

doi:10.3788/gzxb20174611.1112002

# 线性渐变滤光片光谱特征参数测试方法

王世丰,袁艳,苏丽娟,安达

(北京航空航天大学 精密光机电一体化教育部重点实验室,北京 100191)

**摘要:**为了能够精确地测量线性渐变滤光片的光谱特征参数,提出一种线性渐变滤光片的透过率检测方法.该方法在测量时,用光谱仪分别采集滤光前和滤光后的光信号,计算得到测量点的光谱透过率.调节微动位移平台,对滤光片样品进行多点扫描测量,数据处理后,得到线性渐变滤光片的光谱特征参数.推导了测试光谱透过率的理论公式,仿真结果表明该方法的测量精度随着线性色散系数的增大而减小,在线性色散系数小于  $1.5 \text{ nm}\cdot\text{mm}^{-1}$  时,该方法测量的中心透过率和带宽的误差小于  $0.4\%$ .根据该测量方法设计了相应的检测系统,实际测量了线性渐变滤光片的光谱特征参数.

**关键词:**线性渐变滤光片;光谱透过率;光谱特征参数;检测方法;线性色散系数

中图分类号:O433.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)11-1112002-7

## Measurement of the Spectral Characteristic Parameters of Linear Variable Filters

WANG Shi-feng, YUAN Yan, SU Li-juan, AN Da

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to accurately measure the spectral characteristic parameters of Linear Variable Filters (LVF), a method of measuring the transmission of LVF was presented. In this method, the spectral transmission at the measurement point was calculated by measuring the spectral signal of light source and transmitted light with a spectrometer. By adjusting the displacement platform, the spectral transmission at different positions was measured. Then the spectral characteristic parameters of LVF was obtained by data processing. The theoretical formula for measuring the spectral transmittance was deduced. The simulation results show that the accuracy of this method decreases as the linear dispersion increases. When the linear dispersion is less than  $1.5 \text{ nm}\cdot\text{mm}^{-1}$ , the errors of the measured center transmission and bandwidth are less than  $0.4\%$ . An experimental setup was built to test the spectral parameters of a linear variable filter.

**Key words:** Linear variable filters; Spectral transmission; Spectral characteristic parameters; Measurement; Linear dispersion

**OCIS Codes:** 120.2440; 120.7000; 310.6188

## 0 引言

线性渐变滤光片(Linear Variable Filter, LVF)是一种光谱特性随位置线性变化的光学薄膜器件<sup>[1-2]</sup>.作为分光元件,线性渐变滤光片以其成本低、光谱分辨率高、稳定性好等特点,在波分复用、便携式分光和光谱成像等领域得到了广泛的应用<sup>[3-6]</sup>.光谱透过率是评价线性渐变滤光片性能的重要参数,准确地获取透过率参数,是进行相关仪器设计的前提和基础,具有重要的现实意义.然而线性渐变滤光片在镀膜的过程中,受

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No.61635002)资助

第一作者:王世丰(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为光谱数据处理技术. Email: sy1517405@buaa.edu.cn.

导师(通讯作者):袁艳(1967—),女,研究员,博士,主要研究方向为新型光谱成像技术. Email: yuanyan@buaa.edu.cn

收稿日期:2017-05-03;录用日期:2017-07-26

<http://www.photon.ac.cn>

沉积方法、沉积条件和沉积参数等因素的影响,会引入各种误差,使得其实测光谱透过率与理论设计存在偏差,因而要将其应用于相关领域,就必须对其光谱透过率进行检测。

目前,线性渐变滤光片的透过率检测普遍采用单色仪扫描法<sup>[7-8]</sup>。该方法在检测时,通过控制单色仪以一定的步长输出单色光,分别采集光直接照射到 CCD 探测器和通过滤光片透射到 CCD 探测器的图像,经数据处理后得到线性渐变滤光片透过率曲线。这种测量方法虽然性能稳定、测量精度较高,但待检测的滤光片样品应小于 CCD 的几何尺寸,光谱透过率检测范围也受到 CCD 光谱响应范围的限制,难以实现宽波段、大动态范围内透过率的精确测量。

