

旋转样品消光比的测试方法

常闪闪^{1,2}, 麻云凤^{1,2*}, 廖利芬¹, 程旺¹

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用琼斯矩阵,找到了消光比和应力双折射相位差的关系,利用旋转样品法测量了晶体的消光比,给出了表达式,并对误差进行了理论分析。使用功率不稳定性小于 0.2% 的光源、消光比高于 50 dB 的起偏器搭建了测试系统。测试系统适用于相位差在 $(\pi/2, \pi)$ 范围的待测样品,测试精度小于 -55 dB。对 1/2 波片进行测量,结果表明,其消光比为 -41.66 dB,综合误差小于 1%。

关键词 测量; 旋转样品法; 晶体消光比; 相位差

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.121202

Testing Method of Extinction Ratio Based on Rotating Sample

Chang Shanshan^{1,2}, Ma Yunfeng^{1,2*}, Liao Lifeng¹, Cheng Wang¹

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The relationship between the extinction ratio and the stress birefringence phase difference is identified based on a Jones matrix. The extinction ratio of a crystal is measured by the rotating sample method, its expression is also derived, and the errors are analyzed theoretically. A light source with power instability lower than 0.2% and a polarizer with an extinction ratio higher than 50 dB are used to build the test system. This test system is suitable for testing the samples with phase differences in the range of $(\pi/2, \pi)$, and the test accuracy is less than -55 dB. The measured extinction ratio of a 1/2 wave plate is -41.66 dB, and the comprehensive error is less than 1%.

Key words measurement; rotating sample method; extinction ratio of crystal; phase difference

OCIS codes 120.5410; 120.5050; 120.7000; 260.1180

1 引言

在偏振光学领域,消光比至少有 3 个方面的意义:1) 对于如偏振分光棱镜等产生线偏光的偏振器件,消光比定义为主透光透射比与主消光透射比的比值^[1],用于表征偏振器件获取线偏光的能力,常用的偏振器消光比测试方法有双镜检测法^[2]、高消光比测试方法^[3]、自动测试方法^[4]、双调制测试方法^[5]等。其中自动测试方法、高消光比测试方法、双调制测试方法具有高于 50 dB 的测试精度。2) 要求线偏光垂直样品光轴入射,由于样品具有一定厚度,因此出射光会产生寻常光(o 光)和非寻常光(e 光)的

相位差,偏振态改变,此时的消光比反映的是晶体内部应力双折射的大小^[6],相关的国标测试方法见 GB/T 11297.3—2002。3) 适用于线偏光沿晶体光轴入射的情况,此时光偏振态不改变,光矢量方向旋转一定角度,因此这个消光比可表征晶体的旋光性质^[7],国标测试方法见 GB/T 11297.12—2012。后两者均是针对晶体而言。

本文讨论第二类消光比,国标 GB/T 11297.3—2002 中将其定义为:将待测晶体置于一个正交偏光系统中,光束正入射样品,沿传播方向旋转样品,测量出透射光强最大值,转动检偏器成平行偏光系统,测量出透射光强值,两光强的比值即为消光比。主

收稿日期: 2018-11-13; 修回日期: 2019-01-02; 录用日期: 2019-01-21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1107305)

* E-mail: yunfeng39@aoe.ac.cn

要的测试思路有两类:一类是直接利用定义给出的正交偏光法进行测量,但直接测量难以取得较高的测试精度,文献[8-10]从提高光源稳定性、晶体和检偏器转角精度、信号采集智能化等方面改进了正交偏光法。格兰棱镜具有优越的消光性能,是常用的起偏器和检偏器。但格兰棱镜尤其是空气隙棱镜,在旋转过程中伴随着透过率的改变和消光性能的降低。有报道显示^[11],在光强测试法中格兰棱镜是引起误差的主要因素。上述方法在测试过程需要变换起偏器、检偏器的光轴方位角,因此都无法避免格兰棱镜引入的误差。另一类基于消光比是晶体内部应力双折射的反映,因此,如果能找出消光比和应力双折射的联系,就可以利用测应力双折射有关的方法来测量消光比。目前已报道的有单1/4波片法^[12],该方法是非光强测试方法,光源波动性对系统精度影响较小,但需要较严格的角度测量。本文提出一种旋转样品法,这种方法也是一种双折射相位差的测量方法,优点是测试过程中固定起偏器、检偏器光轴方位,因此可以避免格兰棱镜引入的误差,且对待

