

## 平板波导光谱仪中光栅多次衍射杂散光的抑制

李扬裕<sup>1,2</sup>, 方勇华<sup>1</sup>, 李大成<sup>1</sup>, 李亮<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 平板波导光谱仪是一种紧凑型光谱仪, 其光栅多次衍射杂散光大, 需要进行抑制。首先研究了多次衍射杂散光的形成过程, 并通过 TracePro 软件详细分析了多次衍射杂散光的传播路径和大小。然后根据杂散光的空间特性和波长特性对其进行分类, 采取不同的抑制方法。在不改变原有光学结构的基础上提出了利用滤光片和挡光板来抑制多次衍射杂散光的方法, 滤光片的参数和位置需要精心选择以达到最好的抑制效果。最后对增加抑制结构前后的杂光系数进行对比分析。结果表明, 多次衍射杂散光得到了很好的抑制, 最大杂光系数从 5.3% 降到 0.033%, 平均杂光系数从 1.9% 降到 0.0018%。

**关键词:** 杂散光; 光栅多次衍射; 波导光谱仪; 交叉 Czerny-Turner 结构

**中图分类号:** TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0724001

## Suppression of grating multiply diffracted light in planar waveguide spectrometer

Li Yangyu<sup>1,2</sup>, Fang Yonghua<sup>1</sup>, Li Dacheng<sup>1</sup>, Li Liang<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Planar waveguide spectrometer is a compact spectrometer, which has an asymmetrical crossed Czerny-Turner optical structure within a planar waveguide structure. The multiply diffracted light of this spectrometer is large, so it needs to be carefully studied in order to find a suitable method to reduce it. The formed of the multiply diffracted light could be derived from the diffraction characteristic of grating. Then the stray light problem was identified by using the TracePro software. Then based on the difference of the spatial property and wavelength of stray light, different suppression methods were used. Filters and baffles were involved to suppress the multiply diffracted light, without changing the original optical structure. Finally, stray light coefficient was introduced to evaluate the effect using stray light suppression structure. Simulation and analysis results show that the multiply diffraction light of spectrometer has been well suppressed. The maximum of the stray light coefficient is reduced form 5.3% to 0.033%, and the average of it is dropped from 1.9% to 0.0018%.

**Key words:** stray light; grating multiply diffracted light; planar waveguide spectrometer; crossed Czerny-Turner structure

收稿日期: 2015-11-16; 修订日期: 2015-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61275173)

作者简介: 李扬裕(1986-), 男, 博士生, 主要从事光谱仪器的研究。Email: lyy1876@126.com

导师简介: 方勇华(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱遥测及目标识别技术方面的研究。Email: yhfang@aiofm.ac.cn

## 0 引言

大多数共面光栅光谱仪中都存在光栅多次衍射杂散光的问题,会影响光谱仪器的分析精度<sup>[1-3]</sup>。而且在大数值孔径和紧凑布局的小型光谱仪中,多次衍射杂散光的问题会更严峻。多次衍射杂散光的传播路径和大小与光栅的衍射特性以及光学元件的位置有关。

国外有文章报道了多次衍射杂散光<sup>[4-5]</sup>。由于多次衍射杂散光在光栅面上是会聚的,因此对光栅中间部分进行遮掩能有效地抑制多次衍射杂散光<sup>[5]</sup>。遮掩光栅的方法之前就用在 Littrow<sup>[6-7]</sup>、Ebert<sup>[8]</sup>和 Czerny-Turner<sup>[4]</sup>结构的光栅单色仪中,该方法也是著名的光栅制造商 Horiba-Jobin Yvon 公司推荐的补救措施。其他的方法还有让光栅工作在低衍射级次<sup>[9]</sup>、采样非共面光学设计<sup>[4,10]</sup>、使用双单色仪级联结构<sup>[11]</sup>。

