



DOI: 10.12086/oe.2018.180195

便携式紫外-可见光谱仪设计及关键技术研究

王国栋¹, 夏果^{1,2*}, 李志远¹, 胡明勇¹, 陆红波¹

¹合肥工业大学光电技术研究院, 特种显示技术国家工程实验室, 现代显示技术省部共建国家重点实验室, 安徽 合肥 230009;

²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

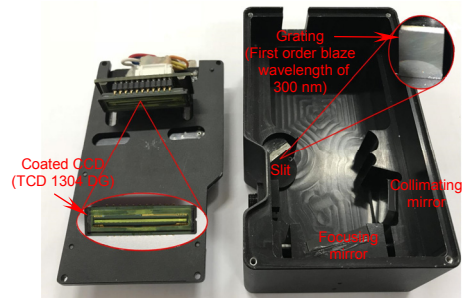
摘要: 随着紫外光谱探测技术的广泛应用, 低成本便携式紫外-可见光谱仪成为该领域的研究热点。本文首先依据交叉型 Czerny-Turner 结构设计了便携式紫外光谱仪光路结构。其次, 针对性研究了紫外光谱仪的关键器件: 紫外探测器和闪耀光栅。利用 Lumogen 荧光材料和蒸镀成膜法制作镀膜紫外增强 CCD, 并分析了荧光薄膜在 CCD 表面的位置对分辨率的影响; 从理论上分析了闪耀光栅对于紫外波段的多级衍射效率的影响, 确定了紫外光谱仪对于闪耀光栅的选择。最后, 研制的便携式紫外-可见光谱仪样机的性能测试结果表明, 200 nm~900 nm 波段、25 μm 狭缝宽度、600 lp/mm、300 nm 闪耀光栅配置下分辨率整体小于 1.5 nm, 200 nm~300 nm 紫外波段的光谱响应度提高到 20%, 实现了便携式紫外-可见光谱仪的设计要求。

关键词: 紫外-可见光谱仪; Lumogen 薄膜; 紫外增强; CCD; 闪耀光栅; 光栅效率

中图分类号: TH744.1

文献标志码: A

引用格式: 王国栋, 夏果, 李志远, 等. 便携式紫外-可见光谱仪设计及关键技术研究[J]. 光电工程, 2018, 45(10): 180195



Design and key technology research of portable UV-VIS spectrometer

Wang Guodong¹, Xia Guo^{1,2*}, Li Zhiyuan¹, Hu Mingyong¹, Lu Hongbo¹

¹National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

²Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract: With the widespread application of ultraviolet spectroscopy, low-cost portable ultraviolet spectrometer has become a research focus in this field. Firstly, the optical structure of the portable UV-VIS spectrometer was designed based on the crossed-asymmetric Czerny-Turner structure in the paper. Secondly, the key devices of ultraviolet spectrometer, namely ultraviolet detectors and blazed gratings, were studied. The coated UV-enhanced CCDs were fabricated using Lumogen fluorescent materials and vacuum coating methods. The influence of the position on the CCD surface of the fluorescent film on the resolution was analyzed. The effect of blazed gratings on the multi-order diffraction efficiency in the ultraviolet region was theoretically studied. Finally, the test results of performance of a portable UV-VIS spectrometer prototype show that the resolution of the 200 nm~900 nm band, 25 μm slit width, 600

收稿日期: 2018-04-16; 收到修改稿日期: 2018-06-18

基金项目: 中国科学院通用光学定标与表征重点实验室开放课题资助(JZ2016QTXM1135)

作者简介: 王国栋(1993-), 男, 硕士, 主要从事紫外光谱仪器的设计及应用的研究。E-mail: WangGD@mail.hfut.edu.cn

通信作者: 夏果(1983-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光谱仪器设计及应用的研究。E-mail: xiaguo@hfut.edu.cn

lp/mm, 300 nm blazed grating configuration is less than 1.5 nm and the spectral responsivity increases to 20% in the spectral range varying from 200 nm to 300 nm, which meets the design requirements of the portable UV-VIS spectrometer.

Keywords: UV-VIS spectrometer; Lumogen film; UV-enhanced; CCD; blazed grating; grating efficiency

Citation: Wang G D, Xia G, Li Z Y, *et al.* Design and key technology research of portable UV-VIS spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(10): 180195

1 引言

紫外光谱探测技术已经广泛应用于火焰监测以及燃烧控制、太阳辐射测量、水处理以及表面消毒、紫外光源控制、紫外线净化、紫外线消毒、食品消毒控制、紫外线激光器控制、分光镜、电弧探测等方面^[1]。同时在化学检测领域,由于大多数分子的电子光谱处于紫外区域,而分子的电子光谱基本上能决定物质的化学反应,因此利用紫外光谱仪对分子的电子光谱进行分子的定性、定量分析,可以有效地进行分析物质的分子成分或者判断物质是否发生化学反应等应用研究^[2-4]。

国内外针对便携式紫外光谱仪已经做了大量的研究,主要是对其中的探测器进行研究。由于普通电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)在紫外波段的响应效果非常差,目前采用背照式 CCD 的减薄和前照式 CCD 的紫外增敏两种方法来提高其紫外波段的响应。其中背照式 CCD 的减薄技术加工精密复杂,成本较高。为了取得良好的紫外光谱响应并降低探测器成本,国内外研究大部分采用在前照式线阵 CCD 上镀一层荧光薄膜的方式,利用荧光薄膜的变频性能实现紫外波段的转换检测^[5-9]。例如美国海洋光学的 USB4000-UV-VIS 光谱仪中就是在线阵 CCD Toshiba TCD 1304 AP 表面添加了 Lumogen 荧光材料,使得紫外波段的量子效率提高到 20%。国内浙江大学使用同样的荧光材料和相同的 CCD,使用物理气相沉积法,紫外波段量子效率可以提升 15%左右^[10]。

本文基于便携式紫外-可见光谱仪关键器件的理论分析,设计并制作了便携式紫外-可见光谱仪样机。使用汞氙灯光源对关键器件改进前后测试,分析紫外-可见光谱仪的光谱参数变化。便携式紫外-可见光谱仪的关键器件包括两个:紫外探测器和闪耀光栅。其中紫外探测器是最基本的器件,起到关键性的检测紫外波段作用。使用蒸镀法将荧光材料蒸镀到 CCD 表面,荧光材料的变频性将紫外光转换为可见光,从而实现紫外光的转换检测。比较荧光薄膜蒸镀到去掉保护玻

璃和没有去掉保护玻璃的 CCD 表面的两处位置的紫外增强效果,分析两处位置对 CCD 分辨率的影响,选择在去掉保护玻璃的 CCD 表面蒸镀荧光材料的方法,保证便携式紫外-可见光谱仪整体分辨率设计要求;闪耀光栅作为另一个紫外响应关键器件,由于闪耀光栅多级衍射不同的能量分布,在紫外光谱仪中可以作用为增强紫外波段能量,提高光谱仪对紫外波段的灵敏度。依据闪耀光栅的光栅效率方程,理论分析了闪耀波长为 300 nm 和 500 nm 的两个闪耀光栅的光栅效率曲线,最后选取 300 nm 的闪耀光栅,不仅提高紫外波段一级衍射效率,以提高紫外探测灵敏度;同时有效地降低紫外波段二级衍射效率,以减少其作为杂散光对光谱探测的误差影响。

