

## 基于凹面光栅的光谱检测仪性能提升的研究进展

付翔, 乐文冉, 王颖, 汪亚, 邹林, 邓志峰, 占生宝

### Research progress on performance improvement of spectrograph based on concave grating

引用本文:

付翔, 乐文冉, 王颖, 汪亚, 邹林, 邓志峰, 占生宝. 基于凹面光栅的光谱检测仪性能提升的研究进展[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 757-765.

FU Xiang, YUE Wenran, WANG Ying, et al. Research progress on performance improvement of spectrograph based on concave grating[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(6): 757-765.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 激光云粒子成像探测器研制

引用本文: 史晓丁, 冯力天, 刘英, 等. 激光云粒子成像探测器研制[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 67-72.

### 2. 大气湍流下超振荡望远成像的理论研究

引用本文: 周健文, 姚纳, 赵汗青, 等. 大气湍流下超振荡望远成像的理论研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 115-120.

### 3. 基于微球透镜远场超分辨率成像方法研究

引用本文: 林巧文, 杨春花, 刘红梅, 等. 基于微球透镜远场超分辨率成像方法研究[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 686-690.

### 4. 基于径向基函数的水性木器漆喇曼光谱鉴别

引用本文: 季佳华, 王继芬, 王冠翔, 等. 基于径向基函数的水性木器漆喇曼光谱鉴别[J]. *激光技术*, 2020, 44(6): 762-767.

### 5. 基于太赫兹相干层析成像系统色散补偿的研究

引用本文: 李丹, 饶云坤, 凌福日. 基于太赫兹相干层析成像系统色散补偿的研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 779-783.

文章编号: 1001-3806(2023)06-0757-09

## 基于凹面光栅的光谱检测仪性能提升的研究进展

付翔<sup>1,2</sup>, 乐文冉<sup>2</sup>, 王颖<sup>2</sup>, 汪亚<sup>2</sup>, 邹林<sup>2</sup>, 邓志峰<sup>2</sup>, 占生宝<sup>2\*</sup>

(1. 滁州学院 机械与电气工程学院, 滁州 239000; 2. 安庆师范大学 电子工程与智能制造学院, 安庆 246133)

**摘要:** 光谱检测是鉴别物质类型、掌握物质含量的重要手段。凹面光栅作为光谱检测仪的核心器件, 其成像质量直接影响检测质量, 影响凹面光栅的成像质量归类为像差消除与分辨率提升两个方面。综述了光谱检测仪研制、像差消除与分辨率提升的研究进展; 总结了各方案消除像差、提高分辨率的技巧、特色以及需满足的条件; 最后展望了基于凹面光栅的光谱检测未来可能发展方向。

**关键词:** 光谱学; 衍射与光栅; 成像; 光谱; 检测技术; 像差; 分辨率

**中图分类号:** TN247 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.06.005

### Research progress on performance improvement of spectrograph based on concave grating

FU Xiang<sup>1,2</sup>, YUE Wenran<sup>2</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>, WANG Ya<sup>2</sup>, ZOU Lin<sup>2</sup>, DENG Zhifeng<sup>2</sup>, ZHAN Shengbao<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Chuzhou University, Chuzhou 239000, China; 2. College of Physics and Electrical Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246133, China)

**Abstract:** Spectral detection was a crucial method for identifying the types and compositions of the substance. The concave grating was the key element of a spectrograph when a concave grating was used as an element of a spectrograph. The detection results of the imaging quality are directly influenced by the concave grating. The methods of affecting the image quality were named aberration correction and resolution improvement, respectively. The research progress of the aberration correction and the resolution improvement in spectrograph manufacture is stated. For each scheme of the aberration correction and the resolution improvement, the skills and characteristics are summarized, and the conditions for the aberration correction and the resolution improvement are pointed out. Finally, the possible development directions of spectral detection based on the concave grating in the future prospect.

**Key words:** spectroscopy; diffraction and gratings; imaging; spectra; detection technology; aberration; resolution

## 引言

光谱检测以其快速、无损、高效等优点, 深受工业、国防、医学、大气、海洋探测等众多领域青睐<sup>[1-2]</sup>, 已成为当下检测技术领域研究的热点。其原理是依据成像的光谱组成和强度, 鉴别出物质类型、并检测出物质的含量<sup>[3-5]</sup>。其中, 成像的光谱组成会影响被检测物质的类型, 光的强度和分辨率会影响被检测物质的含量<sup>[6-8]</sup>。凹面光栅是光谱检测的重要器件, 但其衍射成

像由于受自身条件限制, 必然出现像差、光谱分辨率不高等问题, 影响被检测物质的类型和精度<sup>[9-12]</sup>。针对上述问题, 大量科研工作者从光栅设计、制作入手, 对凹面光栅消像差、以及提高分辨率进行了较深入的研究。但从目前的资料来看, 这些研究只是零散地分布于各研究文献中, 还没有对其进行归纳与总结。本文作者从消除像差和提高分辨率两方面入手, 对其所采用的设计技巧进行归类, 对提高成像质量的研究进展进行阐述, 并总结了阶段性成果。

## 1 消像差的研究进展

众所周知, 光谱检测系统由狭缝、色散元器件、聚焦元器件以及探测器构成, 被封闭于一个密闭的检测室内。提高光谱检测精度的重要一环是消除成像的像散、彗差、色畸变、谱线弯曲等。科研人员从单个光栅

基金项目: 安徽省教育厅高校学科(专业)拔尖人才学术项目(gxbjZD2021063)

作者简介: 付翔(1984-), 女, 硕士研究生, 实验师, 现主要从事激光技术方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhanshb@aliyun.com

收稿日期: 2022-10-14; 收到修改稿日期: 2023-01-16

制作或添加辅助元器件入手,开展了消像差的研究。

### 1.1 单个凹面光栅的消像差

罗兰型光栅是光谱检测最常用光栅<sup>[13]</sup>。先重点阐述罗兰型光栅消像散和弧矢彗差、提升检测精度的进展。消像差的基本思路是:以光程函数为基础,将其展开成多项式,再依据所需消除的像差,使某一系数项 $F_{i,j}=0$ 。对于一个以原点为中心、法线方向为 $x$ 轴的凹面光栅系统<sup>[14]</sup>,光程函数可表达为:

$$F(y,z) = F_{00} + yF_{10} + \frac{1}{2}y^2F_{20} + \frac{1}{2}z^2F_{02} + \frac{1}{2}y^3F_{30} + \frac{1}{2}yz^2F_{12} + \dots \quad (1)$$

