

# 新型便携式中阶梯光栅光谱仪 光学设计与消杂散光研究

杨 晋<sup>1,2</sup> 尹 禄<sup>1,2</sup> 姚雪峰<sup>1</sup> 巴音贺希格<sup>1</sup> 唐玉国<sup>1</sup> 朱继伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 中阶梯光栅光谱仪凭借着高分辨率、小体积、全谱瞬态直读等优异特性成为了现代光谱仪器研究的热点和重点。为了进一步缩小它的体积,提高仪器信噪比和检出限,设计了一种新型结构的中阶梯光栅光谱仪,其折叠主光路的设计可以在不改变成像质量、不降低光谱分辨率的前提下减小仪器体积,光学尺寸小于165 mm×70 mm×65 mm,光谱分辨率为0.06 nm@200 nm。同时设计了挡板、光阑等结构减小仪器的杂散光,经过光线追迹仿真实验,新型中阶梯光栅光谱仪杂散光低于 $2\times 10^{-5}$ ,显著地提高了仪器的信噪比。

**关键词** 光学设计; 中阶梯光栅光谱仪; 优化; 杂散光; 消杂光设计

中图分类号 TH744.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0812001

## Optical Design and Stray Light Suppression of A New Portable Echelle Spectrometer

Yang Jin<sup>1,2</sup> Yin Lu<sup>1,2</sup> Yao Xuefeng<sup>1</sup> Bayanheshig<sup>1</sup> Tang Yuguo<sup>1</sup> Zhu Jiwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Echelle spectrometer is becoming a hot research and focus of modern spectrograph with the outstanding features of high resolution, small size, full spectrum transient direct-reading. In order to further refine its volume, improve the signal to noise ratio and the detection limit, a new structure of echelle spectrometer is designed. By folding main optical path, the new design has smaller size and lower stray light without reducing spectral resolution and image quality. It's optical size is less than 165 mm×70 mm×65 mm, and spectral resolution is 0.06 nm@200 nm. The baffle and diaphragm is designed to further reduce stray light. Through ray tracing simulation, the stray light of the new echelle spectrometer is less than  $2\times 10^{-5}$ , the signal to noise ratio is improved significantly.

**Key words** optical design; echelle spectrometer; optimization; stray light; anti-stray-light design

**OCIS codes** 120.4570; 120.6200; 220.2740; 290.2648; 300.6190

## 1 引 言

中阶梯光栅光谱仪与同体积的光谱仪器相比具有极高的光谱分辨率、极快的光谱分析速度、较高的能量传输效率,逐渐被应用于许多对光谱仪器具有较高要求的系统中。目前,中阶梯光栅光谱仪与电感耦合

收稿日期: 2014-11-24; 收到修改稿日期: 2015-02-13

**基金项目:** 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2014YQ120351)、国家自然科学基金(60478043)、国家重大科研装备研制项目(ZBYZ2008-1)、中国科学院重大科研装备研制项目(YZ200804)、国家重大科学仪器设备开发专项项目(11YQ120023)、吉林省重大科技攻关项目(09ZDGG005)

**作者简介:** 杨 晋(1988—),男,博士研究生,研究实习员,主要从事分光系统光学设计方面的研究。

E-mail: yangjinl@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 唐玉国(1967—),男,博士,研究员,主要从事光谱仪器及医用光谱技术方面的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

等离子体(ICP)技术<sup>[1-2]</sup>以及激光诱导等离子体(LIBS)技术<sup>[3-4]</sup>相结合的产品在原子发射光谱分析领域具有明显的优势,极大地推动了原子发射光谱技术的发展。

相比于具有相同光谱分辨率的扫描式光谱仪而言,中阶梯光栅光谱仪具有全谱直读、实时分析的优点,因此其越来越多地被应用在原子发射光谱技术中;并且针对中阶梯光栅光谱仪小体积、高光谱分辨率、快速实时分析的特点,其开始被应用于户外便携式试验和作为小型载荷等方面。目前,国外已有多家公司研制出了与电感耦合等离子体技术、激光诱导等离子体技术结合的中阶梯原子发射光谱仪。我国对中阶梯光栅光谱仪的研究起步于2008年,已有多家机构提出了中阶梯光栅光谱仪的光学模型并由中科院长春光机所研制出了第一台原理样机<sup>[5]</sup>,但其整体呈平板的长方块状,且探测器与标定光源均设计在长边方向,并不利于便携式应用和作为小型载荷。

