

KDP 晶体折射率非均匀性检测系统*

柴立群, 石琦凯, 徐建程, 许乔, 邓燕

(成都精密光学工程研究中心, 成都 610041)

摘 要: 基于正交偏振干涉法, 建立了 KDP 晶体折射率非均匀性的检测系统, 并可实现晶体相位失谐角的间接检测. 波前检测系统实现了测试光偏振态的精密控制与切换, 采用波长调谐相移的方法去除了测试过程中参考面倾斜引入的误差, 优化了抗振动相移算法, 提高了波前测试的测量准确度及重复性. 通过折射率非均匀性分析算法的设计, 解决了晶体厚度变化引入的误差等. 小口径晶体元件的测试结果表明系统的折射率非均匀性检测准确度(均方根值)优于 10^{-6} .

关键词: KDP 晶体; 折射率非均匀性; 正交偏振干涉法; 相位匹配角

中图分类号: O43

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2009)12-3126-4

0 引言

KDP 晶体在惯性约束聚变系统中作为频率转换元件, 对系统最终输出能量起着至关重要的影响. 为达到较高的转换效率, 晶体光轴方向与光束传播方向必须满足一定的角度, 即相位匹配角, 而晶体由于生长的结构性缺陷等引起的折射率的不均匀性将导致光束的空间分布存在不同程度的相位失配, 从而引起三倍频系统的转换效率下降^[1].

由于直接测量晶体全场的光轴非均匀性非常困难, 因而美国利弗莫尔实验室采用两种方法来实现大口径晶体元件的全场失配角的定量检测, 一是采用晶体定位测试系统 (Crystal Alignment Test System, CATS) 对大口径晶体的若干取样点处的相位失配角的绝对值进行检测; 二是采用正交偏振干涉检测法 (Orthogonal Polarization Interferometry, OPI) 检测大口径晶体的全场折射率非均匀性, 得到晶体全口径内相位失谐角的相对值. 并将 OPI 检测的相对值与 CATS 检测的绝对值进行比对、定标, 最终实现了全口径范围内的定量检测, 并应用于晶体元件的粗切和精切加工阶段.

国内目前已可实现晶轴失配角的取样检测, 在全口径折射率非均匀性方面也开展了相应的工作^[2], 但由于使用的设备为国外进口的大口径干涉仪, 其输出激光偏振态固定, 不能实现正交偏振态的切换, 而在输出激光的测试端口处放置 $\Phi 100$ mm 偏振片, 偏振态的消光比均匀性相对较低, 同时算法中忽略了晶体的厚度偏差等, 因而不适用于折射率非均匀性的高准确度检测.

本文基于 OPI 法的检测原理, 建立了小口径高准确度干涉检测系统, 在系统硬件及分析算法上进行了优化, 开展了小口径晶体元件折射率非均匀性检测的验证实验.

1 检测原理及分析算法

正交偏振干涉法仅用于测量频率转换晶体. 该方法利用不同偏振态的光波测量晶体的透射波前, 通过对测量结果的差异分析得到 e 光折射率均匀性和与之相关的局部相位匹配角的变化.

晶体属于各向异性介质, 即对沿不同方向偏振的光波具有不同的传播性质. 对于单轴晶体而言, 沿任意方向入射的偏振光波, 在晶体内分解为偏振方向相互正交的两束光波 (e 光和 o 光), 见图 1.

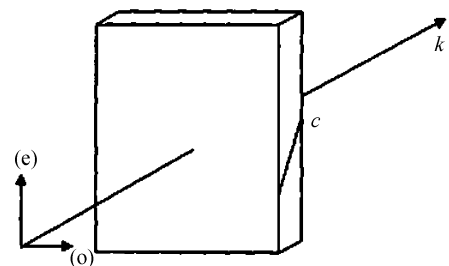


图 1 偏振态与光轴方位

Fig. 1 Diagram of polarization state and optical axis

当光束传播方向 k 与晶体光轴方向 c 存在一个夹角 θ 时, e 光折射率 $n_e(\theta)$ 可以用式 (1) 计算

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

$dn_e/d\theta$ 可由式 (1) 求出

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

首先调整激光偏振状态为 e 光, 测量晶体透射波前, 然后将激光偏振状态转换为 o 光, 再次测量晶体透射波前, 两次测量过程中干涉仪各部件以及被

* 中国高技术研究发展计划 (2007AA804206) 资助

Tel: 028-85136155

Email: chailiqun@163.com

收稿日期: 2009-02-27

修回日期: 2009-05-28

测晶体不作任何调整,于是就可以通过下述的算法得到晶体上各点 e 光折射率的局部差异.