式中, $x, y, z$ 是坐标轴, $F_{20}$ 为离焦系数, $F_{02}$ 为像散系数, $F_{30}$ 为子午彗差系数, $F_{12}$ 为弧矢彗差, $F_{00}$ 和 $F_{10}$ 涉及到光栅方程产生,不具备关键像差特征,可忽略。检测时,为提高检测精度,必须消除像散和弧矢彗差,这要求研制光栅过程中,需不断调节记录、使用光源位置,达到 $F_{02}$ 和 $F_{12}$ 为零的目标。

使用全息法制作罗兰型光栅,当记录光源波长为 $\lambda_0$ 时,BROWN等人<sup>[15]</sup>研究发现:工作波长 $\lambda$ 只有满足条件 $1 \leq m\lambda/\lambda_0 \leq 2$ ( $m$ 表示衍射级次数)时,才能同时消除 $\lambda$ 处的像散、弧矢彗差等;而对于偏离 $\lambda$ 的光束,其像散仍然存在。针对该情况,GRANGE<sup>[16]</sup>运用光线偏离与光程函数导数关系,提出了采用多维参数组求解最小优化函数值的方法,利用该方法,他们设计出一种波长范围在125 nm~185 nm的凹面光栅,结果表明:当光源以最佳角度入射时,在140 nm和170 nm处像散得到消除,而其它波长处的像散也明显降低。

为进一步减小像散,参考文献[17]中提出了利用平面波、柱面波同时记录光栅的方案,如图1所示。图中,激光源发出的球面光束,经偏振分光棱镜(polarization beam splitter, PBS)分光后,其中一束经球面镜形

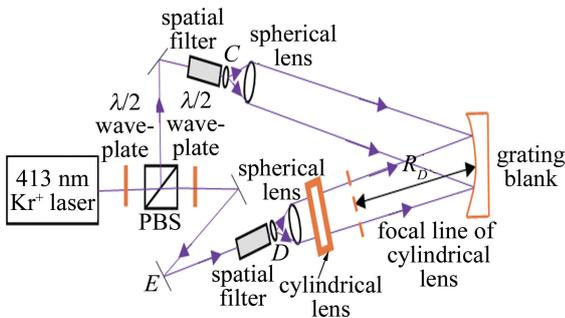


图1 平面波、柱面波记录方案结构示意图<sup>[17]</sup>

Fig.1 Schematic diagram of plane wave and cylindrical wave recording method<sup>[17]</sup>

成平面波,另一束经柱面镜形成柱面波,然后将这两束光发射至待刻光栅。由于柱面波的使用,使得臂长 $R_D$ 增大,由此 $F_{02}$ 得到降低。

当激光器输出波长为413 nm时,选取365.4 nm作为特征谱线对方案实施前后的效果进行比较,结果如图2所示。可以看出,未校正前,像高接近10 mm,校正后,像高减小到3 mm。实验也进一步证明,该设计思路对于减小像散行之有效<sup>[17]</sup>。

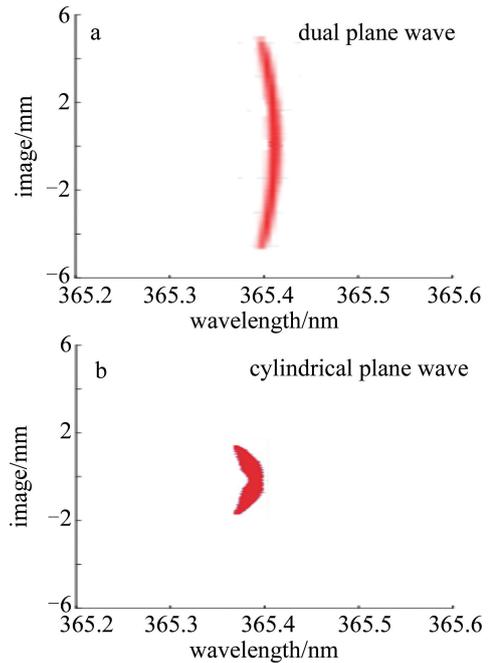


图2 校正前后,波长为365.4 nm处的成像示意图<sup>[17]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of imaging at 365.4 nm before and after adjustment<sup>[17]</sup>

上述方法虽能减小使用波段像散,但无法校正弧矢彗差。为此,该团队进一步提出利用环面波制作光栅的方案。在上述激光波长不变的情况下,仿真得到圆柱平面波、圆柱环面波记录时的对比结果,如图3所示。可以看出,成像光斑在未校正前为弯曲形状,校正后几乎变成直线,说明弧矢彗差得到了有效抑制。实验结果也证实了理论分析结果的正确性<sup>[18]</sup>。

除记录光源位于罗兰圆上制作光栅的情形外,还有一种将记录光源置于圆外的制作方案,如图4所示。图中, $C, D$ 为置于圆外的记录光源。对于该方案,KONG等人<sup>[19]</sup>进行了较详细的研究。在假定记录波长 $\lambda_0=413.1$  nm的条件下,通过分析校正波长 $\lambda$ 为0 nm~800 nm的成像情况,发现:(a)当入射角、衍射角相等时,像散和弧矢彗差在 $\lambda$ 和 $\lambda/2$ 处为0;(b)当衍射角为零时,像散和弧矢彗差在 $\lambda$ 和 $2\lambda$ 处为0;(c)当入射角为零时,像散和弧矢彗差在0和 $\lambda$ 处为0。

