

文章编号: 1001-3806(2006)02-0161-04

## 相关检测法宽光谱消光比智能化测试系统

程冠晓, 李国华\*, 彭捍东, 郝殿中

(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

摘要: 设计了一套基于相关检测原理的高消光比智能化测试系统。该系统把单色仪、数字锁相放大器和计算机等有机组合, 取代了原系统由扫描仪提取数据的方法, 完成了数据采集和处理的智能化, 从而提高了测试速度和测试精度, 实现了可见光区消光比的精确自动测量, 而且可以测得近似的消光光谱, 克服了只对单一波长进行消光比测量的缺点。

关键词: 仪器测量与计量; 消光比; 消光光谱; 相关检测; 偏光器件

中图分类号: O432.2 文献标识码: A

### An automatic measurement system for extinction ratio in visible spectrum based on correlation detection principle

CHENG Guan-xiao, LI Guo-hua, PENG Han-dong, HAO Dian-zhong

(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract** According to the principle of correlation detection, an automatic measurement system for extinction ratio of polarizer composed of monochromator and DSP lock-in amplifier and computer is designed not only to eliminate the influence of drift of intensity of light source on the measurement accuracy, but also to intelligently control the course of data acquisition and processing and obtain accurate extinction ratio at any wavelength in a broad band as well as approximate extinction spectrum.

**Key words** instrumentation measurement and metrology; extinction ratio; extinction spectrum; correlation detection; polarizer

## 引 言

消光比是晶体材料和偏光器件的主要光学参数之一, 消光比测量的精确程度将影响到利用偏光器件对各种光辐射的偏振性质进行测量和鉴别的检测精度, 以及利用偏光器件对其它具有偏光变换性质的光学器件和仪器系统的偏振响应的检测和分析。随着激光偏光技术的不断发展, 偏光器件日益广泛地应用在光纤通信、偏光导航、光调制、光电检测以及光传感等技术领域。因此, 偏光器件消光比的精确测定对于现代化信息技术的发展有着十分重要的意义。

消光比弱光信号检测系统中, 光源起伏对精密测量的影响不容忽视。为了消除光源波动影响, 可以采用单个锁相放大器的源补偿双通道测光法和采用两个锁相放大器的双频双光束测光法等<sup>[1, 2]</sup>。传统的消光比测量方法有双镜测试法<sup>[3]</sup>和高消光比测试法<sup>[4]</sup>。在高消光比测量系统的基础上, 作者设计了一套基于相关检测原理的由单色仪、数字锁相放大器和计算机联合使用的消光比智能化测试系统: 采用双频双光路

分光单探测器接收锁相放大器分离信号比对法进行源补偿测量<sup>[5]</sup>, 克服了光源光强漂移所带来的影响; 采用单色仪得到了待测件在可见光区的消光光谱特性; 采用灵敏度较高的光电倍增管和数字锁相放大器探测微弱信号, 提高了输出信噪比; 采用计算机控制测试过程和数据采集过程, 根据最小二乘法原理编程分析处理实验数据, 实现了较高灵敏度的消光比智能化测试<sup>[6]</sup>。

## 1 测试原理

设偏光器的入射光强、主消光方向和主透射方向的透射光强分别为  $I_i$ ,  $I_{min}$ ,  $I_{max}$ , 则得偏光器的主消光方向的透射比:

$$T_{min} = I_{min} / I_i \quad (1)$$

偏光器的主透射方向的透射比:

$$T_{max} = I_{max} / I_i \quad (2)$$

偏光器的消光比为:

$$\rho = I_{min} / I_{max} \quad (3)$$

或者定义偏光器的消光比为:

$$\rho = T_{min} / T_{max} \quad (4)$$

根据(4)式, 采用相关检测技术由计算机对采集到的数据进行数据处理, 可得到待测偏光器的消光比。

相关检测技术是通过求取相关函数, 来了解原函

作者简介: 程冠晓(1977-), 男, 博士研究生, 现主要从事激光偏光测试技术方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: gh163169.net

收稿日期: 2004-12-20 收到修改稿日期: 2005-02-28

数的技术,其理论依据是相关函数的数学性质。设  $s(t)$  为待测信号,  $n(t)$  为噪声信号,  $r(t)$  为参考信号, 则混有噪声的输入信号  $x(t) = s(t) + n(t)$ 。输入信号与参考信号的互相关函数为:

$$R_{xr}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(\xi) r^*(\xi - t) d\xi =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} [s(\xi) + n(\xi)] r^*(\xi - t) d\xi =$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(\xi) r^*(\xi - t) d\xi + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} n(\xi) \times$$

$$r^*(\xi - t) d\xi = R_{sr}(t) + R_{nr}(t) \quad (5)$$

式中,  $R_{sr}(t)$  为待测信号与参考信号的互相关函数,  $R_{nr}(t)$  为噪声和参考信号的互相关函数。因为噪声和信号不相关, 所以  $R_{nr}(t) = 0$ 。因此得到  $R_{xr}(t) = R_{sr}(t)$ , 即输入信号与参考信号的互相关函数只是待测信号与参考信号的互相关函数, 从而滤除噪声干扰。

