

文章编号 1004-924X(2011)04-0737-06

微硅狭缝紫外-可见光谱仪杂散光的产生与抑制

黎海文^{1,2}, 郝 鹏¹, 吴一辉¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215613))

摘要:采用 MEMS 技术, 研制了一种基于微硅狭缝的紫外-可见光谱仪。介绍了该光谱仪的系统组成, 分析了其杂散光的产生原因, 着重讨论了光谱仪的关键部件-微硅狭缝的直线度、厚度与杂散光之间的关系, 并对狭缝直线度产生的杂散光进行了实验验证。针对以卤钨灯为光源的紫外-可见光谱仪进行测量时, 紫外部分能量低, 杂散光严重的问题, 提出一种组合滤光片法, 通过在入射狭缝前和探测器前增加双重滤光片, 平衡紫外-可见光范围内各波段的光波强度, 抑制紫外波长处杂散光的影响。实验结果表明: 采用组合滤光片法抑制杂散光后, 杂散光降低为抑制前的 23%。

关键词: 紫外-可见光谱仪; 杂散光; 滤光片; 微硅狭缝

中图分类号: O433.1; TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0737

Generation and suppression of stray light in UV-vis spectrometer based on micro-silicon-slit

LI Hai-wen^{1,2}, HAO Peng¹, WU Yi-hui¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China*)

Abstract: A UV-visible spectrometer based on a micro-silicon-slit was developed by using the Micro-electro-mechanical System(MEMS) technology. The generated reasons of the stray-light from the UV-visible spectrometer were analyzed and the relationships between the straightness and thickness of micro-silicon-slit with the stray-light were discussed. Then, an experimental verification was carried out for the stray-light caused by the slit straightness. Furthermore, a new combining filter method was proposed to solve the problem that the radiation power of UV region is much lower than that of visible light region and it is seriously affected by the stray-light when the spectra are measured by a spectrometer with the halogen tungsten light source. The method combines a neutral density filter and a balanced filter in the front of the micro-silicon-slit and the detector to balance the radiation powers of different spectral regions and to inhibit the stray-light of UV spectrometer. It is shown that the stray-light of the UV-visible spectrometer has been reduced by 23% as compared with that by using the tra-

收稿日期: 2010-01-09; **修订日期:** 2010-03-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60971025); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA042102); 江苏省科技支撑工业类资助项目(No. BE2009060); 中科院知识创新重要方向性资助项目(No. KG CX2-YW-913-1, KJ CX2-YW-H18)

ditional method.

Key words: UV-visible spectrometer; stray light; filter; micro-silicon-slit

1 引言

光谱仪器是光学仪器的重要组成部分,是应用光学原理,对物质的结构和成分进行测量和分析的基本设备,广泛应用于冶金、石油化工、医药卫生、环境保护等领域。近年来,由于多通道探测电荷耦合器件(CCD)的发展,以及微机械工艺的成功应用,具有小型化、全自动、快速探测、价格低廉等优点的小型光谱仪获得越来越多的应用^[1-2]。

杂散光作为一项非常重要的关键技术指标,是基于光谱仪进行光度分析时主要的误差来源,它直接限制被分析测试样品浓度的上限。光谱仪的杂散光主要源于其组成部件——反射镜、光栅、狭缝的加工缺陷^[3]。M. R. Sharpe 和 D. Irish^[4-5]等已经对光栅制造缺陷与杂散光关系进行了研究;而关于狭缝对杂散光的影响,目前尚未见有报道。对于杂散光的消除包括从硬件方面进行抑制和用软件算法进行校正补偿两个方面。Kostkowiak, Brown 和 Zong^[6-7]等对光谱仪的杂散光软件补偿方法进行了研究,主要采用可调激光器测量光谱仪的狭缝散射函数对杂散光进行软件补偿。本文研制的紫外-可见光谱仪,采用了基于机电系统(MEMS)技术的微硅片狭缝,微硅狭缝的质量直接受其制作工艺的影响,因此,本文分析了入射狭缝的缺陷与紫外-可见小型光谱仪杂散光之间的关系,以对其制作工艺提出改进。另外,针对卤钨灯为光源的紫外-可见光谱仪进行光谱测量时紫外部分能量低,杂散光严重的问题,探讨了一种从硬件方面抑制紫外部分杂散光的方法。

