

文章编号 1004-924X(2016)12-3041-07

KDP\DKDP 倍频晶体吸收系数的斜入射测量

高波¹, 杨斌², 李强¹, 姜昌录², 黎高平², 柴立群^{1*}

(1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

2. 西安应用光学研究所 陕西 西安 710065)

摘要:考虑惯性约束聚变系统中的磷酸二氢钾/磷酸二氘钾(KDP\DKDP)的吸收系数直接影响系统的转换效率及最终输出能量,本文研究了KDP\DKDP倍频晶体吸收系数的测量方法。提出了新的基于朗伯定律的倍频晶体吸收系数斜入射测量法。建立了斜入射状态下入射光偏振态与晶体o光和e光的关系模型,推导了小角度入射下晶体e光折射率的迭代计算方法。采用该方法计算了晶体的e光折射率,通过测量得到的数据间接计算出了KDP\DKDP倍频晶体吸收系数。详细分析了该方法在测量过程中的各项误差来源,得出该方法测量误差优于 0.0002 cm^{-1} 。最后,对一块 $40\text{ mm}\times 40\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的开关晶体元件进行测试并与分光光度法比对以验证提出方法的可行性,结果显示两种测量方法的偏差小于 0.0002 cm^{-1} ,表明该方法可用于惯性约束聚变系统中倍频晶体吸收系数的测量。

关键词:磷酸二氢钾/磷酸二氘钾(KDP\DKDP)倍频晶体;吸收系数测量;斜入射;比尔朗伯原理

中图分类号:O437;O734.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162412.3041

Absorption coefficient measurement of KDP or DKDP Frequency doubling crystal at oblique incidence

GAO Bo¹, YANG Bin², LI Qiang¹, JIANG Chang-lu², LI Gao-ping², CHAI Li-qun^{1*}

(1. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics Mianyang 621900, China;

2. Xi'an Research Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

* Corresponding author, E-mail: chailiqun@163.com.

Abstract: As the optical absorption coefficient of KDP or DKDP frequency doubling crystal in an Inertial Confinement Fusion (ICF) facility affects directly its frequency conversion efficiency and output energy, this paper researches the measurement methods of the absorption coefficients for two kinds of crystals. A measurement method based on LAMBERT-BEER law was proposed under oblique incidence for frequency doubling crystals. Then, the relationship between the polarization state of incident light and the propagation of light in the crystals under oblique incidence was analyzed. An iterative algorithm for calculating extraordinary refractive index of the crystals was presented. On the basis of the iterative algorithm, the extraordinary refractive index was obtained and the optical absorption coefficient of KDP or DKDP frequency doubling crystal was calculated by using the measured data indirectly. The error sources were analyzed in detail. It shows that total measuring error of this method

收稿日期:2016-09-27;修订日期:2016-11-17.

基金项目:中国工程物理研究院科研资金资助项目(GFZX02080101.1)

is less than 0.0002 cm^{-1} . Finally, a $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ crystal switch was measured and the obtained results were compared with that of spectrophotometry. The comparison indicates that the deviation of the two methods is less than 0.0002 cm^{-1} , which verifies that the proposed method can be used in absorption coefficient measurement of KDP or DKDP frequency doubling crystal in the ICF facility.

Key words: KDP/DKDP; frequency doubling crystal; absorption coefficient measurement; oblique incidence; LAMBERT-BEER law

1 引言

磷酸二氢钾/磷酸二氧钾 KDP\DKDP 晶体在惯性约束聚变系统中作为频率转换元件或调 Q 开关元件,对系统最终输出能量起着至关重要的影响。为达到一定的转换效率,晶体光轴方向与光束传播方向必须满足一定的角度要求,即相位匹配角。晶体吸收系数将直接影响最终的能量输出效率^[1-3]。晶体为各向异性物质,其 o 光吸收系数和 e 光吸收系数不同,而且当入射角不同时,其 e 光折射率和 e 光传播方向也不同,因此利用使用角度下的吸收系数测量晶体更能真实反映晶体使用状态下的吸收状态。KDP\DKDP 的晶体吸收系数一般为 10^{-3} 量级,惯性约束聚变系统中的晶体厚度一般为 10 mm,因而测量方法的精度应达到 10^{-4} 数量级。

