

大口径 KDP 晶体最佳偏转角预测误差分析

李 婷¹ 张 洋^{1,2} 徐 旭² 张 彬¹

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065; ² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 通过测量晶体全口径正交偏振透射波前的干涉数据,建立了计算 KDP 晶体最佳偏转角的理论模型,并通过实验验证了理论的正确性和有效性。在探针激光工作稳定及环境温度稳定的情况下,理论预测值与实验结果的变化趋势相同,且差值在 $10.0 \mu\text{rad}$ 以内。分析了影响测量精度的各种因素,找出了理论预估值与实验结果产生差异的主要原因。由单点模型推广建立了全口径 KDP 晶体最佳偏转角的计算模型,并且数值模拟了 KDP 晶体折射率不均匀性对晶体全口径最佳入射角和转换效率产生的影响。得到的结果为工程上实现大口径 KDP 晶体精密装校提供了理论指导。

关键词 光学器件;KDP 晶体;折射率不均匀性;最佳偏转角;误差分析

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0802003

Prediction of Optimum Deflection Angles and Errors Analysis for KDP Crystals with Large Aperture

Li Ting¹ Zhang Yang^{1,2} Xu Xu² Zhang Bin¹

(¹ School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)
(² Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract By measuring the transmitted wavefront of crystals with orthogonal polarization interferometry(OPI), the model for determining the deflection angle of KDP crystals is established, and the theory is further verified to be correct and efficient by experiments. Under the stable conditions of probe laser and working temperature, the variation trend of prediction values is consistent with that of measurement results, and the difference is within $10.0 \mu\text{rad}$. Furthermore, the factors affecting the measurement precision are analyzed and the differences between the theory and measurement results are pointed out. The model of the optimum deflection angles of full aperture for KDP crystals is established according to the single point model. In addition, the influence of crystal refractive-index non-uniformity on the optimum deflection angles of full aperture for crystals and conversion efficiency is also simulated numerically. The results obtained in this paper provide theoretic guidances for accurate prediction of KDP crystals in the engineering project.

Key words optical devices; KDP crystals; refractive-index non-uniformity; optimum deflection angle; error analysis

OCIS codes 230.4320; 120.5710; 220.4840

1 引 言

在惯性约束核聚变(ICF)驱动器中,谐波转换单元是必不可少的重要组成部分。通常,谐波转换单元由两块晶轴正交的 KDP 晶体级联组成。三倍频激光的产生,是由沿着倍频 KDP 晶体 o 轴方向偏

振的基频光 1ω 输入到倍频晶体,产生频率为 2ω 的倍频光后,再与剩余的基频光分别沿着和频晶体的 o 轴和 e 轴输入和频晶体,在和频晶体中产生偏振方向沿着和频晶体 e 轴的三倍频光 3ω ^[1-5]。

通常,ICF 频率转换系统采用角度相位匹配技

收稿日期: 2014-03-03; 收到修改稿日期: 2014-03-17

基金项目: 国家重大专项应用基础项目(GFZX025010502.7)、四川省教育厅创新团队计划(13Td0048)

作者简介: 李 婷(1989—),女,硕士研究生,主要从事强激光的传输与控制方面的研究。E-mail: liting31415@163.com

导师简介: 张 彬(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事强激光的传输与控制方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

术。为保证谐波转换单元在线工作时能获得较高的转换效率,必须严格控制频率转换晶体的倾斜角度。在在线光路上,通过多次发射高能量脉冲,不断调整晶体倾斜量,可以找到晶体的最佳倾斜角。然而,采用主激光照射晶体,需要消耗大量的人力和物力。根据1981年劳伦斯·利弗莫尔实验室提出以小拼大的组合晶体方案,王文明等^[6]提出测量小块晶元的最佳偏转角来代替整块晶体阵列的最佳偏转角,并通过微机控制自动寻优技术找到晶元的最佳偏转角即为整块晶体阵列的最佳偏转角。另外,神光“II”装置专门设计了离线平台来测量晶体的最佳偏转角^[7],即在离线平台上,使用与主激光功率密度相当的小口径激光照射KDP晶体,找到晶体通光口径内多点的最佳倾斜角,然后取其平均值即是KDP晶体的全口径最佳偏转角。虽然,前人为快速定位KDP晶体最佳偏转角提供了一种有效途径,但是在实际工作中,由于晶体生长过程中的结构缺陷、应力引起的光弹效应、晶体表面形变、晶体自身的重力和温度变化等因素均有可能导致晶体折射率空间分布的不均匀性,进而致使晶体通光孔径内不同位置的最佳倾斜角是不完全相同的,如果采取多点平均的方法,仍然会造成最佳倾斜角的预估误差。工程实践中,在线晶体的安装仍需数发脉冲才能使晶体校正到最佳偏转位置,因此,有必要探求更为快速精准地确定大口径KDP晶体最佳偏转角的方法。