对于两种偏振状态下的透射波前测量,晶体上每一点的相位都可以用下式描述

$$\varphi(x, y) = (n(x, y) - 1)t(x, y) + C(x, y) + T(x, y) + P(x, y) \quad (3)$$

式中 $n(x, y) = \bar{n} + \delta n(x, y)$, $t(x, y) = \bar{t} + \delta t(x, y)$ 分别代表局部折射率和厚度. C 、 T 、 P 三项分别代表空腔、倾斜、常量项对局部透射波前的影响.

忽略所有的常量项,从 e 光测量数据中减去 o 光数据并且去除常量项,可得

$$\begin{aligned} \Delta\Phi = \Phi_e - \Phi_o = & [(n_e + \delta n_e - 1)(\bar{t} + \delta t) + C + T_e + P_e] - \\ & [(n_o + \delta n_o - 1)(\bar{t} + \delta t) + C + T_o + P_o] \approx \\ & (\bar{n}_e - \bar{n}_o)\delta t + (\delta n_e - \delta n_o)\bar{t} + \Delta T_{eo} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 ΔT_{eo} 是两次测量中由相移器引入的倾斜量的改变.

厚度变化项 δt 可以通过 o 光透射波前与空腔测量结果的差异得到

$$\begin{aligned} \Phi_o' = \Phi_o - C = & (\bar{n}_o + \delta n_o - 1)(\bar{t} + \delta t) + T_o - \\ & T_c + P \approx (\bar{n}_o - 1)\delta t + \Delta T_{eo} \end{aligned} \quad (5)$$

在导致晶体折射率的空间分布的诸多因素中,为简化模型,可以近似认为折射率的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 , 则有

$$\Delta\Phi - \Delta T_{eo} - \frac{\bar{n}_e - \bar{n}_o}{n_o - 1} \Phi_o' \approx \delta n_e \bar{t} \quad (6)$$

利用式(2)就可以将 e 光折射率的不均匀性转化为光束传播方向与晶体光轴夹角的误差,见式(7)

$$\Delta\theta = \delta n_e \left(\frac{dn_e}{d\theta} \right)^{-1} \quad (7)$$

2 正交偏振干涉检测系统研制

正交偏振干涉法对干涉仪提出了以下两方面的特殊要求:一是输出光为高消光比的线性偏振光;二是输出光的偏振方向可以正交切换. 商品化的干涉仪不能满足使用要求,因而研究开发了一套通光口径为 $\varphi 100$ mm 的波前检测系统,系统构型采用 Fizeau 准共路干涉,以减轻测量过程中环境扰动对测试的影响以及降低元件的加工难度.

2.1 干涉仪光学系统设计

光学模块由光源、扩束聚焦系统、准直分束系统、对准系统、成像系统组成. 考虑到测试过程中偏振态需要切换,因而对分光元件等必须镀制消偏振分光膜以实现干涉视场的光强一致性.

光源选用了美国 NewFocus 公司的波长可调谐激光器,中心波长为 632 nm,该激光器输出光束线

偏振度优于 50 : 1,基本上可以满足正交偏振干涉测量中对偏振态的要求. 由于出射激光为椭圆形光斑,因而采用了整形棱镜使之成为圆形光斑后方可进行扩束.

为实现输出光束光强分布均匀,采取了两级扩束来实现系统的优化设计,由激光器发出的激光光束经望远放大系统一级扩束后变成平行光,再经聚光镜将光束汇聚在焦点后发散,完成二次扩束. 两级扩束后放大倍数约 500 倍,出射光束不平行度不大于 0.1 mrad.