理论上已证明, 当信号的频率和相位已知, 采用相关检测技术能使输出信噪比达到最大<sup>[7]</sup>。锁相放大器是以相关检测技术为基础, 利用参考信号频率与输入信号频率相关, 与噪声频率不相关, 从而从噪声中提取有用信号。锁相放大器主要由信号通道、参考通道、相关器 3 部分组成。相关器是锁相放大器的核心部分, 它由相敏检波器与低通滤波器组成。相敏检波器是一个乘法器, 为了便于说明相敏检波原理, 设输入信号是一个频率为  $\omega_i$  相位为  $\phi_i$  振幅为  $V_i$  的正弦波:

$$v_i = V_i \sin(\omega_i t + \phi_i) \quad (6)$$

参考信号是一个频率为  $\omega_r$  相位为  $\phi_r$  的单位正弦波:

$$v_r = \sin(\omega_r t + \phi_r) \quad (7)$$

$v_i$  和  $v_r$  通过乘法器运算后:

$$v_i v_r = \frac{V_i}{2} \{ \cos[(\omega_i - \omega_r)t + \phi_i - \phi_r] -$$

$$\cos[(\omega_i + \omega_r)t + \phi_i + \phi_r] \} \quad (8)$$

当  $\omega_i = \omega_r$ , 差频分量  $\omega_i - \omega_r = 0$  然后经过低通滤波器后, 和频分量  $\omega_i + \omega_r$  被滤掉, 得到直流输出电压信号:

$$V_o = \frac{V_i}{2} \cos(\phi_i - \phi_r) = \frac{V_i}{2} \cos\Delta\phi \quad (9)$$

由此可知: 锁相放大器的输出直流电压  $V_o$  正比于输入信号的幅值  $V_i$ , 且与相位差  $\Delta\phi$  成  $\cos\Delta\phi$  关系。调节移相器, 使参考信号与输入信号之间的相位差为 0 此时锁相放大器输出电压  $V_o$  仅与输入信号的幅值成正比。因此, 它能在噪声中检测出与参考信号频率相同的输入信号。这种电路具有极强的抗干扰性、高灵敏性和很宽的动态范围, 可以用在微弱信号检测中<sup>[8,9]</sup>。

## 2 测试系统

根据上述测量原理和方法, 设计并建立了宽光谱消光比智能化测试系统, 如图 1 所示。计算机控制单

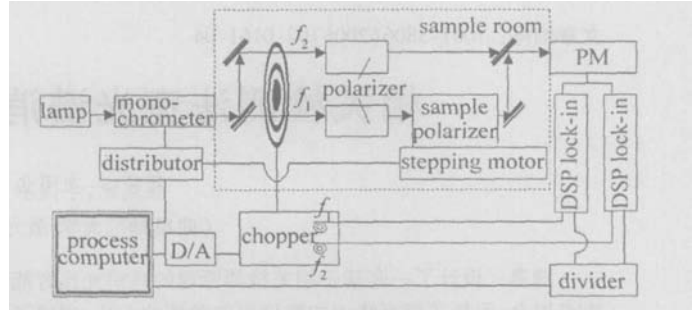


Fig 1 Schematic diagram of the automatic measurement system for extinction ratio

色仪的波长扫描, 可以测得偏光器件在宽光谱范围内的任一波长处的消光比; 由计算机控制步进电机驱动待测偏光器, 提高了转角的准确性, 克服了人工操作的烦琐和精度偏低的不足; 采用双频双光路分光单探测器接收锁相放大器分离信号比对法进行源补偿测量, 克服了光源光强漂移所带来的影响; 采用相敏检波技术提高了测量的输出信噪比, 减小了杂散光和光探测器的暗电流等白噪声对弱光信号测量的影响; 最后, 由计算机进行数据采集、分析和处理。从而实现了较高灵敏度和精度的消光比智能化测试。