本文从测量晶体全口径正交偏振干涉数据出发,建立了计算晶体单点最佳偏转角度的理论模型,开展了实验验证研究,并分析了理论预估与实验结果产生差异的原因。在单点模型的基础上推广建立了KDP晶体全口径最佳偏转角度模型。为了表述方便,以下最佳偏转角度均指晶体在获得最大转换效率时晶体偏离初始准直位置的倾斜角度。

2 理论预估模型

晶体的折射率不均匀性分布测量采用正交偏振干涉(OPI)技术^[8-12],即使用偏振方向分别平行于晶体o轴的o光和平行于晶体e轴的e光照射晶体,得到两幅全口径干涉图。图1给出了倍频晶体OPI测量方法中偏振方向与光轴的关系。

光束通过实际晶体时的附加相位为

$$\phi = nL/\lambda_p, \quad (1)$$

式中 λ_p 为干涉仪波长, L 为晶体厚度, n 为晶体折射率。对(1)式求导得

$$\delta\phi = (n_{\text{avg}}\delta L + \delta nL_{\text{avg}})/\lambda_p, \quad (2)$$

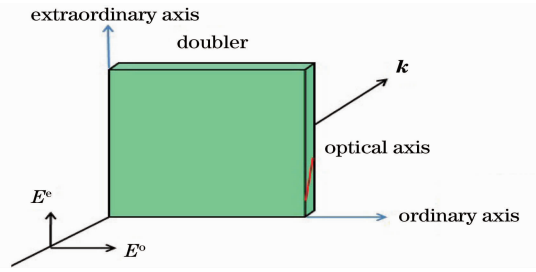


图1 偏振方向与光轴的关系

Fig. 1 Relationship of polarization direction and optical axis

式中 n_{avg} 和 L_{avg} 分别代表晶体折射率和厚度的平均值。然后e光和o光通过KDP晶体的透射波前分布相减,得

$$\Delta\phi = (\phi_a + \delta\phi_e) - (\phi_a + \delta\phi_o) = \delta\phi_e - \delta\phi_o = [(n_{\text{avge}} - n_{\text{avg0}})\delta L + \delta(n_e - n_o)L_{\text{avg}}]/\lambda_p, \quad (3)$$

式中 ϕ_a 代表相位平均值,下标中的o和e表示相应变量对应于o轴和e轴的值。

晶体折射率不均匀变化主要是由光轴方向的局部变化引起的^[9-10]。因为只有e光的测量结果才引入了光轴不一致性产生的非均匀误差(如图1所示),为了简化模型,可以近似认为折射率空间不均匀性完全取决于晶体光轴方向的局部变化,即假定o光折射率为常量,忽略不计 δn_o 。这样(3)式经过处理可得

$$\delta n_e = \Delta\phi\lambda_p/L, \quad (4)$$

式中 $\Delta\phi$ 表示两幅全口径干涉图的位相差。另外,根据非线性光学,非常光对应的折射率 $n_e(\theta)$ 是入射光波矢与光轴夹角 θ 的函数,满足下列关系式:

$$\frac{1}{n_e^2(\theta)} = \frac{\cos^2\theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2\theta}{n_e^2}. \quad (5)$$

对(5)式两边同时微分可得

$$\frac{dn_e}{d\theta} = \frac{n_o n_e (n_e^2 - n_o^2) \sin\theta \cos\theta}{\sqrt{(n_o^2 \sin^2\theta + n_e^2 \cos^2\theta)^3}}. \quad (6)$$

而晶体光轴的局部变化可以用晶体内部失谐角 $\delta\theta$ 来表示,即

$$\delta\theta = \frac{\delta n_e}{(\partial n_e / \partial \theta)_{\lambda_0}}. \quad (7)$$

选取KDP晶体的 $n_o = 1.49457$, $n_e = 1.46039$ 为初值^[13]。根据采用正交偏振干涉技术实际测量得到的两幅全口径干涉图,利用(4)式可计算得到全口径 δn_e 分布,进而再把(4)、(6)式代入(7)式即可得到全口径的内部失谐角 $\delta\theta$ 分布。