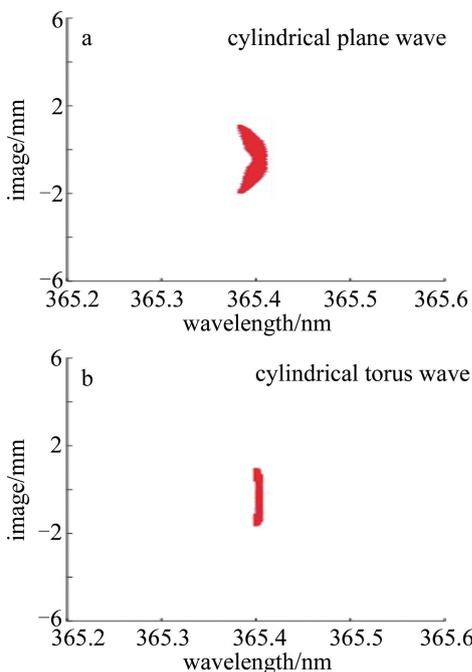


图 3 波长为 365.4 nm 时,圆柱平面波和圆柱环面波成像示意图<sup>[18]</sup>  
 Fig. 3 Schematic diagram of imaging at 365.4 nm with cylindrical plane wave and cylindrical torus wave<sup>[18]</sup>

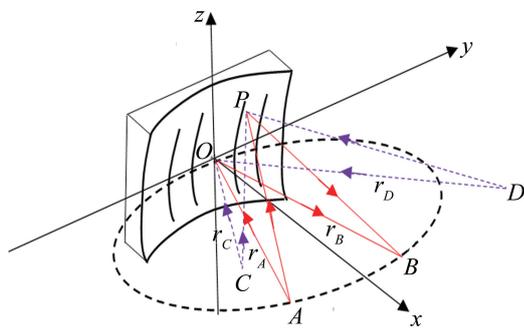


图 4 罗兰光栅结构示意图<sup>[19]</sup>  
 Fig. 4 Schematic diagram of Rowland grating<sup>[19]</sup>

在以上所有情况下,在两个零像差波长之间的像散和弧矢彗差显著降低。以此为基础,他们给出了一种波长范围为 160 nm ~ 600 nm 的设计案例,结果表明,当入射角与衍射角相等时,在工作波长为 225 nm、450 nm 处,像散和弧矢彗差为 0;当从点光源发出波长为 160 nm、380 nm、600 nm 的光束后,经该光栅衍射在像面形成的点列图,相较于传统等刻线密度、曲率半径光栅,像高可从 10 mm 减小到 1 mm,同时谱线弯曲也得到一定改善。

### 1.2 凹面光栅+辅助器件的消像差

单光栅消像差方案虽能在窄频谱范围内较好地确保低像差成像,但当频谱范围较大时,多波长成像的像散、彗差等仍难以消除。针对该问题,一种双光栅串联的方案被提出<sup>[20]</sup>,如图 5 所示。图中,光栅  $G_1$  和  $G_2$

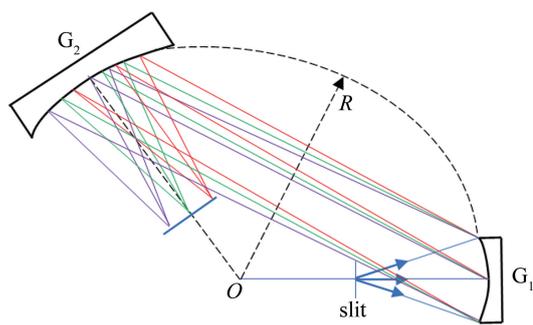


图 5 串联光栅架构示意图<sup>[20]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of tandem grating<sup>[20]</sup>

相切于以  $O$  为中心的圆,且对称放置。复合光源发出的光束从狭缝出射,经光栅  $G_1$  衍射后入射至光栅  $G_2$ 。由于凹面光栅的聚焦特性,相同波长的光束能聚焦于成像面的某一点处。对于该设计,为实现各波长尽可能地无像散、无彗差地成像,需满足如下条件:(a)狭缝必须位于  $G_1$  的法线上,成像点必须位于  $G_2$  的法向平面;(b)对于入射光束,要求其不同波长的子光束是平行入射到  $G_2$ 。当满足两个条件时,相同波长的弧矢像距等于于子午像距。理论分析时,研究者以波长为 120 nm ~ 170 nm 光束为例,通过改变光栅  $G_1$  衍射角范围,如从  $40^\circ$  减小到  $10^\circ$ ,发现其像散从  $10^{-1}/\text{rad}$  减小到  $10^{-5}/\text{rad}$ ,彗差从  $10^{-2}/\text{rad}$  减小到  $10^{-4}/\text{rad}$ 。

上述方案中,由于光栅曲率半径较大,其内切圆半径必然很大,由此导致成像系统的体积较大。针对该问题,参考文献[21]中提出了一种离轴抛物镜串联光栅的方案,如图 6 所示。图中,两块离轴抛物镜对称共焦放置。当瞳孔出射的平行光束经离轴抛物镜反射后,必将以平行的方式入射到平面光栅,其衍射后相同波长的光束,必将以平行的方式入射至凹面光栅,满足不同波长子光束是平行入射到凹面光栅的要求。理论分析表明,对于波长为 260 nm ~ 380 nm 的平行入射光束,当离轴抛物镜半径为 200 mm 时,系统的成像距离从 210 mm 减小到 101.25 mm。

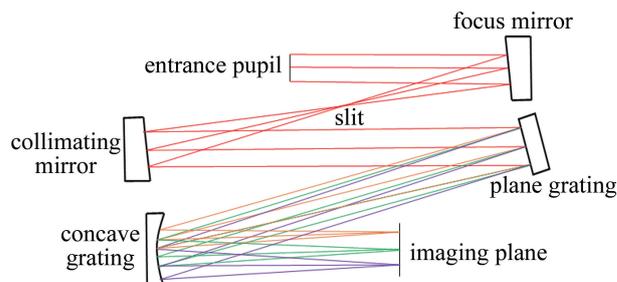


图 6 级联光栅像散优化结构示意图<sup>[21]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of cascade grating astigmatism optimization<sup>[21]</sup>

对于图 6 所示设计系统,由于使用的元器件较多,

必然存在光路对准、像距调节难题。为此,参考文献[22]中提出了一种简化该系统的设计方案,如图7所示。图中,直接以一面离轴抛物镜作为准直镜。由于该镜反射的平行光束入射光栅时,可能导致不同波长的子光束偏离光栅法向平面的情形,为克服这个问题,一块带有楔角的柱面镜嵌入系统,其作用为调节弧矢、子午方向像距,使之满足每个波长无像散、彗差成像的要求。对于该设计方案,理论分析表明:当波长为280 nm~760 nm、柱面镜倾斜角为27.67°、楔角为3.77°时,其光斑均方根半径从图6所示设计系统的11.39 μm降低到8.5 μm。

