

## 激光与光电子学进展

## M 型 Czerny-Turner 光谱仪结构优化设计与分析

吴云鹏<sup>1</sup>, 王军<sup>1,2\*</sup><sup>1</sup>苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009;<sup>2</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

**摘要** 针对 M 型 Czerny-Turner 光谱仪在像差校正时可能会出现二次衍射问题, 提出了此光学结构在消慧差条件下的反二次衍射条件。分析了二次衍射出现的主要因素, 并进行了理论推导。结合反二次衍射条件与消慧差优化的约束条件, 搭建了 M 型消慧差 Czerny-Turner 结构光谱仪。为了验证理论分析的正确性, 使用 Zemax OpticStudio 仿真软件进行了对比实验。仿真结果表明: 满足约束条件的 M 型光路结构中不会出现二次衍射现象, 而不满足约束条件的 M 型光路结构中则会出现二次衍射现象, 与理论分析结果相符。在入射狭缝宽度为 25  $\mu\text{m}$ 、光栅刻线密度为 600 line/mm 的条件下, 软件优化后的光学系统在 200~500 nm 范围内的光谱分辨率优于 1 nm。

**关键词** 光谱学; 光谱仪; Czerny-Turner 光学系统; 慧差; 二次衍射

中图分类号 TH744

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1130002

## Structural Optimization Design and Analysis of M-Type Czerny-Turner Spectrometer

Wu Yunpeng<sup>1</sup>, Wang Jun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, Jiangsu, China;*

<sup>2</sup>*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China*

**Abstract** Aiming at the problem of secondary diffraction in aberration correction of an M-type Czerny-Turner spectrometer, we propose the anti-secondary diffraction condition for this optical structure under the coma-free condition. The main factors of secondary diffraction are analyzed and deduced theoretically. Combining the anti-secondary diffraction condition with the constraint coma-free condition, we built an M-type coma-free Czerny-Turner spectrometer. In order to verify the correctness of the theoretical analysis, the Zemax OpticStudio simulation software is used for a comparative experiment. The simulation results show that there is no secondary diffraction in the M-type optical path structure meeting the constraints, but there is secondary diffraction in the M-type optical path structure that does not meet the constraints, which is consistent with the theoretical analysis result. Under the condition that the incident slit width is 25  $\mu\text{m}$  and the grating engraving line density is 600 line/mm, the spectral resolution of the optical system optimized by the software is better than 1 nm in the range of 200–500 nm.

**Key words** spectroscopy; spectrometer; Czerny-Turner optical system; coma; secondary diffraction

收稿日期: 2021-11-22; 修回日期: 2021-12-27; 录用日期: 2021-12-28

基金项目: “十三五”江苏省重点学科项目(20168765)、江苏省研究生科研创新项目(KYCK17\_2060)

通信作者: \*wjyh@126.com

## 1 引言

近年来,光谱仪逐渐成为科学研究与工业应用中的重要检测设备,被广泛应用于目标信息的提取。传统光谱仪作为实验仪器,存在体积大、造价高等缺点。随着科技的发展和应用范围的拓展,小型化、自动化(智能化)、宽光谱范围、低噪声、高灵敏度、大线性动态范围、高分辨率的光谱仪成为研究热点<sup>[1]</sup>。光栅光谱仪凭借性能稳定、光谱分辨率高、色畸变小等优点在光谱分析仪器中占据了主导地位。

其中,Czerny-Turner结构光谱仪使用两个球面镜作为准直镜与聚焦镜、一块平面衍射光栅作为色散元件。国内外相关的研究人员对 Czerny-Turner 结构光谱仪进行了大量研究。夏果等<sup>[2]</sup>将球差约束条件与光阑面的选取相结合,从而确定了光路结构中的参数。Gabriel等<sup>[3]</sup>通过对比 Czerny-Turner 光谱仪的两种设计模式,发现顺序模式有着更加优越的优化潜力。唐义等<sup>[4]</sup>分析了基于柱面镜和基于超环面的光谱仪像散校正光路的像散校正原理,并分别推导出了这两类光谱图像变形的校正公式和方法。彭雪峰等<sup>[5]</sup>设计了一个光谱范围为 350~450 nm 的 Czerny-Turner 系统,该系统在光谱范围内的分辨率小于 0.1 nm。赵意意等<sup>[6]</sup>在探测器前添加了一个柱透镜以消除 300~900 nm 全谱段的像散。

为了提高成像质量,研究者通过加入额外的光学器件来消除光路中产生的像差,或通过优化结构,调整各光学元件的离轴角与相对距离以满足消除像差的条件。

本文在不加入额外光学器件的基础上,对 M 型 Czerny-Turner 光谱仪的光学结构进行了分析,提出了该光学系统在消慧差的约束下的反二次衍射条件,利用 Matlab 软件计算出系统的结构参数,并在 Zemax OpticStudio 软件中进行了对比仿真验证。

## 2 Czerny-Turner 光学系统

### 2.1 Czerny-Turner 工作原理

Czerny-Turner 光学系统按空间分布可分为 M 型与交叉型两种,其中交叉型结构更为紧凑,更利于小型化设计<sup>[7]</sup>,但相对 M 型结构,测量范围内的光谱分辨率的稳定性较差,且受慧差的影响较大。