为精确地完成对线性渐变滤光片的透过率的检测,以获得线性渐变滤光片的光谱特征参数,本文基于相对测量原理,提出了一种以 FieldSpec 4 光谱仪为测量设备的透过率检测方案。将待检测的滤光片安装在微动位移平台上,分别采集滤光前和滤光后的光谱信号,经数据处理,完成对滤光片单点透过率的实时测量。调节位移平台,对滤光片样品进行扫描,通过进一步处理,得到滤光片的光谱特征参数。该测量方案具有操作简单、非接触、精度高、动态测量范围大、光谱测量范围广等优点。

## 1 线性渐变滤光片的光谱特征参数

线性渐变滤光片在原理上可以视为一种微型法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 标准具<sup>[9]</sup>,简化结构如图 1,其两侧为多层介质膜构成的介质镜,中间层为厚度随位置线性变化的谐振腔。介质镜为光学厚度均为  $\lambda/4$  的高、低折射率交替排列构成的周期多层膜系,其反射率接近 100%<sup>[10]</sup>。在谐振腔内,利用多光束干涉原理,可以得到给定波长为中心的通带,而谐振腔内介质厚度的变化可以实现通带中心波长的线性调谐,使得线性渐变滤光片的光谱特性随位置线性变化。

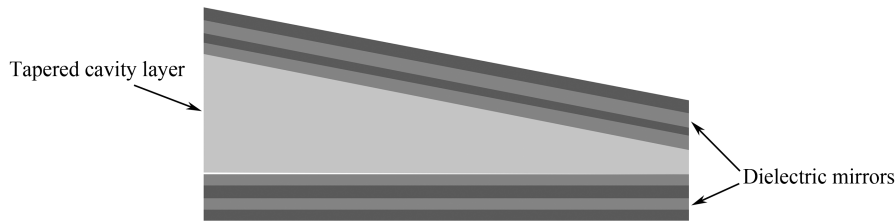


图 1 线性渐变滤光片原理简图

Fig.1 A schematic view of LVF

线性色散系数、光谱透过率曲线等是表征线性渐变滤光片光谱特征的重要参数,是评价其性能的重要指标。线性色散系数定义<sup>[1]</sup>为

$$\text{Linear Dispersion} = \frac{\lambda_{\text{end}} - \lambda_{\text{start}}}{x_{\text{end}} - x_{\text{start}}} \quad (1)$$

式中,  $x_{\text{start}}$  和  $x_{\text{end}}$  分别为线性渐变滤光片的起始工作位置和终止工作位置,  $\lambda_{\text{start}}$  和  $\lambda_{\text{end}}$  分别是线性渐变滤光片的起始工作波长和终止工作波长,对于带通滤光片  $\lambda_{\text{start}}$  和  $\lambda_{\text{end}}$  则分别是在工作起始端和工作终止端的中心波长。

线性渐变滤光片的光谱透过率曲线近似为高斯函数,可描述<sup>[11-13]</sup>为

$$\tau(\lambda, x) = \tau_c(x) \exp\left\{- (4\ln 2) \frac{[\lambda - \lambda_c(x)]^2}{\Delta\lambda(x)^2}\right\} \quad (2)$$

式中,  $\tau_c(x)$  为滤光片工作位置  $x$  处的中心透过率,  $\Delta\lambda(x)$  为滤光片位置  $x$  处对应通带的半高宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM),  $\lambda_c(x)$  为位置  $x$  处对应的中心波长。

理想情况下,线性渐变滤光片的中心波长沿滤光片的工作方向线性变化,即

$$\lambda_c(x) = k_0 x + b_0 \quad (3)$$

$k_0$  即为线性渐变滤光片的线性色散系数,  $b_0$  为滤光片起始工作位置处的中心波长。

## 2 线性渐变滤光片测量原理

### 2.1 理论推导

基于相对测量原理,通常采用点测法对滤光片的透过率进行测量,其测量原理如图 2<sup>[10]</sup>,光源辐射的光

经透镜入射到单色仪,以光电转化器测量单色仪出射波长  $\lambda$  的辐射能量,通过单色仪改变出射波长逐波段测试,分别采集经过滤光片的出射光谱辐射通量  $\Phi_o(\lambda)$  与入射光谱辐射通量  $\Phi_i(\lambda)$ ,其比值即为测量位置处的光谱透过率

