

文章编号 1004-924X(2021)01-0045-09

超宽谱段高分辨率中阶梯光栅光谱仪的光学设计

孙 慈¹, 杨 晋^{1*}, 朱继伟², 马婷婷², 冯树龙¹, 宋 楠¹, 郭雪强², 郭汉洲³

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春长光格瑞光电技术有限公司, 吉林 长春 130102;

3. 长春国科医工科技发展有限公司, 吉林 长春 130102)

摘要:为了实现超宽谱段与高分辨率特点兼具的中阶梯光栅光谱仪系统,提出了一种光路结构设计,并针对其深紫外波段的有效探测方法进行了研究及验证。该光路结构结合准 Littrow 结构与 C-T 结构的优点,保证了色散光路具备高衍射效率,同时很好地抑制了杂散光。在有限可选光学材料下,采用多重评价优化方式获得中阶梯光栅光谱仪的光学结构参数。通过加入由球透镜及柱透镜组成的校正结构,有效地校正了像差,提高了光谱分辨率。最后,针对深紫外波段探测的解决方案进行模态分析,验证了所设计方案的可行性。最终在 160~1 000 nm 的超宽波段范围内,成像光斑的 RMS 值优于 12.1 μm ,在 257.61 nm 处的光谱分辨率优于 0.009 nm,能够满足超宽谱段、高分辨率检测系统的色散分光需求。

关键词:光学设计;中阶梯光栅光谱仪;超宽谱段;高分辨率

中图分类号:O433;TH744.1 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20212901.0045

Optical design of echelle spectrometer with ultra-wide wavelength range and high resolution

SUN Ci¹, YANG Jin^{1*}, ZHU Ji-wei², MA Ting-ting², FENG Shu-long¹, SONG Nan¹,

GUO Xue-qiang², GUO Han-zhou³

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Changchun SPKTRM Optronics Co. Ltd., Changchun 130102, China;

3. Changchun Guoke Medical Engineering Technology Development Co. Ltd., Changchun 130102, China)

* Corresponding author, E-mail: yang_jin1988@163.com

Abstract: In order to realize the echelle spectrometer system with ultra-wide wavelength range and high resolution, an optical path structure design was proposed, and the detection method of deep ultraviolet lights was studied and verified. First, the optical structure combined the advantages of quasi-littrow structure and C-T structure, so as to ensure the dispersing path has the characteristics of high diffraction efficiency and the stray light was well suppressed. In the limited range of optional materials, the multi-optimization

收稿日期:2020-02-11;修订日期:2020-02-28.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项项目(No. 2018YFF01011102);国家自然科学基金资助项目(No. 61805240);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20180201049SF, No. 20180201123GX, No. 20180201122GX, No. 20200403009SF);长春市科技计划资助项目(No. 18DY003)

method was employed to design the optical parameters. In order to correct the aberration and improve the spectral resolution, a correction structure composed of spherical and cylindrical lenses was added. Finally, a solution to the detection of deep ultraviolet lights was proposed, and the feasibility of the scheme was verified by finite element analysis. The final design results indicates that in the wavelength range of 160-1 000 nm, the imaging spot RMS value is better than 12.1 μm , the spectral resolution of 257.61 nm is better than 0.009 nm. It can meet the dispersion demand of ultra-wide wavelength range and high resolution detection system.

Key words: optical design; echelle spectrometer; ultra-wide wavelength range; high resolution

1 引言

光谱技术作为一种重要的分析手段,在科研、生产、质量控制等方面发挥着巨大作用。它依据物质发射、吸收光辐射的频率和强度,实现物质的定性、定量及结构分析,应用非常广泛。中阶梯光栅光谱仪因采用中阶梯光栅作为主色散元件,可以一次获取全波段光谱图像,且较同体积规格仪器的光谱分辨率高、工作波段范围宽、能量效率高,是激光诱导等离子体光谱(Laser Induced Plasma Spectroscopy, LIPS)、微波等离子体炬(Microwave Plasma Torch, MPT)光谱、拉曼光谱及电感耦合等离子体原子发射光谱(Inductively Couple Plasma, ICP)等先进光谱分析系统的优选分光单元^[1-10]。

中阶梯光栅是一种高端色散元件,具有全波闪耀、高色散率、高衍射效率的优点,但其工作于高级次衍射的特点,也带来了严重的光谱叠级现象。通常采用增加棱镜作为辅助色散元件的方法解决该问题,能保证系统的光传输效率且不会引入干扰光谱,但存在色散不均性,衍射级次在短波区级次间隔大,在长波区级次间隔小,引入了级次干扰^[11-12]。此外,组合交叉色散结构会在像面形成大面积二维光谱图像,主光线不在固定平面内,需在子午、弧矢两方向分别进行像差校正及焦距补偿,为光学结构的设计增加了困难。