国内还少有文章报道过多次衍射杂散光的问题。平板波导光谱仪是一款基于交叉非对称 Czerny-Turner 分光结构的紧凑型光谱仪,同时使用了平板波导结构进一步减小系统尺寸<sup>[12]</sup>。这种特殊结构使得它的多次衍射杂散光与一般 Czerny-Turner 结构的不同,上面提到的抑制杂散光的方法不适用。因此需要研究平板波导光谱仪中多次衍射杂散光的传播路径及大小,以寻找有效的抑制方法。

文中先简单介绍平板波导光谱仪的原理。然后介绍所用光栅的衍射特性,分析多次衍射杂散光产生的原因,并使用光学软件 TracePro 对多次衍射杂散光进行模拟分析。针对不同波长确定衍射杂散光的传播路径及大小,根据杂散光的空间特性和波长特性对其进行分类处理。在此基础上提出一种基于滤光片和挡光板的杂散光抑制方法,确定最优的滤光片摆放位置。最后用杂光系数对该方法的抑制效果进行评价。

## 1 平板波导光谱仪简介

平板波导光谱仪的光学系统结构如图 1 所示<sup>[12]</sup>。间隔很小的上下镀金反射镜构成中空平板波导,交叉非对称 Czerny-Turner 结构置于平板波导中间。在色散平面上,光线从狭缝发出,经柱面反射镜(准直镜)准直后入射到光栅上,光栅的+1 级衍射光经柱面

反射镜(会聚镜)会聚后入射到线阵探测器上;在垂直色散平面上,平板波导和柱面透镜(准直透镜、会聚透镜)起到了限制光束尺寸的作用,是一种非成像设计。

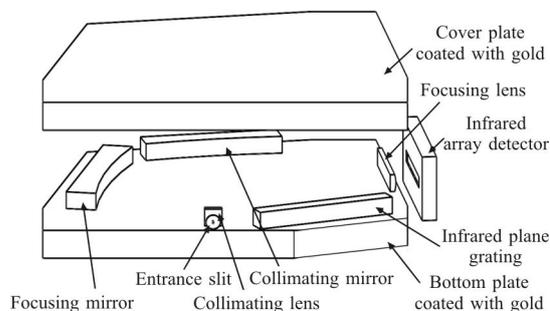


图 1 平板波导光谱仪的光学结构

Fig.1 Principal structure of planar waveguide spectrometer

## 2 光栅多次衍射杂散光分析

仪器的工作波长为 8~12 μm, 光谱分辨率 80 nm, 数值孔径 0.22。使用的光栅为平面刻划光栅, 刻线数 50 lp/mm, 闪耀波长 12 μm, 闪耀角 17.27°, 表面镀金。设计时认为光栅是理想的, 仅有+1 级衍射光。实际中, 光栅还存在其他衍射级次。用光栅设计软件 G Solver 计算得到光栅衍射光的能量分布如图 2 所示。衍射效率随波长变化,+1 级的平均衍射效率有 74%, 其他的衍射级次占 25%, 剩下的 1% 被吸收了。

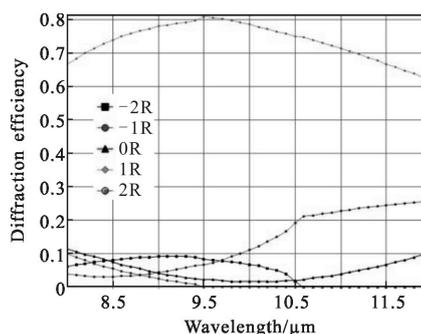


图 2 光栅衍射光的能量分布

Fig.2 Energy distribution of grating diffracted light

根据光栅方程可得衍射角  $\theta$  的计算公式:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{m\lambda}{d} - \sin i\right) \quad (1)$$

式中: $m$  为衍射级次; $d$  为光栅常数; $\lambda$  为入射光波长; $i$  为入射角。根据公式(1)和入射光波长范围, 计算并画出光栅衍射光的空间分布如图 3 所示。