光学玻璃材料吸收系数的测量方法有分光光度法^[4,5],光热偏转法^[6,7],激光量热法^[8]等。激光量热法将激光入射到样品中,样品吸收能量后温度发生变化,然后停止激光照射,通过测量温度衰减,从而间接计算得到样品的吸收系数,该方法的测量精度可达到 10^{-6} ,但对样品质量,大小均有严格要求;光热偏转法通过高功率泵浦激光射入到样品中,样品吸收能量后发生局部的热膨胀,然后通过另一测量光束测量热膨胀造成的形变,从而获得样品的吸收系数,该方法可达到的测量精度为 10^{-5} ,但它要求采用高功率激光器,不利于工程化测量;分光光度法主要依赖于现有的成熟的分光光度计,通过测量样品透射率的方法,根据比尔朗伯定律计算得到样品的吸收系数,该方法的测量精度主要受限于分光光度计的测量精度。

本文提出采用激光光度方法,利用双光路差分原理,消除激光功率的不稳定对测量结果的影响。针对正入射状态下干涉对测量结果的影响,

提出了基于斜入射的吸收系数测量方法。

2 原理

根据比尔朗伯定律知,通过计算光束在晶体传播方向上的距离、透射率以及反射率可得到待测晶体在该波长下的损耗系数:

$$K = \frac{1}{l} [2 \ln(1 - \rho) - \ln T], \quad (1)$$

式中: K 为损耗系数, cm^{-1} ; l 为光束在晶体传播方向的厚度, cm; T 为晶体在某偏振态下的透射率; ρ 为晶体在某偏振态下的反射率。

考虑多次透射光的影响,则公式(1)可修正为

$$K = -\frac{\ln(\beta)}{l}, \quad (2)$$

式中:

$$\beta = \frac{-(1 - \rho)^2 + \sqrt{(1 - \rho)^4 + 4\tau^2\rho^2}}{2\tau\rho^2}, \quad (3)$$

式中: τ 为晶体在某偏振态下的总透射率。

2.1 透射率测量

透射率的测量光路如图 1 所示,先由激光器发射激光,经稳功率仪后,可得到稳定的偏振光,经 1/2 波片后变为线偏光,激光经分束镜分为两束激光,其中一束激光能量直接被监视探测器记录,另一束激光经待测晶体被测量探测器记录,分别放入晶体前后两束激光能量的比值,可获得待测晶体在该波长下透射率。

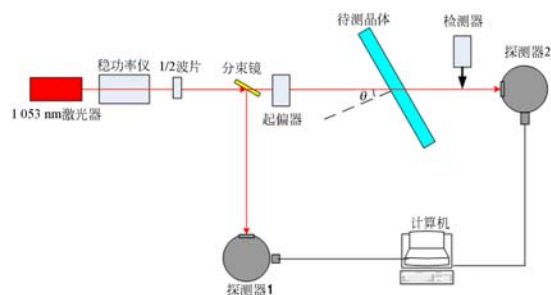


图 1 透射率测量光路示意图

Fig. 1 Sketch map of transmission measurement

2.2 反射率计算

晶体反射率可由菲涅尔公式计算,通过菲涅尔公式可知,反射率与入射光偏振态、入射角和折射角相关;而折射角与斜入射状态下倍频晶体的折射率相关。由于入射角已知,故计算反射率可转化为求解折射率。折射光中 *o* 光光线的方向只取决于入射角,与光轴方向无关;而 *e* 光方向与入射角、光轴方向都有关系,因此 *o* 光折射率满足折射定律,而 *e* 光折射率不满足折射定律。确定 *e* 光折射率有许多方法^[9-11]。下面采用迭代计算的方法计算晶体 *e* 光折射率。