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_o(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} \quad (4)$$

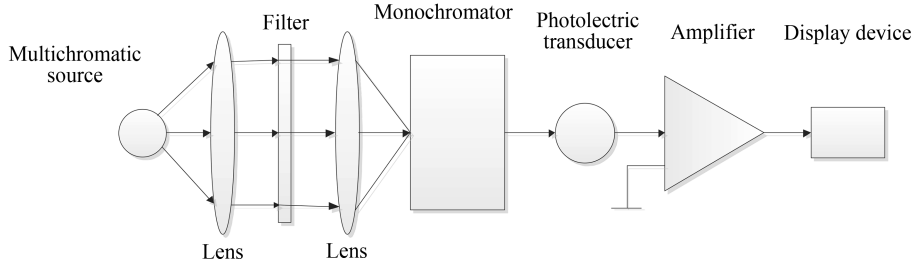


图2 点测法原理

Fig.2 Schematic of Point Measurement Method

这种测量方法精度很高,但测量麻烦费事,且对于透过率曲线变化比较剧烈的情况,测量精度较低.综合考虑点测法的优缺点,本文选取光谱仪作为测量设备,一次测量可完成宽谱段范围内光谱数据的采集,具有省时、高效的优点.图3为测量示意图,固定其探头位置,分别采集未装夹滤光片时直接照射到探头的入射光辐射照度和装夹滤光片时经过滤光片的透射光辐射照度.探头的内径为  $r$ ,在未装夹滤光片情况下,探头接收面的辐照度  $E_i(\lambda)$ ,则探头接收到的辐射通量为

$$\Phi_i = \pi r^2 E_i(\lambda) \quad (5)$$

在装夹滤光片的情况下,探头接收到的经过滤光片的透射光辐射照度  $E_o$ ,此时探头接收到的辐射通量为

$$\Phi_o = \pi r^2 E_o(\lambda) \quad (6)$$

因此,在测量位置处的光谱透过率为

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_o(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} = \frac{E_o(\lambda)}{E_i(\lambda)} \quad (7)$$

在测量过程中,由于光谱仪探头接收到的光,为探头所对应的滤光片上圆形区域  $S$  内的透射光,因而通过式(7)计算得到的光谱透过率为圆形区域内的平均透过率,而线性渐变滤光片的光谱透过率随位置发生变化,实测的透过率与测量点(探头轴线与滤光片平面的交点)的透过率存在偏差,因此有必要推导实际测量时滤光片的光谱透过率计算公式.

在装夹滤光片情况下,探头对准滤光片工作位置  $x$  处,实际探头接收到的辐通量为

$$\hat{\Phi}_o(\lambda, x) = \iint_S P(x, y) \tau(\lambda, x) E_i(\lambda) dx dy \quad (8)$$

式中,  $P(x, y)$  为孔径函数,

$$P(x, y) = \begin{cases} 1 & \sqrt{x^2 + y^2} \leq r \\ 0 & \sqrt{x^2 + y^2} > r \end{cases} \quad (9)$$

对滤光片面进行离散化,划分为面源大小为  $A_0$  的  $n \times n$  等份,则探头接收到的辐通量可表示为

$$\hat{\Phi}_o(\lambda, x) = A_0 E_i(\lambda) \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n P(x_j, y_k) \tau(\lambda, x_j) \quad (10)$$

且满足,  $\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n P(x_j, y_k) A_0 = \pi r^2$ .

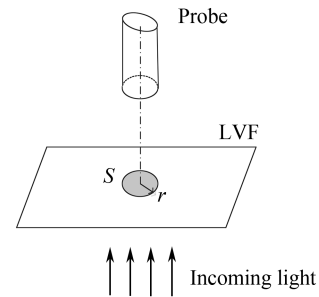


图3 测量示意图

Fig.3 Diagram of measurement

因此实际测量的透过率为

$$\hat{\tau}(\lambda, x) = \frac{\hat{\Phi}_o(\lambda)}{\hat{\Phi}_i(\lambda)} = \frac{A_o E_i(\lambda) \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n P(x_j, y_k) \tau(\lambda, x_j)}{\pi r^2 E_i(\lambda)} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n P(x_j, y_k) \tau(\lambda, x_j)}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n P(x_j, y_k)} \quad (11)$$

从式(11)可以看出,实测的光谱透过率是圆形区域 S 不同位置点透过率的加权平均.当圆形区域大小固定时,线性色散系数是影响实测光谱透过率的关键因素.

