

非线性拟合消光比测量方法

李小龙¹ 李磊磊² 何川¹ 张旭升¹

¹北京理工大学精密光电测试仪器及技术北京市重点实验室, 北京 100081

²北京理工大学自动化学院, 北京 100081

摘要 为克服光电探测器动态范围不足,难以在同一条件下精确测量线偏振器的最小光强透射率及最大光强透射率的问题,提出一种基于非线性拟合的消光比测量方法并搭建了相应的测量装置。该方法只需在限定的角度范围内旋转被测线偏振器并采集对应的光强变化,根据建立的数学模型,进行非线性余弦拟合数据处理,进而解算出消光比。实验结果表明,该方法的测量精度可达 10^{-5} 量级,并具有较好的重复性,验证了提出方法的有效性。

关键词 物理光学; 偏振光学; 线偏振器; 消光比; 非线性拟合

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.022602

Method for Extinction Ratio Measurement Using Nonlinear Fitting

Li Xiaolong¹ Li Leilei² He Chuan¹ Zhang Xusheng¹

¹Beijing Key Laboratory on Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

²School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract To overcome the shortage on dynamic range of the photoelectric detector, and the difficulties on accurate measurement of both the minimum and maximum intensity transmittances of the linear polarizer under the same condition, a method for extinction ratio measurement based on nonlinear fitting is proposed. The experimental system is setup. The measured polarizer is rotated only within a limited angular range to detect the transmitting intensities. Then, based on the principle of the model, the nonlinear fitting is applied on the obtained intensity data to calculate the extinction ratio. The experimental results show that the measured accuracy of 10^{-5} level can be achieved. Also, good repeatability and effectiveness of the proposed method are verified.

Key words physical optics; polarization; linear polarizer; extinction ratio; nonlinear fitting

OCIS codes 260.5430; 120.5410; 120.4640

1 引言

消光比是反映线偏振器性能优劣的主要指标,消光比的精确测定对偏光技术有着十分重要的意义。现有的消光比测量方法有双光路法、正交偏光法、双棱镜法、偏振干涉法、双调制法等^[1-7],这些方法存在系统较为复杂、需使用衰减器或频繁调节光路等不足,从而引入较多误差。

按照线偏振器消光比的理论定义,可通过测量线偏振器对入射线偏振光的最小光强透射率和最大光强透射率来实现消光比的测定。但实际中,对于一个好的线偏振器,最小光强透射率与最大光强透射率之间的数值差异极大,往往超出光电探测器的线性响应范围或动态范围,两者难以由同一探测器在相同状态下精确测量得到。针对以上问题,本文提出一种基于非线性拟合的测量消光比方法,通过限定线偏振器旋转角度范围从而减小光强变化,并采用非线性拟合求解最大出射光强与最小出射光强,进而解算出消光比。该方法具有结构简单、操作简便、测量精度较高等特点。

收稿日期: 2015-08-20; 收到修改稿日期: 2015-09-23; 网络出版日期: 2016-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(61405011)、总装预研基金(9140A09050313BQ01127)、北京理工大学基础研究基金(20140442003)

作者简介: 李小龙(1991—),男,硕士研究生,主要从事偏光测量及仪器方面的研究。E-mail: 1426626285@qq.com

导师简介: 张旭升(1978—),男,博士,副教授,主要从事光电仪器科学与技术方面的研究。

E-mail: zhangxs@bit.edu.cn(通信联系人)

2 测量原理及数学模型

线偏振器消光比 ε 定义为

$$\varepsilon = \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}}, \quad (1)$$

式中 T_{\parallel} 表示振动方向平行于线偏振器主方向的线偏振光的光强透射率, T_{\perp} 表示振动方向垂直于线偏振器主方向的线偏振光的光强透射率。一般地, $T_{\parallel} \gg T_{\perp}$, 对于高品质的线偏振器, 两者相差可达 $10^5 \sim 10^7$ 数量级。要精确测量消光比, 必然要求光电探测电路有足够的灵敏度去精确测量 T_{\perp} , 又要求其在测 T_{\parallel} 时不能饱和失真, 这给光电探测系统带来了很大的困难。因此人们提出了采用衰减器的方法来解决上述问题^[2,4-6], 但这又增加了测量光路的复杂性, 引入了更多的误差源。为此, 本文提出如下基于非线性拟合算法的测量方案。