鉴于此,在现有研究基础上,本文提出了一种新型的光路折叠式中阶梯光栅光谱仪,利用中阶梯光栅、反射棱镜等元件将主光路进行多次折返,充分利用了光谱仪的体积,在不降低成像质量和光谱分辨率的前提下,仪器总体积缩小了1/4,同时设计折叠预留的空间使仪器可以在不增加体积的前提下,利用平面折返镜将入臂和出臂由原来的长边方向折转到短边方向,作为探测器与标定光源接口,使整个仪器结构更为立体、紧凑,利于便携式研发。此外,对于光学仪器而言,杂散光主要是由内部元件和仪器壁的多次散射引起的,体积的减小对仪器的杂散光水平提出了更高的要求,因此在主光路之间设计了带有相应通光孔的挡板以降低仪器的杂散光,提高其信噪比,并通过光线追迹软件仿真验证了消杂散光效果。

## 2 传统中阶梯光栅光谱仪光学结构

目前国内长春光学精密机械与物理研究所<sup>[5-6]</sup>研制的中阶梯光栅光谱仪原理样机和天津大学<sup>[7-8]</sup>等研究机构均采用图1所示的光学结构。

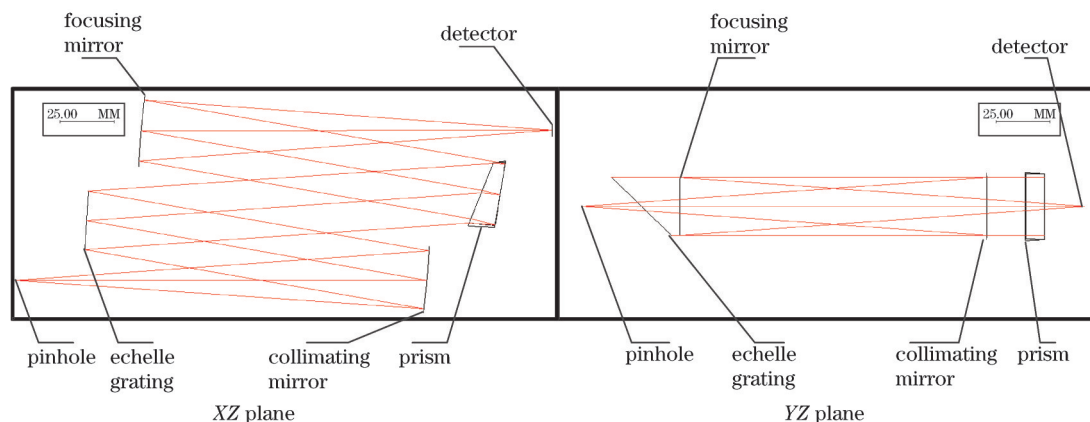


图1 中阶梯光栅光谱仪传统光学结构

Fig.1 Traditional optical structure of echelle spectrometer

在传统结构中,中阶梯光栅光谱仪由聚焦镜、准直镜(一般选择相同曲率半径和离轴角的离轴抛物镜以消除球差和轴外像差)、中阶梯光栅、反射棱镜和面阵探测器构成。光线经准直镜以平行光入射到光栅上,为了提高光能传输效率,光栅在准利特罗条件下使用。平行光经过中阶梯光栅色散后入射到棱镜上进行横向色散,最终经聚焦镜成像在面阵探测器上。从YZ俯视图中可以看出这种光学结构下的光学元件中心都在XZ平面上平铺开,即主光线始终在XZ平面内,除光栅外的任何光学元件并没有俯仰角度。这种传统结构的特点是有利于装调,但是光谱仪的体积并没有得到充分利用,据此提出了在保证光谱分辨率前提下缩小体积的新型光学结构。