测样品转角精度要求不高。综上,基于旋转样品的消光比测试方法,引起误差的因素较少,理论上更易取得较高的测试精度。

2 基本原理

2.1 消光比和应力双折射相位差的关系

正交偏光法测试原理为:待测晶体置于一个正交偏光系统中,光束垂直待测样品光轴正入射样品,沿传播的方向旋转样品,测量出透射光强最大值,记为 I_{\perp} ;转动检偏器成平行偏光系统,测量出透射光强值,记为 I_{\parallel} ,则消光比可表示为

$$R_x = 10 \lg \frac{I_{\parallel}}{I_{\perp}}. \quad (1)$$

测试系统电矢量如图1所示,图1(a)中起偏器、检偏器光轴相互垂直构成正交偏光系统,起偏器光轴平行于 x 轴,样品光轴与 x 轴夹角为 θ ,光经过样品后产生的相位差为 δ ,检偏器光轴沿 y 轴,入射样品的线偏光沿 x 轴,检偏器出射的光矢量记为 \mathbf{E}_{\perp} ,写成矩阵形式为

$$\mathbf{E}_{\perp} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \exp(i\delta) & \frac{1}{2} \sin(2\theta) [1 - \exp(i\delta)] \\ \frac{1}{2} \sin(2\theta) [1 - \exp(i\delta)] & \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \exp(i\delta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$I_{\perp} = |\mathbf{E}_{\perp}|^2 = \frac{1}{2} \sin^2(2\theta) (1 - \cos \delta). \quad (3)$$

图1(b)对应为平行偏光系统,起偏器、检偏器的光轴相互平行构成平行偏光系统,同理,检偏器出

射的光矢量为

$$\mathbf{E}_{\parallel} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta \exp(i\delta) & \frac{1}{2} \sin(2\theta) [1 - \exp(i\delta)] \\ \frac{1}{2} \sin(2\theta) [1 - \exp(i\delta)] & \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \exp(i\delta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$I_{\parallel} = |\mathbf{E}_{\parallel}|^2 = 1 - \frac{1}{2} \sin^2(2\theta) (1 - \cos \delta). \quad (5)$$

当 $\theta = \pi/4$ 时, I_{\perp} 取极大值,有

$$I_{\perp} \Big|_{\frac{\pi}{4}} = \frac{1}{2} (1 - \cos \delta). \quad (6)$$

I_{\parallel} 取极小值,有

$$I_{\parallel} \Big|_{\frac{\pi}{4}} = 1 - \frac{1}{2} (1 - \cos \delta). \quad (7)$$

则晶体消光比可写为

$$R_x = 10 \lg \frac{1 + \cos \delta}{1 - \cos \delta}. \quad (8)$$

(8)式为晶体消光比与相位差的函数,周期为 2π 且关于 $\delta = \pi$ 对称,当 $0 < \delta < \pi/2$ 时, $R_x > 0$ 且逐渐减小;当 $\pi/2 < \delta < \pi$ 时, $R_x < 0$ 且 $|R_x|$ 逐渐增大。

2.2 旋转样品法

2.2.1 基本原理

旋转样品法的相位差 δ 表示为^[13]

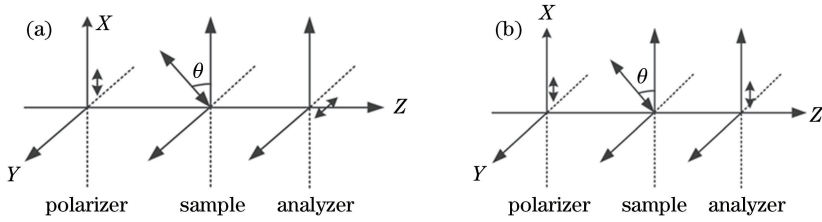


图1 测试系统电矢量图。(a)正交偏振;(b)平行偏振

Fig. 1 Configuration of electric vector for test system. (a) Orthogonal polarization; (b) parallel polarization

$$\delta = 2\arcsin \sqrt{\frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min} \tan^2 \phi}}, \quad (9)$$

式中: I_{\max} 、 I_{\min} 为样品旋转过程中光强的最大值和最小值; ϕ 为检偏器与起偏器光轴的夹角。理论上 ϕ 可以为任意角度。令 $A = I_{\min}/I_{\max}$,对(9)式进行微分,可得

$$d\delta = -2 \frac{\sqrt{A(1-A)} \tan \phi}{1 + A \tan^2 \phi \cos \phi} d\phi. \quad (10)$$