欧美国家很早就开展了中阶梯光栅光谱仪的研发工作,通过探索优化光栅制作、光学设计、光谱探测等关键单元技术,成功研制出多款具备先进技术水平の中阶梯光栅光谱仪。鉴

于它在光谱分析及相关应用领域中不可替代的优势,近年,国内诸如长春光机所、浙江大学、天津大学等科研单位也相继开展了中阶梯光栅光谱仪的研究工作。所设计仪器的使用波段基本在 190~800 nm,且未有能实现超宽谱段范围同步直读的设计报导。而光谱仪器谱段范围的拓宽,意味着可覆盖更多待测样本所含元素的特征谱线,大大提升了光谱分析系统的检测能力。

本文主要根据石化行业油品检测元素的使用波段及检出需求,设计了一种能够覆盖深紫外到近红外波段的超宽谱段高分辨率中阶梯光栅光谱仪。该光谱仪结合准 Littrow 结构与 C-T 结构优势,采用组合色散形式;为方便装调,控制成本,采用球面反射镜作为主要反射元件,通过加入校正结构及优化配置光路参数获得了优质的成像质量。

2 原理

基于中阶梯光栅、棱镜组合色散的中阶梯光栅光谱仪结构原理如图 1 所示。光谱仪主要由准直系统、聚焦系统、色散系统和探测系统组成^[13]。

信号光束由小孔入射,经准直镜后以平行光的形式入射到中阶梯光栅的表面进行弧矢方向色散,再经过棱镜完成子午方向色散,如此交叉色散形成二维光谱,通过成像镜进行会聚,成像于探测器的接收靶面,完成光谱信息的收集。然后,通过后端的光谱信息预处理等操作实现二维谱图的一维转换,最终为分析检测系统提供准确的样品特征光谱信息。

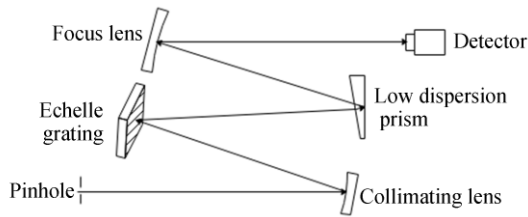


图1 中阶梯光栅光谱仪的工作原理

Fig. 1 Working principle of echelle spectrometer

3 光路结构设计

3.1 设计需求

中阶梯光栅光谱仪多集成于光谱检测设备内应用,是光谱分析系统的核心单元。为增加检测元素种类和提高元素分析准确度,所设计的中阶梯光栅光谱仪需具备超宽波段、高光谱分辨率特点。此外,为充分发挥其“全谱直读”的独特优势,光路结构的设计需以中阶梯光栅全部使用级次的中心波长为参考,完成全谱段成像质量的优化和评价。

此中阶梯光栅光谱仪的主要应用方向为基于微波等离子体炬光源的油品检测设备。综合油品重要监测元素S,Cl等的特征谱线位置及检出要求,输入设计需求如表1所示。

针对中阶梯光栅光谱仪特有的二维梳状谱图特点,且为满足超宽谱段及高分辨率设计需求,选用具有大靶面及小像元的滨松S12101面阵型CCD(Charged Coupled Device)芯片,如图2所示,其性能参数见表2。因此,光路结构参数还需以探测器靶面尺寸和像元大小为依据。