扩束后的激光光束经偏振分光棱镜反射后通过准直物镜实现光束的准直. 准直镜采用球面双分离式透镜组结构, F 数约为 5.5,出射光束不平行度小于 $1'$.

成像部分采用固定放大倍率以提高系统传递函数. 为了减少离焦测量引起的误差,设计采用远心光路系统. 为得到较好的光学传递函数^[5], CCD 选取 UNIQ 公司的 UP1830,成像系统的设计指标具有衍射受限的成像质量,并且调制传递函数在 50 mm 处各视场均大于 0.6,见图 2.

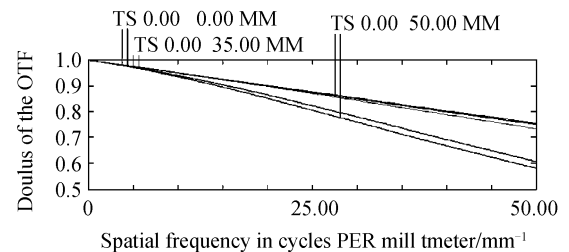


图 2 成像系统各视场调制传递函数

Fig. 2 MTF of imaging system at different field of view

光学系统中偏振态的控制及切换由以下方法实现:首先于出射激光处放置二分之一波片使 p 分量最大,再在整形棱镜处使激光以布儒斯特角入射,透射光包含有剩余 s 光及全部 p 光,再经格兰-泰勒棱镜进一步去除 s 光,提高 p 光的消光比. 激光一级扩束后,再通过一块二分之一波片实现正交偏振态的切换. 偏振方向的精确校正采用高准确度的偏振片结合可检测微弱功率的功率计实现.

2.2 相移模块设计

相移干涉是干涉测量中准确度最高的测量方法,为了实现相移可以采用两种方式:机械相移及波长调谐相移. 由于正交偏振干涉法需要进行 o 光、e 光和空腔三组波前测量,若采用机械相移方法,则每次测量中引入的倾斜误差各不相同,为了消除倾斜误差需要采用背景数据进行倾斜量拟合计算,从而增加了测量及分析算法的复杂度,降低了检测准确度. 而波长相移方式由于没有涉及机械移动,式(5)、(6)中的倾斜误差项均为零,从而可得到折射率非均

匀性为

$$\delta n_e = \left[\Phi_e - \Phi_o - \frac{\bar{n}_e - \bar{n}_o}{\bar{n}_o - 1} (\Phi_o - C) \right] / t + \text{const} \quad (8)$$

波长调谐相移技术中,忽略激光器在使用波长调谐范围内的非线性性,相位变化量 $\Delta\varphi$ 、波长变化量 $\Delta\lambda$ 、腔长 Z 三者存在非线性关系

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda_0^2} \times \Delta\lambda \times Z \quad (9)$$

激光器自身的波长调谐准确度约为 1.8×10^{-4} nm,不能满足相移量粗准确度需要,通过数/模卡对激光器内部的压电陶瓷输入电压进行细分控制,实现了波长调制准确度优于 10^{-6} nm.

相移量的校正通过计算两幅互有相移的干涉条纹的相关性得到.

2.3 相移算法设计

干涉仪实际应用中由于可调谐激光器的非线性、环境振动、腔长测量误差等因素的影响,不采用复杂的闭环控制手段进行实时反馈的情况下,无法得到精确的相移值.而用于频率转换的 KDP 晶体通常厚度不超过 15 mm,因而折射率非均匀性引入的波前相位变化为一微小量,检测准确度受限于干

涉系统的波前检测准确度.

为解决相移的失调误差对波前检测准确度的影响,设计了一种基于最小二乘迭代的相移算法^[4],算法的迭代过程有三步,首先由任意输入的相移量决定定位相分布,其次由第一步求得的相位分布求解相移量,最后设定收敛判据,重复第一步及第二步,直到满足第三步中的收敛判据,然后正确的相位分布可以由第一步得到.该迭代算法收敛快而稳定,无需准确相移量.