创新之处如下所述: (1) 光源强度起伏和背景噪声 (主要是杂散光和白噪声) 是消光比弱光信号测量中引起测量误差的两个主要因素。通常采用双光路双探测器比对法来消除光源起伏影响, 然而双探测器的响应特性不对称给该方法带来明显的缺点。作者提出了一种新方法——基于相敏检波技术的双频双光路分光单探测器接收锁相放大器分离信号比对法进行源补偿测量, 既有效克服了光源光强漂移所带来的影响, 又极大地提高了输出信号的信噪比。从单色仪出射的单色光, 经过分光、斩光调制后, 两束频率分别为  $f_1, f_2$  的光信号都通过性能结构相同的高消光比起偏器以相同的光强出射, 其中一束频率为  $f_1$  的光信号作为参考信号直接由光电倍增管接收, 另一束频率为  $f_2$  的光信号通过待测偏光器后, 作为待测信号由光电倍增管接收。这样, 在光电倍增管所接收的信号中, 包含了样品光路和参考光路的光强信号。将该混合信号分别送入两台锁相放大器的信号输入端, 而两台锁相放大器的参考频率分别为  $f_1$  和  $f_2$ , 因此两台锁相放大器就分别从含有噪声的混合信号中检出频率为  $f_1$  和  $f_2$  的信号, 这两个信号分别对应于样品光路和参考光路的光强, 然后将分离出的频率为  $f_1$  和  $f_2$  的信号送入除法器 (比率计) 比对, 从而消除了光源起伏的影响。因为该方法只用单只探测器, 从而避免了双探测器不对称引起的系统误差。作者进行了光源稳定性测试, 每 30s 采样一次, 共计 30min, 计算机作出透射比  $T-t$  曲线为一条平稳的水平直线, 表明双频双光路分光单探测器接收锁相放大器分离信号比对法有效克服了光源光强漂移

所带来的影响。(2)透过两偏光器的样品光路的光强随其主截面之间的夹角变化是非常灵敏的,通常的手工旋转待测偏光器寻找通光和消光位置的方法有较大误差。该系统采用计算机控制步进电机驱动待测偏光器旋转,计算机实时采集数据,根据最小二乘法原理编程对数据进行非线性曲线拟合求极值,给出透射比  $T_{\min}$ ,  $T_{\max}$  和消光比  $\rho$  从而提高了系统的测量精度。(3)使用 VB 6 0 编写了消光比测试控制程序。有两种测试模式可供选择:单波长消光比测试模式和消光光谱测试模式。测试界面分别如图 2 图 3 所示。利用 VB 6 0 的通信控件 MSCmm 实现工控机的 RS-232 串行端口和锁相放大器、步进电机、单色仪之间的串行通信。

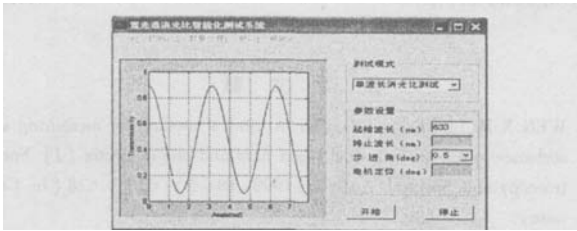


Fig 2 CU measuring extinction ratio at single wavelength

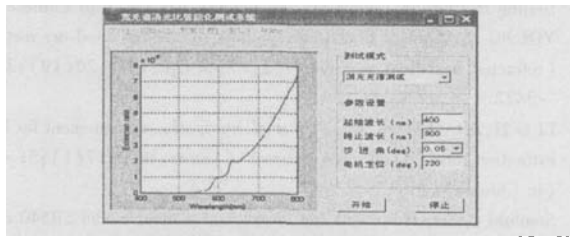


Fig 3 CU measuring extinction spectrum

为了满足可见光区弱光信号的测量需要,该系统中器件以及技术参数的选取如下:因为卤钨灯在可见光区有较强的连续光谱和较好的光源稳定性,而且有体积小、结构紧凑、使用方便和寿命长等优点,是理想的可见光~近红外光源。所以,该测量系统中采用 24V/150W 的卤钨灯为测试光源,选用高性能直流稳压电源对其供电(输出电压 24.098V,波纹电压 0.4mV)。若需要进行红外和紫外区测量,氙灯是较好的测试光源。为了满足可见光区测试要求,采用北京瑞利分析仪器公司的 WDP500-C 平面光栅单色仪,其主要技术指标为:平面光栅常数 1200line/mm,一级光谱范围 200nm~1000nm,波长示值误差优于  $\pm 0.3\text{nm}$ ,波长重复性 0.05nm(单向),狭缝宽度范围 0.01mm~3mm 连续可调,采集间隔可变 0.0025mm~1mm(可更大),测量精密度优于 0.4%。为了更好地在待测器件光极强值邻域采样,要求步进电机的步进角要小;因为消光光谱测试为估计测试,不必要求电机定位精度很高。采用天津港东科技发展有限公司的步进电机组件,步距角由软件编程设定<sup>[10]</sup>(0.05°, 0.10°, 0.50°, 1.00°, 1.50°, 2.00°, 有利于根据测试精度和测试速度