表1 中阶梯光栅光谱仪设计需求

Tab. 1 Parameters of echelle spectrometer

名称	设计参数
谱段	160~1 000 nm
光谱分辨率	<0.009 nm@257.61 nm
光源引入	SMA905/集光筒

3.2 色散光路结构设计

通常中阶梯光栅的刻线密度在30~300 gr/mm,闪耀角为45°~75°,为利于选定CCD芯片的有效探测靶面,根据它在主色散方向的尺寸

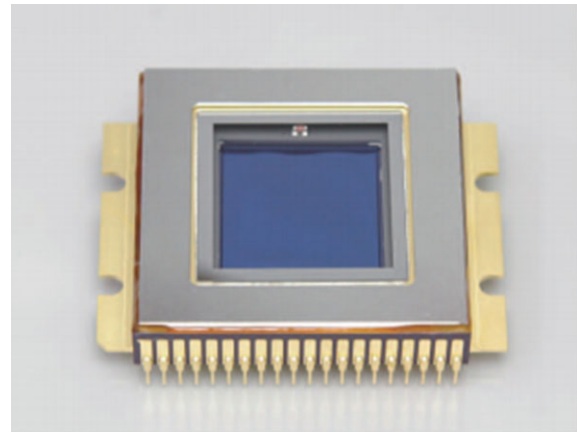


图2 S12101型号探测器实物

Fig. 2 Appearance of S12101 chip

表2 S12101芯片的基本参数指标

Tab. 2 Basic structural parameters of S12101 chip

参数	指标
靶面尺寸(H×V)	24.576 mm×24.576 mm
像元尺寸(H×V)	12 μm×12 μm
有效像元个数(H×V)	2 048×2 048

与中阶梯光栅参数的关系:

$$H_{\text{ccd}} = \frac{\lambda_{\text{max}} \cdot f}{d \cos \theta_B \cdot \cos \omega}, \quad (1)$$

其中: λ_{max} 为中阶梯光栅的最大使用波长, f 为焦距, d 为光栅常数, θ_B 为光栅闪耀角, ω 为光栅偏置角。结合现有中阶梯光栅参数,选用刻线密度为54.5 gr/mm,闪耀角为46°的中阶梯光栅完成相应的光学设计。整体光路结构设计在主色散方向采用准Littrow结构,以保证中阶梯光栅的高衍射效率。当主色散方向上的光束以闪耀角入射,且满足Littrow条件时,中阶梯光栅具有最高衍射效率,即:

$$\beta = i, \quad (2)$$

其中: i 为光栅入射角, β 为光栅衍射角。但此种入射方式令人射、衍射光束近乎共轴易产生干涉等现象,使得中阶梯光栅无法正常工作于主截面。因此,引入光栅偏置角,采用离面准Littrow入射形式,使入射光束偏离主截面 ω 的同时,能够在主截面沿着中阶梯光栅短边法线入射^[14]。根据矢量衍射理论,此时光栅方程为:

$$m\lambda = d(\sin i \cos \omega + \sin \beta \cos \omega_m), \quad (3)$$

其中: m 为光栅衍射级次, λ 为光束波长, ω_m 为衍

射光束与主截面矢量夹角。经整理可以获得各衍射级次的中心波长为:

$$\lambda = \frac{2d \sin i \cos \omega_m}{m}. \quad (4)$$

因光束以近 Littrow 方式入射,且当光栅偏置角较小时,可认为其余弦值近似为 1,对衍射效率的影响很小。则在所设计的中阶梯光栅光谱仪的光谱范围内,160 nm 处的光栅使用级次为 163,在 1 000 nm 处的光栅使用级次为 26。

由于 Littrow 结构易引入杂散光,在辅助色散方向采用非对称 C-T 结构,便于杂散光抑制,从而利于提升系统的光能传输效率。辅助色散元件采用低色散棱镜,整体结构为折叠式后色散交叉形式。棱镜具有非均匀色散特性,它相对不同波长的色散性能可表示为:

$$\delta_\lambda = \arcsin \left\{ n_\lambda \cdot \sin \left[\alpha - \arcsin \left(\frac{\sin \theta}{n_\lambda} \right) \right] \right\}, \quad (5)$$

其中: n_λ 为棱镜相对不同波长的折射率, θ 为棱镜入射角, α 为棱镜顶角。由于反射棱镜参数需与中阶梯光栅色散匹配,即横向色散能力需使探测靶面接收的二维梳状谱图相邻级次间隔距离大于 1 个像元,才能保证系统的高分辨率,则根据几何光学原理,不同入射波长下棱镜的色散距离可表示为:

$$L_\lambda = f \cdot \arcsin \left[n_\lambda \cdot \sin \left(\alpha - \arcsin \frac{\sin \theta}{n_\lambda} \right) \right]. \quad (6)$$

根据中阶梯光栅衍射级次可得相邻级次间隔为:

$$\Delta L_m = L_{m+1} - L_m. \quad (7)$$

棱镜在横向色散方向的边界宽度可表示为:

$$L_{\text{ccd}} = f(\delta_{\min} - \delta_{\max}). \quad (8)$$

由于棱镜具有非均匀色散特性,在长波段倾斜角度小,级次间隔小,故根据中阶梯光栅光谱仪的边界衍射参数,可以确定辅助色散方向展宽及级次间隔,进而确定与中阶梯光栅参数相匹配的棱镜参数。