2 光路结构设计

紫外光谱仪选用如图 1 所示的交叉非对称式 Czerny-Turner 光路结构^[11],光线由狭缝 a 入射到准直镜 M_1 ,经准直镜作用后的平行光入射到闪耀光栅 G 表面,不同波长的光线在光栅的分光作用下按不同衍射角出射到聚焦镜 M_2 ,在聚焦镜聚焦作用下在探测器

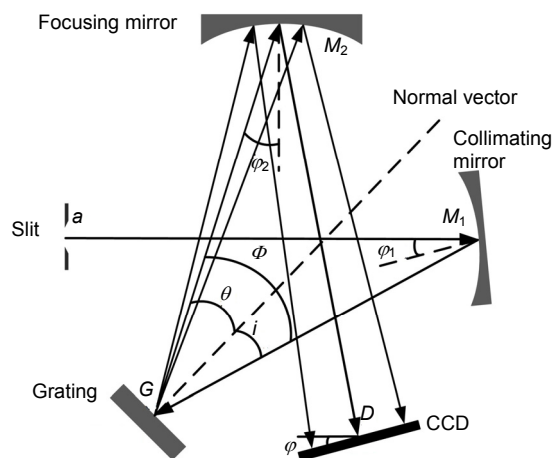


图 1 交叉非对称型 Czerny-Turner 系统光路图
Fig. 1 Layout of crossed-asymmetric Czerny-Turner system

表面成像。图中 φ_1 为准直镜离轴角, i 为光栅入射角, θ 为中心波长衍射角, Φ 为中心波长入射光线与衍射光线的夹角, φ 为像面倾角。

光谱仪系统中, 各光学元件的参数依据几何光学与像差理论相互约束, 因而不能独立地选取各元件参数, 需要依据元件间几何关系与成像原理依次流程设计, 本文设计的光谱仪系统初始参数设计流程如图 2 所示。首先从核心器件闪耀光栅开始, 确定其输入参数: 边缘波长 λ_1 和 λ_2 、设计所需分辨率 $\Delta\lambda$ 、光栅常数 d 。将上述参数带入光栅方程和角度方程:

$$i = \arcsin\left(\frac{\lambda_c n}{2 \cos(\Phi/2)}\right) + \frac{\Phi}{2}, \quad (1)$$

$$\theta = \Phi - i, \quad (2)$$

计算出光栅入射角 i 与中心波长衍射角 θ 。根据光谱仪分辨率要求和狭缝、光栅、准直镜等器件因素计算出各个器件之间距离。由于准直镜与聚焦镜为离轴球面反射镜, 因而其物距与像距不为焦距, 且子午像距与弧矢像距不同, 在光谱仪中考虑分辨率因素, 我们将像面放置在聚焦镜子午像面处。根据 Coddington's

公式和 Reader 提出的消除中心波长彗差公式, 计算出准直镜和聚焦镜的子午像距和子午焦距, 确定光谱仪光路结构中的仪器初始参数^[12-13]。

闪耀光栅是光谱仪中的核心器件, 一般平面光栅能量集中在无色散的衍射零级, 这是因为普通衍射光栅的单缝衍射零级主级大方向与多缝干涉零级主级大方向重合。在实际光谱仪成像中, 需要将光谱能量集中到所需要的衍射级次, 选取平面闪耀光栅作为分光衍射元件。本文设计的紫外光谱仪测量范围为 200 nm~900 nm, 所设计的光谱仪要求分辨率达到 $\Delta\lambda = 1$ nm。选用光栅线对数 n 为 600 lp/mm, 光栅常数 $d = 1/n$ 。中心波长的入射光线与衍射光线的夹角 Φ 取 30° , 如图 1 所示。基于几何光学和相差理论等建立起整个光谱仪的初始结构, 参数如表 1 所示。

完成整个结构的初始参数设计后, 将参数导入到 ZEMAX 软件进行模拟优化, 由于宽波段光谱仪还存在像散、场曲等像差, 其最佳像面并非位于聚焦镜焦面, 同时由于设计只消除了中心波长彗差, 因而像面倾角也不为 0° , 需要优化像面的位置与角度参数使得

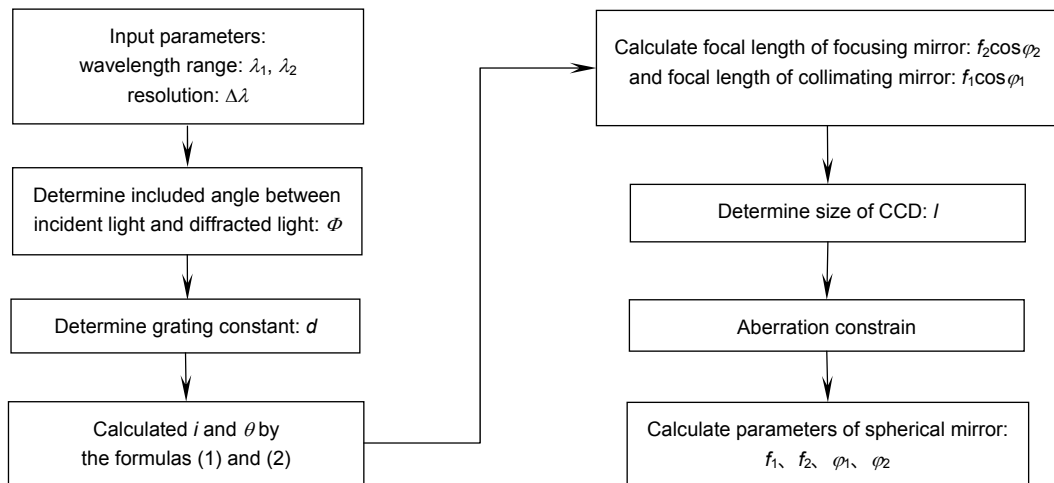


图 2 初始参数设计流程

Fig. 2 Flowchart of determining initial parameters

表 1 光学元件参数

Table 1 Parameters of optical elements

Optical elements	Parameters	Value
Slit	a	25 μm
Collimating mirror	f_1	38.7 mm
Focusing mirror	f_2	70.8 mm
Blazing grating	n	600 lp/mm

宽波段衍射光线都能够在像面上得到聚焦。将聚焦镜与像面之间的距离与像面倾角设为优化变量，子午方向与弧矢方向的权重为 1 : 0，开始进行优化。优化后光路图如图 3 所示，从图中可以看出优化后全波段光线近似聚焦在同一平面，该焦平面即为优化后最佳像面。优化后聚焦镜距 CCD 距离为 69.95 mm，像面倾角 $\phi = -1.3^\circ$ ，优化后结构参量如表 2 所示。

图 4 为优化后 ZEMAX 软件中呈现的全波段的点

列图。选取了 5 组特征波长的点列，从图中可以看出，所设计结构在全波段谱线可以清晰分离。

图 5 为全波段点列的 Y 轴均方根半径，可以看出在全波段点列的 Y 轴均方根半径均小于 $11 \mu\text{m}$ 。

从以上分析可知，所设计的 Czerny-Turner 光路在 200 nm~ 900 nm 的光谱范围内能够实验中心波长分辨率优于 1 nm，边缘波长分辨率优于 1.5 nm，达到设计目标。