2 系统的组成

小型化光谱仪一般采用光栅作为色散器件,并采用小型折叠 Czerny-Turner 式的光学结构。这种光路最大的优点就是彗差小,具有比较好的成像质量,且系统结构简单^[8-10]。如图 1 所示,光线经过微硅片狭缝对光线进行控制,使光束宽度按要求的宽度入射到准直反射镜 1 上,准直反射镜把光线准直后入射到光栅上进行分光,分光后的光束再照射到成像反射镜 2,成像在出口探测器光敏面上。

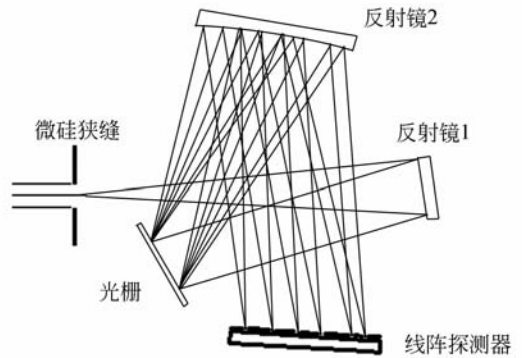


图 1 小型光谱仪系统组成

Fig. 1 Optical system of miniature spectrometer

狭缝为光谱仪的关键部件之一。传统光谱仪狭缝采用机械方法加工,具有体积大、加工困难、装调复杂等缺点。若采用机械加工的方法加工和装配狭缝,会使得光谱仪的体积增大,装配更加复杂,很难实现光谱仪的小型化。采用微机械加工工艺加工出的硅片狭缝不仅具有体积小、质量轻、价格低廉、适宜批量化生产等优点,而且刀口的厚度也易于控制,一般可控制在 $2\sim 100\ \mu\text{m}$ 内。图 2 为采用微机械加工工艺制作的用于光谱仪的微硅片狭缝在扫描电子显微镜观察下的图片,其刀口的厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 左右,此时狭缝边缘的直线度也非常高。

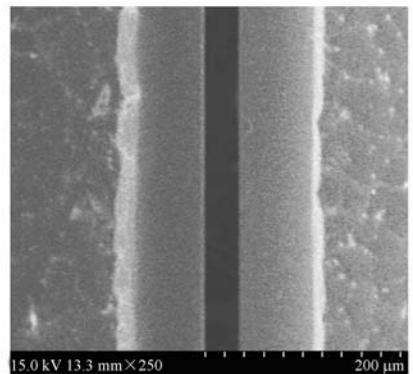


图 2 微硅片狭缝正视图

Fig. 2 Upper-surface of micro silicon slit

3 杂散光产生原因

光谱分析系统的杂散光是指到达接收器的被

测波长以外的其他波长的光。杂散光产生的原因有光学元件上的灰尘、被损伤以及其他缺陷(如光栅、透镜、反射镜、棱镜材料中的气泡等)造成的散射;系统内部黑化处理不当、准直系统内部或有关隔板边缘的反射;光学系统屏蔽不好,外界有辐射进入光学系统中;狭缝的缺陷;光学系统的像差等,其中光学元件如狭缝和光栅的散射光是造成杂散光的主要来源。光栅本身缺陷包括光栅刻槽间距有随机误差,光栅表面粗糙度,光栅刻槽深度随机误差,对上述 3 种随机误差所产生的杂散光分布, M. R. Sharpe 和 D. Irish 等已经开展了较为详尽的研究^[3-5]。