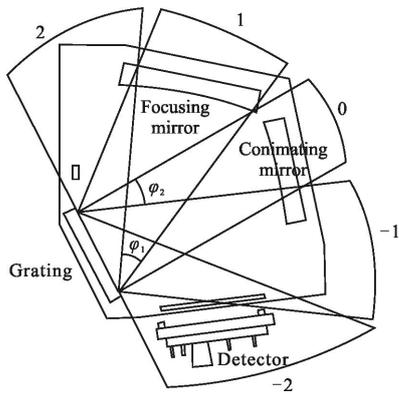


图 3 光栅衍射光的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the grating diffracted light

从图 3 中可以看出, +2 级衍射光不发生多次衍射的条件是: 会聚镜在  $8\ \mu\text{m}$  入射光的 +2 级与 +1 级衍射光的夹角  $\varphi_1$  内; -1 级衍射光不发生多次衍射的条件是: 准直镜在  $8\ \mu\text{m}$  入射光的 -1 级与 0 级衍射光的夹角  $\varphi_2$  内。近似计算用下面的公式:

$$\varphi_1 = \theta_{+2} - \theta_{+1} > \arctan(W_{FM} \cos \beta / L_{CF})$$

$$\varphi_2 = \theta_0 - \theta_{-1} > 2i + \arctan(W_{CM} \cos \alpha / L_{CG}) \quad (2)$$

式中:  $\theta_{+2}$ 、 $\theta_{+1}$ 、 $\theta_0$ 、 $\theta_{-1}$  分别为 +2 级、+1 级、0 级、-1 级衍射光出射角;  $W_{CM}$  为准直镜的宽度;  $W_{FM}$  为会聚镜的宽度;  $\alpha$  为准直镜的离轴角;  $\beta$  为会聚镜的离轴角;  $L_{CG}$  为准直镜到光栅的距离;  $L_{CF}$  为光栅到会聚镜的距离。

由于该系统的数值孔径比较大, 导致系统中光学元件的宽度也比较大,  $W_{CM}=64\ \text{mm}$ ,  $W_{FM}=48\ \text{mm}$ 。其他参数  $\alpha=12^\circ$ ,  $\beta=18^\circ$ ,  $L_{CG}=90\ \text{mm}$ ,  $L_{CF}=84\ \text{mm}$ ,  $d=20\ \mu\text{m}$ ,  $i=-3^\circ$ , 代入公式(1)和(2)中计算得:

$$\varphi_1 = \theta_{+2} - \theta_{+1} = 31.57^\circ < \arctan(W_{FM} \cos \beta / L_{CF}) = 35.93^\circ$$

$$\varphi_2 = \theta_0 - \theta_{-1} = 23.34^\circ < 2i + \arctan(W_{CM} \cos \alpha / L_{CG}) = 33.55^\circ$$

可见该系统中 +2 和 -1 级衍射光会形成多次衍射杂散光, 而 -2 级是直接形成杂散光。

下面借助光学追迹软件进行杂散光分析。先在 Solidworks 中建立光学系统的三维模型, 然后导入到 TracePro 中, 添加表面和材料属性。光栅表面属性按图 2 设置, 其他表面为理想表面(理想透镜表面、理想反射镜表面、理想吸收表面)。光源为 Grid Source, 波长为  $8、9、10、11、12\ \mu\text{m}$ , 各波长光线数量为 1 141, 阈值为 0.000 1, 颜色为“Exponential Extended”(颜色越红, 光线能量越大)。光线追迹完成后选择探测器光

敏面, 然后选择“Ray Sorting”为“Select Surface”, 得到光路图(没有画出正常光线)如图 4 所示。

从图中可以看出杂散光杂乱地分布在整个探测器上, 传播路径与正常光有重叠(如图 4(a)所示), 而且在探测器处都是会聚的(如图 4(b)所示)。通过仔细分析杂散光的波长、传播路径和大小, 找到抑制这些杂散光的方法。