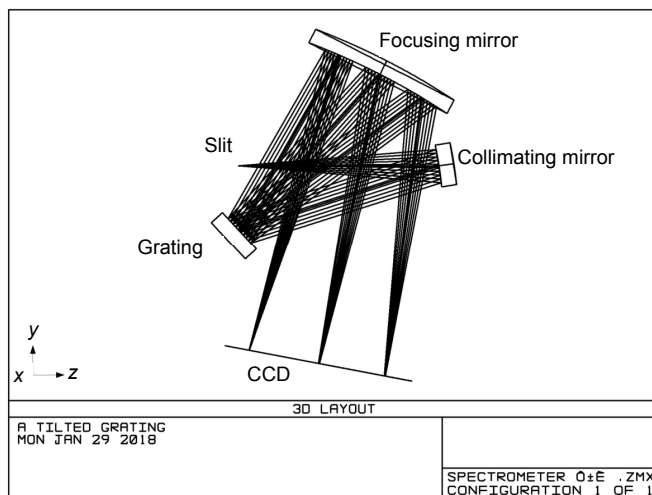


图 3 优化后光谱仪光路

Fig. 3 Optimized layout of the crossed-asymmetric Czerny-Turner spectrometer

表 2 优化后结构参量

Table 2 Parameters of optimized structure

Parameters	Value	Parameters	Value
i	24.8°	ϕ	-1.3°
θ	5.2°	L_{SM1}	37.8 mm
ϕ	30°	L_{M1G}	40 mm
ϕ_1	5.2°	L_{GM2}	40 mm
ϕ_2	13°	L_{M2D}	69.95 mm

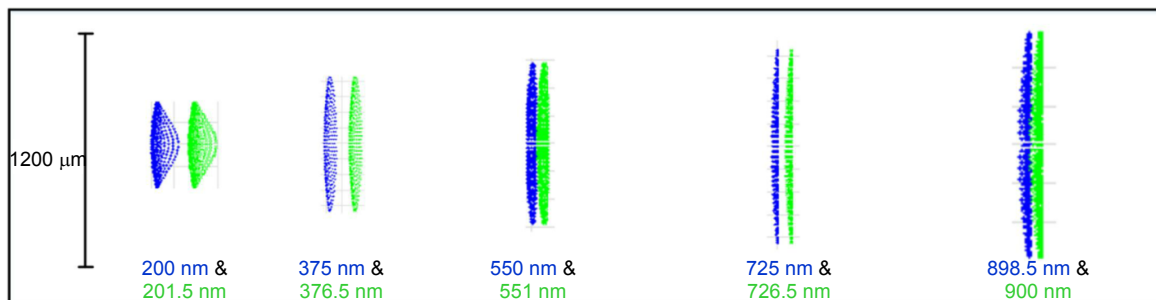


图 4 像面点列图

Fig. 4 Spot diagrams of image plane

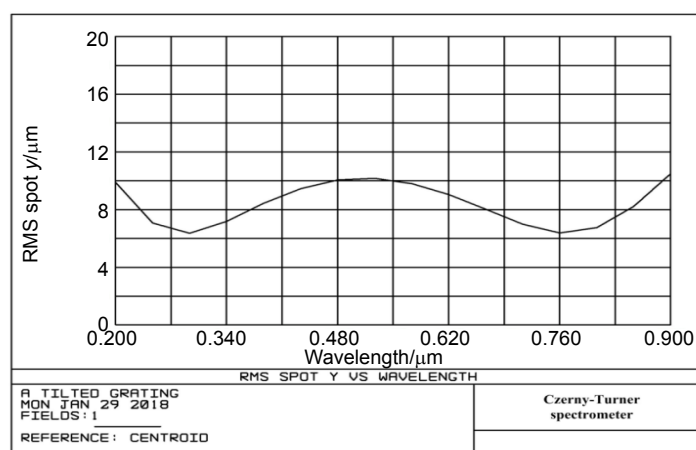


图5 Y轴方向点列均方根半径

Fig. 5 RMS spot Y versus wavelength

3 紫外光谱仪关键技术研究

3.1 镀膜紫外增强 CCD 的研制

对于紫外光谱仪而言,将光路设计完成后,想要能够测试紫外光,还需要两个关键的器件:能够测试紫外光的紫外探测器和能够提高紫外光灵敏度的闪耀光栅。本文选用一款灵敏度高、暗电流低的线阵快门型 CCD 探测器 Toshiba TCD 1304 DG,此 CCD 具有 3648 个像素,有利于光谱的分辨率提高,响应度峰值波长为 550 nm。荧光材料选择为德国 BASF 的 Lumogen Yellow S 0790,呈黄绿色粉末状。激发波长范围为 200 nm~400 nm,发射波长范围为 500 nm~600 nm^[14]。荧光材料发射波长范围在探测器 TCD 1304 DG 的响应度峰值波长周围,吸收波长范围在紫外波长区域,符合紫外荧光增强探测器所需材料的条件。

荧光材料成膜技术在国内已经有很多成熟的研究,王丽辉等对可以增强 CCD 紫外响应的荧光材料进行了讨论分析^[15]。张大伟等对其中的荧光材料 Lumogen 进行了成膜分析^[16]。本文使用的材料与张大伟等人使用的材料相同,都是德国 BASF 的 Lumogen 荧光材料。从张大伟等人的研究可以知道,荧光材料成膜时,相比于简单的旋涂法,蒸镀法成膜后的薄膜表面粗糙度较小,能够有效提高成像器件的分辨率。同时 Lumogen 荧光材料使用蒸镀法成膜时,制成的荧光薄膜的最佳厚度为 0.42 μm 左右^[17]。所以本文所选用的成膜方法为效果较好的蒸镀法,蒸镀薄膜的厚度目标为 0.42 μm 左右。

蒸镀法成膜时,将固体的粉末材料放置在真空室内的通电钨舟内,固定电流 1 A,以恒定上升的温度变化保持材料的蒸发速度。荧光材料在真空高温蒸发下,沉积到基底表面,形成薄膜。蒸镀过程中,基底上固定有石英基片和 CCD 感光层器件,且保持匀速转动,使得制成的膜层均匀,最终制得厚度为 0.4 μm 的荧光薄膜。

将 Lumogen 荧光材料分别蒸镀到去掉保护玻璃后的和没有去掉保护玻璃的 CCD 表面。使用 253 nm 的高强度的光纤光源,垂直于荧光薄膜,直接照射到 CCD 表面,比较测试镀膜前 CCD 和镀膜后荧光薄膜分别位于两处位置时的紫外响应效果。结果如图 6(a)所示,镀膜 CCD 中去掉保护玻璃的荧光增强曲线比没有去掉保护玻璃的曲线要窄,半波峰宽相差 3 倍多,且和未镀膜 CCD 的紫外响应的宽度几乎相同。荧光材料的发光性能是各向同性的,所以荧光薄膜距离感光层的距离越远,则荧光发射越分散,制作镀膜 CCD 的分辨率也越差^[18]。所以制作镀膜紫外增强 CCD 时,将薄膜蒸镀到去保护玻璃后的 CCD 表面,其紫外响应的分辨率几乎不会受到影响。

制作出镀膜紫外增强 CCD 后,使用 Newport 公司的 QE/IPCE 测量套件测试其响应度。使用单色仪和积分球将不同波长的光分别均匀照射到镀膜紫外增强 CCD 和标准光功率计中,计算出两个器件的数据的比值即为响应度结果^[19-20]。如图 6(b)所示,在 200 nm~300 nm 波长处,镀膜后 CCD 的响应度由原始 CCD 几乎为 0%提高到 20%左右。