由(10)式可以看出, ϕ 等于0时测试系统即为平行偏光系统,检偏器方位角的误差对测试结果无影响。因此,对(5)式分析可知,当 $\theta = 0 + n(\pi/2)$ 时, n 为整数, I_{\parallel} 取极大值,可得

$$I_{\max} = 1. \quad (11)$$

当 $\theta = (\pi/4) + n(\pi/2)$ 时, n 为整数, I_{\parallel} 取极小值,可表示为

$$I_{\min} = 1 - \frac{1}{2}(1 - \cos \delta). \quad (12)$$

将(11)、(12)式代入(8)式,可得

$$R_X = 10 \lg \frac{I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}. \quad (13)$$

2.2.2 误差分析

同正交偏光法相比,旋转样品法引起误差的因素较少,主要包括以下几点:1)待测样品旋转角度为光强极值,转角误差对测量结果无影响;2)检偏器方位角 $\phi = 0$ 为(9)式极值,检偏器方位角误差对测量结果无影响;3) I_{\max} 、 I_{\min} 偏振方向相同,检偏器对同一偏振方向的线偏光的透射率相同,因此检偏器的透光性质对测量结果无影响。

误差因素主要来自以下方面。

1) 光源波动带来的误差

定义光源功率波动为

$$n_1 = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\min}}, \quad (14)$$

式中: P_{\max} 为光源功率最大值; P_{\min} 为光源功率最小值。由(13)式可得

$$R'_X = 10 \lg \frac{I_{\min}}{I_{\max}(1 \pm n_1) - I_{\min}}, \quad (15)$$

式中: R'_X 为样品消光比测量值。定义光源波动引起的误差 S_1 为

$$S_1 = \frac{R'_X - R_X}{R_X} =$$

$$\frac{\lg \{ (I_{\max} - I_{\min}) / [I_{\max}(1 \pm n_1) - I_{\min}] \}}{\lg [I_{\min} / (I_{\max} - I_{\min})]}. \quad (16)$$

已知样品相位差 δ 的范围为 $0 \sim \pi$,则可以得到 I_{\max} 、 I_{\min} 、 R_X 、 S_1 的对应值。依次令 $n_1 = 0.01\%$ 、 0.1% 、 1% ,以 R_X 为横轴, S_1 为纵轴,得到不同 n_1 下光源的不稳定性如图2所示。由图可见,相同的测试精度下,光源波动 n_1 越大,误差 S_1 越大;光源稳定性越好,旋转样品法的测试精度越高,测试范围越大;光源稳定性一定时,在横轴的负半轴 $|R_X|$ 越大 $|S_1|$ 越小,在横轴的正半轴 S_1 先随 R_X 增大而减小后随 R_X 增大而增大。光源波动对系统的测试精度影响较大。

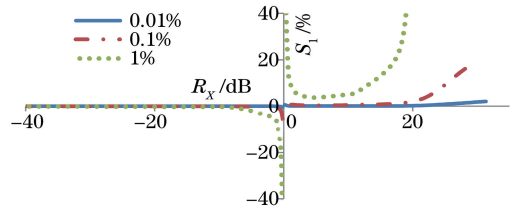

 图2 不同 n_1 下光源的不稳定性

 Fig. 2 Instability of light source under different n_1

2) 起偏器的消光性能带来的误差

设起偏器消光比为 $a:b$,起偏器消光引起的误差为 S_2 ,则有

$$S_2 = \frac{R_X |_{(a,b)} - R_X |_{(a=1,b=0)}}{R_X |_{(a=1,b=0)}}, \quad (17)$$

$$S_2 =$$

$$\frac{\lg \{ \{ [(a^2 + b^2) / (a^2 - b^2)] + \cos \delta \} / (1 + \cos \delta) \}}{\lg [(1 + \cos \delta) / (1 - \cos \delta)]}. \quad (18)$$

依次令 $a:b = 10^4:1$ 、 $10^{4.5}:1$ 、 $10^5:1$,以样品消光比 R_X 为横轴, S_2 为纵轴,绘制不同消光比下的起偏器消光曲线如图3所示。由图可见,起偏器消