测量原理如图 1 所示。光源发出的光束由斩波器进行调制, 并通过高品质起偏器 P1 形成线偏振光, 再经过待测线偏振器 P2 到达光电探测器。

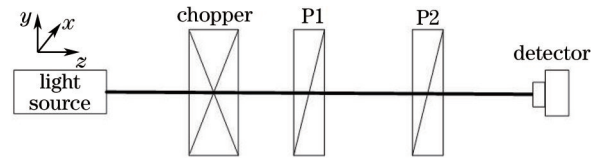


图 1 测量系统原理图

Fig.1 Principle of the measurement

假定 P1 为理想器件, 其主方向在参考坐标系 x 轴方向, 被测线偏振器 P2 主方向与 x 的夹角为 α 。光束经 P1 后转化为线偏振光, 其偏振态用琼斯矢量描述为

$$\mathbf{E} = E_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 E_0 为光波复振幅。P2 的偏光特性可用琼斯矩阵 \mathbf{J} ^[8] 描述:

$$\mathbf{J} = t_{\parallel} \begin{pmatrix} \cos^2 \alpha + \sqrt{\varepsilon} \sin^2 \alpha & (1 - \sqrt{\varepsilon}) \sin \alpha \cos \alpha \\ (1 - \sqrt{\varepsilon}) \sin \alpha \cos \alpha & \sin^2 \alpha + \sqrt{\varepsilon} \cos^2 \alpha \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中 t_{\parallel} 表示线偏振器主方向上的振幅透射率, $\varepsilon = (t_{\perp}/t_{\parallel})^2$, 其中 t_{\perp} 为垂直于线偏振器主方向上的振幅透射率。P2 出射光的琼斯矢量 $\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{J}\mathbf{E}$, 因此探测器接收到的光强为

$$I(\alpha) = t_{\parallel}^2 I_0 \left[(\cos^2 \alpha + \sqrt{\varepsilon} \sin^2 \alpha)^2 + (1 - \sqrt{\varepsilon})^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \right] = \frac{1}{2} t_{\parallel}^2 I_0 [(1 + \varepsilon) + (1 - \varepsilon) \cos 2\alpha], \quad (4)$$

式中 $I_0 = |E_0|^2$ 。令 $a = \frac{1}{2} t_{\parallel}^2 I_0 (1 + \varepsilon)$, $b = \frac{1}{2} t_{\parallel}^2 I_0 (1 - \varepsilon)$, 则(4)式简化为

$$I(\alpha) = a + b \cos 2\alpha, \quad (5)$$

在光源稳定的条件下, a 、 b 均为常数。于是

$$\varepsilon = \frac{a - b}{a + b}. \quad (6)$$

由此可知, 只需测得 a 、 b 的值, 就能解算出消光比。根据前面的论述, 因 $(a - b) \ll (a + b)$, 事实上直接精确测量 a 、 b 是有很大难度的。注意到(5)式, 若旋转 P2 改变 α 角, 探测器接收到的将是余弦光强信号。利用这个理论规律, 可通过测量 α 在某个角度范围内的光强值 $I(\alpha)$, 并采用非线性余弦拟合法来间接确定 a 、 b 的值。为此, 设 α 的起始角度为 α_0 , 增量为 δ_a , 将(5)式改写为

$$I_n = a + b \cos(2\alpha_0 + 2n\delta_a), \quad n = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (7)$$

式中 n 为测量序数, N 为实验数据个数, a 、 b 、 α_0 为待拟合参数。以(7)式为拟合函数, 由 N 组实验数据进行非线性最小二乘余弦拟合, 进而可解算出消光比 ε 。

3 实验与结果

实验装置如图 2 所示。原理验证实验所用光源为 532 nm 半导体激光器, 其强度稳定性优于 1% /h; 准直

光束由 THORLABSMC2000 光学斩波器进行调制;P1 为高性能格兰-汤普逊偏光棱镜,其消光比优于 10^{-6} ; A1、A2 为光阑,用以消除杂散光影响,DP 为退偏组件;实验中待测线偏振器 P2 为二向色性聚乙烯醇偏振片。待测样品 P2 安装在电控转台上,由软件控制转台精确旋转。所用探测器为普通硅基光电放大探测器,其模拟输出电压信号由 16 bit 数据采集器数字化后传输给计算机处理。