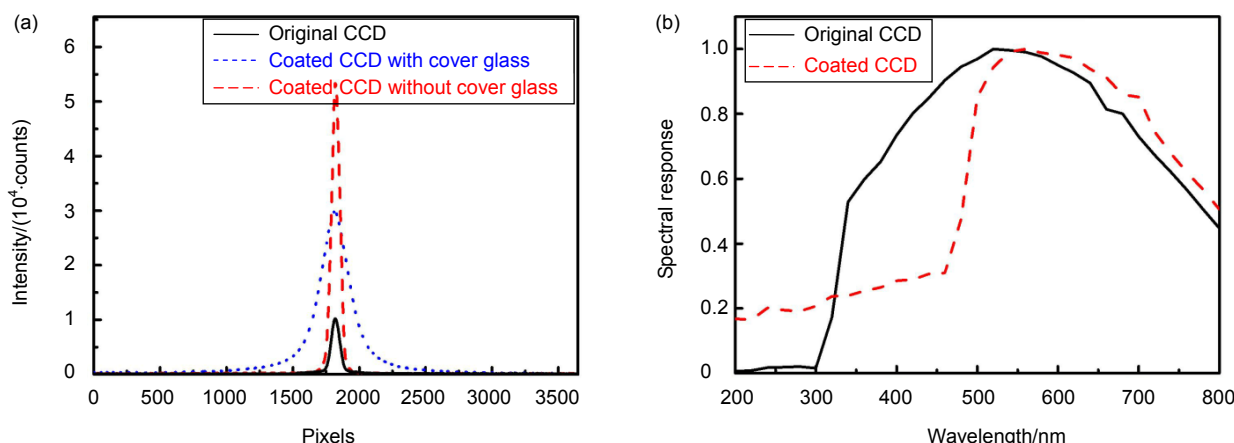


图 6 镀膜 CCD 的参数测试曲线。(a) 253 nm 紫外光入射 CCD 响应曲线; (b) 镀膜 CCD 的光谱响应曲线
 Fig. 6 The parameter test curve of the coated CCD. (a) CCD response curves of 253 nm ultraviolet light incident; (b) Spectral response curves of coated CCD

3.2 闪耀光栅的分析与选型

作为紫外光谱仪中的一个重要器件, 闪耀光栅的选择很大程度影响着紫外-可见光谱仪的性能。便携式紫外-可见光谱仪中选用的光栅为平面闪耀光栅, 常用的平面闪耀光栅为 600 lp/mm。由于不同闪耀波长光栅的多级衍射的能量分布不同, 因此不同光谱仪器中对于闪耀波长也会有不同的选择。通常使用闪耀光栅的效率公式来进行选择分析^[21]:

$$\eta = \left\{ \frac{\sin[\pi(\frac{\lambda_0}{\lambda} - m)]}{\pi(\frac{\lambda_0}{\lambda} - m)} \right\}^2, \quad (3)$$

式中: η 为光栅效率, λ 为波长, λ_0 为闪耀波长, m 为光谱级次。

以波长范围为 200 nm~900 nm 为例进行数据拟合, 光谱级次 m 分别为一级衍射、二级衍射, 选用光谱仪中常用的闪耀波长 λ_0 分别为 300 nm、500nm 的两种闪耀光栅, 得到一级和二级衍射的光栅效率曲线如图 7 所示。

图 7(a)是闪耀波长为 500 nm 闪耀光栅的一级衍射光栅效率曲线, 在波长 500 nm 处效率最大, 在 250 nm 处效率只有 0%。所以在紫外光谱仪中使用这类光栅时, 在 250 nm 左右很难得到较好的紫外光谱数据。图 7(b)是闪耀波长为 300 nm 闪耀光栅的一级衍射光栅效率曲线, 在波长 300 nm 处效率取得最大值, 在紫外波长 250 nm 时效率依然为 88%, 在 500 nm 也有 60%, 所以使用这类的闪耀光栅时, 紫外光谱仪在 200 nm~400 nm 有很高的灵敏度, 同时在紫外-可见全部波段有较高响应。

所有光谱仪中, 光谱图形主要使用的是一级衍射光谱, 二级衍射光谱为杂散光, 需要另外加入二级滤波片消除。因此, 图 7(c)中, 闪耀波长 500 nm 的闪耀光栅的二级衍射光栅效率曲线在波长 250 nm 处效率最大, 在 500 nm 处效率为 0%, 此时, 使用此类闪耀光栅时, 250 nm 过高的二级衍射光会造成杂散光难以完全消除, 影响到紫外-可见光谱仪光谱的读取。图 7(d)中, 闪耀波长 300 nm 的闪耀光栅的二级衍射效率曲线整体不大于 40%, 便于后期的杂散光消除。所以在设计制作便携式紫外-可见光谱仪时, 选用闪耀波长为 300 nm 的闪耀光栅有更好的紫外光谱响应, 同时还能减少杂散光的影响。

4 结果与分析

通过上述光路结构设计, 和对于紫外光谱仪的关键器件讨论研究, 研制了一款便携式紫外-可见光谱仪样机, 结构如图 8 所示。光路器件按照光路结构设计所述参数制作, 其中的关键器件, 紫外探测器使用自行研制的镀膜紫外增强 CCD, 镀有 Lumogen Yellow S 0790 荧光材料的线阵 CCD TCD 1304 DG; 闪耀光栅选用 600 lp/mm, 闪耀波长为 300 nm 的闪耀光栅。同时为了验证闪耀光栅的光栅效率理论分析, 使用装有 600 lp/mm, 闪耀波长为 500 nm 闪耀光栅的便携式光谱仪, 分别测试汞氙灯(Ocean Optics HG-1 型号)光谱, 光谱测试范围为 200 nm~900 nm。

积分时间为 4 ms, 测试范围 200 nm~900 nm, 测试汞氙灯光谱图结果如图 9、图 10 所示。图 9 为光谱仪中使用 500 nm 闪耀波长的闪耀光栅测试汞氙灯光谱图, 一级光谱中 253.652 nm 的光强在 CCD 镀膜前