## 3 新型中阶梯光栅光谱仪光学设计

### 3.1 新型便携式中阶梯光栅光谱仪光学结构

为了尽量减小中阶梯光栅光谱仪的体积,新型中阶梯光栅光谱仪的各光学元件中心不再采用在同一水

平面内的设计方式。通过各光学元件俯仰角度的变化实现主光线在Y轴方向上下折返从而达到充分利用仪器空间的效果,最终设计成图2所示光路结构。

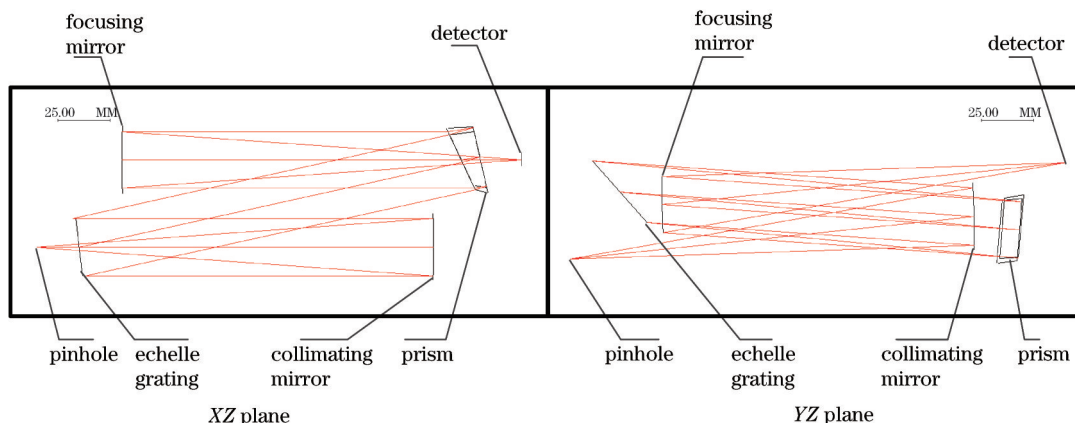


图2 新型便携式中阶梯光栅光谱仪光学结构

Fig.2 Optical structure of new portable echelle spectrometer

光线由针孔入射到准直镜,并以平行光出射进入光栅时在Y轴方向上产生一个正的纵向位移,中阶梯光栅在X轴方向设置偏置角形成准利特罗结构使衍射光线沿入射光线方向返回,并在Y轴方向上产生一个负的纵向位移。反射棱镜和聚焦镜也同样产生一正一负两个Y方向位移。这种光路结构在Y方向上的尺寸与传统结构相比略有增加,但在X方向上的尺寸比传统结构缩小了1/3以上,因此有效地减小了仪器的体积和质量,同时光栅与棱镜有相同的俯仰角,并没有增加装调难度而且对光谱分辨率没有影响。

### 3.2 光学系统设计

传统结构的整个光路主光线在同一平面内,中阶梯光栅虽然通过设置偏置角形成了锥面衍射,但是其色散平面仍然垂直于整个光路主光线所在平面,也就是反射棱镜色散平面。新型结构为了充分利用空间,使主光线上下偏折,并不在同一平面内,形成了更为复杂的空间锥面衍射。因此在利用光学设计软件进行光学设计时,新旧结构参数的选择有一定的差别。规定光栅绕X轴旋转 $\alpha$ 度,再绕Y轴旋转 $\beta$ 度,光栅锥面衍射方程为:

$$m\lambda = d(\sin i_e \cdot \cos \varepsilon + \sin i'_e \cdot \cos \varepsilon'), \quad (1)$$

式中 $m$ 为级次, $\lambda$ 为波长, $d$ 为光栅常数, $i_e$ 、 $i'_e$ 分别为入射光线和衍射光线在主截面内投影与法线的夹角, $\varepsilon$ 、 $\varepsilon'$ 分别为入射光线和衍射光线与主截面的夹角。

在准利特罗条件下有:

$$i_e = i'_e, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon', \quad (3)$$

即光栅锥面衍射方程可以简化为:

$$m\lambda = 2d \sin i_e \cdot \cos \varepsilon. \quad (4)$$

如图3所示,传统结构中有:

$$\alpha = i_e = i'_e, \quad (5)$$

$$\beta = \varepsilon = \varepsilon'. \quad (6)$$

新型结构的光学系统是根据光栅主截面对称的,如图4所示,新型结构除了满足(2)式和(3)式,各角度还满足以下关系:

$$\sin \varepsilon = \sin \beta \cdot \cos \alpha, \quad (7)$$

$$\tan i_e = \frac{\tan \alpha}{\cos \beta}. \quad (8)$$

因此在进行光学设计时,根据中阶梯光栅的闪耀角和空间结构,可以确定光栅入射角 $i_e$ 、偏置角 $\varepsilon$ ;光栅的旋转量 $\alpha$ 、 $\beta$ 则由(7)式和(8)式确定。