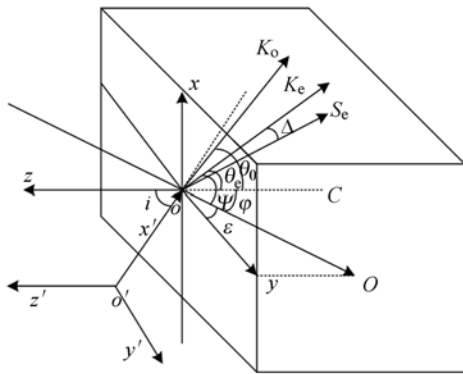


图 2 光线斜入射 KDP 晶体光线示意图

Fig. 2 Sketch map of light oblique incidence in KDP crystal

如图 2 所示, *xoy* 面为晶体表面, *zo* 为晶体表面法线,取晶体光轴 *O* 与晶体表面夹角为 ϵ (yoO)。假设光线在 *xoz* 面内入射,光线的入射角为 i ($o'oz$),晶体内 *o* 光波法线 K_o 与 *e* 光的波法线 K_e 折射角分别为 θ_o ($K_o oC$) 和 θ_e ($K_e oC$),晶体内 *o* 光与 *e* 光的主折射率分别为 n_o 和 n_e , φ 为晶体光轴对晶体表面投影与入射面之间的夹角 (CoO), ψ 为晶体光轴 *O* 与 *e* 光波法线之间的夹角 ($K_e oO$)。

晶体 *e* 光波法线满足折射定律, *e* 光波法线折射角 (*e* 光波法线与晶体表面法线夹角) 可表示为:

$$\theta_e = \arcsin \frac{\sin i}{n_e}, \quad (3)$$

根据折射率椭球方程可得到晶体 *e* 光折射率:

$$n_\theta = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \psi + n_e^2 \cos^2 \psi}}, \quad (4)$$

晶体光轴方向可表示为向量

$$\mathbf{N} = \frac{(\cos \epsilon \cos \theta_e \sin \varphi, -\cos \epsilon \cos \theta_e \sin \varphi - \sin \epsilon \sin \theta_e, \cos \epsilon \sin \theta_e \sin \varphi)}{\sqrt{\cos^2 \epsilon \sin^2 \varphi + (\cos \epsilon \cos \theta_e \cos \varphi + \sin \epsilon \sin \theta_e)^2}}. \quad (9)$$

$$\mathbf{O} = (\cos \epsilon \cos \varphi, \cos \epsilon \sin \varphi, \sin \epsilon), \quad (5)$$

晶体 *e* 光波法线方向可表示为向量

$$\mathbf{K}_e = (\sin \theta_e, 0, -\cos \theta_e), \quad (6)$$

则可得到 *e* 光波法线与晶体光轴之间夹角满足下列关系:

$$\cos \psi = \sin \theta_e \cos \epsilon \cos \varphi - \cos \theta_e \sin \epsilon, \quad (7)$$

由公式 (3)、(4) 和 (7) 迭代可计算出晶体 *e* 光折射率,迭代流程如图 3 所示。

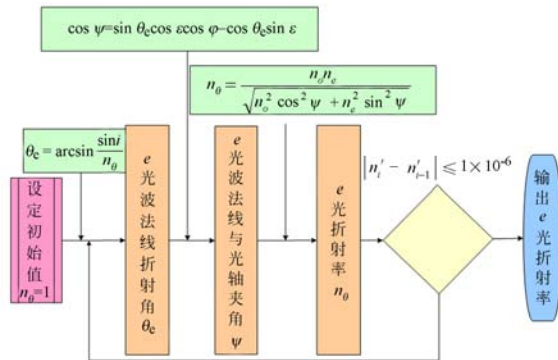


图 3 晶体 *e* 光折射率迭代计算流程图

Fig. 3 Flow chart of iterative algorithm for calculating extraordinary refractive index of crystal

2.3 振动方位角计算

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。一般地相位匹配角仅有一个方向,但特殊情况下存在相位匹配角既不在水平方向,也不在垂直方向。因此为了得到精确的晶体 *e* 光和 *o* 光吸收系数,需要精确调整入射光偏振方向,从而使通过晶体的光为 *e* 光或 *o* 光。通过将起偏器放置于高精度旋转机构上来控制和测量入射光的偏振方向。高精度旋转机构需先通过角度编码盘进行校正。

e 光波法线 K_e 与 *e* 光线 S_e 方向之间的离散角与晶体光轴与 *e* 光波法线之间的夹角 ψ 的关系如下:

$$\tan \Delta = \left[1 - \frac{n_o^2}{n_e^2} \right] \frac{\tan \psi}{1 + \frac{n_o^2}{n_e^2} \tan^2 \psi}. \quad (8)$$