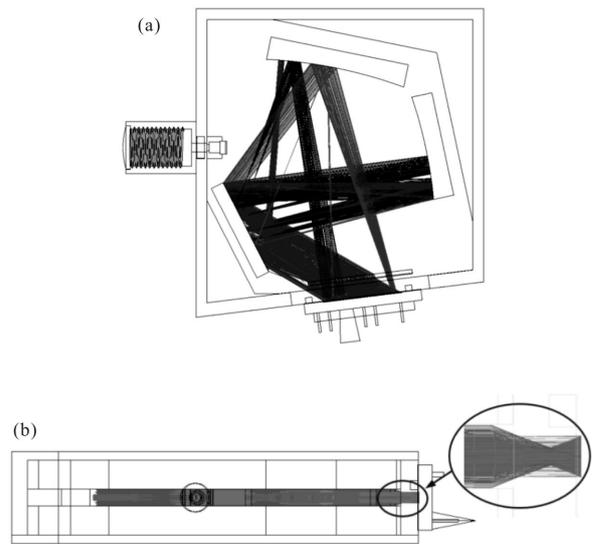


图 4 实际中到达探测器的杂散光

Fig.4 Light reaching the detector in practice

以  $8\ \mu\text{m}$  波长为例, 其光线追迹结果如图 5 所示, 其中图 5(a)为光线图, 图 5(b)为传播路径示意图, 用不同序号标出不同的传播路径。①为 +1 级衍射光, 是正常光; ②为 -2 级衍射光; ③为二次衍射光, 第一次衍射为 -1 级, 被准直镜反射回光栅, 第二次衍射为 +1 级, 被会聚镜反射经会聚透镜到达探测器; ④为二次衍射光, 第一次衍射为 +2 级, 被会聚镜反射回光栅, 第二次衍射为 0 级, 经会聚透镜到达探测器。

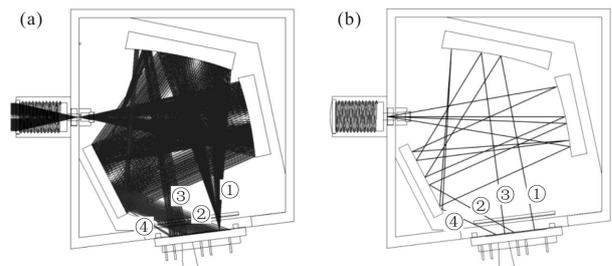


图 5 波长  $8\ \mu\text{m}$  的光线传播路径

Fig.5 Light propagation paths of  $8\ \mu\text{m}$

然后用同样的方法分析其他波长的杂散光,如图 6 所示,此处就不详细说明了。发现不同的杂散光的传播路径和波长特性是有区别的,需要用不同的方法进行抑制。将探测器前的区域分为:A、B、C、D,如图 7 所示。区域 A 和 D 在正常光路之外,经过这两个区域的杂散光与正常光分开了,可以通过挡光板进行抑制。区域 B、C 中杂散光与正常光在空间上是重叠的,但是在波长上两者是分开的。区域 B 中是小于  $9.6\ \mu\text{m}$  的杂散光,与大于  $10.6\ \mu\text{m}$  的正常光重合。区域 C 中是  $9.4\sim 10.6\ \mu\text{m}$  的杂散光,与小于  $9.0\ \mu\text{m}$  的正常光重合。同时还发现  $12\ \mu\text{m}$  波长没有杂散光,通过更精细的分析,确定  $11.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$  波段都没有多次衍射杂散光。

