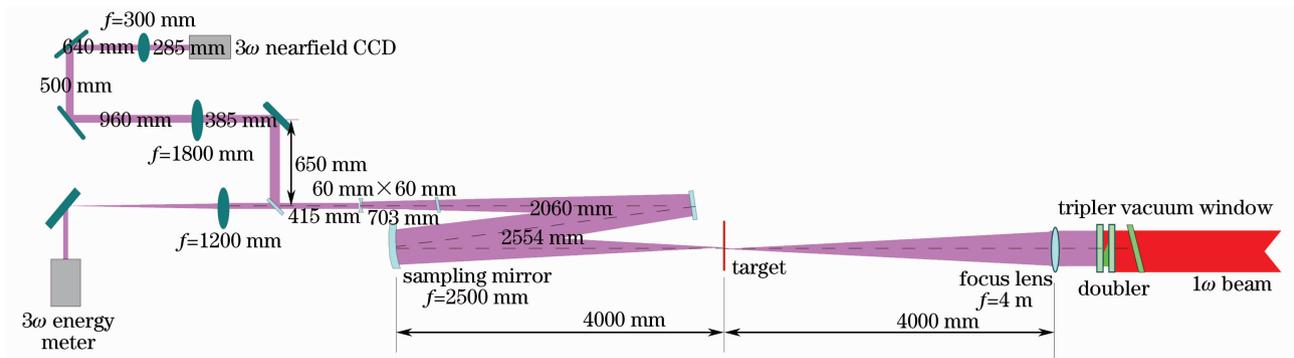


图 4 实验光路示意图

Fig. 4 Experimental setup

3.2 高强度三倍频性能

实验获得的三倍频效率曲线如图 5 所示(彩图请见网络电子版)。红色、绿色和蓝色的五角星为采用快速生长二倍频晶体获得的三倍频效率,其中红色五角星表示中等功率密度下 3 ns 脉冲,绿色五角星表示中等功率密度下 1 ns 脉冲,蓝色五角星为高功率密度下 1 ns 脉冲(倍频晶体失谐 200 μrad)。圆圈和方框为采用传统生长(CG)晶体获得的三倍频效率。不难看出,采用快速生长(RG)二倍频晶体时的三倍频效率与传统生长晶体基本相当,基本满足效率对光轴均匀性的要求。此外,3 ns 脉冲的效率明显高于 1 ns 脉冲,这是由于长脉冲时间波形平顶性更好。

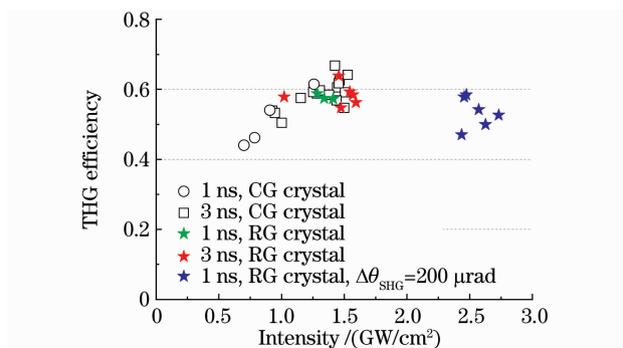


图 5 不同基频光功率密度下的三倍频效率

Fig. 5 THG conversion efficiency at different 1ω intensities

快速生长二倍频晶体尺寸为 330 mm×330 mm×12 mm,而传统生长三倍频晶体尺寸为 330 mm×330 mm×11 mm。实验光路如图 4 所示,主放大器输出的单束基频光经抽样转换组件注入到 I 型终端光学系统,其中 I 型终端光学组件包括窗口、倍频晶体、三倍频晶体以及透镜。基频光经频率转换器进行三次谐波后,再经透镜聚焦后进入测量系统,可提供三倍频能量、近场和远场的精密测量。

典型的三倍频近场强度分布如图 6 所示,三倍频近场上存在宝塔型折射率突变结构的烙印,且宝塔结构左侧的三倍频近场强度明显低于右侧。这种宝塔结构可能降低后续光学元件的负载能力^[13]。从美国 LLNL 实验室报告的相关结果来看,其早期在 Beamlet 上基于快速生长晶体的三倍频实验中光束近场同样存在宝塔结构,但后期在 NIF 上三倍频光束近场未存在宝塔结构。因此,从对三倍频近场强度的影响来看,国产快速生长倍频晶体的折射率均匀性还需进一步提高。

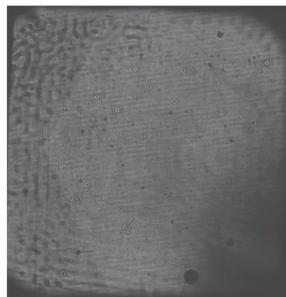


图 6 三倍频近场分布(发次:2011030801,基频光能量:2322 J,三倍频光能量:1904 J)