对于光谱分析系统的关键部件入射狭缝来说,产生杂散光的原因主要有狭缝边缘的直线度,狭缝的厚度两个方面。如图 3 所示,狭缝边缘直线度恶劣时,入射光照射到狭缝边缘上会发生散射而形成杂散光。由于入射光源不可能是严格的平行光,狭缝越厚,入射光照射到狭缝的两侧壁上的几率越大,由此会在侧壁上产生漫反射,改变光的入射方向,通过反射镜进入探测器,形成杂散光。

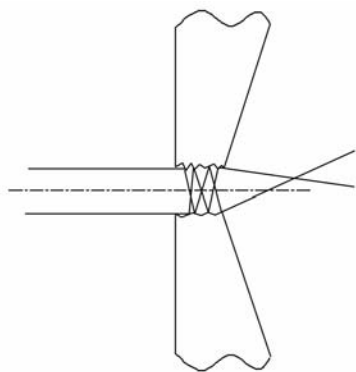


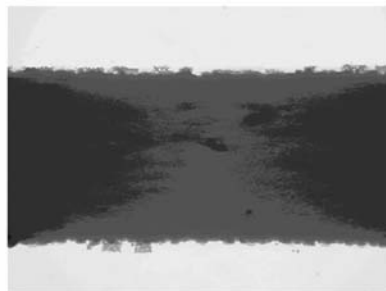
图 3 狭缝厚度、直线度对杂散光的影响

Fig. 3 Influence of slit straightness and thickness on stray light

为了验证狭缝的表面直线度产生的杂散光,采用氦氖激光器发射出一束激光,分别通过直线度有差异的两微硅片狭缝(在显微镜放大倍率为 400 时观察,两狭缝的直线度如图 4(a)、(b)所示),利用面阵 CCD 对其的衍射光斑进行成像,狭缝边缘直线度好的衍射图像如图 5(a)所示,狭缝边缘直线度较差的衍射图像如图 5(b)所示,对比



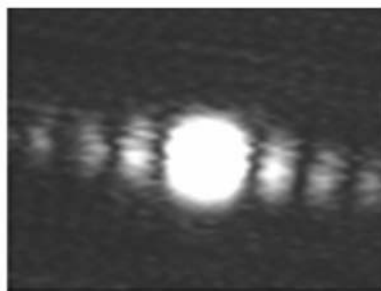
(a) 直线度好的狭缝
(a) Good straightness slit



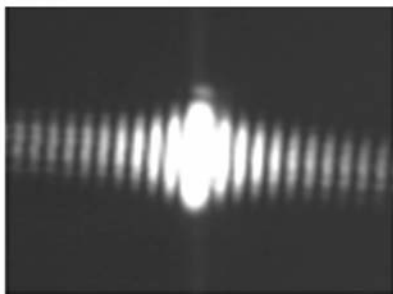
(b) 直线度差的狭缝
(b) Bad straightness slit

图 4 微硅片狭缝

Fig. 4 Micro-silicon-slits



(a) 直线度好的狭缝
(a) Good straightness slit



(b) 直线度差的狭缝
(b) Bad straightness slits

图 5 狭缝衍射图像

Fig. 5 Diffraction images of slit

两图可以看出,狭缝边缘直线度较好时,引起光的散射作用比较小,光线通过狭缝后,光线的能量主要集中在衍射级次的零级;狭缝边缘直线度较差时,边缘的不平整导致光线产生很强的散射,衍射级次的零级所占的能量被削弱,其它级次的能量被加强。对于光谱仪来说,衍射级次零级为光谱分析对象,而其它级次的光即为杂散光,当狭缝边缘直线度较差时,其它级次的能量被加强,即导致了后面系统杂散光的增强。

通过以上分析可知,由于受到加工水平以及制作工艺的限制,杂散光在任何实际的光谱分析系统中都是存在的,不可能完全消除。因此,可根据不同测试分析要求采取不同的措施,尽量地抑制杂散光,降低杂散光对测试分析结果的影响。