要求灵活选取)。采用两台美国斯坦福研究系统公司的 SR850 数字锁相放大器,由于该锁相放大器的核心部分相敏检波器采用了数字信号处理技术,从而很好地提高了信号处理的性能,而且配有串行接口以方便计算机控制;利用该公司的同一个 SR540 双频斩光器实现双光路双频同时斩波,节省了一个斩光器和减少了测试误差源。考虑到光电倍增管的响应时间以及工频干扰等因素,设定适宜的斩光频率分别为  $f_1 = 15\text{Hz}$ (内孔),  $f_2 = 180\text{Hz}$ (外孔)。锁相放大器是通过相关器完成窄带技术的。通常要使锁相放大器的相关器的等效噪声带宽  $B_n$  远小于斩光器的工作频率  $f$ ,如果相关器的等效噪声带宽大于或者和工作频率相当,这就失去了相关器的固有优点。要选择适当的时间常数  $T$ ,保证相关器的等效噪声带宽  $B_n$  为工作频率  $f$  的 1/100 左右为宜。根据  $B_n = f/100$  和  $B_n = 1/2T$ ,可推导出所要选定的锁相放大器的时间常数  $T = 50/f$ 。因此,设定两台锁相放大器的时间常数分别为  $T_1 = 333\text{ms}(50/f_1)$ ,  $T_2 = 278\text{ms}(50/f_2)$ 。根据光电倍增管的输出信号电压量程和 A/D 卡的量程(5V),设定两台锁相放大器的放大倍数均为 100,灵敏度为 100 $\mu\text{V}$ 。为了与卤钨灯测试光源的光谱响应一致,采用北京滨松光子技术有限公司的 CR152 端窗型光电倍增管(铯钾钠铯光阴极、硼硅玻壳、11 级盒式+线性倍增)作为可见光区弱光信号探测器,光谱响应范围宽 300nm~850nm(S-4),高灵敏度,高稳定性,低暗噪声。配套供电电源是该公司的 CC183-01Y 集成小型高压电源,采用阳极接地、负高压供电,输入电压 12V  $\pm 0.5\text{V}$ ,输出电压连续可调 -200V ~ -1100V,漂移(最大)  $m_{\text{ax}} \pm 0.03\%/h$  控制电压 0~5V,高压调整方式灵活可靠,高压输出稳定性高,输出线性度好,金属外壳有很好的电磁屏蔽作用。

综上所述,该消光比测量系统采用相敏检波技术,测试灵敏度可达  $10^{-7}$ 。误差来源主要是入射光部分偏振性、检测部分的非线性、由于退偏器退偏效果不理想引起的探测器的偏振响应和锁相放大器的零点漂移等。按原设计,综合考虑误差因素,整个系统误差可控制在  $\pm 2\%$  以内。在一般情况下,这已能较好地满足偏光器件消光比测试的要求。

### 3 测试

#### 3.1 消光比测试

首先,选择系统初始化(扣除背景噪声,做本底校正);然后,选择单波长消光比测试模式,如图 2 所示设置相应参数:输入测试波长、选择步进角。步进电机驱动待测偏光器绕光轴旋转 1 周,计算机作出透过率随转角变化的  $T-\theta$  曲线,在曲线的峰值和谷值附近分

别采样有限个点,计算机对采集的数据进行最小二乘法非线性曲线拟合,对拟合得到的函数求极值,得到最小透射比和最大透射比,然后相除,给出待测偏光器的消光比。

利用该系统对所生产的某一种偏光器的消光比进行了不同波长的多次测试,结果重复性很好,如表 1 所示。这表明该测试系统是稳定可靠的。

Table 1 Measuring results of extinction ratio

measuring number	1	2	3	4	5	6	mean	relative error
(633nm) extinction ratio $\rho/10^{-6}$	2.21	2.17	2.25	2.24	2.13	2.16	2.19	0.8%
(670nm) extinction ratio $\rho/10^{-6}$	3.75	3.68	3.74	3.70	3.72	3.69	3.71	0.3%