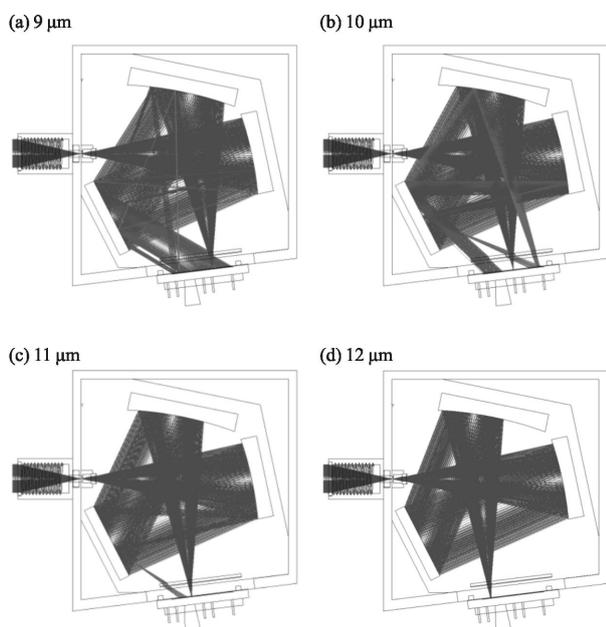


图 6 其他波长的杂散光

Fig.6 Stray light propagation paths of other wavelength

### 3 多次衍射的抑制方法

根据第 2 节的结果,在不改变原有光学结构的基础上,提出利用滤光片和挡光板来抑制杂散光的方法。挡光板挡杂散光的同时不能挡正常光,所以要将挡光板放在正常光路之外,杂散光经过的地方。在挡光板上加工消光槽并涂吸光材料,杂散光在上面经过至少两次散射,强度将大大减弱。滤光片可以让杂散光被反射和吸收,而让正常光通过。在区域 B 用一块起始波长为  $10.2\ \mu\text{m}$  长通滤光片(5%透过率波长

$9.7\ \mu\text{m}$ ,  $10.6\sim 12\ \mu\text{m}$  透过率大于 90%,厚度  $0.5\ \text{mm}$ ),在区域 C 用一块截止波长为  $9.3\ \mu\text{m}$  的短通滤光片(5%透过率波长  $9.6\ \mu\text{m}$ ,  $8\sim 9\ \mu\text{m}$  透过率大于 90%,厚度  $0.5\ \text{mm}$ ),如图 7 所示。滤光片的摆放位置要仔细选择,既要有效抑制杂散光,又不能产生新的杂散光。一般是将滤光片贴着探测器窗口放置,但是该系统中不能这么做,会导致杂散光滤除不干净,滤光片放在图示位置的滤除效果最好。从图 8 中可以看出多次衍射杂散光得到了很好的抑制。

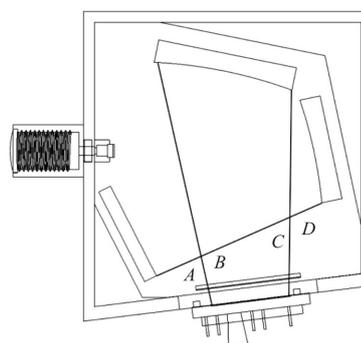


图 7 光线传播路径的分类

Fig.7 Sort of light propagation paths

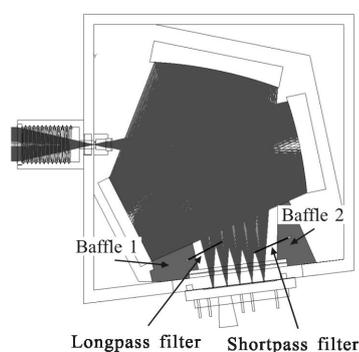


图 8 杂散光抑制结构

Fig.8 Stray light suppression structure

更客观的是用杂光系数来评价。杂光系数定义为杂散光占总信号的百分比。探测器共有 64 个像元,对每一个像元都计算杂光系数。设置一个 Grid Source 的宽带光源,其波长从  $7\sim 13\ \mu\text{m}$ ,每间隔  $0.01\ \mu\text{m}$  取一个波长。由于波长间隔远小于光谱分辨率,对光学系统而言可以当作是宽带光源。每个波长有光线 1 141 条,共有 685 741 条。使用 Simulation Mode 进行光线追迹,选择探测器光敏面为 Exit Surface。将 Irradiance Maps 中的数据提取出来用于计算杂光系