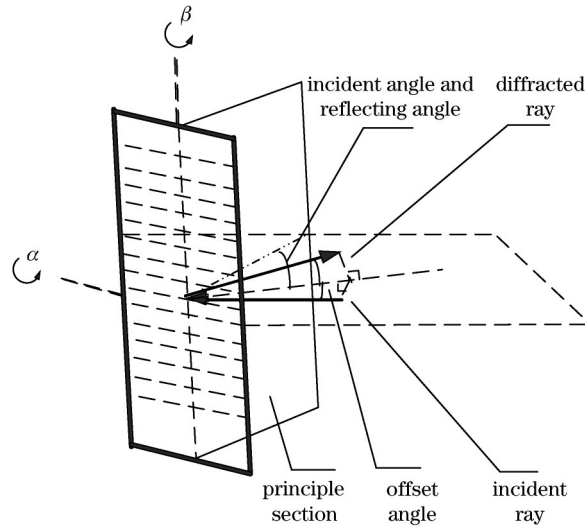


图3 传统结构中阶梯光栅锥面衍射示意图

Fig.3 Echelle conical diffraction mounting of traditional structure

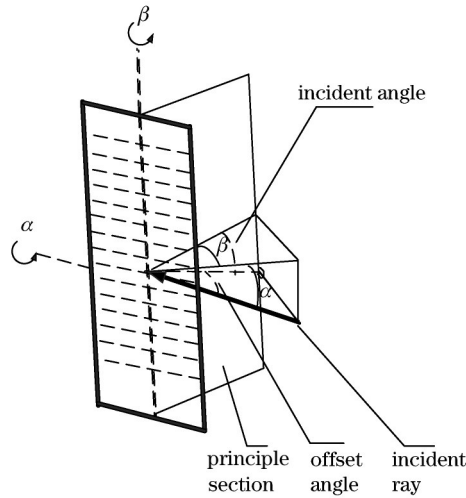


图4 新型结构光栅锥面衍射示意图

Fig.4 Conical diffraction mounting of new structure

此外,根据空间光线光路计算,假设光栅衍射光线与 $XZ$ 、 $YZ$ 平面的夹角分别为 $\alpha'_c$ 和 $\beta'_c$ ,则有以下关系:

$$\alpha'_c = \arccos \left( \frac{1 - 2 \sin \varepsilon \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha}{\sqrt{1 + 4 \sin^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \beta - 4 \sin \varepsilon \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha}} \right) + \alpha_c, \quad (9)$$

$$\beta'_c = \arctan \left( \frac{2 \sin \varepsilon \cdot \cos \beta}{\cos \alpha'_c \cdot \sqrt{1 + 4 \sin^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \beta - 4 \sin \varepsilon \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha}} \right), \quad (10)$$

式中 $\alpha_c$ 为光栅入射光线与光轴的夹角。

假设 $T$ 为光栅衍射光线到棱镜在 $Z$ 轴上投影的距离,则棱镜在空间坐标系中的偏移量为:

$$D_x = T \cdot \tan \beta'_c, \quad (11)$$

$$D_y = T \cdot \tan \alpha'_c, \quad (12)$$

根据(2)、(3)式以及(7)~(12)式完成真实的光线追迹,并通过结构对称性进一步确定棱镜和聚焦镜的转角,然后计算出系统残余像差进行系统优化。最终设计的新型小体积中阶梯光栅光谱仪,其光谱范围为200~600 nm,焦距为150 mm,光谱分辨率为0.06nm@200nm(如图5所示),光学尺寸为165 mm×70 mm×65 mm,与等焦距的传统结构相比较(165 mm×116 mm×52 mm),宽度减小了1/3以上而高度略微增加。还可利用折叠后的预留空间,

通过在入臂和出臂上增加折返镜进一步减小系统的长度,将光源和探测器折到宽度方向上,使其光学尺寸为 125 mm×90 mm×65 mm,使得整个仪器结构更加紧凑以利于便携化开发,如图 6 所示。