4 杂散光抑制

卤钨灯凭借着其光谱覆盖面广,价格低廉的特点,广泛地应用于生化医疗,成分分析等方面。但是,由于其紫外和近紫外部分能量较弱,与可见光部分相差悬殊,在利用紫外-可见光谱仪同时对紫外和可见光进行光谱分析时,相对可见光部分,紫外部分将受到杂散光严重的影响。因此,紫外-可见光谱仪杂散光的抑制关键就是紫外部分杂散光的抑制。

当对宽带光源进行光谱分析时,光谱仪在测量过程中,实际测得的某波长带宽内的信号为真实信号和杂散光之和,即:

$$I_{\text{means}} = I_{\text{real}} + I_{\text{stray}} \quad (1)$$

由杂散光光分布函数矩阵可得,探测器某波长处的杂散光产生的信号为:

$$I_{\text{stray}} = \sum_{j=1}^N (d_{ij} I_{b,j}) + I_s \quad (2)$$

$I_{b,j}$ 为无杂散光影响的带宽内卷积信号, I_s 为光谱仪测试波长范围以外的光波所产生的杂散光, d_{ij} 为带宽外某波长处的信号对带宽内的杂散光的影响系数。

$$\begin{cases} d_{ij} = \frac{\delta_{i,j}}{\sum_{i \in b} \delta_{i,j}}, i \notin b \\ d_{ij} = 0, i \in b \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)可以看出,当入射光为复色光时,被测某波长处的杂散光为各个波长在此波长处产生杂散光的累加;被测波长杂散光的大小与被测波长外

各波长的光波能量的强弱成正比。被测波长处杂散光对测试结果的影响由被测波长与被测波长外各波长光波能量的强弱共同决定。由此可得:当以卤钨灯为光源进行光谱测试时,光谱中各波段辐射能量相差较大,可见光部分能量较高,而紫外和近紫外部分能量较弱。紫外波长处相对可见光部分,将严重受到杂散光的影响。因此需要平衡光谱能量,抑制紫外部分杂散光。

本文提出采用组合滤光片法对光谱的各个谱段的能量进行调整来抑制紫外部分的杂散光。采用在入射狭缝前和探测器前增加双重滤光片的方法,达到平衡各谱段能量,抑制紫外杂散光的目的。受光学镀膜材料以及镀膜工艺条件的限制,只在入射狭缝前增加一块滤光片,达到既可提高紫外部分光谱光强的占有量,又可以平衡各波段光强的效果是很难实现的,如图 6 所示。本文设计和制作出了在一定程度上满足要求的滤光片各波长的透过率曲线:

- (1) 330~520 nm: 透过率为 90% 左右;
- (2) 520~800 nm: 透过率为 6% 左右;

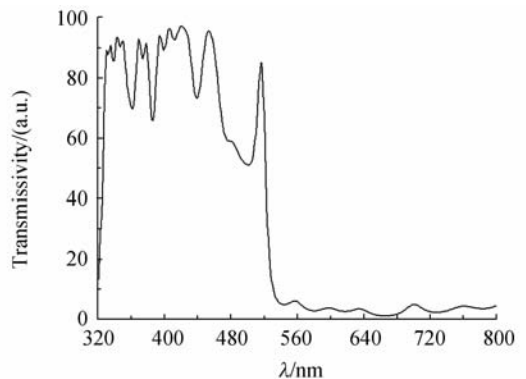


图 6 滤光片透过率

Fig. 6 Transmissivities of filter

由于在 520 nm 波长处有一峰值,这样在紫外部分能量较强时,此处将处于饱和状态。因此,可在线阵探测器窗口处再增加一阶跃型中性滤光片,进一步平衡各谱段的能量。将整个光谱分为 4 部分 320~360, 360~500, 500~530, 530~800 nm, 第一部分光波直接照射到探测器上;后 3 部分处通过阶跃型中性滤光片各部分的透过率的不同,实现平衡各谱段能量占有率的目的,其具体结构参数如表 1 所示。