数,抑制杂散光前后的杂光系数如图 9 所示。

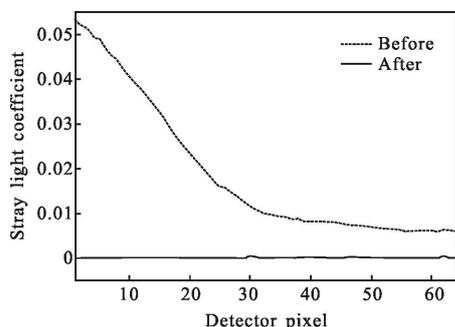


图 9 各个像元的杂光系数

Fig.9 Stray light coefficient of each pixel

没有抑制杂散光前,最大杂光系数为 5.3%,平均杂光系数为 1.9%,探测器上杂散光从左往右渐渐降低;抑制杂散光后,最大杂光系数为 0.033%,平均杂光系数为 0.0018%,基本没有杂散光了。对于吸光度为 0.1 的样品的测量,5.3%的杂散光能造成 5.6%的分析误差,0.033%的杂散光仅造成 0.037%的分析误差<sup>[2]</sup>。因此对于高精度分析,降低杂散光显得尤为重要。

#### 4 结论

平板波导光谱仪作为一款紧凑型光谱仪,其多次衍射杂散光问题同样严峻,而且还不能使用常用的抑制方法。文中从各个波长的衍射杂散光分析入手,根据杂散光的空间特性和波长特性对其进行分类,有些杂散光在空间上与正常光线分开,有些杂散光在波长上与正常光线分开。对于空间上能分开的杂散光采用挡光板进行抑制,对于空间上分不开而波长上能分开的杂散光采用滤光片进行抑制。为了不引入新的杂散光,滤光片的位置需要精心选择,以达到最优的抑制效果。在不改变原有光学结构的基础上达到了抑制杂散光的目的。TracePro 仿真的结果表明这种方法显著地降低了杂散光水平,最大杂光系数从 5.3%降到 0.033%,平均杂光系数从 1.9%降到 0.0018%。

基于滤光片和挡光板的方法虽然是一种补救措施,但所研究结果亦对同类仪器的设计有很好的借鉴作用。研究过程中还发现,在工作波段较窄的情况下,可能存在一个没有多次衍射杂散光的光学

结构,如平板波导光谱仪中 11.5~12.5  $\mu\text{m}$  波段就没有杂散光。

#### 参考文献:

- [1] Neumann W. Fundamentals of Dispersive Optical Spectroscopy Systems [M]. US: SPIE Press, 2014.
- [2] Li Changhou. UV-VIS Spectrophotometry [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 72-83. (in Chinese)  
李昌厚. 紫外可见分光光度计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 72-83.
- [3] Zhai Shanshan. Model design and performance evaluation method of stray-light testing equipment for diffraction grating [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)  
翟珊珊. 衍射光栅杂散光测试仪模型设计及性能评价方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [4] Penchina C M. Reduction of stray light in in-plane grating spectrometers [J]. *Applied Optics*, 1967, 6(6): 1029-1060.
- [5] Pribram J K, Penchina C M. Stray light in Czerny-Turner and Ebert spectrometers [J]. *Applied Optics*, 1968, 7(10): 2005-2019.
- [6] Alpert N L. Infrared filter grating spectrophotometers-design and properties [J]. *Applied Optics*, 1962, 1(4): 437-479.
- [7] Stamm R F, Salzman J C F. Photoelectric Raman spectrometer with automatic range changing. II. Conversion of Perkin-Elmer infrared instrument to grating type [J]. *J Opt Soc Am*, 1953, 43(2): 126-163.
- [8] Tyler J E, Smith R C. Submersible spectroradiometer [J]. *J Opt Soc Am*, 1966, 56(10): 1390-1396.
- [9] Watanabe A, Tabisz G. Multiply diffracted light in Ebert monochromators[J]. *Applied Optics*, 1967, 6(6): 1132-1136.
- [10] Welford W. Stigmatic Ebert-Type plane grating mounting [J]. *JOSA*, 1963, 53(6): 766-772.
- [11] Landon D, Porto S. A tandem spectrometer to detect laser-excited Raman radiation [J]. *Applied Optics*, 1965, 4(6): 762-765.
- [12] Li Yangyu, Fang Yonghua, Li Dacheng, et al. Optical design of miniature infrared gratings spectrometer based on planar waveguide[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(3): 841-846. (in Chinese)  
李扬裕, 方勇华, 李大成, 等. 基于平板波导的小型红外光栅光谱仪光学设计 [J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(3): 841-846.