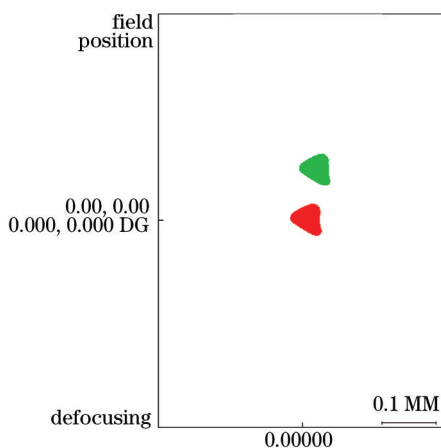


图 5 200.00 nm 和 200.06 nm 点列图

Fig.5 Spot diagram of 200.00 nm and 200.06 nm

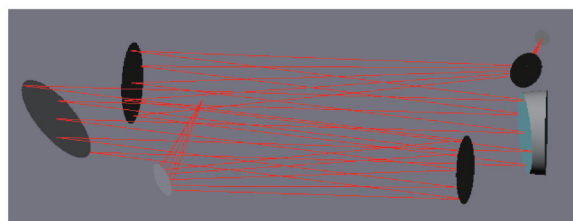


图 6 新型便携式中阶梯光栅光谱仪三维示意图

Fig.6 3D schematic diagram of new portable echelle spectrometer

空间折叠的设计,使系统的离轴角可以进一步减小,并且设计依然保持子午和弧矢方向上的对称性,更好地抑制了轴外像差,成像质量进一步的提高,如图 7 所示。

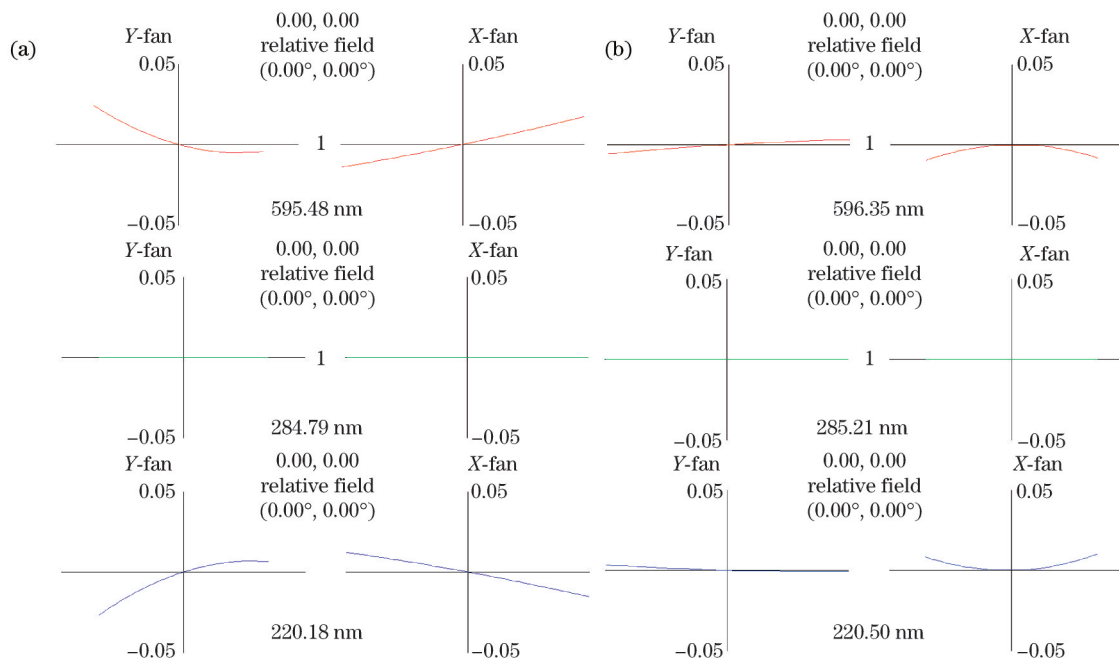


图 7 像差曲线对比。(a) 传统光谱仪; (b) 新型光谱仪

Fig.7 Comparison of aberration curves. (a) Traditional spectrometer; (b) new spectrometer