Fig. 6 Near-field image of the 3ω beam (No. 2011030801 with input 1ω beam energy of 2322 J and the 3ω beam energy of 1904 J)

3.3 快速生长晶体的横向散射效应

高功率固体激光驱动器中,大口径薄晶体由于

横向增益长度非常长,在高通量下运行时存在横向受激拉曼散射(TSRS)损伤风险。虽然二倍频光的增益系数小于三倍频光,但快长晶体的拉曼增益系数约为传统生长晶体的2倍,因此快速生长二倍频晶体存在产生TSRS的可能。另外,由于快长晶体内部散射颗粒远多于传统生长晶体,更容易发生瑞利散射。

在开展高通量三倍频实验时,用快速生长二倍频晶体的4个侧边附着场图纸来探测散射光的强度。当功率密度与横向尺寸(即IL)的乘积超过20 GW/cm²时,传统生长的三倍频晶体侧面未出现场图印,而快速生长晶体的4个侧面均出现很强的场图印,且沿SRS增益方向能量更强。这很可能是快长晶体同时出现了横向受激拉曼散射和较强的瑞利散射。不过,仍需要开展进一步的研究来定量判断快速生长晶体的散射效应。

4 结 论

主要研究大口径KDP晶体的高强度三倍频性能。采用正交偏振干涉法测量了晶体的光轴均匀性分布,并在神光III原型装置上利用快速生长二倍频晶体开展了高强度三倍频实验,验证了折射率均匀性分布对三倍频效率和近场的影响。实验结果表明,快速生长晶体光轴均匀性分布水平以及对三倍频效率的影响与传统生长晶体相当,但三倍频近场上存在宝塔型折射率突变结构的烙印,可能降低后续元件的负载能力,此外,快速生长晶体的横向拉曼散射及瑞利散射强于传统生长晶体,损伤风险较高。因此,快速生长晶体对光轴均匀性、体内杂质以及拉曼增益系数的控制仍有待进一步提高。

参 考 文 献

1 W. H. Lowdermilk, J. A. Paisner, J. D. Boyes *et al.*. Status

- of the National Ignition Facility project [C]. *SPIE*, 1997, **3047**: 16~37
- 2 Michel L. Andre. Status of the LMJ project [C]. *SPIE*, 1997, **3047**: 38~42
- 3 H. S. Peng, X. M. Zhang, X. F. Wei *et al.*. Status of the SG-III solid state laser project [C]. *SPIE*, 1998, **3492**: 25~33
- 4 N. P. Zaitseva, M. R. Dehaven, R. L. Vital *et al.*. Rapid growth of large-scale (40~55 cm) KH₂PO₄ crystals [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1997, **180**: 255~262
- 5 J. J. De Yoreo, A. K. Burnham, P. K. Whitman *et al.*. Developing KH₂PO₄ and KD₂PO₄ crystals for the world's most powerful laser [J]. *Int. Mater. Rev.*, 2002, **47**: 113~152
- 6 Ruth A. Hawley-Fedder, Harry F. Robey III, Thomas A. Biesiada *et al.*. Rapid growth of very large KDP and KD*P crystals in support of the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 2000, **4102**: 152~161
- 7 J. X. Ding, T. Wang, S. L. Wang *et al.*. Effect of pressure on thermal stability and decomposition of KDP crystal [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2011, **28**(2): 026402
- 8 Hu Guohang, Zhao Yuanan, Sun Shaotao *et al.*. Growth characteristics and mechanism of surface and bulk damage in KDP and DKDP crystals [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(8): 087805
- 9 Sun Shaotao, Ji Lailin, Wang Zhengping *et al.*. Effects of growth method on the growth habit and optical property of DKDP crystals [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2009, **37**(11): 1914~1918
- 孙绍涛, 季来林, 王正平等. 生长方法对DKDP晶体生长习性及其光学性能的影响 [J]. *硅酸盐学报*, 2009, **37**(11): 1914~1918
- 10 P. DeMange, C. W. Carr, R. A. Negres *et al.*. Multiwavelength investigation of laser-damage performance in potassium dihydrogen phosphate after laser annealing [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(3): 221~223
- 11 J. M. Auerbach, P. J. Wenger, S. A. Couture *et al.*. Modeling of frequency doubling and tripling with measured crystal spatial refractive-index nonuniformities [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(9): 1404~1411
- 12 Wang Fang, Su Jingqin, Li Keyu *et al.*. Influence of KDP crystals' refractive-index non-uniformities on 3 ω conversion efficiency [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(5): 746~749
- 王芳, 粟敬钦, 李恪宇等. KDP晶体折射率不均匀性对三倍频转换效率的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(5): 746~749
- 13 Wang Fang, Su Jingqin, Li Keyu *et al.*. Increase law of near-field beam modulation in 3 ω optics system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s1): 92~97
- 王芳, 粟敬钦, 李恪宇等. 三倍频光学系统中近场调制增长规律研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(s1): 92~97

栏目编辑:马沂