三倍频频率转换计算模型以耦合波动方程组为基础,代入使用上述方法得到的内部失谐角数据,并且考虑了三波耦合过程、衍射以及晶体中的吸收,采

用分步傅里叶算法和四阶龙格-库塔法求解非线性耦合波方程组,得到转换效率与晶体倾斜角度的关系曲线,在最大转换效率处即可获得晶体最佳偏转角,进而可推算晶体上任意一点的最佳偏转角。在此基础上,通过编程分步寻优的方法,可以在一定范围内寻找整块大口径 KDP 晶体的最佳偏转角,进而建立全口径 KDP 晶体偏转角模型,其具体计算流程如下:

1) 利用 OPI 技术测量数据计算得到的透射波前差,由(4)式得到晶体的 δn_e 分布,进而根据(7)式解得全口径内部失谐角 $\delta\theta$ 分布;

2) 计算倾斜角与内部失谐角的差值,将差值代入耦合波方程组,使晶体倾斜角在一定范围内变化,可得到转换效率与晶体倾斜角度的关系曲线,转换效率最大处对应的晶体倾斜角即为最佳偏转角,这就完成一次单点计算;

3) 代入全口径内部失谐角数据,计算倾斜角与它们的差值,设定倾斜角在一定范围内变化,倾斜角

每改变一次,计算此时得到的倍频光总能量,它与基频光总能量之比即是转换效率,最后,根据转换效率与晶体倾斜角度的关系曲线,得到转换效率最大处对应的晶体倾斜角,即为全口径最佳偏转角。

3 实验验证

利用正交偏振干涉技术测量晶体的折射率非均匀性。调整激光的偏振状态为 e 光,测量晶体的透射波前。将激光偏振状态转换为 o 光再次测量晶体的透射波前,两次测量过程中干涉仪各部件以及待测晶体均不作任何调整。于是,经数据处理可得到 KDP 晶体的折射率不均匀性分布。

由于倍频晶体与和频晶体的测量及计算过程类似,本文以倍频晶体为例开展了实验验证。图 2 给出了对一块口径为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,厚度为 12 mm 的倍频 KDP 晶体进行干涉测量的实验结果。图中方形黑色部分为晶体夹持框。

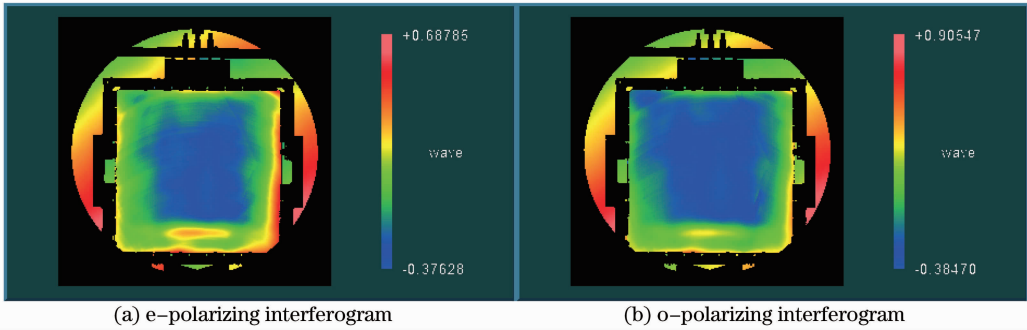


图 2 正交偏振干涉图

Fig. 2 Interferograms of orthogonal polarization interferometry

按照第 2 节的理论方法,通过对图 2 行数据处理后得到 KDP 晶体的折射率不均匀性分布如图 3 所示。根据(7)式计算 $360\text{ mm} \times 360\text{ mm}$ 通光孔径内晶体内部失谐角分布,结果如图 4 示。