## 4 杂散光分析与抑制

### 4.1 中阶梯光栅光谱仪杂散光分析

光谱仪器的入射针孔或狭缝的尺寸都很小,限制了外部杂散光的强度,仪器的杂散光主要是由内部元件和仪器壁的多次散射引起的。对于以光栅为核心分光元件的仪器而言,光栅非使用级次的光为内部杂散光的主要来源,这些光线通过镜面以及仪器内壁、支架的反射和散射进入探测器。由于中阶梯光栅光谱仪交叉色散的特性避免了光栅级次重叠带来的影响,而且中阶梯光栅非使用级次的衍射光光路远离主光路照射到反射率相对较低的仪器壁上,因此与一般光栅光谱仪相比,中阶梯光栅光谱仪的杂散光相对较弱。但对于便携式中阶梯光栅光谱仪来说,体积的减小对仪器的杂散光水平提出了更高的要求,同时还要兼顾全谱瞬态直读实时分析的应用需求,因此,对杂散光进行分析和消杂散光结构的研究是必要的。

中阶梯光栅光谱仪的杂散光一般主要来源于主光线附近的由光栅、棱镜和反射镜产生的小角度散射光,这一部分光目前只能通过提高光学元件粗糙度、面型精度等方式来降低。除此之外还有一部分杂散光来源于光学元件的大角度散射光,新型中阶梯光栅光谱仪的空间折叠结构设计可以有效抑制这部分杂散光,同时还可通过在光路之间设置挡板、光阑等进一步减小该部分杂散光。

### 4.2 杂散光抑制结构设计及仿真参数设置

采用新型中阶梯光栅光谱仪结构,在入射光路和出射光路上设置平面折返镜来进一步缩小仪器体积,构建如图8所示的光线追迹模型。入射折返镜1将入射光反射到准直镜2上,出射的平行光进入中阶梯光栅3,再经过反射棱镜4进行交叉色散,最终经过聚焦镜5和折返镜6成像在像面上。为了抑制光学元件大角度散射产生的杂散光,在折叠光路之间设计了一系列的挡板和光阑结构,并对挡板和光阑做涂黑处理降低其反射率以起到抑制杂散光的效果。带有小孔光阑的挡板7用来格挡中阶梯光栅和聚焦镜,避免准直镜的散射光入射到聚焦镜上;挡板10用来格挡反射棱镜和折返镜6,避免折返镜下方的杂散光通过折返镜6进入探测器;挡板9用来格挡准直镜和反射棱镜,避免准直镜的散射光入射到聚焦镜或者折返镜2上;挡板8用来格挡中阶梯光栅和折返镜1,避免中阶梯光栅的散射光和非使用级次衍射光入射到折返镜1上。带有挡光环的遮光筒11罩在探测器镜头前,用来遮挡成像视场外的光线。

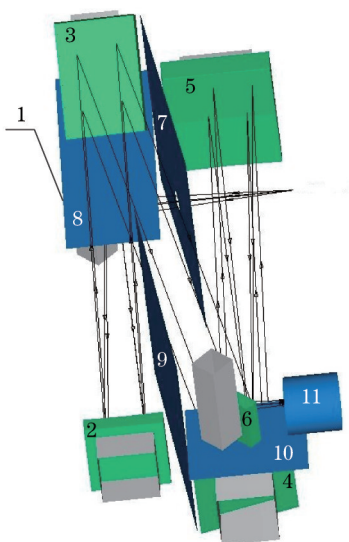


图8 杂光抑制结构示意图

Fig.8 Construction of stray light repression

在光线追迹仿真中,总光线数选择能够产生稳定解(即再增加追迹光线的数量,杂散光水平也几乎不变)的 $2.25 \times 10^6$ 根,光源总强度为1000,数值孔径与仪器数值孔径相同。光栅、棱镜、反射镜表面采用哈维模型,相应参数为 $b_0=1.6161$ , $s=-1.8526$ , $l=0.0051$ ;仪器壁、光学元件支架、杂散光抑制挡板表面采用郎伯模型,吸收率为90.5%;光线分裂次数为2次,散射次数为2次。由于中阶梯光栅光谱仪能够一次性对宽波段光谱成像,不同波长对应衍射级次不同,仿真采用单波长叠加的方式,每次考察一个波长的杂散光强度,选择衍