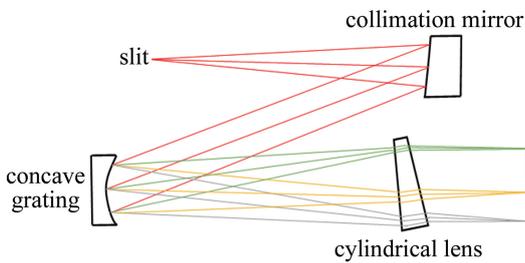


图7 旋转柱面透镜调节像距消像散结构示意图<sup>[22]</sup>

Fig. 7 An astigmatic structure diagram for adjusting image distance by rotating cylindrical lens<sup>[22]</sup>

上述两种设计中,光栅的数值孔径、光束的入射角度要求均较小,这限制了光谱检测的范围。针对该问题,参考文献[23]中提出了柱面镜级联两块凹面光栅,从而拓展检测范围的设计思路。依据每个波长像差校正的原理,首先在满足像散、彗差校正条件下,求解出光栅位置,柱面镜楔角、倾斜角的最优参数,然后针对系统小型化要求,设计出如图8所示大区域检测系统。图中,折叠镜的作用是确保系统在结构紧凑的情况下,进一步减小体积。结果表明:在波长为400 nm~800 nm,第一、二光栅入射角分别为1.2°和15°,柱面镜楔角为15.63°时,其数值孔径达到0.1。

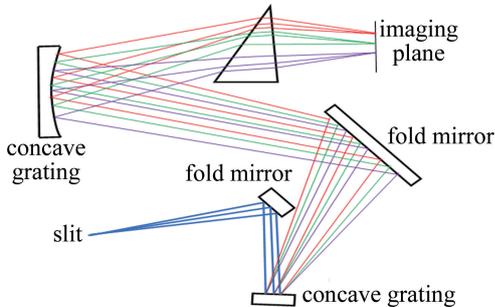


图8 级联光栅型旋转透镜调节像距结构示意图<sup>[23]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of cascade grating type rotating lens adjusting image distance<sup>[23]</sup>

前面已提到,数值孔径对光谱检测具有较大影响,

其主要表现为:当数值孔径较大时,光栅衍射所生成的像也较大,此时像的弯曲和畸变表现得更为明显。针对该问题,一种通过添加平凸厚透镜的方案被提出,这就是人们熟知的Dyson光谱仪,如图9所示<sup>[24]</sup>。图中,平凸厚透镜与光栅的圆心重合,且透镜的中心轴与光栅法线也重合。狭缝紧贴于透镜后表面,当光束从狭缝入射时,由于光栅衍射和透镜凸面的折射,最终汇聚在透镜后表面上成像。将探测器的敏感面置于像面上,此时像可在探测器上被检测。为校正谱线弯曲和色畸变,推导出光栅和透镜的曲率半径( $R$ 和 $r$ )须满足条件 $R/r=n/(n-1)$ (其中 $n$ 为透镜的折射率)。进一步,选取曲率半径分别为135 mm、69 mm的光栅和透镜,制作了一台数值孔径为0.66的样机系统,结果表明,在3650 nm、3655 nm和3663 nm处,谱线弯曲和色畸变几乎为0。

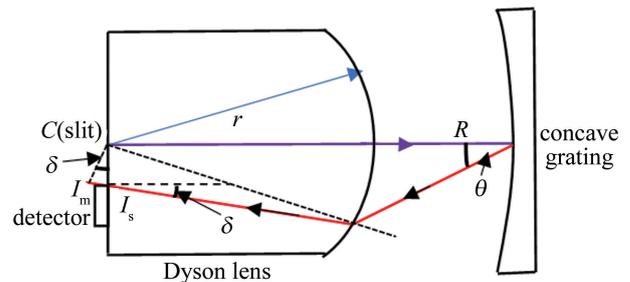


图9 Dyson结构任意光线下子午面与弧矢面成像示意图<sup>[24]</sup>

Fig. 9 Schematic diagram of meridional and sagittal imaging of Dyson structure under arbitrary light<sup>[24]</sup>

然而,该光谱仪只适用于衍射角较小的情况。当衍射角增大时,由于不同波长的子午焦距不同,谱线弯曲、色畸变以及像散仍存在。为此,MONTERO-ORILLE等人<sup>[25]</sup>在图9的基础上,提出了一种在双波长下校正谱线弯曲、色畸变的方法。其原理是:在衍射角 $\theta$ 为任意角度的情况下,选取合适的临界波长 $\lambda_a$ 和 $\lambda_b$ ,运用正弦定理和斯涅耳定律对 $R/r$ 进行修正,当 $\delta=0^\circ$ ( $\delta$ 为子午像点于平凸厚透镜后表面法线的夹角)时,谱线弯曲、色畸变以及像散均得到较好校正。理论分析表明,当临界波长分别为400 nm和1000 nm、光栅曲率半径为179.86 mm、透镜半径为59.25 mm时,像高谱线弯曲为0.007 μm,色畸变为0.026 μm。

图9中,由于探测器具有一定尺寸、无法与透镜后表面完全贴合,会导致探测器无法检测到成像,从而不利于其安装、使用。针对该情况,一种利用全反射面折叠光路的方案被提出<sup>[26]</sup>,如图10所示。图中,将平凸厚透镜替换为一面带有反射镜的特殊透镜,其作用是将原本汇聚在后表面的光束、在透镜焦距不变的情况

下,反射并汇聚到透镜外的像面上。理论分析表明,在光谱范围为 350 nm ~ 1050 nm、光栅曲率半径为 165 mm、透镜凸面曲率半径为 53.693 mm、全反射临界角为 50°的情况下,像面和透镜之间达到 1 mm 的分离,谱线弯曲为 0.05  $\mu\text{m}$ ,色畸变为 0.7  $\mu\text{m}$ 。此外,当使用一块 2 次曲面系数为 -0.9076 的非球面光栅替代球面光栅时,焦平面与厚透镜后表面之间高达 7 mm 的分离,可进一步满足探测器的安装使用<sup>[27]</sup>。同时,光斑的均方根半径从 24  $\mu\text{m}$  减小到 6  $\mu\text{m}$ 。图中,TIR (total internal reflection) 为全内反射透镜。