表 1 阶跃型中性滤光片结构参数

Tab.1 Structure parameters of step neutral filter

指标	波长/nm			
	320~360	360~500	500~530	530~800
透过率/(%)	100%	12%	3%	48%
尺寸大小/mm	0.948	3.3	0.7	6.4

对于组合滤光片的装调,首先需要通过汞灯对组装好的光谱仪进行波长标定;然后,再将第一块滤光片通过固定装置直接固定于入射狭缝前,利用用光谱仪对卤钨灯发光光谱进行光谱分析,参照实际测试光谱,调整中性滤光片与探测器的相对位置,调整至所需光谱后,将中性滤光片固定。图 7 所示为联合调整后实际探测到的卤钨灯的光谱曲线,在可见部分未饱和的情况下,紫外探测波长 340 nm 处的光谱能量得到了很大程度的提高。

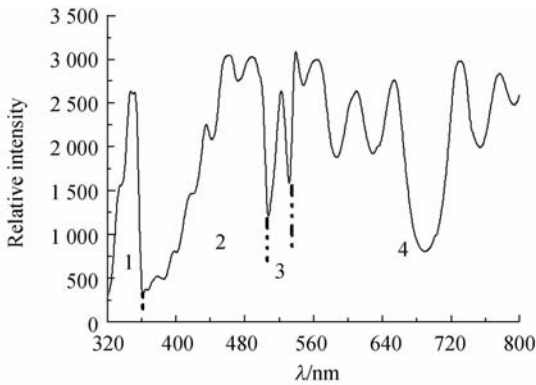


图 7 调整后光谱曲线

Fig.7 Spectra after correction

采用 50 g/L 的 NaNO_2 水溶液测试紫外波长 340 nm 处的杂散光曲线,抑制前与抑制后的测试结果如图 8 所示(为防止可见光饱和部分对测试部分的影响,进行抑制前测试时,将可见光 CCD 区域遮挡),由图可得,光谱仪的暗电流为 90 个单位光强,抑制前 340 nm 处的杂散光为 660 个单位光强,采用组合滤光片法抑制后 340 nm 处的杂散光为 150 个单位光强,杂散光降低为原来的 23%。此部分杂散光可进一步采用软件校正的方法进行补偿消除。

如图 9 所示,本紫外-可见光谱仪采用组合滤光片法抑制以及软件补偿杂散光后,测试不同浓

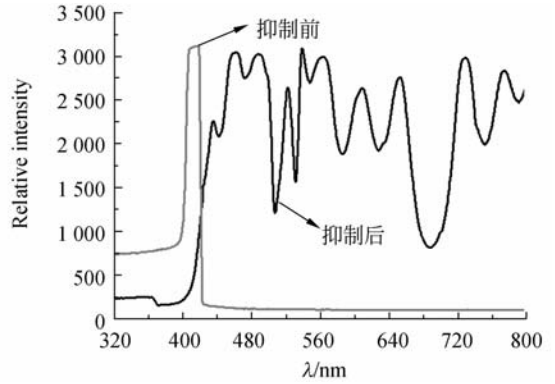


图 8 杂散光测试曲线

Fig.8 Spectral stray light

度的碱性铬酸钾溶液 340 nm 处的吸光度曲线,其吸光度为 0~2.17;相关系数为 0.999 65,标准偏差为 0.023 78,测试结果具有很高的线性相关性。