3 实验

利用上述的波前检测系统,分别检测干涉仪空腔反射波前、o 光及 e 光入射时的晶体透射波前.为去除干涉仪测量过程中随机误差的影响,提高测量准确度及可重复性,每次波前测试取 10 次以上测试结果进行点对点平均参与最终运算.以一块尺寸为 $79 \text{ mm} \times 77 \text{ mm} \times 13.27 \text{ mm}$ 的 I 类晶体为例,测试及分析结果的二维分布见图 3. n_e 及 n_o 的标称值分别为 1.466 9、1.507 4,像素点对应于像面的采样间距为 0.1 mm.

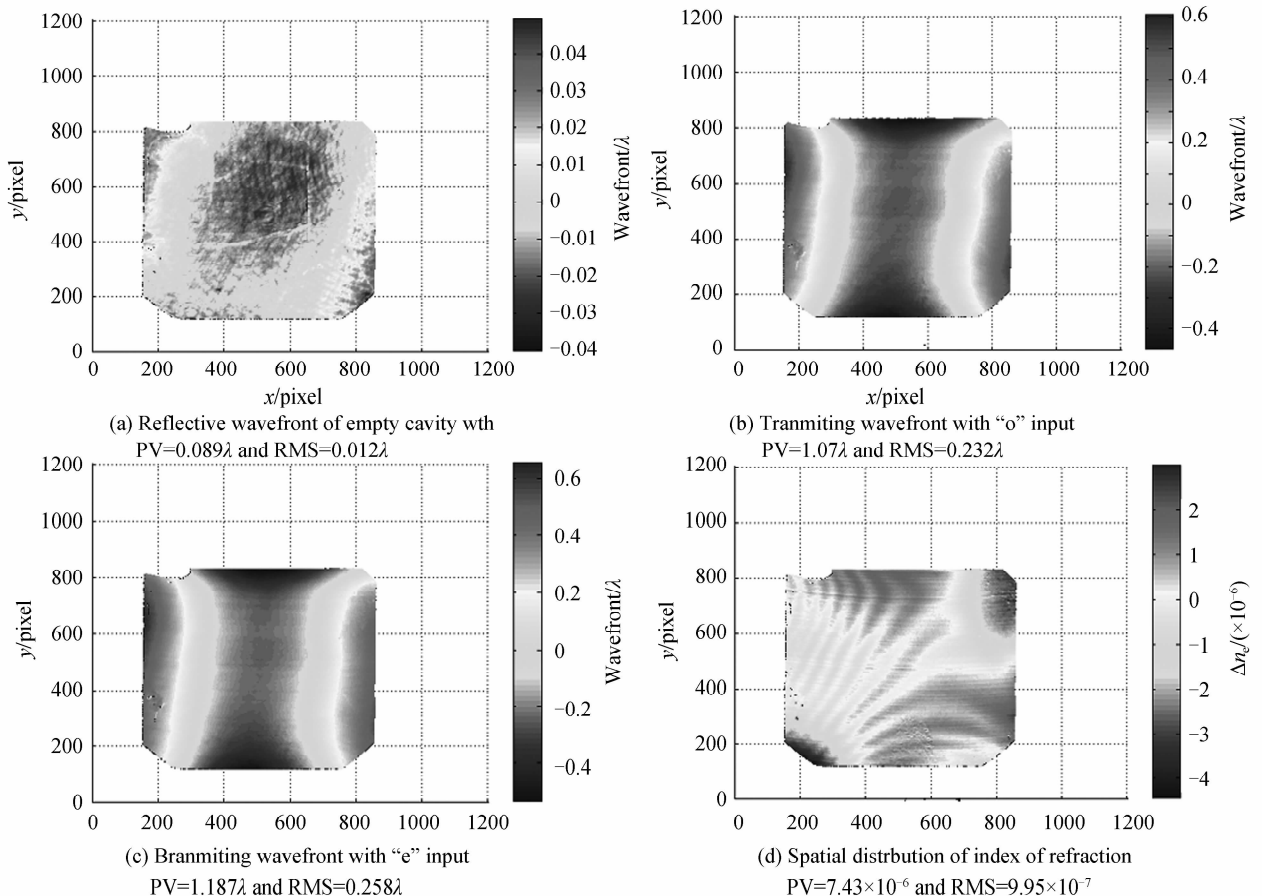


图 3 I 类晶体折射率非均匀性检测

Fig. 3 Testing of index of refraction nonuniformity of one I type crystal

由图 3(d) 清晰可见由于晶体边界内部条状的 突变的折射率变化项.