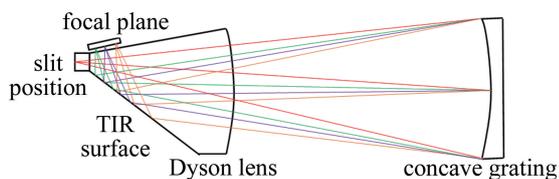


图 10 折叠光路结构示意图<sup>[26]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of folded optical path structure<sup>[26]</sup>

虽然上述设计确保了探测器的检测使用,但由于其带有全反射面的特殊透镜的厚度较大,会导致系统的杂散光较大。为此,参考文献[28]中将图 10 所示带有全反射面的透镜替换成较薄的平凸厚透镜,并提出了一种非球面校正镜设计思路,如图 11 所示。图中,让平行光束通过由 ZnSe 和 Ge 材料制成的透镜组合,将该光束聚焦至透镜外,确保了探测器安装使用。非球面镜的添加,提供了一个非球面系数,校正了由减小透镜厚度带来的球差问题。此外,可通过旋转像面,将各波长下、原本不在同一垂面上的最小弥散光斑置于同一平面上,平衡了色差,从而使得每个波长的光束都能理想成像。理论分析表明,在波长范围为 7.5  $\mu\text{m}$  ~ 10  $\mu\text{m}$  时,系统的杂散光减小到  $10^{-7}$  量级,谱线弯曲小于 4.051  $\mu\text{m}$ ,色畸变小于 4.154  $\mu\text{m}$ ,说明该设计思路是可行的。图中,FPA (focal plane array) 为焦平面阵列。

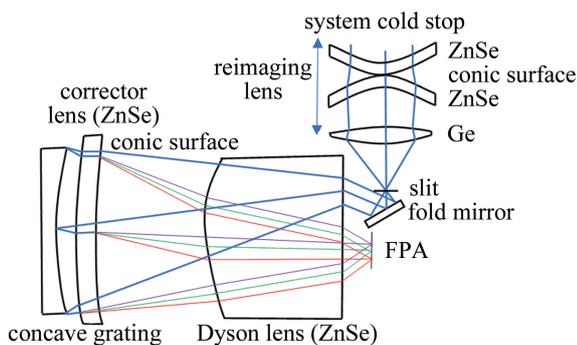


图 11 非球面镜法结构示意图<sup>[28]</sup>

Fig. 11 Schematic diagram of aspherical mirror method<sup>[28]</sup>

## 2 提高分辨率的研究进展

除像差外,分辨率也是影响光谱检测精度的另一个重要影响因素。总结当前研究成果,可将提高分辨率的方法概括为窄波段分割以及宽波段分割两种类型。

### 2.1 窄波段分辨率提升的研究进展

光谱分辨率由色散器件角色散本领、会聚透镜的焦距以及探测器像元尺寸共同决定<sup>[29]</sup>。若系统色散能力越大,则像的分辨率越高<sup>[30]</sup>。对于窄波段来说,提高分辨率的做法是:通过改进光栅架构、或添加辅助元器件来提升整个检测波段的色散率。

基于该思路,参考文献[31]中提出了一种改进光栅架构提高分辨率的方案。该方案依据色散率和分辨率的关系,在考虑光程和入射光束波长的情况下,采用牛顿迭代法,从光栅顶点开始,依次确定刻槽位置和闪耀角,从而提高分辨率。以此为基础,研究者们还对非罗兰圆、线性色散、以及多级衍射类型的光栅分辨率进行了分析,结果表明:以牛顿迭代算法制作的光栅均可提升分辨率。

牛顿迭代法虽能从高分辨率角度、合理地布局光栅刻线的排列,但其大量的迭代次数,使得求解刻线位置的时间较长。针对该问题,参考文献[32]中提出了一种简易、高分辨率的光栅设计方法。其步骤为:首先运用光程函数,建立光栅架构非线性优化方程,并采用全局搜索算法求解最佳刻线位置;其次,通过微调光源和探测器的位置参数,获取检测范围内可提升色散率的色散距离。分析结果表明,在狭缝宽度为 50  $\mu\text{m}$ 、波长范围为 370 nm ~ 780 nm、入射距离为 120 mm、像面距离为 124.5 mm 的情况下,像的最小分辨率可达 2 nm,而最高分辨率达到 0.8 nm 以上。

实际应用中,由于检测室内部背景等杂散光的存在,必然导致分辨率下降。针对该情况,REN 等人<sup>[33-34]</sup>提出了一种检测室内壁刻槽提升分辨率的方案,并搭建出如图 12 所示的检测系统。图中,由于杂

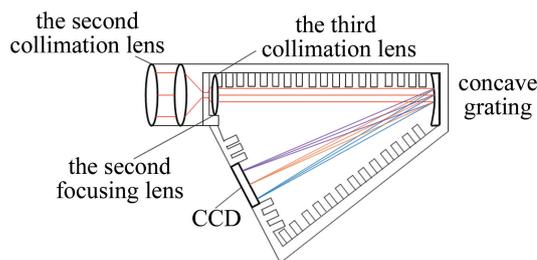


图 12 内壁刻槽结构示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 12 Structure diagram of inner wall grooves<sup>[33]</sup>

散光在凹槽处发生多次反射直至光能完全衰减,则可避免探测器上同一处出现多波长光束同时介入的情况,从而分辨率得到了提高。结果表明,在波长范围为400 nm~1000 nm、内壁刻槽深度和宽度分别为1 cm和2 cm时,分辨率可达1.4 nm。

为进一步提高窄波段内的分辨率,CAO等人<sup>[35]</sup>提出了一种双光栅色散叠加的方案,如图13所示。图中,将两块参数完全相同的光栅固定在同一光栅座上,通过波长扫描结构驱动光栅同轴旋转。不同波长的衍射光束对应相应的转角,在不同转角处,探测器接收到不同波长的光,由此可实现连续波长范围内的光谱检测。由于两块光栅的共同使用,将系统色散能力提高为原来的两倍,从而进一步提高了分辨率。结果表明,在波长为170 nm~380 nm的范围内,分辨率可达0.8 nm。