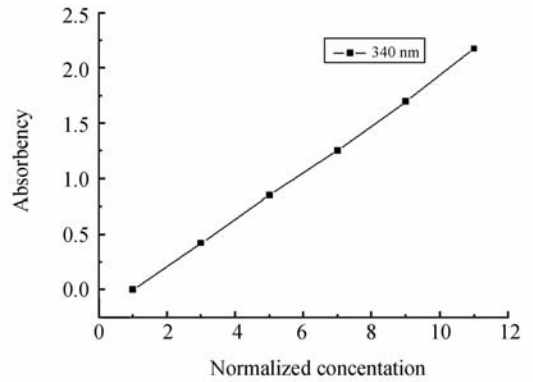


图 9 340 nm 处的吸光度曲线

Fig.9 Absorbency curve at 340 nm

5 结 论

对于采用基于 MEMS 技术微硅片狭缝的紫外-可见光谱仪,微硅狭缝的质量直接受其制作工艺的影响,因此,本文着重分析了基于微硅狭缝的紫外-可见光谱仪关键部件微狭缝缺陷引起杂散光的主要因素:刀口过厚和狭缝边缘的不直线性;其次,针对采用卤钨灯为光源进行光谱分析时,光谱仪紫外部分杂散光影响严重的问题,通过在入射狭缝前和探测器前增加双重滤光片的组合滤光片法,成功实现了平衡各谱段能量占有率的目的,抑制了紫外部分的杂散光。

参考文献:

- [1] 鞠挥, 吴一辉. 微型光谱仪的发展现状[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 372-376.
JU H, WU Y H. The State of the art of micro spectrometers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 372-376. (in Chinese)
- [2] 周连群, 吴一辉, 张平, 等. 基于 MEMS 技术的微型分光光度计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 990-997.
ZHOU L Q, WU Y H, ZHANG P, *et al.*. Micro-spectrophotometer based on MEMS technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 990-997. (in Chinese)
- [3] 李昌厚. 紫外可见分光光度计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
LI CH H. *UV-VIS Spectrophotometer* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [4] SHARPE M R, IRISH PYE D, LTD U. Stray light in diffraction grating monochromators[J]. *Journal of Modern Optics*, 25(9): 861-893.
- [5] PENCHINA C M. Reduction of stray light in in-plane grating spectrometers [J]. *Appl. Opt.* 1967, 6(6): 1029-1031.
- [6] ZONG Y Q, STEVEN W, BROWN B, *et al.*. Simple spectral stray light correction method for array spectroradiometers [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45: 1111-1119.
- [7] 沈海平, 潘建根, 冯华君, 等. 发光二极管光谱测量中的杂散光与带宽校正[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1493-1496.
SHEN H P, PAN J G, FENG H J, *et al.*. Stray light and bandpass correction in the spectral measurement for light emitting diodes [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(6): 1493-1496.
- [8] 郝道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 机械工业出版社, 2003.
YU D Y, TAN H Y. *Engineering Optics* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 黄梅珍, 倪一, 林峰, 等. 高速紫外-可见分光光度计的研制[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(6): 938-941.
HUANG M ZH, NI Y, LIN F, *et al.*. Development of high speed UV-Vis spectrophotometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, 25(6): 938-941. (in Chinese)
- [10] 周连群, 吴一辉, 张平, 等. 一种采用微硅片狭缝的新型微小型光纤光谱仪[J]. 光学精密工程, 2005, 13(6): 637-642.
ZHOU L Q, WU Y H, ZHANG P, *et al.*. A new mini-fiber-spectrometer by adopting micro-silicon-slit [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 637-642. (in Chinese)

作者简介:



黎海文(1976—), 男, 江西丰城人, 博士, 副研究员, 1999 年于吉林大学获得学士学位, 2005 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事微型生化分析仪方面的研究。E-mail: lihw@ciomp. ac. cn



郝鹏(1982—), 男, 河北石家庄人, 博士, 助理研究员, 2004 年于燕山大学获得学士学位, 2009 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事微光机电系统及表面等离子体共振生物传感器方面的研究。E-mail: hp312@126. com



吴一辉(1965—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 研究员, 博士生导师, 主要从事 MOMES 技术、微流体、光探测技术和皮卫星姿态控制飞轮等方面的研究。E-mail: yihuiwu@ciomp. ac. cn