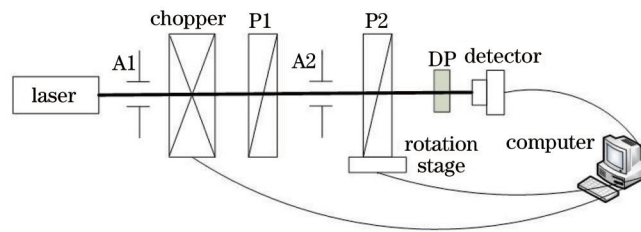


图2 测量装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of measurement system

为验证原理方法及实验装置的有效性,对三种不同型号规格的样品进行了多次重复检测,同时与曲阜师范大学激光所的检测结果做了比对。为减小环境杂光干扰,原理验证实验在暗室环境中进行。首先由测控软件驱动电控转台将 P2 自动调整到消光位置,并以 0.1° 的角间距单方向扫描采样,采样范围为 5° ,测量数据如表 1 所示,表中也给出了曲阜师大激光所的测量数据。其中某次测量(2#样品第 1 次)的原始数据及拟合曲线如图 3 所示, a 、 b 、 α_0 的拟合值分别为 61.8677° 、 61.8573° 、 90.0047° 。由实验数据可见,非线性余弦拟合法的测量重复性良好,与曲阜师大的测量数据相比具有较好的一致性。

表 1 实验测量数据

Table 1 Experimental test data

Sample	Qufu	1 st test	2 nd test	3 rd test	Average
1#	1.892×10^{-4}	1.61×10^{-4}	1.59×10^{-4}	1.63×10^{-4}	1.61×10^{-4}
2#	6.830×10^{-5}	8.42×10^{-5}	8.34×10^{-5}	8.22×10^{-5}	8.33×10^{-5}
3#	7.367×10^{-5}	7.50×10^{-5}	7.48×10^{-5}	7.31×10^{-5}	7.43×10^{-5}

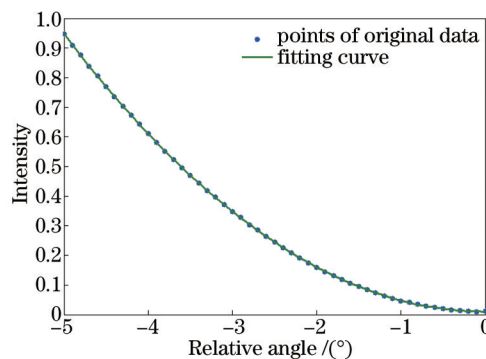


图3 原始数据点与拟合曲线图

Fig.3 Original data and the fitting curve

以上实验是从消光位置开始进行扫描测量的,为进一步考查实验拟合效果,给起始角度 α_0 人为引入一个小的偏离量(即偏离消光位置)。实验方法为:由测控软件将 P2 自动调整到消光位置后再偏离一定的角度,并以 0.2° 的角间距单方向扫描采样,采样范围为 10° ,实验数据如表 2 所示。表中的初始角度为扫描采样的起始角度,其偏离消光角度(90°)一个小的偏离量,表中给出了 a 、 b 、 α_0 的拟合值及消光比测量值。图 4 给出了 2#样品的采样原始数据及其拟合曲线。从表中数据可看出,拟合出的初始角度 α_0 与预先设定的扫

表 2 起始位置偏离消光的实验测量数据

Table 2 Experimental test data with initial angular deviation

Sample	Initial angle	a	b	α_0	ε
1#	91.5°	84.8390	84.8104	91.5089°	1.68×10^{-4}
2#	92°	62.2519	62.2416	91.9824°	8.28×10^{-5}
3#	91.8°	67.8939	67.8839	91.7894°	7.41×10^{-5}

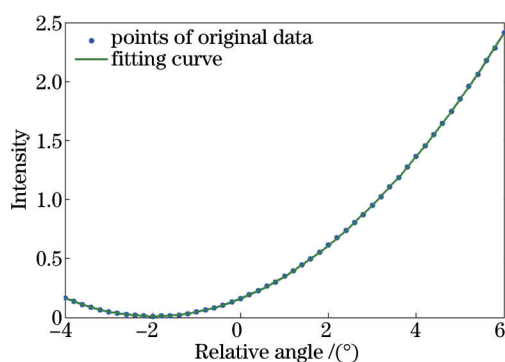


图4 起始位置偏离消光的实验原始数据与拟合曲线图

Fig.4 Original data and the fitting curve with initial angular deviation

描起始角一致,其微小差异应是由消光位置定位误差、转台旋转误差等引起的。从表中数据还可看出,当扫描起始角偏离消光位置一个小角度的情况下,消光比的测量结果基本不受影响。