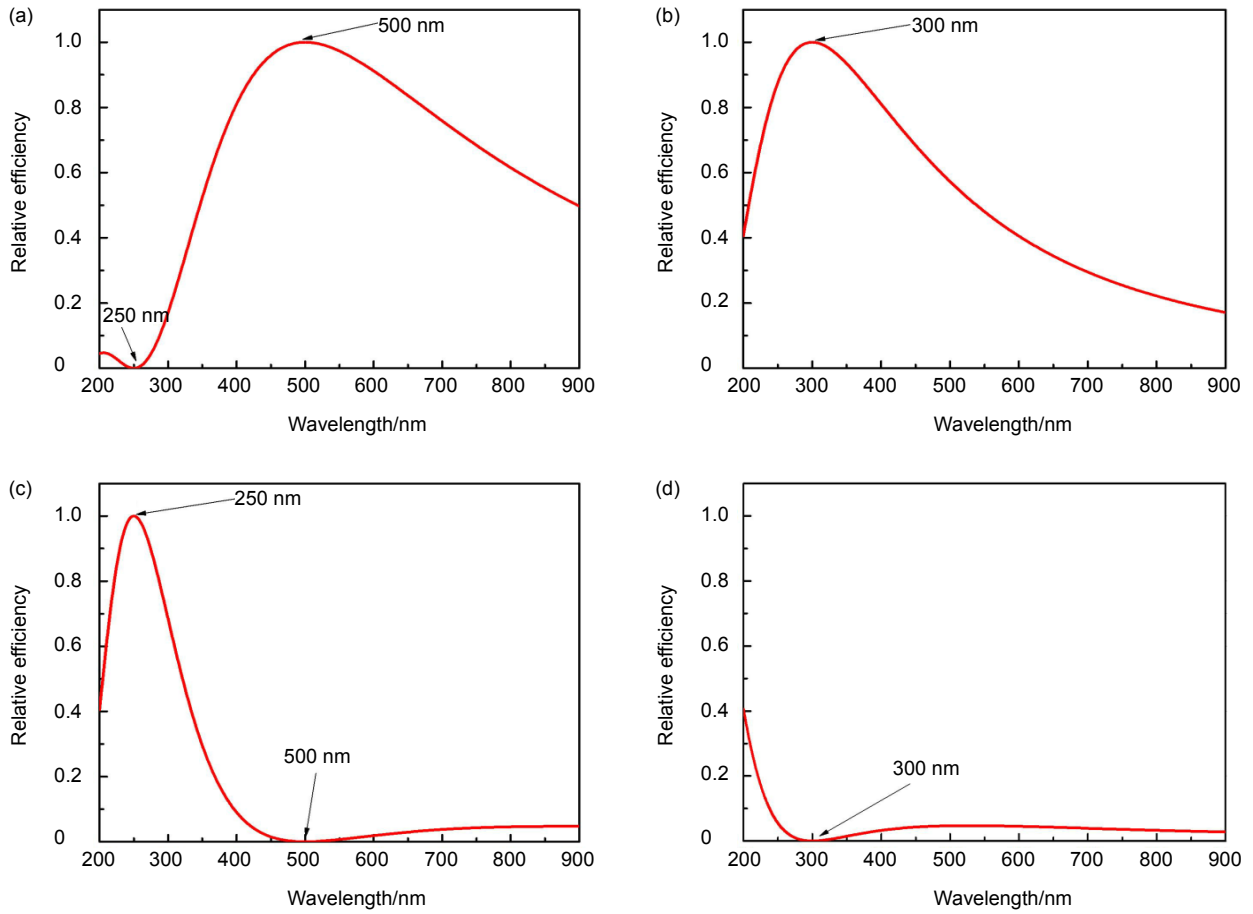


图 7 不同闪耀波长的不同级次光栅效率曲线。(a) 500 nm 的一级光栅效率曲线；(b) 300 nm 的一级光栅效率曲线；(c) 500 nm 的二级光栅效率曲线；(d) 300 nm 的二级光栅效率曲线

Fig. 7 Different order relative efficiency curves at different blaze wavelengths. First order relative efficiency curve at blaze wavelength of (a) 500 nm and (b) 300 nm; Second order relative efficiency curve at blaze wavelength of (c) 500 nm and (d) 300 nm

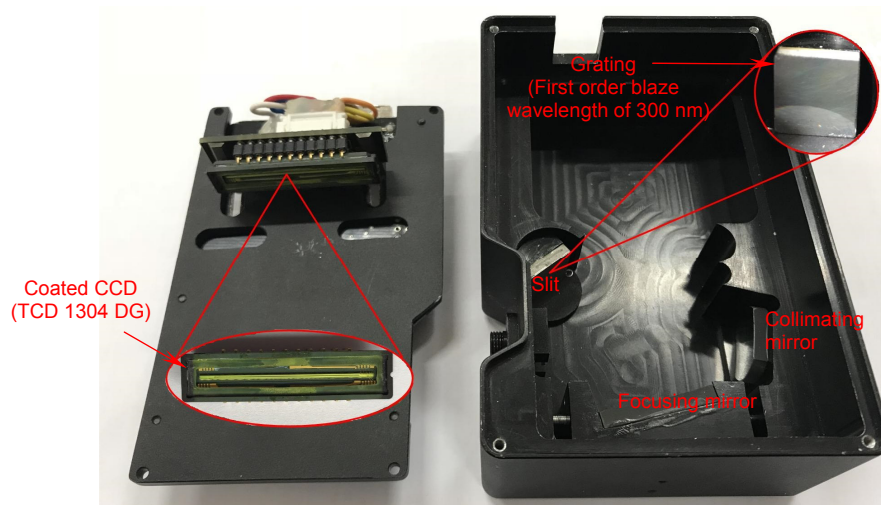


图 8 便携式紫外-可见光谱仪样机

Fig. 8 The prototype of portable UV-VIS spectrometer

后(图 9(a)到图 9(b))没有明显的增强变化,二级光谱中 253.652 nm(图 9 中 507.304 nm 位置处)的光强在 CCD 镀膜前后有很明显的增强效果,但是此处增强出现的二级光谱已经成为杂散光。图 9 测试的汞氩灯光谱图结果同式(3)和图 7(a)、7(c)的理论分析相一致。

图 10 为紫外-可见光谱仪中使用 300 nm 闪耀波长的闪耀光栅测试汞氩灯光谱图,一级光谱中 253.652 nm 的光强在 CCD 镀膜前后(即从图 10(a)到图 10(b))有非常明显的增强效果,二级光谱中的光强增强效果相对较弱。紫外光谱仪显示的光谱图形主要为一级衍射光谱,二级衍射光谱将会被二级滤波片消除。同时对比图 9(b)和图 10(b),可以看出,一级衍射光谱中,图 10(b)253.652 nm 的光谱灵敏度要比图 9(b)高很多。从而验证了理论分析中在紫外-可见光谱仪中对于两种闪耀波长的闪耀光栅的选择。此外,从镀膜前后(图 9、图 10 中从(a)到(b))的变化可以看出,在 300 nm 处

的一级衍射紫外波长和 500 nm 处的二级衍射紫外波长位置,紫外光光强都有明显的提高,表明了自行研制的镀膜紫外增强 CCD 显著的紫外增强效果。

本文设计制作的便携式紫外-可见光谱仪,加入了二级滤光片,装调测试汞氩灯光谱为图 11(a)。其中边缘波长为 253.652 nm 的波峰为图 11(b),半波峰宽为 1.5 nm。靠近中心波长 576.960 nm 和 579.066 nm,光谱数据如图 11(c)所示,根据瑞利判据,表明紫外光谱仪整体的分辨率不大于 1.5 nm。将汞氩灯中部分紫外波长与可见波段典型波长 546.074 nm 进行相对光强比,比较改进前后紫外-可见光谱仪的相对光强比,如表 3。紫外波段 253.652 nm 波长相对光强比值从改进前的 0.03 变为改后的 1.32,其它波段均有比较明显的提高,说明改进后紫外-可见光谱仪紫外波段的相对光强增强非常明显。

按照信噪比计算公式:

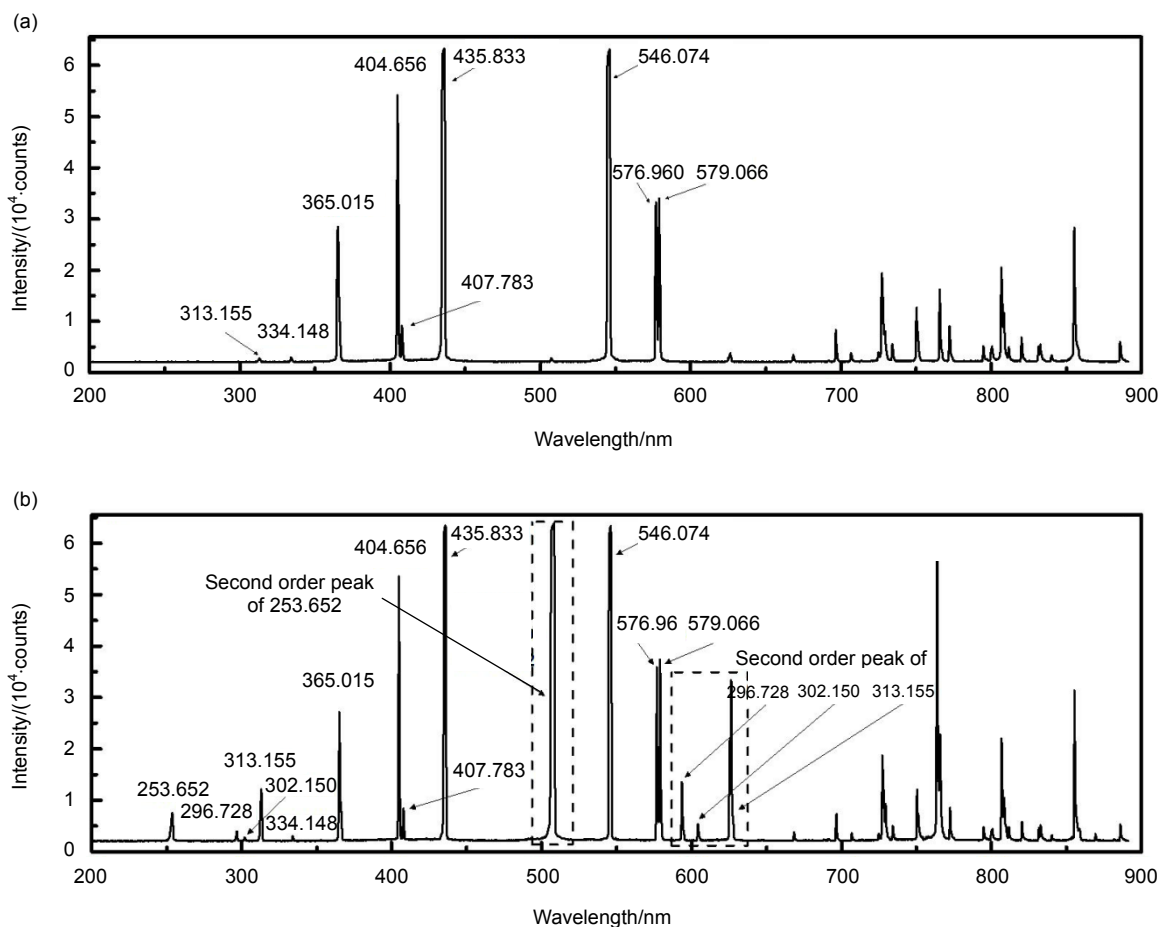


图 9 500 nm 闪耀波长光栅的汞氩灯光谱。(a) 镀膜前光谱图; (b) 镀膜后光谱图

Fig. 9 Hg-Ar spectra of blaze grating at blaze wavelength of 500 nm with (a) original CCD and (b) coated CCD

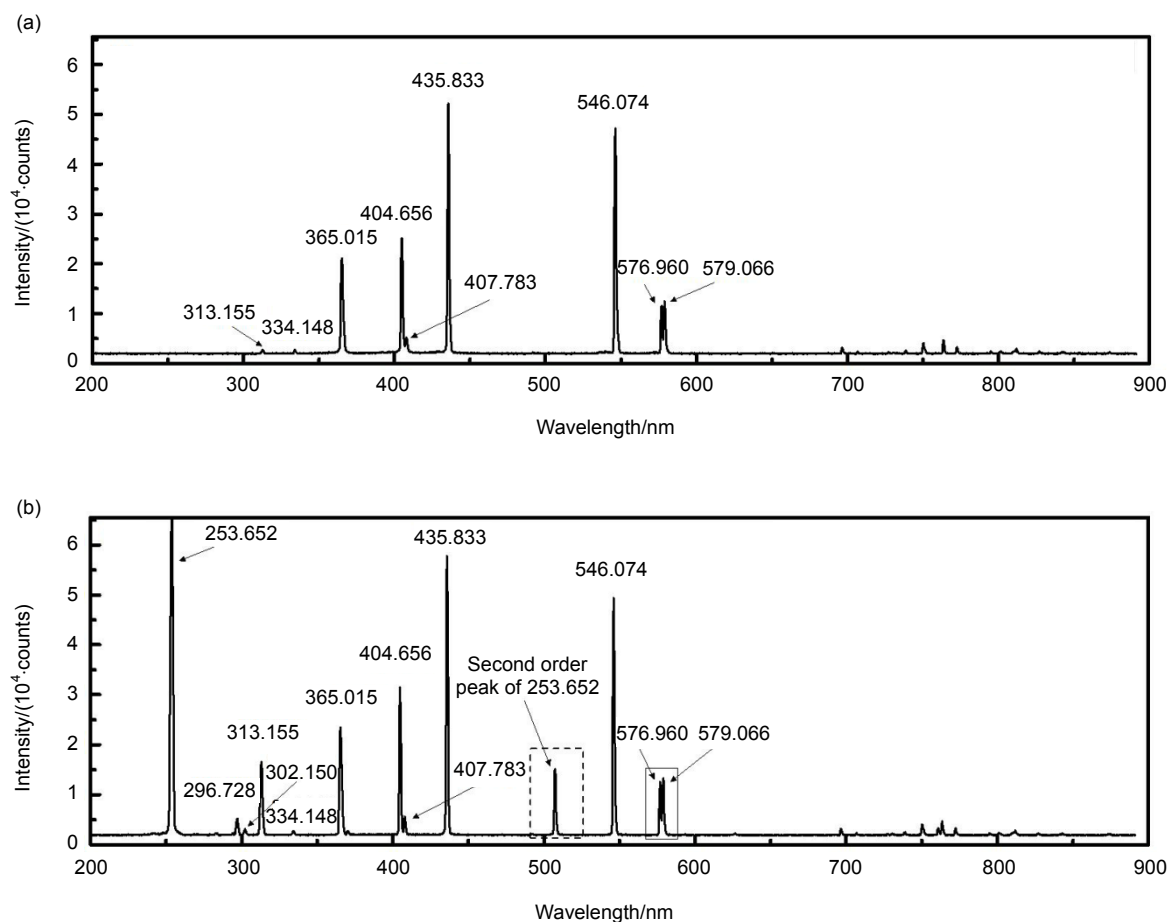


图 10 300 nm 闪耀波长光栅的汞氩灯光谱。(a) 镀膜前光谱图；(b) 镀膜后光谱图
 Fig. 10 Hg-Ar spectra of blaze grating at blaze wavelength of 300 nm with (a) original CCD and (b) coated CCD

表 3 改进前后光谱仪中其它波长与 546.074 nm 光强的相对比
 Table 3 The light intensity ratio between other wavelengths and 546.074 nm of spectrometer before and after improvement