3.3 像差校正结构设计

中阶梯光栅光谱仪的工作谱段覆盖深紫外、可见光、近红外的波段。因此,全谱段成像质量及均匀性优化是设计的关键。整体结构为紧凑光路,方便装调安装,采用球面反射式元件,降低了系统色差,提高光能利用率,且便于

平直谱面的获取及宽波段光束的收集,但会引入球差。此外,为防止因近轴中心处光束遮挡而损失有效信号光束,引入离轴角 ϵ ,采用倾斜入射方式^[15]。

首先,根据瑞利判据通过物镜口径、焦距参数设计控制球差引起的波像差,并配合球透镜校正球差。然后在前期研究的基础上,对结构参数进行设计,子午彗差会引起光斑色散维度的增宽,进而展宽谱像,影响光谱仪的高分辨率特性^[16]。因此,根据 Beulter 光程函数理论^[17-18],在子午方向通过计算物点经准直镜、聚焦镜的光程路径,获取对应像点在像面产生的角宽度为:

$$\delta_{w1} = -\frac{3W^2 \sin \frac{\gamma_1}{2} \cos^3 i}{4r_1^2 \cos^3 \frac{\gamma_1}{2} \cos \beta}, \quad (9)$$

$$\delta_{w2} = -\frac{3W^2 \sin \frac{\gamma_2}{2} \cos^2 \beta}{4r_2^2 \cos^3 \frac{\gamma_2}{2}}, \quad (10)$$

其中: W 为光栅有效宽度, γ_1, γ_2 为准直镜、聚焦镜的离轴角度, r_1, r_2 为准直镜、聚焦镜的曲率半径,根据系统在子午方向的焦距可得彗差引起的增宽。故通过对球面准直、聚焦镜的参数设计可以有效校正彗差。

此外,该系统在子午及弧矢方向的光学特性不同,需要校正像散。这里针对各主要像差的校正及抑制进行了特殊设计,通过加入柱透镜和球透镜校正了系统球差及像散。在入射端加入了双柱透镜、球透镜组合,与准直球面反射镜共同组成准直系统,不仅可以校正离轴像差和球差,还保证了出射光的平行度;在出射端加入一片柱透镜与一片球透镜,与聚焦球面反射镜组成会聚系统,并在子午、弧矢面产生不同的补偿焦距,使得子午面与弧矢面尽量重合,以校正因离轴产生的剩余像差和像散^[19]。

4 设计结果与讨论

4.1 设计结果

中阶梯光栅光谱仪的工作谱段覆盖深紫外到近红外,且加入了透射式的校正组件结构,为保证入射信号光束的有效利用,主要选用氟化钙

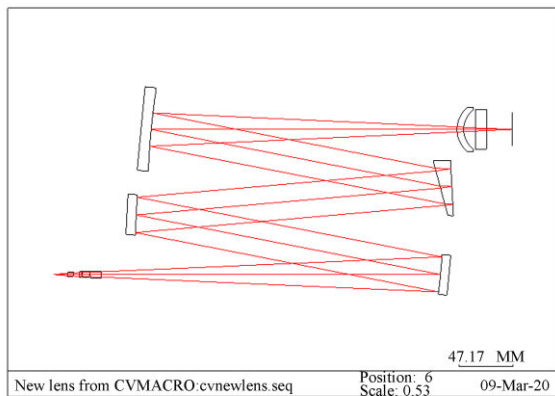
及紫外熔石英为光学材料,提高深紫外波段的传递效率。以上述色散结构及像差抑制结构设计为主要依据,优化选择并配置了光学元件及结构参数,并对彗差、球差和像散进行了校正,保证系统的高分辨率特性,采用 CODEV 光学设计软件对结构进行优化评估,最终得到的光路结构如图 3 所示,设计参数如表 3 所示。

根据中阶梯光栅的使用边界及中心级次,设计过程采用 1 025.133, 1 005.413, 986.449, 746.883, 522.818, 205.384, 160.374 nm 作为参考波长,对光学系统的成像质量进行评估,得到中阶梯光栅光谱仪在不同级次自由光谱区内的点列图及像差曲线,如图 4 所示。可以看出,该光学结构在 160~1 000 nm 的超宽谱段内,通过对像差的有效抑制及全波段成像质量的优化,各