由于 K_e, S_e 和光轴 *O* 共面,设该面的法线为单位矢量 \mathbf{N} ,由 $\mathbf{N} \perp \mathbf{K}_e, \mathbf{N} \perp \mathbf{O}$,则可求出 \mathbf{N} :

利用 $\mathbf{S}_e \perp \mathbf{N}$, \mathbf{K}_e 与 \mathbf{S}_e 夹角为 Δ , 则可计算出 e 光光线 \mathbf{S}_e

$$\mathbf{S}_e = (a\gamma + b, c\gamma + d, \gamma), \quad (10)$$

其中

$$a = \cot \theta_e, \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{-2(ab + cd) - \sqrt{4(ab + cd)^2 - 4(a^2 + c^2 + 1)(b^2 + d^2 - 1)}}{2(a^2 + c^2 + 1)}, \quad (15)$$

由于 e 光的电矢量 $\mathbf{M}_e \perp \mathbf{S}_e$, 且在 \mathbf{K}_e , \mathbf{S}_e 和光轴 O 的面内, 因此 e 光的电矢量 $\mathbf{M}_e \perp \mathbf{N}$, 则可计算出 e 光电矢量 \mathbf{M}_e

$$\mathbf{M}_e = [(cq + d)g - qf, eq - (aq + b), (aq + b)f - (cq + d)e] * r, \quad (16)$$

$$r = \frac{1}{\sqrt{[fq - (cq + d)g]^2 + [(aq + b)g - qe]^2 + [(aq + b)f - (cq + d)e]^2}}. \quad (20)$$

o 光电矢量 \mathbf{M}_o 的方向实际为 o 主平面的法线方向, o 主平面即为 o 光线与光轴组成的平面,

$$\mathbf{M}_o = \frac{(\cos \epsilon \cos \theta_o \sin \varphi, -\cos \epsilon \cos \theta_o \sin \varphi - \sin \epsilon \sin \theta_o, \cos \epsilon \sin \theta_o \sin \varphi)}{\sqrt{\cos^2 \epsilon \sin^2 \varphi + (\cos \epsilon \cos \theta_o \cos \varphi + \sin \epsilon \sin \theta_o)^2}}, \quad (21)$$

晶体 o 光线满足折射定律, 则可求到 o 光线折射角:

$$\theta_o = \arcsin(i/n_o), \quad (22)$$

此时的计算均在 xyz 坐标系内, 需要向 $x'y'z'$ 做坐标转换, $x'y'z'$ 为 xyz 坐标系的 xoz 平面绕 y 轴顺时针旋转入射角 i 得到, 利用变换矩阵:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sin i & 0 & -\cos i \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos i & 0 & \sin i \end{bmatrix}, \quad (23)$$

则可计算得到 \mathbf{M}_o 、 \mathbf{M}_e 在 $x'y'z'$ 上的矢量 \mathbf{M}_o' 、 \mathbf{M}_e' :

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_o' &= \mathbf{T}\mathbf{M}_o, \\ \mathbf{M}_e' &= \mathbf{T}\mathbf{M}_e \end{aligned} \quad (24)$$

\mathbf{M}_o' 、 \mathbf{M}_e' 在 $y'o'z'$ 面上的投影(即垂直于入射光的面)为 P_o 、 P_e 。设

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_o' &= (x_o, y_o, z_o) \\ \mathbf{M}_e' &= (x_e, y_e, z_e), \end{aligned} \quad (25)$$