光比越大, $|S_2|$ 越小; 当起偏器的消光比一定时, 在横轴的负半轴, $|R_x|$ 越大, $|S_2|$ 越小, 在横轴的正半轴, S_2 很小, 且受 R_x 的影响较小。

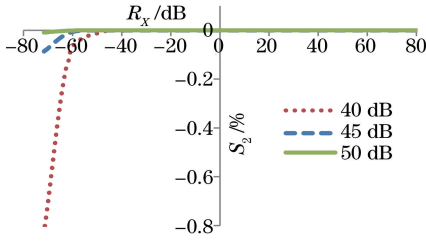


图3 不同消光比下的起偏器消光

Fig. 3 Extinction of polarizer under different extinction ratios

3) 样品的不均匀吸收带来的误差

定义 n_2 为吸收的不均匀, 可表示为

$$n_2 = \frac{I_{\theta=0^\circ} - I_{\theta=45^\circ}}{I_{\theta=45^\circ}}, \quad (19)$$

式中: $I_{\theta=0^\circ}$ 、 $I_{\theta=45^\circ}$ 为待测样品光轴与起偏器光轴夹角为 0° 、 45° 时, 样品出射的光功率 (不经检偏器, 直接测量), 此时, 样品消光比测量值为

$$R'_x = 10 \lg \frac{I_{\min}}{I_{\max}(1 \pm n_2) - I_{\min}}. \quad (20)$$

(20) 式和 (15) 式具有相同的形式, 表明样品吸收不均匀和光源波动引起的误差具有相同的表现形式, 因此不再进行讨论。

3 测量实验与结果

搭建实验装置如图 4 所示, 光源为波长为 1064 nm 的连续固体激光器, 功率不稳定性 $n_1 < 0.2\%$ 。起偏器、检偏器为两块天然冰洲石加工的空气隙棱镜, 组成平行偏光系统, 单块棱镜消光比高于

50 dB。系统选用的样品为一片 1/2 波片 (波长为 1064 nm), 消光比为负值。

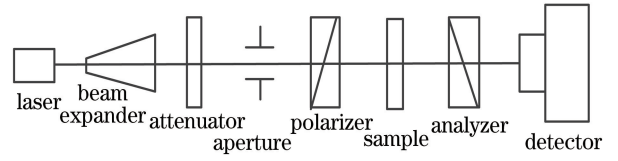


图4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

测试中, 首先打开激光器, 使其达到开机稳定; 接着, 不加检偏器, 旋转待测样品, 根据 (19) 式的定义测量出 n_2 ; 加检偏器, 旋转样品, 光强出现 $\pi/2$ 的周期变化, 当待测样品光轴与起偏器夹角为 0° 时, 得到光强最大值 I_{\max} , 当待测样品光轴与起偏器夹角为 $\pi/4$ 时, 得到光强最小值 I_{\min} , 将 I_{\max} 、 I_{\min} 代入 (13) 式, 即可计算出待测样品消光比。

重复测量 10 组数据, 得到测量结果如表 1 所示。由表 1 计算消光比可得

$$R_x = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{xj} = -41.66 \text{ dB}, \quad (21)$$

式中: j 为测量次数。已知 $n_1 = 0.2\%$, 由 (16) 式, 光源波动引起的误差为

$$S_1 = -0.9\%. \quad (22)$$

已知起偏器消光比 $a:b = 10^5:1$, 则由 (18) 式可得起偏器消光引起的误差为

$$S_2 = -1.53 \times 10^{-5}\%. \quad (23)$$

此外, 实验中测得 $n_2 = 0$, 则样品的不均匀吸收带来的误差为

$$S_3 = 0. \quad (24)$$

综上, 对 1/2 波片进行测量, 得到其消光比为 $R_x = -41.66 \text{ dB}$, 综合误差小于 1%。

表1 测量结果

Table 1 Testing results

Rotating sample	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R_x/dB	-41.48	-41.60	-41.73	-41.73	-41.47	-41.47	-41.73	-41.86	-41.73	-41.86

4 结 论

当入射光垂直样品光轴入射时, 消光比反映晶体双折射的大小。本研究提出的基于旋转样品的消光比测试方法和正交偏光法同属于光强测量法, 两种测试方法都具有易于实现计算机的控制, 自动数据采集处理, 测试速度快的优点, 因此对正交偏光测量的改进措施几乎都可以应用在旋转样品法上。不同的是, 正交偏光法需要旋转样品且改变检偏器、起偏器的方位角, 旋转样品法固定检偏器、起偏器的方