Wavelength/nm	Before improvement	After improvement
253.652	0.03	1.32
296.728	0.03	0.11
313.155	0.04	0.34
365.015	0.45	0.48
546.074	1	1

$$SNR = (S - D) / \sigma \quad (1)$$

其中： SNR 为信噪比， S 为每个像元输出值的平均值， σ 为每个像元输出值的标准差， D 为每个像元暗光谱的输出平均值。取紫外波段 200 nm~300 nm 范围内全部像元，计算得出改进前光谱仪的信噪比为 10.86，而

改进后的信噪比为 330.64。比较图 9(a)改进前光谱仪对于汞氩灯响应光谱图，和图 11 改进后的汞氩灯响应光谱图，从中可以看出改进后的便携式紫外-可见光谱仪在紫外部分的信号响应非常明显，强度达到饱和。所以其紫外部分的信噪比在改进后有非常高的提升。

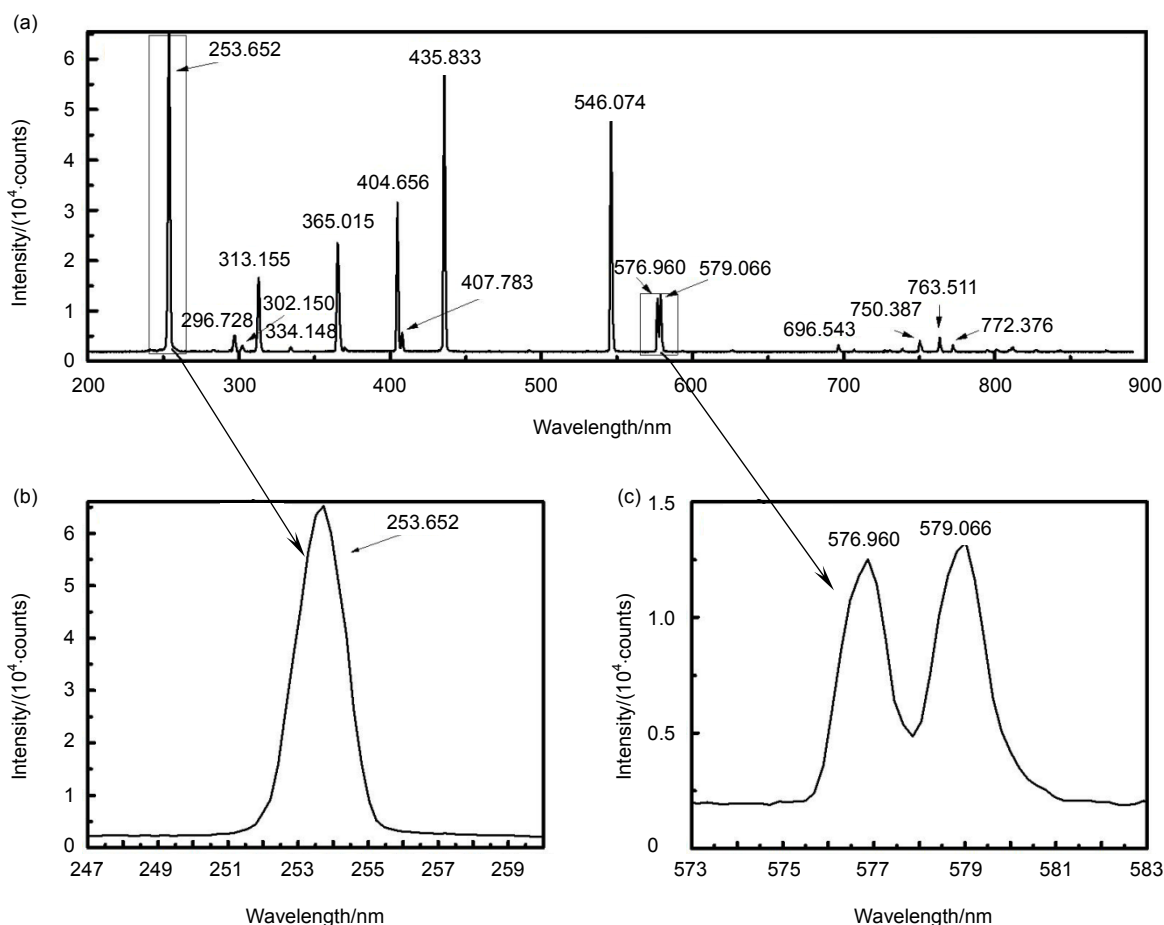


图 11 便携式紫外-可见光谱仪测试汞氩灯光谱。(a) 便携式紫外-可见光谱仪汞氩灯光谱; (b) 253.652 nm 的光谱图形; (c) 576.960 nm 和 579.066 nm 的光谱图形

Fig. 11 Hg-Ar spectrum with portable UV-VIS spectrometer. (a) Hg-Ar spectrum with portable UV-VIS spectrometer; (b) The spectrum of 253.652 nm; (c) The spectrum at 576.960 nm and 579.066 nm

5 结论

本文基于交叉型 C-T 光路结构设计了一款便携式紫外-可见光谱仪, 给出光学系统的设计参数。针对紫外-可见光谱仪中增强紫外响应的关键器件, 研制了镀膜紫外增强 CCD, 以 Lumogen Yellow S 0790 材料为荧光变频材料, 将荧光薄膜蒸镀到去掉保护玻璃的线阵 CCD TCD 1304 DG 上。使得线阵 CCD 的紫外响应度在 200 nm~300 nm 从原有的几乎为 0% 提高到 20% 左右, 同时还不影响 CCD 紫外响应的分辨率; 利用光栅效率公式, 理论分析了闪耀波长为 300 nm 和 500 nm 的闪耀光栅的一级和二级衍射光栅效率曲线, 据此选择使用闪耀波长为 300 nm 的闪耀光栅为便携式紫外-可见光谱仪的器件。通过对关键器件的分析和制作, 研制出一款便携式紫外-可见光谱仪样机。测试 200

nm~900 nm 的汞氩灯光谱, 对光栅效率的理论分析进行验证。研制的便携式紫外光谱仪紫外波段光谱灵敏度得到较大的提升, 整体分辨率不大于 1.5 nm, 达到便携式紫外光谱仪设计要求。

参考文献

- [1] Yang J. The application and development of UV detection technology[J]. *Optoelectronic Technology*, 2011, **31**(4): 274-278.
杨杰. 紫外探测技术的应用与进展[J]. *光电子技术*, 2011, **31**(4): 274-278.
- [2] Weiser H, Vitz R C, Moos H W, et al. Sensitive far uv spectrograph with a multispectral element microchannel plate detector for rocket-borne astronomy[J]. *Applied Optics*, 1976, **15**(12): 3123-3130.
- [3] Chen X, Li Z X, Yan F, et al. Test system for absolute spectral response of SBUV image intensifier[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(5): 8-14.
陈雪, 李宗轩, 闫丰, 等. 日盲紫外像增强器绝对光谱响应测试