### 2.2 仿真分析

本节仿真模拟测量不同线性色散系数滤光片时,测量结果与理论值的差异.现有待检测的滤光片的线性色散系数设计值为  $1.467 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,仿真中假设待测线性渐变滤光片位置线性色散系数  $k_0$ . 分别选取  $1 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$  (小于设计值),  $1.5 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$  (接近设计值),  $5 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$  (略大于设计值),  $10 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$  (大于设计值) 四种情况进行仿真.其余参数设置为:光谱仪探头的内径  $r=0.4 \text{ mm}$ ,滤光片的透过率函数服从高斯分布,即满足式(2),并且设定  $\tau_c = 1$ .假设滤光片的透过率函数的半高宽与中心波长的比值为常数,  $\Delta\lambda/\lambda = 1.8\%$ .选取滤光片的中心波长参数  $\lambda_c = 480 \text{ nm}$ 、半高宽  $\Delta\lambda = 8.64 \text{ nm}$  的位置为测量点,仿真得到光谱仪测量的光谱曲线如图 4,计算得到的光谱特性参数如表 1.从仿真结果可以看出,随着线性色散系数的增大,光谱的平均效应加强,使得测量谱线的通带宽度增大,中心透过率降低,会带来较大的测量误差,因此,本测量方法对在测量线性色散系数较低的样品时精度较高.对于待检测的滤光片样品,其线性色散系数接近  $1.5 \text{ nm} \cdot \text{mm}^{-1}$ ,从表 1 显示本文提出的测量方案的计算的中心透过率、半宽高相对误差均小于  $0.4\%$ ,适用于待测样品的特性检测.

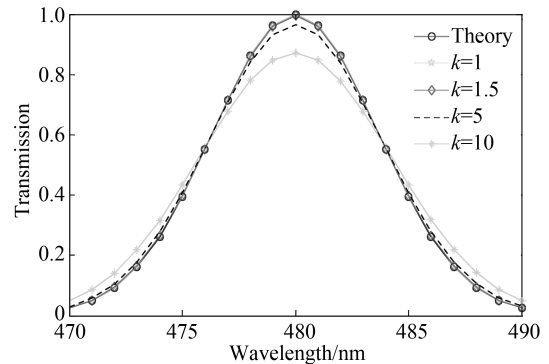


图 4 不同线性色散系数下的光谱透过率的仿真结果  
Fig.4 Simulation of spectral transmittance under different linear dispersion

表 1 不同线性色散系数下仿真计算得到的光谱特征参数

Table 1 Parameters obtained by simulation under different linear dispersion

Linear dispersion/ $(\text{nm} \cdot \text{mm}^{-1})$	Center wavelength		Center transmission		FWHM	
	value/nm	error/nm	value/%	error/%	value/nm	error/%
$k_0 = 1$	480	0	99.85	0.15	8.652 8	0.15
$k_0 = 1.5$	480	0	99.67	0.33	8.668 8	0.32
$k_0 = 5$	479.999	0.001	96.41	3.59	8.960 4	3.71
$k_0 = 10$	479.998	0.002	87.11	12.89	9.913 5	14.74

## 3 线性渐变滤光片测试实验

### 3.1 测试方案

线性渐变滤光片的透过率测试方案如图 5,该测试系统由卤钨灯光源、平行光管、微动位移平台、待测滤光片和 FieldSpec 4 光谱仪等组成.在系统光路中,平行光管对钨灯出射光起着准直的作用,使得经平行光管出射的光垂直照射到待测的滤光片表面.