上述实验中, a 、 b 、 α_0 采用的拟合初始值均分别为 1000、1000、 90° 。大量实验发现,本文所提方法对于拟合初始值的选取要求较为宽松,拟合算法的收敛性很好。拟合初始值的选取,可根据实验物理模型来确定。考虑到按(1)式定义的消光比为一个很小的量,因此 a 、 b 值相近,其初始值可根据实验信号大小来大致选取。而消光位置对应于式(5)中的 $\alpha = 90^\circ$,故本实验中 α_0 的拟合初始值选为 90° 。对比曲阜师大激光所的测试结果,虽然具体数值上还存在的少量差异,但考虑到被测点差异、测量原理不同、环境及实验条件等的差异以及微小量值消光比的测量精度,上述对比误差应在合理范围之内。此外,实验中消光位置应包含于扫描采样的角度范围内,这对确保本方法的测量精度及重复性很重要。从实验结果看,本实验装置的测量精度已能达到 10^{-5} 量级。若改善实验条件,例如采用高灵敏度光电倍增管探测微弱信号、采取锁相放大相敏检波技术、施加光源漂移修正技术等,有望进一步提高测量精度。

4 结 论

提出了一种基于非线性余弦拟合原理测量线偏振器消光比的方法,并通过对比实验验证了该原理方法的准确性和可行性。实验结果表明:非线性余弦拟合测量方法的测量重复性较好,实验结果与曲阜师大的测量结果吻合,测量精度达 10^{-5} 量级;若消光位置包含于扫描采样范围内,即使测量起始角偏离消光位置一个角度,消光比的测量结果也基本不会受影响,因此无需精确确定被测线偏振器的消光位置即可进行测量,拟合结果还能准确给出消光位置对应的角度值;非线性余弦拟合方法的收敛性很好,对拟合初始值选取不严格。若进一步改善实验装置的技术条件,该方法的测量精度还能获得提高。非线性余弦拟合测量方法具有结构简单、操作方便、精度和重复性较好等特点,对线偏振器件的性能检测应用具有参考意义。

参 考 文 献

- 1 Cheng Guanyao, Li Guohua. Study of an automatic measurement system for extinction ratio in visible spectrum[J]. Journal of Qufu Normal University, 2005, 31(4): 61-64.
程冠晓, 李国华. 宽光谱消光比智能化测试系统的实验研究[J]. 曲阜师范大学学报, 2005, 31(4): 61-64.
- 2 Li Guohua, Zhao Mingshan, Wu Fuquan, *et al.*. Study of a measurement system for high extinction ratio[J]. Chinese J Lasers, 1990, 17(1): 51-55.
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): 51-55.
- 3 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003:233-238.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 233-238.
- 4 Wang Zhaobing, Li Guohua, Lu Shulong, *et al.*. Experimental study of the extinction ratio auto-measuring system[J]. Chinese J 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 Liu Guiqin, Li Guohua. The analysis of the system error in the automatics extinction light ratio measure system[J]. Journal of Qufu Normal University: Natural Science Edition, 2004, 30(4): 61-64.
刘贵勤, 李国华. 消光比自动测试系统的系统误差分析[J]. 曲阜师范大学学报:自然科学版, 2004, 30(4): 61-64.

- 6 Li Chunyan, Wu Yimin, Gao Liming, *et al.*. Measurement of extinction ratio by dual modulation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(3): 582-587.
李春燕, 吴易明, 高立民, 等. 采用双调制式测量消光比参数[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 582-587.
- 7 Huang Jianyu, Ji Jiarong. Measurement of extinction ratio of polarizer using interference method of polarization[J]. *Applied Laser*, 1996, 16(6): 267-268, 276.
黄建余, 季家熔. 偏振干涉法用于偏振器消光比的测量[J]. *应用激光*, 1996, 16(6): 267-268, 276.
- 8 Dennis H Goldstein, *Polarized Light*[M]. 3rd edition. Boca Raton: CRC Press, 2011.

栏目编辑: 史 敏