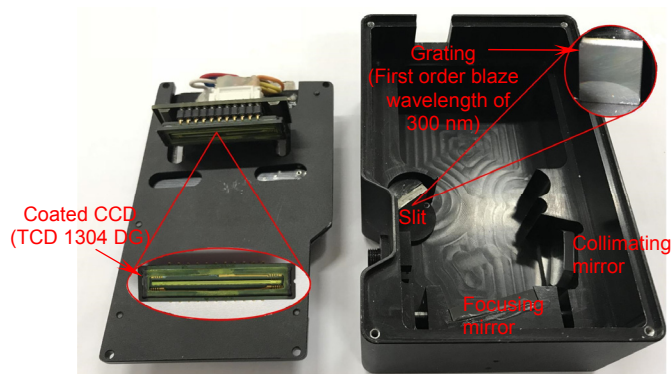
- 系统[J]. 光电工程, 2016, **43**(5): 8–14.
- [4] Feng F, Duan F J, Bo E, *et al.* An optical design of small-size echelle spectrograph[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2014, **41**(7): 20–25.
冯帆, 段发阶, 伯恩, 等. 一种小型中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. 光电工程, 2014, **41**(7): 20–25.
- [5] Franks W A R, Kiik M J, Nathan A. UV-responsive CCD image sensors with enhanced inorganic phosphor coatings[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, **50**(2): 352–358.
- [6] Liu Q, Ma S B, Qian X C, *et al.* Thickness optimization and photoelectric performance test of UV sensitized film of COMS sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(6): 0604002.
刘琼, 马守宝, 钱晓晨, 等. CMOS 传感器紫外敏化膜层的厚度优化及其光电性能测试[J]. 光子学报, 2017, **46**(6): 0604002.
- [7] Alexander S J. Phosphor coated UV-responsive CCD image sensors[D]. Waterloo, Ontario: University of Waterloo, 2002.
- [8] Franks W A R. Inorganic phosphor coatings for ultraviolet responsive image detectors[D]. Waterloo, Ontario: University of Waterloo, 2000.
- [9] Tong J P, Gao J X, Wang F, *et al.* Nonlinear correction of the sensor S11639 in mini-spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(11): 1101–1106.
童建平, 高建勋, 汪飞, 等. 微型光谱仪中传感器 S11639 的非线性校正[J]. 光电工程, 2017, **44**(11): 1101–1106.
- [10] Cheng L, Chen Y P, Zhu R B, *et al.* Design and Realization of Micro Fiber Spectrometers for Bioluminescence Detecting Systems' Stray Light Detection[J]. *Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters*, 2006, **14**(2): 427–429.
- [11] Xia G, Wu S, Wang G D, *et al.* Astigmatism-free Czerny-Turner compact spectrometer with cylindrical mirrors[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(32): 9069–9073.
- [12] Kingslake R. Who? Discovered coddington's Equations?[J]. *Optics and Photonics News*, 1994, **5**(8): 20–23.
- [13] Reader J. Optimizing Czerny–Turner spectrographs: a comparison between analytic theory and ray tracing[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, **59**(9): 1189–1196.
- [14] Keough S J, Hanley T L, Wedding A B, *et al.* Grazing incidence X-ray studies of ultra-thin Lumogen films[J]. *Surface Science*, 2007, **601**(24): 5744–5749.
- [15] Wang L H, Wang X K, Chen B. Study of ultraviolet and extreme ultraviolet phosphors for imaging detector[J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(S1): 479–481.
王丽辉, 王孝坤, 陈波. 增强 CCD 紫外和极紫外成像的荧光物质的研究[J]. 光学技术, 2006, **32**(S1): 479–481.
- [16] Zhang D W, Tian X, Huang Y S, *et al.* Preparation and spectral characterization of Lumogen coatings for UV-responsive CCD image sensors[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(5): 1171–1174.
张大伟, 田鑫, 黄元申, 等. CCD 紫外敏感 Lumogen 薄膜制备与光谱表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(5): 1171–1174.
- [17] Tao C X, Ruan J, Shu S P, *et al.* Thickness dependence of ultraviolet-excited photoluminescence efficiency of lumogen film coated on charge-coupled device[J]. *Current Optics and Photonics*, 2017, **1**(4): 284–288.
- [18] Du C G, Sun L Q, Ding Z T. Experiment study of enhancing CCD ultraviolet response using coronene[J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(5): 753–757.
杜晨光, 孙利群, 丁志田. 利用晕苯增强 CCD 紫外响应的实验研究[J]. 光学技术, 2010, **36**(5): 753–757.
- [19] Zhao Y H, Yan F, Lou H W, *et al.* Measurement technology for relative spectral responsivity of the ultraviolet ICCD[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(5): 1371–1374.
- [20] Zhao Y Q, Jiang L, He F, *et al.* Measurement and analysis of linear CCD nonlinear optical response characteristics[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(7): 19–23.
赵友全, 江磊, 何峰, 等. 线阵 CCD 光电响应非线性特性测定与分析[J]. 光电工程, 2015, **42**(7): 19–23.
- [21] Mouroulis P, Wilson D W, Maker P D, *et al.* Convex grating types for concentric imaging spectrometers[J]. *Applied Optics*, 1998, **37**(31): 7200–7208.

Design and key technology research of portable UV-VIS spectrometer

Wang Guodong¹, Xia Guo^{1,2*}, Li Zhiyuan¹, Hu Mingyong¹, Lu Hongbo¹

¹National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

²Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China



The prototype of portable UV-VIS spectrometer

Overview: With the widespread application of ultraviolet spectral detection technology, low-cost portable ultraviolet spectrometer has become a research hotspot in this field. For example, in chemical detection, the electronic spectrum of most molecules, which are in the ultraviolet region, can characterize the chemical reaction of a substance. Various experiment and application researches can be carried out with the qualitative and quantitative analysis of the molecular electronic spectrum using a ultraviolet spectrometer, such as analyzing the molecular composition of the analyte or determining whether the substance has undergone a chemical reaction or not. Owing to the absorption of ultraviolet light by the silicon substrate in the detector, it is hard to generate signal charges in the detector for the ultraviolet light. Therefore, the conventional spectrometer has a very low response to the ultraviolet band. In order to improve the response of the spectrometer to the UV band, the spectrum of the spectrometer's response is broadened. This article uses a simple and convenient method to improve the traditional spectrometer so that it can measure ultraviolet band. Based on this method, a UV-visible portable spectrometer prototype was developed. The innovations of the method proposed in this paper mainly include the following two points. First, a layer of fluorescent film is evaporated on the surface of the detector to convert ultraviolet light into visible light, thereby improving the ultraviolet responsivity of the detector. Second, we optimize the performance of the components in the spectrometer, thus increasing the incident light energy in the UV band. The structure of this paper is organized as follows. First, the optical path of the traditional portable cross-type Czerny-Turner structure spectrometer was designed. Second, the key components of the UV spectrometer were studied, namely UV detectors and blazed gratings. UV-enhanced CCDs were fabricated using Lumogen fluorescent material and vapor deposition film-forming method. The influence of the position of the fluorescent film on the CCD surface was analyzed. Based on the effects of blazed gratings on the multi-order diffraction efficiency in the ultraviolet region, the choice of a blazed grating for the UV spectrometer was determined. Finally, we developed an improved portable UV-visible spectrometer prototype. The performance test results show that its overall resolution of 200 nm~900 nm band is less than 1.5 nm when using 25 μm slit width, 600 lp/mm, and 300 nm blazed grating configurations. The spectral responsivity of 200 nm~300 nm ultraviolet band is increased to 20%, and the signal-to-noise ratio rises by about 30 times, meeting the design requirements of the portable UV-visible spectrometer.

Citation: Wang G D, Xia G, Li Z Y, *et al.* Design and key technology research of portable UV-VIS spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(10): 180195

Supported by Open subject of Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization Technology of the Chinese Academy of Sciences (JZ2016QTXM1135)

* E-mail: xiaguo@hfut.edu.cn