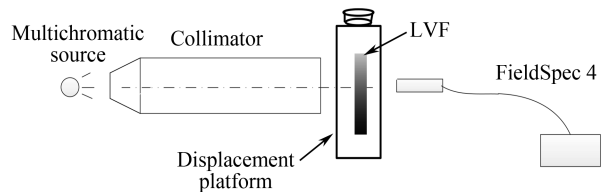


图 5 测试方案图  
Fig.5 Schematic of measurement

在测量实验之前,对卤钨灯光源进行预热,用光谱仪进行观测,待其辐射谱线稳定后开始测试.安装并夹持各部件,调节各元件同轴等高.在测量过程中,先测出不装夹滤光片情况下,经平行光管出射光的辐照度,然后将滤光片装夹在微动位移平台,调节夹持滤光片的装置使得平行光管出射的光垂直照射到滤光片表面,测得该位置处经过滤光片的透射光辐射照度,经数据处理可得到该位置处的光谱透过率.调节微动位移平

台,对待测滤光片样品进行扫描,完成对不同位置处透过率的测量.

### 3.2 实验结果

实验选取的待检测样品为由上海晶鼎光电科技有限公司生产的一款线性渐变滤光片,其设计光谱测量范围为 450~505 nm,工作方向长度为 37.5 mm,线性色散系数为  $1.467 \text{ nm}\cdot\text{mm}^{-1}$ .实验中,微动位移平台以 0.5 mm 为步进,分别测量了滤光片上 76 不同位置测量点的光谱辐射曲线.为消除随机误差的影响,在每个测量点,用光谱仪分别采集 10 组数据,对 10 组数据求平均得到该测量位置的光谱数据.将在不同位置处测量的光谱数据与初始测量未装夹滤光片情况下测得的光谱数据带入公式(11)进行计算,得到滤光片不同位置的透过率曲线.图 6 为选取滤光片上工作位置  $x=10、15、20、25 \text{ mm}$  处的 4 个测量点的测量值及其拟合曲线.