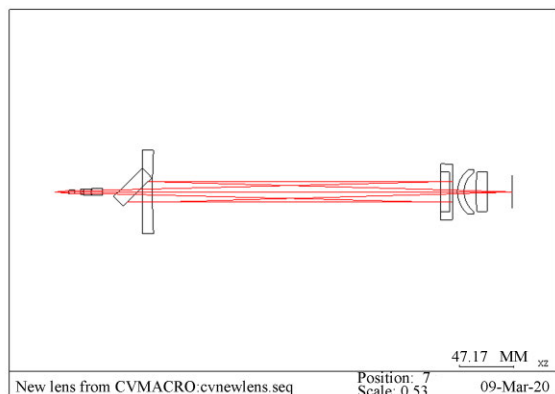
表 3 中阶梯光栅光谱仪的设计参数

Tab. 3 Parameters of echelle spectrometer

参 数	设计值
谱 段/nm	160~1 000
光谱分辨率/nm	<0.009@257.61
物方数值孔径 NA	0.09
小孔直径/ μm	24
棱镜顶角/ $^\circ$	12
中阶梯光栅	54.5 gr/mm, 46°
光栅偏置角/ $^\circ$	8
焦 距/mm	312.98



(a) 子午方向光路结构
(a) Optical structure in meridian direction



(b) 弧矢方向光路结构
(b) Optical structure in sagittal direction

图 3 超宽谱段高分辨率中阶梯光栅光谱仪的光路结构
Fig. 3 Optical structure of echelle spectrometer with ultra-wide wavelength range and high resolution

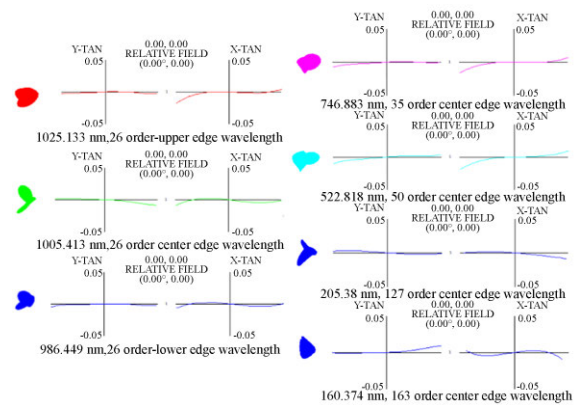


图 4 不同级次自由光谱区内点列图及像差曲线
Fig. 4 Spot diagrams and aberration curves in free spectral range of different orders

波段的子午、弧矢方向的像差均得到了较好的校正,成像光斑较为均匀,RMS 值均小于 $12.1 \mu\text{m}$ 。图 5 和图 6 为 257.601, 257.61, 257.619 nm 处的点列图及线扩散函数分布,由图可知光谱分辨率优于 $0.009 \text{ nm}@257.61 \text{ nm}$ 。

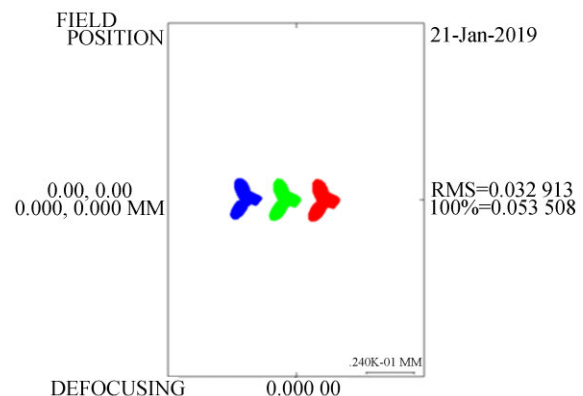


图 5 257.601, 257.61 和 257.619 nm 处点列图
Fig. 5 Spot diagram at 257.601, 257.61 and 257.619 nm

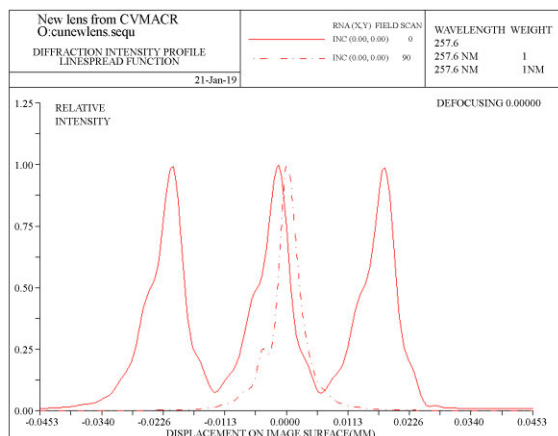


图6 257.601, 257.61和257.619 nm处线扩散函数分布
Fig.6 Distribution of line spread function at 257.601, 257.61 and 257.619 nm