射级次为  $m-2, m-1, m, m+1, m+2$  (其中  $m$  为所考察波长的闪耀级次), 设置 5 个级次的能量分布为 1:2:4:2:1。

### 4.3 评价标准与仿真结果

目前普遍采用的光谱仪器杂散光评价标准为: 选择某一波长通道对应的探测器像元作为参考像面, 当复色光入射时, 考察过滤掉该通道对应波长后接收到的光强与参考像面直接接收到的光强的比值:

$$\eta = \frac{\bar{I}_{\lambda_0}}{I}, \quad (13)$$

其中  $I$  为入射到参考像面的总光强,  $\lambda_0$  为参考像面对应通道的中心波长,  $\bar{I}_{\lambda_0}$  为过滤掉中心波长后参考像面接收到的光强。

考虑到中阶梯光栅全波闪耀和所使用级次跨度范围大的特点, 在光线追迹仿真过程中每次考察一个波长, 记录其入射到参考像面的光强度。在选择追迹波长时, 不同于一般光谱仪器在波段范围内等间隔选取, 考虑到不同波长成像在探测器上的位置, 选择在探测器像面上成像位置等间隔的一系列波长, 依次求出每个波长对应的杂散光相对强度  $\eta_i$ , 有:

$$\eta_i = \frac{I_{\lambda_i}}{I_{\lambda_0}}, \quad (14)$$

其中  $I_{\lambda_i}$  为第  $i$  个波长到达参考像面的光强,  $I_{\lambda_0}$  为中心波长到达参考像面的光强。则整个波段的杂散光相对强度  $\eta$  为:

$$\eta = \int P(\lambda) \eta_i d\lambda, \quad (15)$$

其中  $P(\lambda)$  为光源辐通量随波长变化的函数。

选取中心波长  $\lambda_0 = 258 \text{ nm}$  的通道, 对所设计的新型中阶梯光栅光谱仪进行光线追迹仿真实验, 对比添加挡板结构前后的杂散光相对强度, 得到的实验结果如图 9 所示, 黑色实线为增加消杂散光结构后的杂散光模拟曲线, 灰色区域为增加消杂散光结构前后的杂散光差值。

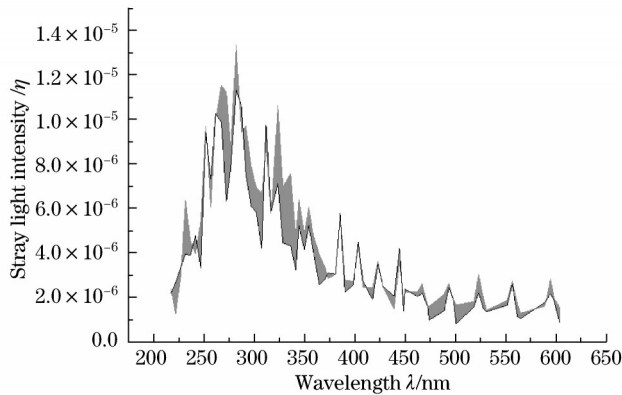


图 9 不同波长在中心通道产生的杂光对比图

Fig.9 Comparison of stray light in central channel at different wavelengths

从图中灰色区域可见, 虽然某些波长区域在添加抑制结构前后杂散光水平差别不明显甚至微有增加, 但从整体上看大部分光谱范围内校正后的杂散光都有所改善, 抑制效果较为明显, 整体杂散光水平下降 15%。但是由于中阶梯光栅光谱仪本身的结构特点决定了其杂散光主要来源于主光路附近光学元件自身的散射, 因此对杂散光的进一步抑制需要对光学元件的加工提出更高的要求。新型中阶梯光栅光谱仪的相对杂散光水平基本在  $10^{-6} \sim 10^{-5}$  量级之间, 取其平均值  $\bar{\eta} = 5 \times 10^{-5}$ , 可将计算仪器杂散光相对强度的(15)式简化为:

$$\eta = \frac{\Delta\lambda_0}{\Delta\lambda} \bar{\eta}, \quad (16)$$

其中  $\Delta\lambda$  为光源中包含的波长范围,  $\Delta\lambda_0$  为仪器的整个波长范围。在本仪器中, 以光源辐通量不随波长变化的理想白光光源, 即  $P(\lambda) = 1$  作为入射光, 光谱范围  $\Delta\lambda_0$  为 400 nm, 新型便携式中阶梯光栅光谱仪的杂散光强度小于  $8 \times 10^{-4}$ 。目前, 中阶梯光栅光谱仪主要应用于电感耦合等离子体原子发射光谱分析(ICP-AES)技