位角。读取样品旋转过程中光强的最大值和最小值时, 旋转样品法操作简单, 引入的误差因素少。另外, 光源稳定性是影响光强法测量精度的主要因素, 旋转样品法的测试周期为 $\pi/4$, 短于正交偏光法的周期为 $\pi/2$, 这在一定程度上表明旋转样品法受光源稳定性的影响小于正交偏光法。

由误差分析可知, 制约旋转样品法测试精度的因素有光源不稳定性、起偏器消光比、样品吸收的不均匀性。理想条件下, 旋转样品法适用于进行 $0 < \delta < \pi$ 的双折射晶体消光比的测试。实验中, 使用功

率不稳定性小于 0.2% 的光源、消光比高于 50 dB 的起偏器,搭建了测试系统。分析易知,光源波动是影响系统精度和测试范围的重要因素,因此,搭建的测试系统更适用于相位差 δ 在 $(\pi/2, \pi)$ 范围的待测样品,测试精度小于 -55 dB。

参 考 文 献

- [1] Bass M. Handbook of optics [M]. 3rd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 2010: 393.
- [2] Liao Y B. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003: 233-236.
廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 233-236.
- [3] Li G H, Zhao M S, Wu F Q, *et al.* Study of a measurement system for high extinction ratio [J]. Chinese Journal of Lasers, 1990, 17(1): 51-53.
李国华, 赵明山, 吴福全, 等. 高消光比测试系统的研究 [J]. 中国激光, 1990, 17(1): 51-53.
- [4] Wang Z B, Li G H, Lu S L, *et al.* Experimental study of the extinction ratio auto-measuring system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2000, 27(5): 415-418.
王召兵, 李国华, 陆书龙, 等. 消光比自动测试系统的实验研究 [J]. 中国激光, 2000, 27(5): 415-418.
- [5] Li C Y, Wu Y M, Gao L M, *et al.* Measurement of extinction ratio by dual modulation [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(3): 582-587.
李春艳, 吴易明, 高立民, 等. 采用双调制方式测量消光比参数 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 582-587.
- [6] Southgate P D, Hall D S. Anomalously high nonlinear optical effects in *m*-nitroaniline [J]. Applied Physics Letters, 1971, 18(10): 456-458.
- [7] Yu D Y, Tan H Y. Engineering optics [M]. 3rd ed. Beijing: Machinery Industry Press, 2013: 510.
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 第三版. 北京: 机械工业出版社, 2013: 510.
- [8] Chen X, Tong M M, Xing J C. A research on testing of optic-crystal extinction-ratio [J]. Infrared Technology, 2006, 28(7): 388-390.
陈曦, 佟明明, 邢冀川. 光学晶体消光比测试研究 [J]. 红外技术, 2006, 28(7): 388-390.
- [9] Liu B Y, Guo X Y, Zhang Y H, *et al.* Design of testing system of the extinction ratio of laser crystal based on LabVIEW [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2010, 29(6): 45-48.
刘宝元, 郭小云, 张玉虹, 等. 基于 LabVIEW 的激光晶体消光比测试系统设计 [J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(6): 45-48.
- [10] Liu B Y, Cui X H, Chen X. Measuring of extinction ratio of laser crystal [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(5): 85-87.
刘宝元, 崔小虹, 陈曦. 激光晶体消光比测试方法研究 [J]. 光学与光电技术, 2006, 4(5): 85-87.
- [11] Zhang Z Y, Deng Y Y, Wang D G, *et al.* Comparison and analysis of several methods for measuring waveplate retardation [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(11): 1678-1685.
张志勇, 邓元勇, 王东光, 等. 几种波片位相延迟测量方法的比较 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1678-1685.
- [12] Liu X Z, Li G P, Yang Z J, *et al.* Study of the measurement of crystal extinction ratio by the use of a single 1/4 wave plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(7): 599-602.
刘训章, 黎高平, 杨照金, 等. 用单 1/4 波片法测量晶体消光比的研究 [J]. 中国激光, 1999, 26(7): 599-602.
- [13] Sun Y Z, Wang D G, Zhang H Q, *et al.* Method and precision analysis for measuring retardation of infrared waveplate [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 685-688.
孙英姿, 王东光, 张洪起, 等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析 [J]. 光学学报, 2006, 26(5): 685-688.