### 3.2 消光光谱测试

选择消光光谱测试模式,如图 3 所示设置相应参数:输入测试起始波长和终止波长、选择步进角、输入电机定位角度。步进电机驱动待测偏光器绕光轴旋转到对应于某个波长的最小透射比位置附近(该最小透射比位置由 3.1 节中所述消光比测试模式中曲线拟合得到)。进行光谱扫描,计算机采集该波段的透射比数据并实时绘出  $T_{\min}-\lambda$  透射谱;然后,步进电机驱动待测偏光器绕光轴旋转到最大透射比位置附近,计算机采集该波段的透射比数据并实时绘出  $T_{\max}-\lambda$  透射谱。最后,计算机对采集到的两个标量数组  $T_{\min}$  和  $T_{\max}$  中的对应元素  $T_{\min}(\lambda_i)$  和  $T_{\max}(\lambda_i)$  相除,自动绘出待测偏光器的消光光谱  $\rho(\lambda_i) = T_{\min}(\lambda_i) / T_{\max}(\lambda_i)$ 。

根据测得的偏光器的近似的消光光谱,可以便捷地估计偏光器适当的使用波段范围。

给出一幅计算机自动绘出的待测偏光器在 400nm ~ 800nm 波段的近似的消光光谱,如图 4 所示。可以看到,在 400nm ~ 550nm,该偏光器的消光比很低

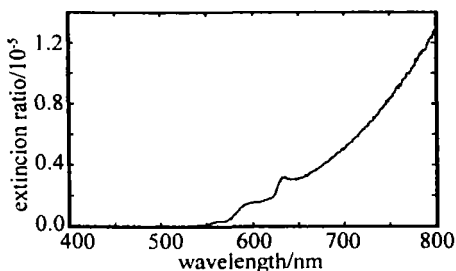


Fig 4 Extinction spectrum (400nm ~ 800nm)

且起伏不大;700nm ~ 800nm 消光比呈上升趋势。

## 4 结 论

介绍了应用于消光比测试的微弱交流光电信号智能化检测系统<sup>[11, 12]</sup>,应用双频双光路分光单探测器接收锁相放大器分离信号比对法进行源补偿测量,克服了光源光强漂移所导致的测量数据不稳定的缺点。经理论分析和实验验证,测量的重复精度和复现精度优于目前已有的手动或自动消光比测量,测试灵敏度可达  $10^{-7}$ ,系统相对测试误差不超过  $\pm 2\%$ 。实现了可见光区任一波长处的消光比的精确自动测量,而且可以测得近似的消光光谱,克服了只对单一波长进行消光比测量的缺点。

### 参 考 文 献

- [1] WEN X M, LIN L ZH, WU Y H. A kind of method for measuring absorbance spectrum with dual beam light and one detector [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis 1998, 18(5): 626 ~ 628 (in Chinese).
- [2] JIANG Y S. Photoelectric technology and experiment [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2000. 303 ~ 306 (in Chinese).
- [3] YOUNG M. Optical fiber index profiles by the refracted-ray method (refracted near field scanning) [J]. Appl Opt 1981, 20(19): 3415 ~ 3422.
- [4] LI G H, ZHAO M Sh, WU F Q *et al*. Study of a measurement for high extinction ratio [J]. Chinese Journal of Lasers, 1990, 17(1): 51 ~ 55 (in Chinese).
- [5] Stanford Research Systems Inc. Instruction manual model SR540 optical chopper [M]. CA: Stanford Research Systems Inc, 1997. 13.
- [6] LIU J H. Modern detection technology and test macro design [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1999. 134 ~ 140 (in Chinese).
- [7] ZHANG Y, LI R, LIU J H. Software implementation and simulation analysis of lock-in amplifier [J]. Electric Measurement and Instrumentation 1998, 35(6): 30 ~ 32 (in Chinese).
- [8] ZHANG L J, XIAO L T, LI C Y. Experimental study of harmonics detection by use of a digital lock-in amplifier [J]. Laser & Infrared 2000, 30(5): 311 ~ 313 (in Chinese).
- [9] QIAO X Y, JIA L F. Application of phase-locked amplifier in detecting of biomass parameter on-line [J]. Journal of Test and Measurement Technology 2003, 17(2): 170 ~ 172 (in Chinese).
- [10] WANG H Y. Stepping motor control technology guide [M]. Shanghai Tongji University Press, 1990. 216 ~ 221 (in Chinese).
- [11] DAI Y S. Method and instrumentation for testing weak signal [M]. Beijing: Defence Industry Press, 1994. 71 ~ 203 (in Chinese).
- [12] HAO D ZH, WU F Q, KONG W J. The design and test of thin film polarizing beam splitting prism [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 401 ~ 403 (in Chinese).