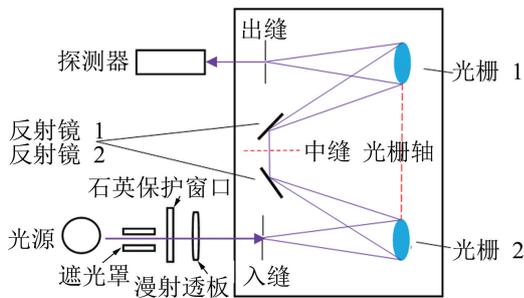


图13 双光栅色散叠加结构<sup>[35]</sup>

Fig. 13 Double grating dispersion superposition structure<sup>[35]</sup>

上述方案虽能有效提高窄波段内的分辨率,但成像呈曲面形状,与平面探测器相匹配时,会导致检测精度的下降。为此,LI等人<sup>[36]</sup>提出了透镜提高色散能力的方案,如图14所示。图中,将第2块光栅替换为2块透镜的组合。透镜的作用是将原本不易检测曲面像谱变换为平面像谱。同时,增大了色散距离,从而提高了系统的线性色散。结果表明,在波长为320 nm~800 nm范围内,两块透镜焦距分别选择为80 mm、60.1 mm,分辨率可达0.5 nm,较前一方案相比分辨率得到显著提升。此外,在特定波长处添加一块条形滤

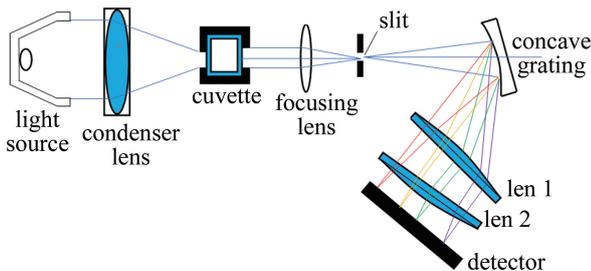


图14 透镜优化色散结构示意图<sup>[36]</sup>

Fig. 14 Schematic diagram of double grating dispersion superposition structure<sup>[36]</sup>

光片,可进一步提高检测精度。

## 2.2 宽波段分辨率提升的研究进展

上述方法虽能有效地提高窄波段分辨率,但由于色散距离限制,当谱宽较大时,高分辨率的检测效果难以实现<sup>[37]</sup>。针对该问题,一种对频带分割的方法被提出。其做法为:在确保探测器长度较短的情况,依据谱宽与分辨率的关系,利用光栅或不同辅助元器件将宽波段分割为若干窄波段依次检测。参考文献<sup>[38]</sup>中利用该方法设计了一种利用3块光栅切换、分割波段的检测结构,如图15所示。图中, $O_1$ 、 $O_2$ 、 $O_3$ 为光栅中心,将波段为400 nm~2500 nm光源发出的光束通过旋转光栅分割为400 nm~1000 nm、1000 nm~1700 nm和1700 nm~2500 nm 3个子波段,并利用上述窄波段提高分辨率的方法对每个波段进行改善后,再进行检测。结果表明,以上3个波段的分辨率分别为2.5 nm、4.3 nm、6.2 nm,较好满足了近、中红外光检测需求。

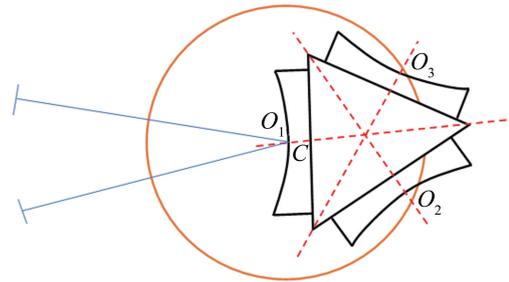
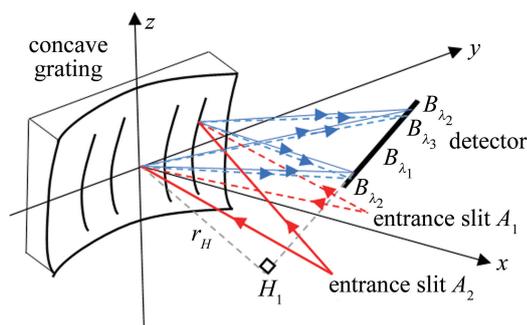


图15 3块光栅分割波段结构示意图<sup>[38]</sup>

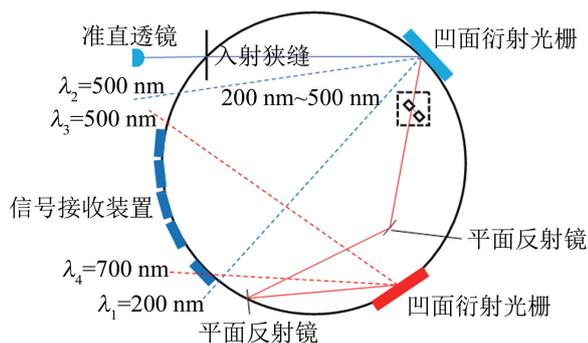
Fig. 15 Schematic diagram of band structure segmented by three gratings<sup>[38]</sup>

上述方案虽然可实现高分辨率的宽带检测,多块光栅运用时,增加了系统的复杂性。针对该问题,一种双缝入射方案被提出<sup>[39]</sup>,如图16所示。图中,将其中两块光栅替换为两个人射狭缝,在满足等衍射角的条件下,运用光栅方程和光程函数确定入射角和狭缝位置,使用狭缝 $A_1$ 、 $A_2$ 将 $\lambda_1$ - $\lambda_3$ 波段分割为2个子波段。当光束在 $A_1$ 狭缝处入射时,可将 $\lambda_1$ - $\lambda_2$ 的光束投影到探测器上;同理在 $A_2$ 狭缝处入射时,可将 $\lambda_2$ - $\lambda_3$ 的光束投影到探测器上。这里的 $\lambda_1$ - $\lambda_3$ 表示检测总带宽, $\lambda_1$ - $\lambda_2$ 和 $\lambda_2$ - $\lambda_3$ 为被分割成的两个较窄的子带宽。实验结果表明,在400 nm~1200 nm波段内,系统分辨率可达1.8 nm。进一步,ZHOU等人<sup>[40]</sup>在图16的基础上,将其中的一个狭缝替换为一块反射镜,设计了一种反射镜灵活的分割波段改进结构。当入射光线不经过反射镜时,在探测器上可接收 $\lambda_1$ - $\lambda_2$ 波段的光谱;当反射镜向下移动至合适位置时,可接收 $\lambda_2$ - $\lambda_3$ 波段的光谱。需要强调的是,该反射镜是一种只反射500 nm以