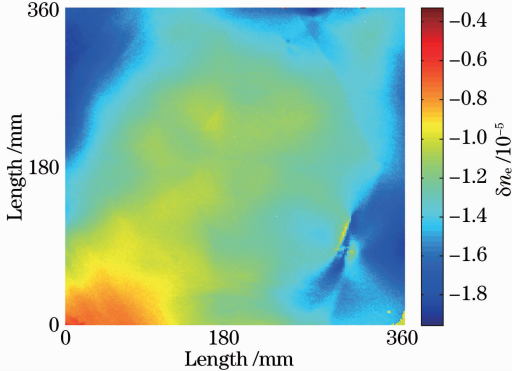


图 3 KDP 晶体的 δn_e 分布

Fig. 3 δn_e distribution of the KDP crystal

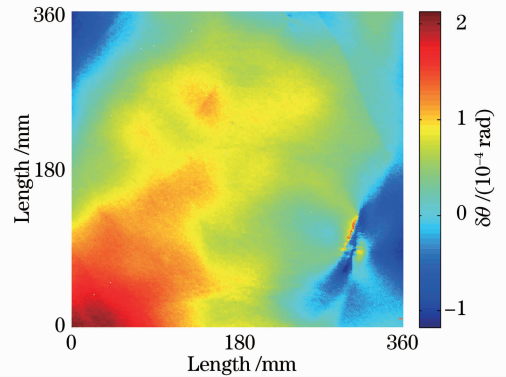


图 4 KDP 晶体的 $\delta\theta$ 分布

Fig. 4 $\delta\theta$ distribution of the KDP crystal

将晶体放置在离线测量平台上,使用 5 mm 口径的探针激光,平均功率密度为 1.6 GW/cm^2 ,从左到右依次测量晶体上的 11 个点的最佳偏转角,每点之间距离 30 mm ,如图 5 示,晶体的左右移动以及

偏转由马达控制, 马达的偏转步长为 $10 \mu\text{rad}$ 。

根据实验结果绘制相应的谐波转换效率随晶体倾斜角调谐曲线^[7], 确定出 KDP 晶体通光孔径内不同位置处的最佳倾斜量。同时, 找到对应点的内部失谐角数据, 代入三倍频频率转换计算模型, 经计算得到上述 11 个不同位置处的理论最佳偏离角度。

表 1 每点测量值与理论值的差异

Table 1 Differences between measurement and forecast values of the points

No. of the point	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	23.3	23.3	23.3	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4	23.4
Difference / μrad	35.5	39.9	24.3	3.4	0.7	4.9	8.8	0.4	3.9	9.5	2.2

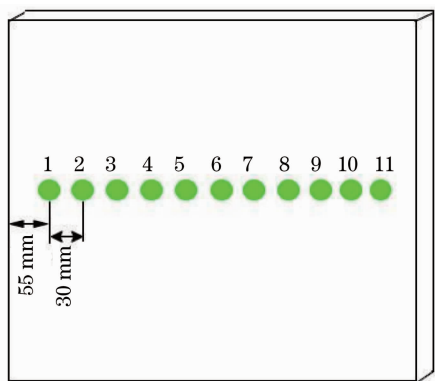


图 5 离线测量原理图

Fig. 5 Schematic of off-line measurement

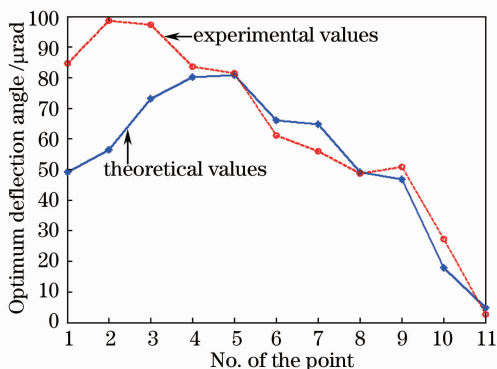


图 6 理论预估失谐角与实际测量结果的对比

Fig. 6 Comparison of forecast deflection angles and actual measurement results

4 误差分析

KDP 晶体离线测量平台主要包括探针激光、晶体支撑结构、晶体偏转马达、晶体自准直仪以及激光自准直仪、反射镜等。以下分析了测量误差的主要来源:

1) 在离线测量平台中, 探针激光存在角漂, 会直接影响平台的测试精度。尤其在激光器刚开始运行时, 其角漂较为严重。实验使用的探针激光角漂在

图 6 给出了理论预估与实际测量的对比结果, 表 1 给出了每点的监测温度以及理论值与实验值的差值。由图 6 可以看出, 除前面 3 个点外, 理论预估与实验测量值的变化趋势相同。由表 1 可以看出, 后面 8 个点其差值均在 $10 \mu\text{rad}$ 以内, 而前面 3 个位置的实验与理论值则出现了一定幅度的偏差。