则

$$\begin{aligned} P_o &= \left(\frac{y_o}{\sqrt{y_o^2 + z_o^2}}, \frac{z_o}{\sqrt{y_o^2 + z_o^2}} \right), \\ P_e &= \left(\frac{y_e}{\sqrt{y_e^2 + z_e^2}}, \frac{z_e}{\sqrt{y_e^2 + z_e^2}} \right), \end{aligned} \quad (26)$$

$$b = \frac{\cos \Delta}{\sin \theta_e}, \quad (12)$$

$$c = \frac{\cos \epsilon \sin \varphi}{\sin \theta_e (\cos \epsilon \cos \theta_e \cos \varphi + \sin \theta_e \sin \epsilon)}, \quad (13)$$

$$d = \frac{\cos \epsilon \sin \varphi \cos \theta_e \cos \Delta}{\sin \theta_e (\cos \epsilon \cos \theta_e \cos \varphi + \sin \theta_e \sin \epsilon)}, \quad (14)$$

其中

$$e = \cos \epsilon \cos \theta_e \sin \varphi, \quad (17)$$

$$f = -\cos \epsilon \cos \theta_e \sin \varphi - \sin \epsilon \sin \theta_e, \quad (18)$$

$$g = \cos \epsilon \sin \theta_e \sin \varphi, \quad (19)$$

由于 o 光仍然在入射面内, 因此可以得到

则 o 光电矢量和 e 光电矢量在 $y'o'z'$ 面上的方位角分别为:

$$\begin{aligned} \alpha_o &= \arctan\left(\frac{z_o}{y_o}\right), \\ \alpha_e &= \arctan\left(\frac{z_e}{y_e}\right). \end{aligned} \quad (27)$$

3 实验结果

本文选取一块 KDP 倍频晶体作为实验对象, 其尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 晶体光轴与晶体表面的夹角为 53° , 晶体光轴对晶体表面的投影与入射面之间的夹角为 15° , o 光主轴折射

表 1 KDP 晶体吸收系数测量结果

Tab. 1 Measurement results of absorption coefficient of KDP crystal

测量位置	1 053 nm 波长 o 光吸收系数 (cm^{-1})	1 053 nm 波长 e 光吸收系数 (cm^{-1})
1	0.061 19	0.038 57
2	0.061 17	0.038 44
3	0.061 67	0.039 38

率为 1.494 1, e 光主轴折射率为 1.46。经过计算得,晶体 o 光方位角为 -13.95° , e 光方位角为 76.02° 。晶体两表面粗糙度分别为 1.1 nm 和 0.9 nm。分别测量 o 光和 e 光吸收系数,共测量 3 个位置,测量结果如表 1 所示。

4 误差分析

倾斜入射下光吸收系数测量的基本数学模型如公式(1)所示,吸收系数 K 与 3 个参量有关,即 T 、晶体厚度 L 、晶体表面反射率 R 。因此吸收系数 K 的测量不确定度由 T 、 L 、 R 的测量不确定度决定,并且 T 、 L 、 R 的测量不确定度相互独立。吸收系数的测量不确定度可表示如下:

$$u_K = \frac{1}{L} \sqrt{[2\ln(1-R) - \ln T]^2 \left(\frac{u_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{-2u_R}{1-R}\right)^2 + \left(\frac{u_T}{T}\right)^2} \quad (28)$$

4.1 透射率测量引入的不确定度

透射率测量的不确定度主要有:

(a) 测量重复性引入的不确定度

测量重复性引入的标准不确定度用 A 类方法评定:

$$u_1 = \frac{S}{\sqrt{N}}$$

其中 S 为重复测量的标准偏差, N 为测量次数。

取 10 次测量的平均值作为测量结果,可得透射比重复性引入的标准不确定度为 1.5×10^{-5} 。

(b) 激光功率不稳定引入的不确定度

激光功率的不稳定性取决于激光光源本身的稳定性和激光稳功率系统的稳定性。光路中采用双光路比较法测量透射率,故激光功率不稳定引入的测量不确定度可忽略。

(c) 探测器噪声及不均匀引入的不确定度

根据探测器的响应指标,采用 B 类方法评定,假设服从正太分布, k 取 2, 则标准不确定度 u_3 为:

$$u_3 = 0.000\ 0001/2 = 5 \times 10^{-6}.$$

探测器不均匀性对不确定度的影响不超过 3×10^{-5} , 假设服从均匀分布, k 取 $\sqrt{3}$, 标准不确定度为:

$$u_4 = 0.000\ 03/\sqrt{3} = 1.7 \times 10^{-5}.$$

(d) 信号采集引入的不确定度

本方法中采用美国 Data Translation 公司

DT9824 高精度同步采集模块,其一致性优于 1×10^{-5} , 用 B 类方法评定,假设服从正态分布, k 取 2, 则标准不确定度为:

$$u_5 = 0.000\ 01/2 = 5 \times 10^{-6}.$$

(e) 偏振方向与待测晶体 e 电矢量或 o 电矢量不平行引入的测量不确定度

采用马吕斯定律判断偏振方向与待测晶体 o 电矢量或 e 电矢量是否垂直/不平行,假设判断精度小于 0.1° , 由此引入的测量不确定度采用 B 类方法评定,则测量不确定度为:

$$u_6 = 1 - \cos^2 0.1^\circ = 3.0 \times 10^{-6}.$$

上述测量与各项不确定度分量不相关,因此可以获得透射率测量不确定度为:

$$u_T = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} = 2.41 \times 10^{-5}.$$

4.2 厚度测量引起的不确定度

厚度采用激光测厚仪测量,测量精度优于 2×10^{-4} cm。采用 B 类方法评定,假设服从均匀分布, k 取 $\sqrt{3}$, 则标准不确定度为:

$$u_L = 2 \times 10^{-4} / \sqrt{3} = 1.15 \times 10^{-4}.$$

4.3 反射率计算引入的不确定度

反射率计算引入的不确定度主要有折射率测量引入的不确定度和入射角测量引入的测量不确定度。晶体主轴折射率可通过高精度折射率测量设备测得,测量精度可优于 10^{-6} , 晶体 e 光折射率除与主轴折射率相关外还与晶体光轴与晶体表面夹角以及入射角度相关。晶体光轴与晶体表面夹角可通过 X 光衍射方法测量,测量精度可优于 0.01° , 入射角可通过高精度旋转台控制,得出的不确定度为 0.01° 。

综上所述,反射率的最大变化值为 7.4×10^{-6} , 假设服从均匀分布,则标准不确定度为:

$$u_R = 7.4 \times 10^{-6} / \sqrt{3} = 4.3 \times 10^{-6}.$$

吸收系数测量不确定度可通过公式(28)计算得到 $u_K = 3.51 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 。

5 比对验证

为了验证本文方法测量结果的准确性,将其与成熟的分光光度计的测量结果进行比较。但由于分光光度计测量精度较低,因此通过增加晶体厚度,以降低对分光光度计的精度要求。由于分光光度计无法调整方位角,因此选择测量一个开

关晶体元件的 o 光吸收系数。实验中分别采用 Lambda1050 分光光度计和本文提出的方法对一件尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 的开关晶体元件进行测量,测量结果如表 2 所示。

表 2 KDP 晶体吸收系数对比结果

Tab. 2 Comparison of absorption coefficients of KDP crystal

测量位置	Lambda1050 分光光度计 (cm^{-1})	本文方法 (cm^{-1})
1	0.060 19	0.060 55
2	0.061 07	0.060 98
3	0.061 61	0.061 55
4	0.060 79	0.061 42
5	0.060 88	0.061 11
6	0.061 23	0.061 15
平均值	0.060 962	0.061 12
平均值 偏差	1.65×10^{-4}	

参考文献:

- [1] 汪圣飞,安晨辉,张飞虎,等. 磷酸二氢钾晶体飞切过程中温度场的分布及其对切屑形貌的影响[J]. 光学精密工程,2016,24(8):1948-1955.
WANG SH F, AN CH H, ZHANG F H, *et al.*. Thermal field distribution in fly-cutting of KDP crystal and its influence on chip morphology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(8):1948-1955. (in Chinese)
- [2] 郭晓光,刘子源,郑桂林,等. KDP 晶体三倍频晶面微观力学行为及加工性能[J]. 光学精密工程,2016,24(2):398-405.
GUO X G, LIU Z Y, ZHENG G L, *et al.*. Micro-mechanical behavior and machining property for tripler plane of KDP crystal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(2):398-405. (in Chinese)
- [3] 张洋,李婷,袁晓东,等. KDP 晶体相位匹配角理论预测模型及其验证分析[J]. 物理学报,2015,64(2):024213.
ZHANG Y, LI T, YUAN X D, *et al.*. Theoretical model of phase-matching angles for KDP crystals and its verification analysis[J]. *Acta Phys. Sin.* 2015,64(2):024213. (in Chinese)
- [4] 张琦锋,侯士敏,张耿民,等. Ag-BaO 薄膜在电场作用下的可见-近红外波段光学吸收特性[J]. 物理学报,2001,50(3):561-565.
ZHANG Q F, HOU SH M, ZHANG G M, *et al.*.