术以及激光诱导等离子体光谱分析技术,其光源的特征峰一般为十几个到几十个,每个特征峰谱线宽度小于0.1 nm左右,故而光源包含的波长范围 $\Delta\lambda$ 一般在10 nm以内。据此可粗略估算出所设计的新型便携式中阶梯光栅光谱仪的杂光强度小于 $2 \times 10^{-5}$ ,与国外同类型中阶梯光栅光谱仪的杂散光水平相当,因此该光谱仪不仅具有小体积,而且具有较低杂散光水平。

## 5 结 论

设计了一种新型的便携式中阶梯光栅光谱仪,并针对其结构特点设计了一种抑制杂散光的结构,结果表明:1) 新型结构利用主光路的折叠,在不牺牲光谱分辨率的前提下提高了成像质量和缩小了仪器体积;2) 通过利用空间折叠结构和在主光路间设置挡板、光阑、遮光筒的方式对杂散光起到一定的抑制作用,使整个仪器的杂散光水平在 $10^{-5}$ 量级;3) 光学系统建模和杂散光分析仿真实验证明该设计具有可行性,可以用于指导实际仪器的设计与加工。

## 参 考 文 献

- 1 Sarah C, Jantzi Jose R, Almirall. Elemental analysis of soils using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) and laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) with multivariate discrimination: tape mounting as an alternative to pellets for small forensic transfer specimens[J]. *Applied Spectroscopy*, 2014, 68(9): 963-974.
- 2 José R, Almirall, Shirly Montero, Kenneth Furton. Association of glass fragments by their trace elemental content using ICP-MS and LA-ICP-MS in the analysis scheme[C]. *SPIE*, 2002, 4708: 61-71.
- 3 Yonghoon Lee, Se-Woung Oh, Song-Hee Han. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) of heavy metal ions at the sub-parts per million level in water[J]. *Applied Spectroscopy*, 2012, 66(12): 1385-1396.
- 4 O Ormachea, O Urquidi, D Casazola. Development of a portable, low-cost LIBS system[C]. *SPIE*, 2013, 8785: 87851D.
- 5 Tang Yuguo, Song Nan, Bayanheshig, *et al.*. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 1989-1995.  
唐玉国, 宋楠, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 1989-1995.
- 6 Chen Shaojie, Bayanheshig, Pan Mingzhong, *et al.*. Efficient algorithms for echelle spectrograph design and cross-dispersed spectra analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1030001.  
陈少杰, 巴音贺希格, 潘明忠, 等. 中阶梯光栅光谱仪快速设计与谱图分析的数学模型[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1030001.
- 7 Zhang Yinxin, Yang Huaidong, Deng Chao, *et al.*. Optical design of high resolution echelle prism cross dispersion[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(6): 1706-1710.  
张尹馨, 杨怀栋, 邓超, 等. 高分辨率中阶梯光栅-棱镜交叉色散光路设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(6): 1706-1710.
- 8 Feng Fan, Duan Fajie, Bo En, *et al.*. An optical design of small-size echelle spectrograph[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, 41(7): 20-25.  
冯帆, 段发阶, 伯恩, 等. 一种小型中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. *光电工程*, 2014, 41(7): 20-25.
- 9 M J Sholl, F S Grochocki, J C Fleming, *et al.*. Stray light design and analysis of the SNAP telescope[C]. *SPIE*, 2007, 6675: 66750C.
- 10 Xia Wang, Sun Wen, Wang Xiakun, *et al.*. Study on stray light suppression in IRFPA Dewar[C]. *SPIE*, 2012, 8417: 84172I.
- 11 Chen Xue, Sun Chuang, Xia Xinlin. Stray light suppression property of baffle with honeycombed wall[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0523004.  
陈学, 孙创, 夏新林. 具有蜂窝内壁的遮光罩杂散光抑制特性分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0523004.
- 12 Mou Yongpeng, Huang Meizhen, Jin Yuxi. Monochromator stray light simulation analysis and verification[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 1-3: 100-106.  
牟永鹏, 黄梅珍, 金玉希. 单色器杂散光分析与验证[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 1-3: 100-106.

栏目编辑: 韩峰