$\pm 30 \mu\text{rad}$, 图 7 给出了经模拟计算得到的探针激光存在不同角漂时, 三倍频转换效率随晶体偏离角度的变化。由图 7 可知, 无角漂时对应的最佳偏转角为 $110 \mu\text{rad}$, 角漂为 $-30 \mu\text{rad}$ 度时对应的最佳偏转角为 $142 \mu\text{rad}$, 角漂为 $30 \mu\text{rad}$ 度时对应的最佳偏转角为 $80 \mu\text{rad}$ 。由此可见, 角漂为 $-30 \mu\text{rad}$ 时的最佳偏转角相对于无角漂时的最佳偏转角最大相差 $32 \mu\text{rad}$, 角漂为 $30 \mu\text{rad}$ 时的最佳偏转角相对于无角漂时的最佳偏转角最大相差 $30 \mu\text{rad}$, 即角漂产生的最大误差约为 $\pm 32 \mu\text{rad}$ 。

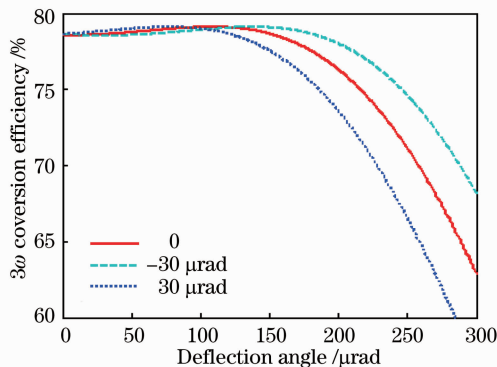


图 7 探针激光角漂的影响

Fig. 7 Influences of probe laser drift angle

2) 探针激光的能量稳定性也会直接影响测量数据的准确性。图 8 为双纵坐标图, 给出了入射激光光强与倍频晶体最佳偏离角度及三倍频最大转换效率的关系。实验使用探针激光的功率密度为 $1.6 \text{ GW}/\text{cm}^2$, 能量稳定性为 2.1% , 由图 8 可知, 能量稳定性产生的最大误差约为 $\pm 9 \mu\text{rad}$ 左右。

3) 由于 KDP 晶体的折射率系数将随着外界环境温度的变化而产生变化。对于快速生长的 KDP 晶体, 其变化量为 $90 \mu\text{rad}/^{\circ}\text{C}$ ^[13]。在验证实验中, 监测显示前三个点是在 $23.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时测量的, 而后面 8 个点是在 $23.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时测量的, 前后有 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的差异, 估计会造成 $9 \mu\text{rad}$ 的误差。

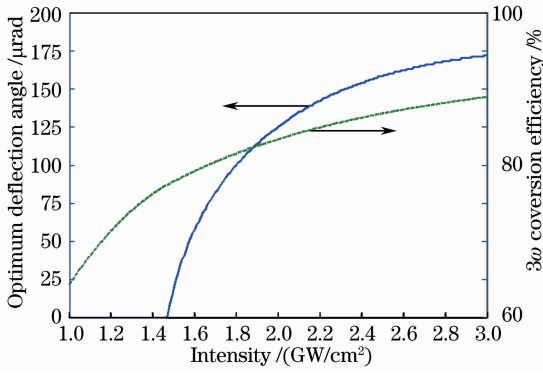


图 8 探针激光能量稳定性的影响

Fig. 8 Influences of the stability of the probe laser energy

4) 由于测量时采用“走-停-走”^[7]的方式,最佳偏转角是通过曲线拟合而得到的,因而拟合得到的曲线会与实际存在一定的误差。因此将偏转角扫描误差取马达步长的一半,即 $5 \mu\text{rad}$ 。

5) 实验中晶体自准直仪以及激光自准直仪的误差均为 $\pm 5 \mu\text{rad}$ 。

6) 实验中使用的几块平面反射镜引入的误差小于 $1 \mu\text{rad}$ 。

实验中可能存在的误差见表 2。

表 2 离线测量误差分布

Table 2 Off-line measurement errors

Error source	Maximum error
Drift angle / μrad	± 32
Energy stability / μrad	± 9
Temperature / ($\mu\text{rad}/^\circ\text{C}$)	90
Motor / μrad	5
Laser autocollimator / μrad	± 5
Crystal autocollimator / μrad	± 5
Reflector / μrad	< 1