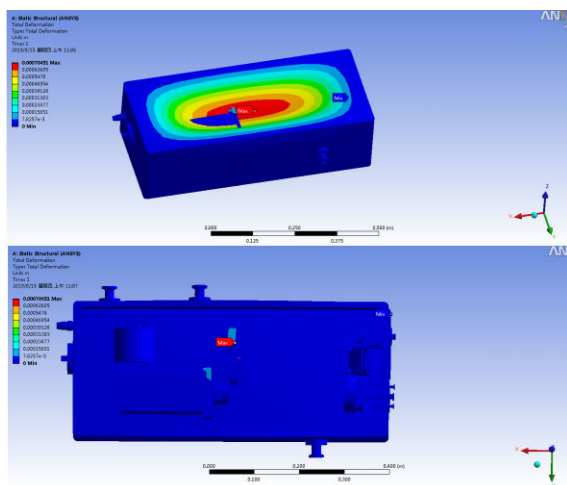
此外,该结构没有采用抛物面反射镜等惯用方法来校正像差以提高光谱分辨率。以球面元件为主的光路结构,对装调、加工的误差容忍较高,在针孔位置误差为 $50\ \mu\text{m}$ 、同轴度为 $30\ \mu\text{m}$ 、

透射式元件 30° 角度倾斜之内仍能保证较高的成像质量,光谱分辨率指标控制在 $0.009\ \text{nm}@257.61\ \text{nm}$,且此类仪器在成像镜处通常预留三维调整接口,便于装调。

4.2 探测实验

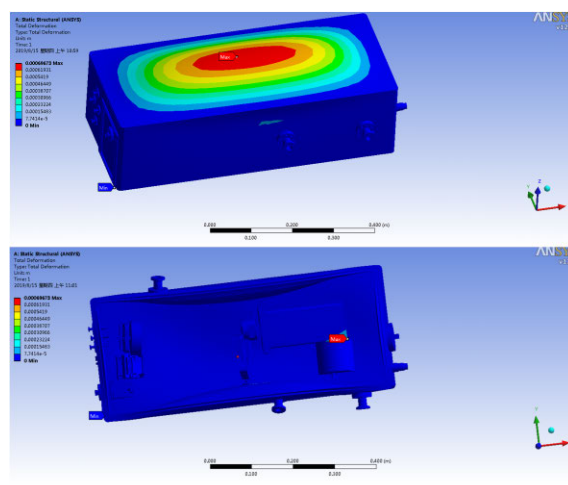
在解决了光学设计难点的同时,为实现深紫外到近红外波段信号光束的有效探测,本文除采用具有高紫外透过率的玻璃材料外,通过整机密封结构设计,并加入环境控制系统,对光室内部进行抽真空或充入惰性气体处理,以解决深紫外波段的空气吸收问题。

该设计还有效提高了结构刚度,保证了光束的高稳定传输。真空及充气条件下的结构变形模拟如图7所示,整机结构上盖变形最大,约为 $0.7\ \text{mm}$,内部镜座受外壳变形影响会产生约 $0.07\sim 0.15\ \text{mm}$ 的变形。经评估,该变形量在公差要求范围内,且实际变形值小于此模拟值。



(a) 真空条件下结构变形模拟情况

(a) Mechanical structure deformation simulation of spectrometer under vacuum condition



(b) 充气条件下结构变形模拟情况

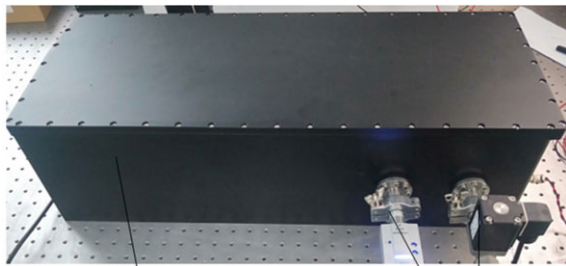
(b) Mechanical structure deformation simulation of spectrometer under aeration condition

图7 光谱仪结构变形模拟

Fig. 7 Simulation of mechanical structure deformation for spectrometer

超宽谱段高分辨率中阶梯光栅光谱仪样机如图8所示。通过谱图还原模型建立,对光谱信息进行预处理,实现 $160\sim 1\ 000\ \text{nm}$ 全谱段二维谱图的一维转换,采集汞氙灯谱图如图9所示。