备注:由于测量光斑大小不同,不同位置的测量结果不是一一对应测量得到的。

6 结 论

本文提出采用基于朗伯定律的小角度斜入射方法测量 KDP\DKDP 倍频晶体的吸收系数。建立了小入射角度下晶体多次透射的透射率和多次反射的反射率测量模型,推导了小角度入射下晶体 e 光折射率的迭代计算方法。通过上述间接量的测量可精确计算出 KDP\DKDP 倍频晶体的吸收系数。

本方法通过单点方式测量倍频晶体吸收系数,不受口径限制,可通过多点采样扫描的方式实现大口径倍频晶体吸收系数测量。

- Optical absorption of Ag-BaO thin film in the visible and near-infrared region with applied electric field [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(3): 561-565. (in Chinese)
- [5] WELSCH E, RISTAU D. Photothermal measurement on optical thin films [J]. *Applied Optics*, 1995,34(31):7239-7253.
- [6] 殷庆瑞,王通,钱梦禄. 光声光热技术及其应用 [M]. 北京:科学出版社,1991.
YIN Q R, WANG T, QIAN M L. *Photo-Acoustical Thermal Technologies and Applications* [M]. Beijing: Sciences Press, 1991. (in Chinese)
- [7] 沈华,张英聪,朱日宏. 基于光热位移原理的 KDP 晶体光吸收系数干涉测量方法的数学模型及结构参数优化 [J]. 红外与激光工程,2013,42(12):3353-3357.
SHEN H, ZHANG Y C, ZHU R H. Mathematical model and structure parameters optimization of KDP crystal optical absorption coefficient measurement with interferometry method based on photothermal displacement principle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013,42(12):3353-3357. (in Chinese)
- [8] BERND S, JONAS G, UWE L, *et al.*. Photo-thermal measurement of absorptance losses, temperature induced wavefront deformation and compaction in DUV-optics [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(25). 23026-23036.
- [9] 武因盛,李艺,陈万平,等. 光轴任意取向单轴晶体

的非正入射工作状态:非正交 Jones 矩阵 [J]. 光电
子激光, 1995,6(5):287-293.

WU Y SH, LI Y, CHEN W P, *et al.*. Oblique in-
cidence on uniaxial crystal with arbitrarily oriented
optical axis: Jones matrix with non-orthogonal ele-
ments[J]. *Optronics Lasers*, 1995,6(5):287-293.
(in Chinese)

- [10] 沈为民,邵中兴. 单轴晶体中光轴任意取向时寻常
光与非常光间的离散[J]. 光学学报,2002,22(6):
765-768.

SHEN W M, SHAO ZH X. Dispersion between

ordinary ray and extraordinary ray in uniaxial crys-
tals for any orientation of optical axis [J]. *Acta
Optica Sinica*, 2002, 22(6): 765-768. (in Chi-
nese)

- [11] 唐雄,姚兰芳. 非寻常光在单轴晶体薄膜中的反
射-透射研究[J]. 上海理工大学学报,2015,37
(1):61-66.

TANG X, YAO L F. Reflecting and refracting of
extraordinary beam in uniaxial crystal thin film[J].
*J. University of Shanghai for Science and Tech-
nology*, 2015,37(1):61-66. (in Chinese)

作者简介:



高 波(1983—),男,四川遂宁人,硕
士,副研究员,2008 年于南京理工大学
获得硕士学位,主要从事光学检测方面
的研究。E-mail: cowboytear @ hot-
mail.com



杨 斌(1969—),男,湖北武汉人,研究
员,1991 年于西安电子科技大学获得
学士学位,主要从事光学计量和光电测
试设备的研究开发工作。Email:
yangbin7871@aliyun.com