表 1 中,前三点存在最大 $39.9 \mu\text{rad}$ 的误差,这可能是开始测量时激光器运行不稳定造成的。此外,前后测量时的温度不一致可能也存在一定影响。通过上述分析可知,对实验测量精度的影响主要包括探针激光的角漂、能量稳定性和环境温度等。

5 KDP 晶体全口径最佳偏转角预测

在线应用时,为了快速找到大口径 KDP 晶体的放置角度,提高精密装校效率,本文在验证了单点理论模型正确性的基础上,建立了全口径最佳偏转角模型。假设入射基频光平均功率密度为 $1.6 \text{ GW}/\text{cm}^2$,光束口径为 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$,模拟计算了倍频 KDP 晶体全口径偏转角与倍频转换效率的关系。图 9 给出了理想晶体(即折射率分布均

匀)和非理想晶体(即折射率分布不均匀)的晶体偏转角与转换效率的关系曲线。图 10 为晶体放置在最佳偏转角处的转换效率分布。

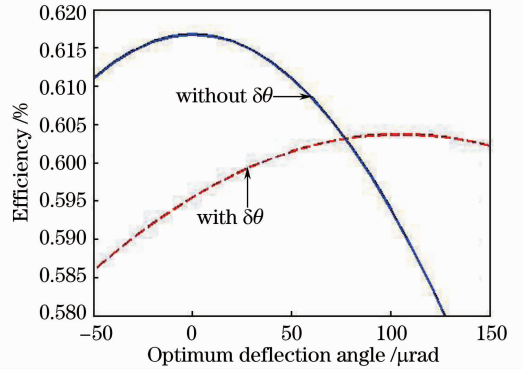


图 9 转换效率与倍频晶体偏转角度的关系

Fig. 9 Conversion efficiency versus deflection angle of doubler

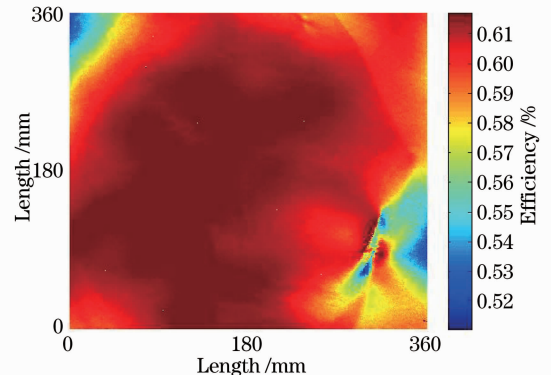


图 10 转换效率的分布

Fig. 10 Conversion efficiency distribution

由图 9 可以看出,晶体折射率不均匀性对晶体全口径的最佳偏转角有较大的影响。根据图 3 所示的折射率不均匀性分布,计算得到的全口径最佳偏转角约为 $105 \mu\text{rad}$,而理想晶体最佳偏转角约为 0 ,两者相差了 $105 \mu\text{rad}$ 。另外,实验中 11 点的平均值为 $63 \mu\text{rad}$,与理论值 $105 \mu\text{rad}$ 相差了 $42 \mu\text{rad}$ 。由此可见,多点取平均的方法仍然会产生一定的偏差,需要理论进行修正。

对比图 10 与图 4 可以发现,晶体中间区域的转换效率较高,其对应的内部失谐角接近 0 ;左上角与右下角转换效率较低,其对应的内部失谐角偏离 0 较大,且往负方向偏离;左下角转换效率较高,其对应的内部失谐角偏离 0 也较大,但是往正方向偏离。由此可见,折射率不均匀分布对晶体转换效率存在一定的影响。当产生的内部失谐角接近 0 时,对转换效率的影响较小,而内部失谐角偏离 0 较大时,对转换效率的影响需视内部失谐角的正负而定,

或补偿或衰减。

6 结 论

建立了大口径 KDP 晶体最佳偏转角的理论预估模型,并通过实验进行了验证,证明了单点预估模型的正确性和有效性。同时,还进一步分析了影响测量精度的各种误差。研究结果表明,理论预测值与实验值的变化趋势相同,且在探针激光工作稳定及环境温度稳定的条件下,理论预估与实验测量结果的差值在 $10 \mu\text{rad}$ 以内。由此可见,探针激光角漂、能量稳定性和环境温度等影响实验测量精度的主要因素,在实际工作中,应予重点控制。根据单点模型建立了全口径 KDP 晶体的最佳偏转角预测模型,分析了折射率不均匀性对晶体最佳偏转角度以及转换效率的影响。结果表明,当内部失谐角较小时,对转换效率的影响较小,而当内部失谐角较大时,对转换效率的影响则视内部失谐角的正负而定。该研究方法和结论可为大口径 KDP 晶体精密装校提供理论依据,为工程实践提供理论指导。