对于 I 类晶体,有 $d\theta/dn_e = 2.457 \times 10^7 \mu\text{rad}$, 从而可得到匹配角偏差峰谷值为 0.193 mrad.

理论及实验结果表明,除干涉检测系统外,影响折射率非均匀性检测测试准确度及重复性的主要有环境温度、e 轴及 o 轴与晶体边缘平行度、光轴与测试光偏振方向的平行度等.除环境温度外,其它误差源目前尚无高准确度检测的条件,尚需开展进一步的工作.

4 结论

针对 KDP 晶体元件折射率非均匀性检测技术开展了理论和实验研究,建立了检测系统.利用波片、棱镜等实现了正交偏振态的方向控制与切换,通过对可调谐激光器的频率调制带宽进行细分,实现了所需要的相移量准确度要求,并通过互有相移量的干涉条纹之间的互相关关系,建立了激光器输入电压、腔长、相移量三者之前的关系,对相移量进行了准确校正,从而实现了波长调谐相移,解决了倾斜引入的误差问题.优化了基于最小二乘迭代的相移算法提高了测试系统对环境的苛刻要求.小口径晶

体实验表明 KDP 晶体折射率非均匀性检测准确度优于 10^{-6} (均方根值).为大口径晶体元件全场晶轴定向准确度的定量检测奠定了必要的技术基础.

参考文献

- [1] 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.
- [2] WANG Fang, SU Jing-qin, LI Ke-yu, *et al.* Influence of KDP crystals' refractive index nonuniformities on 3ω conversion efficiency[J]. *High power laser and particle beam*, 2007, **19**(5):746-749.
王芳,粟敬钦,李格宇,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.
- [3] XU Jian-cheng, DENG Yan, CHAI Li-qun, *et al.* The effect of CCD on high spatial resolution interferometric optical test[J]. *Acta photonica Sinica*, 2006, **35**(5):793-796.
徐建程,邓燕,柴立群,等. CCD 对高空间分辨率波前干涉检测的影响[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5):793-796.
- [4] XU Jian-cheng, XU Qiao, CHAI Li-qun. Iterative algorithm for phase extraction from interferograms with random and spatially nonuniform phase shifts[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(3): 480-485.

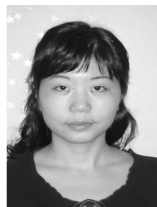
Testing of KDP Crystal Refractive Index Nonuniformity

CHAI Li-qun, SI Qi-kai, XU Jian-cheng, DENG Yan, XU Qiao

(Fine Optical Engineering Research Center, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on a method named Orthogonal Polarization Interferometry, testing system on refractive index nonuniformity of KDP crystal is proposed, and phase detuning angle can also be indirectly tested. Polarization state of the testing light is precisely controlled and switched in the interferometer. Error introduced by tilt of the optical element is avoided by adopting wavelength-tuning phase shifting method. Phase shifting algorithm is optimized to raise testing precision and repeatability. Analytic algorithm of index of refraction nonuniformity is designed, and therefore the error introduced by variation in the crystal thickness is avoided. The measurement result for the crystal with small aperture shows that the accuracy of the instrument is better than 10^{-6} (RMS).

Key words: KDP crystal; Orthogonal polarization interferometry; Index of refraction nonuniformity; Phase-matching angle



CHAI Li-qun was born in 1973 and obtained her M. S. degree in Optical engineering from University of Electronic Science and Technology of China in 2001. Now she is an associate researcher at Chengdu Fine Optical Engineering Research Center, and her research interests focus on fine optical testing.