图16 双缝输入方案结构示意图<sup>[39]</sup>Fig. 16 Schematic diagram of double slit input scheme<sup>[39]</sup>

上光束的特殊反射镜。由于该镜的使用,在分辨率不减的同时让波段分割变得更为灵活。结果表明,在将工作波段 200 nm~900 nm 分割成 200 nm~550 nm 和 550 nm~900 nm 的情况下,系统分辨率可达 1.2 nm。

为进一步提高宽波段的分辨率,LU 等人<sup>[41]</sup>在利用反射镜高灵活度的优势,并考虑系统色散能力和复杂性的情况下,设计出一种双光栅分割波段的结构,如图 17 所示。图中,将两块完全相同且刻线密度为 2400 line/mm 的光栅和信号接收装置置于同一罗兰圆上。依据上述检测原理,通过适当调节光束的入射角度和反射镜的位置,使得所设计的整个波段信号能被接收装置采集。由于刻线密度的增大,提升了光栅的角色散能力,从而使得分辨率得到提高。结果表明,当波长范围为 200 nm~700 nm、入射角为 60°时,系统的分辨率达 0.4 nm。

图17 双罗兰圆光栅结构示意图<sup>[41]</sup>Fig. 17 Schematic diagram of double Rowland circular grating<sup>[41]</sup>

### 3 结束语

针对光谱检测对高质量图像的要求,从消像差和提高分辨率两方面入手,综述了提高成像质量的最新进展。对于消像差,将其归纳为单光栅和添加辅助元器件两种方案;对于提高分辨率,将其归纳为窄带以及宽波段分割两种方案。在此基础上,对不同方案的优

势进行了分析,归类了这些方案采用的设计技巧,总结了所取得的阶段性成果。通过分析不难发现,对于消像差,单光栅方案虽能有效校正像差,但频带范围较大时,每个波长处像差仍难以消除,需要通过添加辅助元器件加以改善;而对于提升分辨率,窄带检测方法虽对分辨率的提升行之有效,但色散距离限制对宽波段分辨率的影响不容忽视,需通过分割波段予以改进。针对上述问题,未来可在选取低像差光栅的基础上,通过级联多块线密度较低的光栅或减小透镜厚度等办法进一步实现对像差的校正;通过增加元器件数量将波段分割得更为精细,在检测波段更宽、体积较小的情况下,进一步获取更高分辨率。相信在不久的将来,基于凹面光栅的高质量光谱检测将能得到更快的发展,实现更为广泛的应用。

### 参考文献

- [1] DONG Y, CHEN J, LUO L, *et al.* Modeling and implementation of a fiber-based quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy system [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(13):4202-4206.
- [2] SUN J, LIU Y, JIANG Y, *et al.* Cooled Dyson long-wave infrared push-broom imaging spectrometer by re-imaging [J]. *Optics Communications*, 2016, 367:274-278.
- [3] YU Sh, XIA J Zh. Study on shifted-excitation Raman difference spectroscopy in the identification of jade [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(4):511-515 (in Chinese).  
于爽,夏婧竹. 便携式差分喇曼光谱技术在翡翠鉴定中的研究 [J]. *激光技术*, 2021, 45(4): 511-515.
- [4] CUI Z, TIAN Z, ZHANG Y, *et al.* Research on streak tube imaging lidar based on photocathode range gating method [J]. *Optics Communications*, 2019, 432:79-83.
- [5] YU L, CHEN J, XUE H, *et al.* Stigmatic broadband imaging spectrometer with a high numerical aperture [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2414-2419.
- [6] CUI Z W, XIANG Y L, ZHANG Y X, *et al.* Quantitative study on uranium in uranyl solution by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Laser Technology*, 2021, 45(3):331-335 (in Chinese).  
崔祖文,向昱霖,张宇璇,等. 铀酰溶液中铀含量的激光诱导击穿光谱测量 [J]. *激光技术*, 2021, 45(3): 331-335.
- [7] LI X, NI K, ZHOU Q, *et al.* Fabrication of a concave grating with a large line spacing via a novel dual-beam interference lithography method [J]. *Optics Express*, 2016, 24(10):10759-10766.
- [8] ZHAO X L, BAYANHESHG, LI W H, *et al.* Design of ultraviolet high-resolution astigmatic correction Rowland holographic grating [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(11): 3616-3620 (in Chinese).  
赵旭龙,巴音贺希格,李文昊,等. 紫外高分辨率像散校正型罗兰全息光栅设计 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(11): 3616-3620.
- [9] CHEN J, WANG C, ZHANG G, *et al.* High-resolution compact spectrometer based on a custom-printed varied-line-spacing concave blazed grating [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12446-12454.
- [10] LIU Y H, CHENG Q L, TAN Z J, *et al.* Design of high resolution