参 考 文 献

- Ji Lailin, Liu Chong, Tang Shunxing, *et al.*. Phase perturbation of large aperture KDP crystal manufacture and effects on third harmonics generation [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502012.
季来林,刘崇,唐顺兴,等.大口径 KDP 晶体加工相位扰动与三次谐波转换[J].中国激光,2012,39(5): 0502012.
- Zhang Junyong, Sun Meizhi, Zhang Yanli, *et al.*. Inverse problem of frequency conversion at SG-II final optical assemble [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0916003.
张军勇,孙美智,张艳丽,等.神光 II 终端光学组件的频率变换逆问题研究[J].光学学报,2012,32(9): 0916003.
- Jia Kai, Xiong Zhao, Yang Chuang, *et al.*. A mounting configuration for efficient third harmonic conversion of KDP crystals with large aperture[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702004.
贾凯,熊召,杨闯,等.大口径 KDP 晶体实现高效三倍频转换的新型支撑结构[J].中国激光,2013,40(7): 0702004.
- Wegner P J, Hensian M A, Speck D R. Harmonic conversion of large-aperture $1.05\text{-}\mu\text{m}$ laser beams for inertial-confinement fusion research[J]. Appl Opt, 1992, 31(30): 6414-6426.
- Mi Guojiang, Cai Bangwei, Yang Chunlin. The analysis of the third harmonic generation schemes for ICF drivers[J]. Laser Technology, 1999, 23(5): 304-308.
秘国江,蔡邦维,杨春林.用于 ICF 驱动器高效三倍频方案的分析[J].激光技术,1999,23(5): 304-308.
- Wang Wenming, Yi Zhang, Jiang Wenhan. Auto-orientation of KDP crystals in laser frequency doubling[J]. Chinese J Lasers, 1987, 14(10): 603-606.
王文明,易樟,姜文汉. KDP 晶体在激光倍频过程中的自动定向[J].中国激光,1987,14(10): 603-606.
- Kong Chenhui, Ji Lailin, Zhu Jian. Design and precision analysis of offline crystal frequency tripling alignment adjusting system for SG-II [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(10): 101403.
孔晨晖,季来林,朱俭.“神光 II”装置三倍频离线调试系统设计与测试精度分析[J].激光与光电子学进展,2010,47(10): 101403.
- Wang Fang, Su Jingqin, Li Keyu, *et al.*. Influence of KDP crystals' refractive-index non-uniformities on 3ω conversion efficiency[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(5): 756-749.
王芳,栗敬敏,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].强激光与离子束,2007,19(5): 756-749.
- J M Auerbach, C E Barker, S A Couture, *et al.*. Modeling of Frequency Doubling and Tripling with Converter Refractive Index Spatial Non-Uniformities Due to Gravitational Sag [R]. Monterey: Third Annual International Conference on Solid State Lasers for Application (SSLA) to Inertial Confinement Fusion (ICF), 1998.
- Auerbach J M, Wegner P J, Couture S A, *et al.*. Modeling of frequency doubling and tripling with measured crystal spatial refractive index nonuniformities [J]. Appl Opt, 2001, 40(9): 1404-1411.
- Cheng Xiaofeng, Jiang Xiaodong, Zheng Wanguo, *et al.*. Measurement of optical uniformity of KDP crystals [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(2): 25-28.
程晓峰,蒋晓东,郑万国. KDP 晶体光学均匀性检测实验研究[J].光电工程,2008,35(2): 25-28.
- Chai Liqun, Shi Qikai, Xu Jiancheng, *et al.*. Testing of KDP crystal refractive index nonuniformity [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 3126-3129.
柴立群,石琦凯,徐建程,等. KDP 晶体折射率非均匀性检测系统[J].光子学报,2009,38(12): 3126-3129.
- Jia Kai. Analysis and Optimization of Critical Factors for Efficient Harmonic Conversion in Final Optics Assembly [D]. Chengdu: Sichuan University, 2012. 51-52, 117-121.
贾凯.夹持结构优化设计及加工误差对晶体面型的影响[D].成都:四川大学,2012. 51-52, 117-121.

栏目编辑: 史 敏