由于深紫外波段的有效探测是该设备研制的关键技术问题,因此,对该项技术进行验证。根据光栅色散方程可计算得到 $160\ \text{nm}$ 位于163级次,汞氙灯 $253.652\ \text{nm}$ 处特征光斑位于103级次位置。定位 $253.652\ \text{nm}$ 处光斑坐标位置作为



中阶梯光栅光谱仪主体 环境控制系统接口

图 8 中阶梯光栅光谱仪样机

Fig. 8 Photo of echelle spectrometer prototype

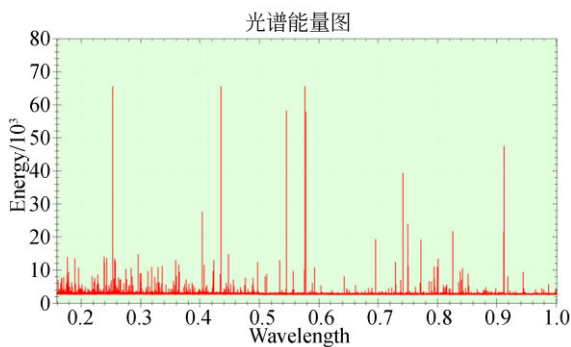


图 9 二维谱图的还原结果

Fig. 9 Reduction result of two-dimensional spectrogram

基准,如图 10 所示。观看采集氘灯光源所获得的全谱段二维梳状谱图,如图 11 所示,可以看到自 103 级次(探测器靶面第 735 行位置附近)下数 60 个级次即 163 级次(160 nm 所在级次)谱线清晰。故所研制设备的使用范围可以覆盖 160~1 000 nm。



图 10 253.652 nm 处光斑位置

Fig. 10 Graphic representation of spot location at 253.652 nm

中阶梯光栅光谱仪在应用过程需根据所集成光谱分析系统特点配备光源耦合结构实现发散光束的有效导入。因此,由图 11 可以看出,虽

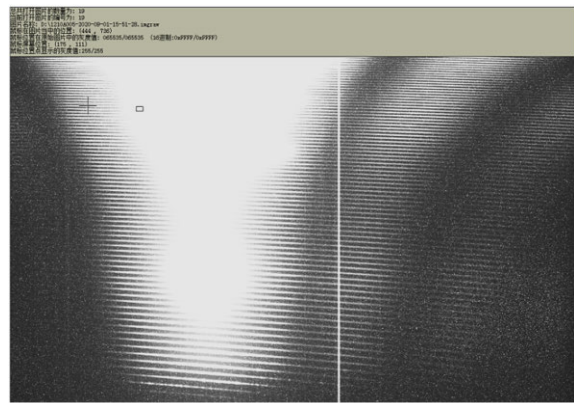


图 11 中阶梯光栅光谱仪采集氘灯谱图

Fig. 11 Spectrum of deuterium light source collected by echelle spectrometer

然在全谱段范围内,各衍射级次谱线得到有效采集,但各波段谱线强度相差较大。针对此问题,将完成配套光源的耦合结构设计,以提升紫外波段的光源耦合效率,平衡全谱段的信号强度。

5 结 论

本文针对石化行业的流程工业检测应用需求,设计了一种中阶梯光栅光谱仪,该光谱仪具有 160~1 000 nm 的超宽工作波段。针对深紫外波段的探测需求,通过像差抑制和色散结构设计,使得光学系统在子午、弧矢两方向的像差得到了良好的校正。通过加入由球透镜和柱透镜组成的校正结构,实现焦距补偿及全波段的高质量成像优化,最终设计系统在全谱段范围的成像光斑大小约为 12.1 μm ,且较为均匀,在 257.61 nm 处的分辨率优于 0.009 nm。此外,为解决深紫外波段的强空气吸收问题,采用高刚度密封结构设计及环境控制装置,通过应力分析在抽真空及充气状态下验证整体方案的可行性,并且对深紫外波段的探测进行了实验验证。