- optical spectrum detecting system based on interference technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4):262-267 (in Chinese).
- 刘玉红,程其变,谭佐军,等.采用相干技术的高分辨光谱检测系统设计[J].*红外与激光工程*,2019,48(4):262-267.
- [11] CUI Z, TIAN Z, ZHANG Y, *et al.* Research on streak tube imaging lidar based on photocathode range gating method[J]. *Optics Communications*, 2019, 432:79-83.
- [12] ZHANG B, TAN Y, ZHU J, *et al.* Imaging spectrometer with single component of freeform concave grating[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(14):3412-3415.
- [13] BEULTER H G. The theory of the concave grating[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1945, 35(5):311-350.
- [14] STAVDAS A, MANOUSAKIS M, SCAHILL C, *et al.* Design and performance of free-space concave grating demultiplexers for ultra-wideband WDM networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(11):1777-1784.
- [15] BROWN B J, WILSON I J. Holographic grating aberration correction for a Rowland circle mount II [J]. *Journal of Modern Optics*, 1981, 28(12):1601-1610.
- [16] GRANGE R. Aberration-reduced holographic spherical gratings for Rowland circle spectrographs[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(19):3744-3749.
- [17] CHEN X W, ZENG L J. Astigmatism-reduced spherical concave grating holographically recorded by a cylindrical wave and a plane wave for Rowland circle mounting[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(25):7281-7286.
- [18] CHEN X W, ZENG, L J. Aberration-reduced spherical concave grating holographically recorded by a spherical wave and a toroidal wave for Rowland circle mounting[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3):3294-3304.
- [19] KONG P, BAYANHESHIG, LI W H, *et al.* Optimization of Rowland circle mounts for broad-band spectrographs[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(4):0409003(in Chinese).
- 孔鹏,巴音贺希格,李文昊,等.宽波段全息罗兰光栅的优化[J].*中国激光*,2011,38(4):0409003.
- [20] BARTOE J, BRUECKNER G E. New stigmatic, coma-free, concave-grating spectrograph[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1975, 65(1):13-21.
- [21] YU L, LIN G Y, WANG S R. Tandem gratings spectrometer for spectroscopy broadband anastigmatic imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2):351-354.
- [22] YU L, WANG S R, LIN G Y, *et al.* Spectral broadband anastigmatic Wadsworth imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2015, 23(1):101-109.
- [23] YU L, XUE H, CHEN J X. Dual concave grating anastigmatic spectrometer with high spectral resolution for remote sensing[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(33):9789-9796.
- [24] MEERTTZ L. Concentric spectrographs [J]. *Applied Optics*, 1977,16(12):3122-3124.
- [25] MONTERO-ORILLE C, PRIETO X, GONZÁLEZ-NÚÑEZ H, *et al.* Two-wavelength anastigmatic Dyson imaging spectrometers[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14):2379-2381.
- [26] MOUROULIS P, GREEN R O, WILSON D W. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12):9087-9096.
- [27] XUE Q S. Modified Dyson imaging spectrometer with an aspheric grating surface[J]. *Optics Communications*, 2013, 308:260-264.
- [28] LIU Z H, JI Y Q, SHI R B, *et al.* Optical design of airborne infrared pushbroom imaging spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9):2941-2946 (in Chinese).
- 刘子寒,季轶群,石荣宝,等.机载红外推扫成像光谱仪光学设计[J].*红外与激光工程*,2014,43(9):2941-2946.
- [29] ZOU Ch B. Study of hyperspectral imaging spectrometer based on the improved Dyson structure[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences(Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences), 2017:53-55(in Chinese).
- 邹纯博.新型Dyson高光谱成像系统研究[D].西安:中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所),2017:53-55.
- [30] SUN J Y. Study on optics system of long-wave infrared hyperspectral imaging spectrometer base on Dyson form[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,2016:21-27(in Chinese).
- 孙佳音.基于Dyson结构的长波红外高光谱成像光谱仪光学系统研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2016:21-27.
- [31] ZHOU Zh H, DING L, YAN Y B, *et al.* Optimum design of concave gratings based on a newton recursive algorithm[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2001, 12(12):1209-1213 (in Chinese).
- 周哲海,丁立,严瑛白,等.基于牛顿迭代算法的凹面光栅优化设计[J].*光电子·激光*,2001,12(12):1209-1213.
- [32] CHENG L, CHEN Y P, ZHU R B, *et al.* Optimum design of flat-field holographic concave grating for micro-spectrometers[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science Edition)*, 2008, 42(2):312-316 (in Chinese).
- 程梁,陈燕平,朱若波,等.微型光谱仪平场全息凹面光栅的优化设计[J].*浙江大学学报(工学版)*,2008,42(2):312-316.
- [33] REN Zh, LIU G D, HUANG Zh, *et al.* Design of a novel high resolution holography concave grating spectroscopy for tongue coating analyzer[C]//2010 3rd International Conference on Bioinformatics & Biomedical Engineering. New York, USA: IEEE, 2010: 1455-1458.
- [34] REN Zh, LIU G D, HUANG Zh, *et al.* Design of a novel noninvasive blood glucose monitor based on improved holography concave grating NIR-spectrometer[C]//2011 5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. New York, USA: IEEE, 2011: 1-4.
- [35] CAO D Sh, LIN G Y, YANG X H, *et al.* Structure design and wavelength accuracy analysis of ultraviolet double grating spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2):219-230(in Chinese).
- 曹佃生,林冠宇,杨小虎,等.紫外双光栅光谱仪结构设计 with 波长精度分析[J].*中国光学*,2018,11(2):219-230.
- [36] LI J W, NI Y, GUO Y, *et al.* Structural design and performance analysis of specific protein analyzer based on concave grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8):0830002(in Chinese).
- 李俊伟,倪屹,郭瑜,等.基于凹面光栅的特定蛋白分析仪结构设计及性能分析[J].*光学学报*,2019,39(8):0830002.
- [37] KONG P, TANG Y G, BAYANHESHIG, *et al.* Double-grating minitype flat-field holographic concave grating spectrograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1):0105001(in Chinese).
- 孔鹏,唐玉国,巴音贺希格,等.双光栅切换微型平场全息凹面光栅光谱仪[J].*光学学报*,2013,33(1):0105001.

- [38] ZENG J, BAYANHESHIG, LI W H. Effect of type-IV concave holographic grating parameter errors on spectral performance and their compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1005005 (in Chinese).  
曾瑾, 巴音贺希格, 李文昊, 等. IV型凹面全息光栅参数误差对光谱性能的影响及补偿[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1005005.
- [39] ZHOU Q, FENG J C, LI X H, *et al.* Concave grating miniature spectrometer with an expanded spectral band by using two entrance slits[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(11): 110501.
- [40] ZHOU Q, PANG J, LI X, *et al.* Improving the spectral resolution of flat-field concave grating miniature spectrometers by dividing a wide spectral band into two narrow ones[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(32): 9450-9455.
- [41] LU Y, REN W J, GUO G J, *et al.* Optical system design of spectrometer with double Rowland circle structure[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 415-423 (in Chinese).  
鲁毅, 任万杰, 郭国建, 等. 双罗兰圆结构光谱仪的光学系统设计[J]. *应用光学*, 2022, 43(3): 415-423.