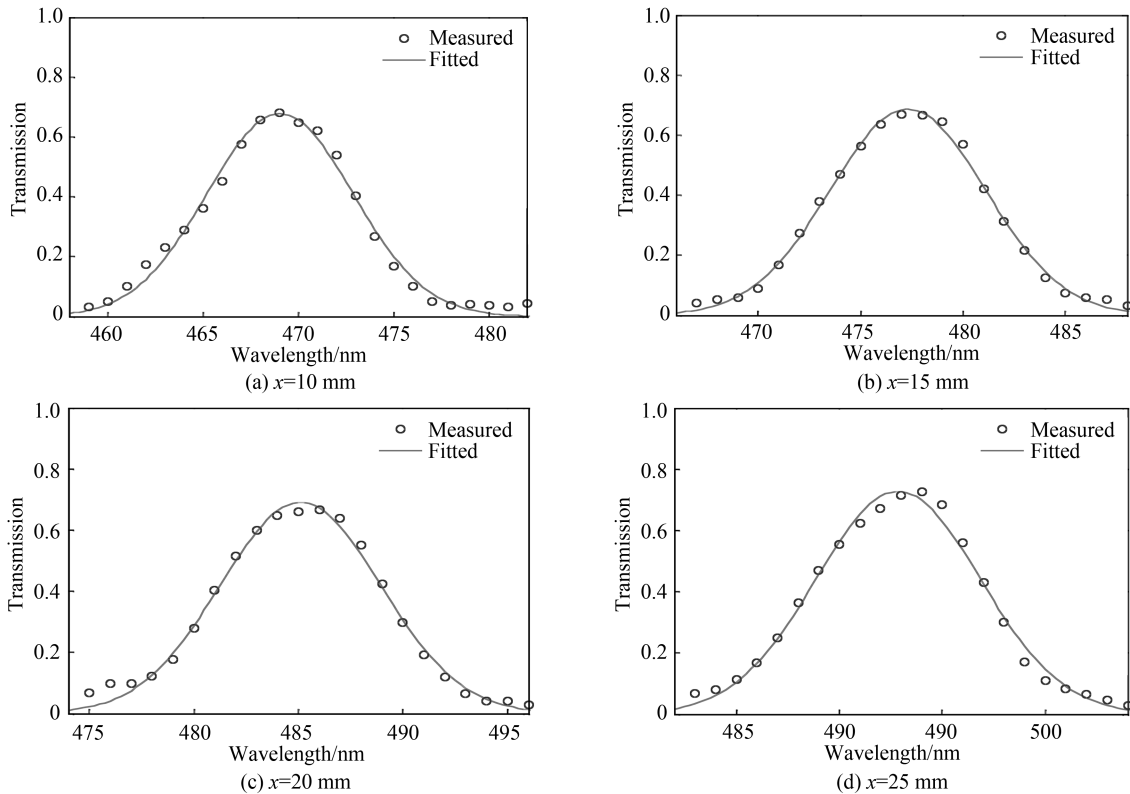


图 6 不同位置处透过率测量值及拟合曲线

Fig.6 Measured values and fitting curves at different positions

为评价各个测量点的透过率的拟合效果,分别计算各个透过率曲线在大于中心透过率 10% 的波段内的测量值与拟合值的均方误差,计算结果如图 7.对计算结果进行统计,均方误差的最大值为  $5.55 \times 10^{-7}$ ,最小值为  $1.08 \times 10^{-4}$ ,可以看出测量值与拟合值的偏差较小,验证了以高斯函数拟合滤光片透过率曲线的合理性.

对不同位置处的透过率曲线用高斯函数进行拟合,得到其通带的中心波长、中心透过率和半高宽  $\Delta\lambda$  等参数.数据处理后,得到其光谱特性参数,表 2 为上述 4 个测量点位置的测量参数.

对滤光片上所有测量点的通带中心波长与位置进行线性拟合,拟合直线如图 8,中心波长-位置曲线与拟合曲线的最大偏差为 2.33nm,滤光片具有较好的线性度.拟合得到滤光片的线性色散系数  $k_0 = 1.5464 \text{ nm}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,起始工作位置处的中心波长  $b_0 = 452.96 \text{ nm}$ .计算得到的线性色散系数与理论设计值的偏差为  $0.0794 \text{ nm}\cdot\text{mm}^{-1}$ ,测量得到的滤光片通带中心波长范围为 453~511 nm.

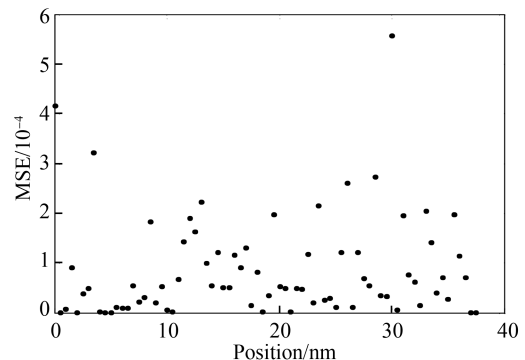


图 7 各个测量位置透过率的均方误差

Fig.7 MSE of transmission at different positions

表 2 滤光片的测量参数  
Table 2 Measured parameters of LVF

Position/mm	Center wavelength( $\lambda$ )/nm	Center transmission/%	FWHM ( $\Delta\lambda$ )/nm	$\Delta\lambda/\lambda/\%$
10	468.23	70.47	8.98	1.92
15	476.48	70.87	8.73	1.83
20	485.10	69.09	9.06	1.87
25	492.23	70.84	9.16	1.86