环境控制装置及高质量成像光路的设计,解决了中阶梯光栅光谱仪类仪器因光学材料有限及强空气吸收作用而难在深紫外波段应用的问题。所设计的光谱仪实现了超宽谱段光谱的高分辨读取,为深紫外波段探测提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 曹海霞. 应用于 ICP 光谱仪的中阶梯光栅光谱仪色散系统分析[J]. 分析仪器, 2019(2): 86-88.
CAO H X. Development status of dispersion systems for echelle spectrometer used in ICP spectrometer[J]. *Analytical Instrumentation*, 2019(2): 86-88. (in Chinese)
- [2] BYKOV S V, SHARMA B, ASHER S A. High-throughput, high-resolution Echelle deep-UV Raman spectrometer[J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(8): 873-883.
- [3] 张锐. 中阶梯光栅光谱仪关键技术研究及其应用[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
ZHANG R. *Study on the Key Technology of the Echelle Spectrometer and Its Application System* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [4] 任佳, 高勋. 飞秒细丝-纳秒激光诱导击穿光谱技术对土壤重金属 Pb 元素检测[J]. 光学精密工程, 2019, 27(5): 1069-1074.
REN J, GAO X. Detection of heavy metal Pb in soil by filament-nanosecond laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 1069-1074. (in Chinese)
- [5] 刘盼, 张天舒, 范广强, 等. 气体受激拉曼散射系统的分析与优化[J]. 光学精密工程, 2019, 27(12): 2509-2516.
LIU P, ZHANG T SH, FAN G Q, *et al.*. Analysis and optimization of gas stimulated Raman scattering system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2509-2516. (in Chinese)
- [6] TOLMACHEV Y A, IVANOV M P, GLUKHOV V A. Enhancing sensitivity of methane detection in exoplanet atmospheres and nebulas using spectroscopic methods [J]. *Technical Physics*, 2018, 63(3): 427-433.
- [7] 姜杰, 邴延富, 金伟, 等. 高分辨率 MPT 全谱仪的研制及性能测试[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(11): 2375-2379.
JIANG J, HUAN Y F, JIN W, *et al.*. Development of a high resolution simultaneous microwave plasma torch spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(11): 2375-2379. (in Chinese)
- [8] 朱文煜, 陈少杰, 撮芄芄, 等. 分波段式中阶梯光栅原子发射光谱仪[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 870-876.
ZHU W Y, CHEN SH J, HAN P P, *et al.*. Echelle-emission spectrometer with divided spectral coverage [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 870-876. (in Chinese)
- [9] 王静鸽, 李新忠, 李贺贺, 等. 背景扣除和强度校正对激光诱导等离子体光谱参数的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(1): 276-280.
WANG J G, LI X ZH, LI H H, *et al.*. Influence of background deduction and intensity correction on spectral parameters of laser induced plasma [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(1): 276-280. (in Chinese)
- [10] LIN Q Y, WANG S, GUO G M, *et al.*. Novel laser induced breakdown spectroscopy-Raman instrumentation using a single pulsed laser and an echelle spectrometer [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2018, 46(2): 163-174.
- [11] YAN L W. Study on the advanced Czerny-Turner imaging spectrometer with high resolution in broadband [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(6): 1756-1760.
- [12] 张锐, 潘明忠, 杨晋, 等. 基于数字微镜器件的中阶梯光栅光谱仪的光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 2994-3000.
ZHANG R, PAN M ZH, YANG J, *et al.*. Optical system of echelle spectrometer based on DMD [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(12): 2994-3000. (in Chinese)
- [13] 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.
TANG Y G, SONG N, BAYANHESHIG, *et al.*. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(9): 1989-1995. (in Chinese)
- [14] YIN L, BAYANHESHIG, YANG J, *et al.*. High-accuracy spectral reduction algorithm for the échelle spectrometer [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3574-3581.
- [15] AUSTIN D R, WITTING T, WALMSLEY I A. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(19): 3846-3853.

- [16] ZHANG R, BAYANHESHIG, YIN L, *et al.*. Wavelength calibration model for prism-type echelle spectrometer by reversely solving prism's refractive index in real time [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(15): 4153-4158.
- [17] BEUTLER H G. The theory of the concave grating[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1945, 35(5): 311.
- [18] DUAN F J, QIN Y Q, FU X, *et al.*. Simple spectral reduction algorithm used for the echelle spectrometer[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 8921-8927.
- [19] FU X, DUAN F, JIANG J J, *et al.*. Astigmatism-corrected echelle spectrometer using an off-the-shelf cylindrical lens [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(28): 7861-7868.

作者简介:



孙 慈(1988—),女,内蒙古人,硕士,研究实习员,主要从事光谱仪器设计与开发方面的研究。E-mail: sun-ci1822@163.com

通讯作者:



杨 晋(1988—),男,广东惠州人,博士,助理研究员,主要从事光谱仪器开发、分光系统光学设计及杂散光等方面的研究。E-mail: yang_jin1988@163.com