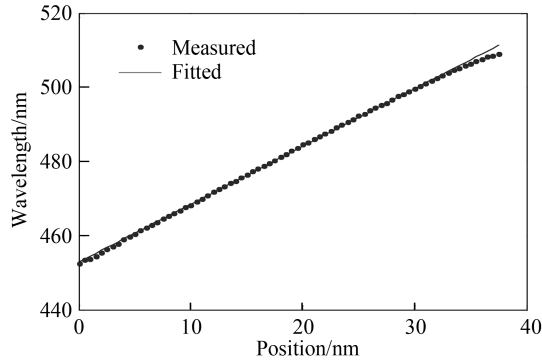


图 8 滤光片的中心波长与位置关系

Fig.8 Relationship between center wavelength and position of LVF

## 4 结论

介绍了线性渐变滤光片的分光原理,给出了表征线性渐变滤光片光谱特性的特征参数.为满足线性渐变滤光片透过率测量过程中,大动态范围、宽谱段以及高精度的要求,提出了一种基于相对测量原理的透过率检测方案.推导了以该测量方案测量时,光谱透过率的计算公式,并仿真分析了由于滤光片线性色散系数的存在,测量点处的光谱平均效应对测量结果的影响.仿真结果表明,在线性色散系数小于  $1.5 \text{ nm}\cdot\text{mm}^{-1}$  时,滤光片的光谱特征参数的测量相对误差优于  $0.4\%$ ,满足滤光片检测精度的要求.根据该测量方案,搭建了实际的检测系统,对滤光片上不同位置测量点的透过率进行了测试,经数据处理得到各测量点的中心透过率、中心波长和半高宽参数.对滤光片的位置与中心波长参数拟合,得到其线性色散系数为  $k_0 = 1.5464 \text{ nm}\cdot\text{mm}^{-1}$ .检测结果可为相关仪器的设计和优化提供参数指导.

### 参考文献

- [1] FAN Bin, LI Gang-zheng, CHENG Xin-bin, *et al.* Production and measurement of linear variable filter[J]. *Optical Instrument*, 2006, **28**(4): 95-103.  
范滨,李刚正,程鑫彬,等. 线性渐变滤光片的制备与测试[J]. 光学仪器, 2006, **28**(4): 95-103.
- [2] LIU Wei-guo, SUN Xin, GAO Ai-hua, *et al.* The development of a real-time transmittance measuring system for linear variable neutral density filters[J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2009, **29**(6): 515-518.  
刘卫国,孙鑫,高爱华,等. 线性渐变滤光片透过率实时测量系统[J]. 西安工业大学学报, 2009, **29**(6): 515-518.
- [3] GU Pei-fu, LU Wei, CHEN Hai-xing, *et al.* Effect of spectral width of thickness-monitoring system on performance of narrow-band filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 251-254.  
顾培夫,陆巍,陈海星,等. 膜厚监控系统的光谱宽度对窄带滤光片性能的影响[J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 251-254.
- [4] DON Ying, YOU Zheng, HAO Yun-cai. Hyperspectral remote sensing system for nanosatellite-imaging spectrometer based on spatially linear variable filter (SVFIS)[J]. *Journal of Astronautics*, 2002, **23**(4): 12-14.  
董瑛,尤政,郝云彩. 纳型卫星高光谱遥感系统——基于空间线性可变滤波器的成像光谱仪(SVFIS)[J]. 宇航学报, 2002, **23**(4): 12-14.
- [5] SEDDON R I, SWABY B L, RYALL R J, *et al.* Monolithic linear variable filter and method of manufacture; US, US5872655[P]. 1999.
- [6] LI Wen-jie, WANG Cheng-liang, ZHENG Xin-bo, *et al.* Review of imaging spectrometer based on linear variable filter [J]. *Infrared*, 2015, **36**(3): 1-7.  
李文杰,王成良,郑新波,等. 基于线性渐变滤光片的成像光谱仪综述[J]. 红外, 2015, **36**(3): 1-7.
- [7] LIU Qing, ZHOU Jin-song, NIE Yun-feng, *et al.* Study of spectral property and measurement of linear variable filters [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, **35**(4): 1142-1145.  
柳青,周锦松,聂云峰,等. 线性渐变滤光片光谱分光特性及检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, **35**(4): 1142-

1145.

- [8] EMADI A. Linear-variable optical filters for microspectrometer application[D]. Technical University of Delft, 2010.
- [9] EMADI A, WU H, De G G, *et al.* Design and implementation of a sub-nm resolution microspectrometer based on a linear-variable optical filter.[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(1): 489-507.
- [10] 曹建章,徐平,李景镇. 薄膜光学与薄膜技术基础[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [11] WIESENT B R, KOCH A W. Limits of IR-spectrometers based on linear variable filters and detector arrays[J]. Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, 2010, **7767**(1): 34-37.
- [12] ZHANG Jian, GAO Jin-song, LI Yu-dong. Linear variable filter with high dispersion coefficient[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1221-1226.  
张建,高劲松,李玉东. 高色散系数线性渐变滤光片的研制[J]. 光学 精密工程,2015,**23**(5):1221-1226.
- [13] MURR P J, WIESENT B R, HIRTH F, *et al.* Thin film measurement system for moving objects based on a laterally distributed linear variable filter spectrometer.[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, **83**(3): 035110.