本文选用 M 型 Czerny-Turner 光学系统,光路结构如图 1 所示,基本元件有入射狭缝(S)、准直镜

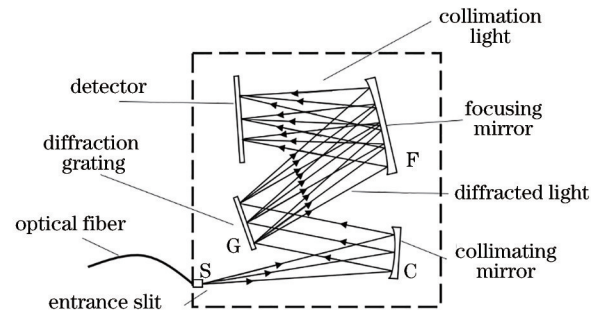


图 1 M 型 Czerny-Turner 光学系统的光路结构

Fig. 1 Optical path structure of M-type Czerny-Turner optical system

(C)、衍射光栅(G)、聚焦镜(F)和光谱探测器(D)等。复色光经光纤传输后,从狭缝处入射至准直镜表面,经准直镜准直后,平行光在衍射光栅表面形成单色光,且不同波长光线的衍射角度不同。最后聚焦镜将这些衍射光聚焦到探测器表面,形成光谱<sup>[8-9]</sup>。

### 2.2 Czerny-Turner 结构杂散光分析

在 Czerny-Turner 光学系统中,杂散光是影响成像质量的重要因素。在微型光谱仪中,杂散光的影响尤为严重。光栅的多次衍射、光栅的多级衍射、光栅对多级衍射光束的多次衍射、光学元件加工偏差等都会导致杂散光产生<sup>[10-11]</sup>。

光栅分光产生多级衍射光,其中二级短波段衍射光会出现在一级长波段衍射光成像处,在仿真时可指定只生成一级衍射光,而在实际情况中可通过在探测器前添加线性渐变滤光片来消除到达像面的二级衍射光。

光栅的多次衍射则是光学元件摆放不合理造成的,而增大球面镜的离轴角会增大系统的慧差,因此需计算实现消慧差的同时抑制光栅二次衍射的条件。

## 3 M 型 Czerny-Turner 结构的反二次衍射设计

### 3.1 Czerny-Turner 系统中的二次衍射

在小型化光谱仪设计过程中,因内部空间狭小和构件尺寸等问题,光路结构会过于紧凑。为了减少光学像差,需要调整构件倾角,在这个过程中,光路中可能会出现二次及以上衍射光,影响系统的成像性能。

在从光栅表面出射到球面镜表面的一次衍射光线中,部分光线可能在反射后会再次到达光栅表面,

形成杂散光。二次衍射可分为两种情况,分别对应光路结构中的准直镜与聚焦镜。在设计中将光栅作为光阑以限制光束,因此计算时也以光栅为中心。

### 3.2 光栅与准直镜间的二次衍射

光栅与准直镜间的二次衍射如图 2 所示。为了计算反二次衍射条件,在光路中建立坐标系,以光栅中点  $G_2$  为坐标原点,中心波长光线  $C_2G_2$  的反向为  $X$  轴正方向,逆时针转  $90^\circ$  为  $Y$  轴正方向。准直镜中心到光栅中心的距离为  $L_{CG}$ 。准直镜的离轴角为  $\theta_c$ ,曲率半径为  $R_c$ ,曲率中心为  $O_1$ 。光栅离轴角为  $\alpha_1$ ,光栅长度为  $L_G$ ,边缘波长光线的衍射角为  $\beta_1$ 。

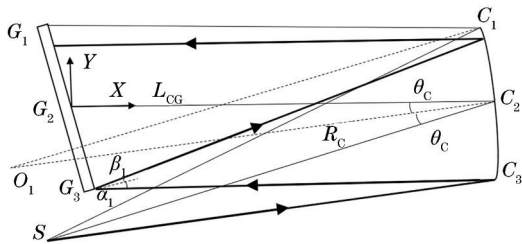


图 2 光栅与准直镜间的二次衍射

Fig. 2 Secondary diffraction between grating and collimating mirror

考虑极限情况:若在从准直镜上点  $C_3$  处到光栅上点  $G_3$  处的光线中,边缘波长光线的衍射光不会再次经过准直镜表面产生二次衍射,那么其他光线也不会。即点  $C_1$  应在点  $G_3$  处边缘波长衍射线的下方。

从光学结构中可推出  $C_2$  的坐标为  $(L_{CG}, 0)$ ,且  $G_2(0, 0)$  是坐标轴原点,则  $G_1$  的坐标为  $(-\frac{L_G}{2} \sin \alpha_1, \frac{L_G}{2} \cos \alpha_1)$ ,  $G_3$  的坐标为  $(\frac{L_G}{2} \sin \alpha_1, -\frac{L_G}{2} \cos \alpha_1)$ 。令  $G_3$  处边缘波长光线的衍射光所在的直线与  $X$  轴正方向的夹角为  $\gamma_1$ ,可得  $\gamma_1 = \alpha_1 + \beta_1$ 。

同时,点  $C_1$  为线  $G_1C_1$  与准直镜所在球面右侧的交点,且此平面切面的圆心为  $O_1(L_{CG} - R_c \cos \theta_c, -R_c \sin \theta_c)$ ,则  $C_1(X_1, Y_1)$  的坐标为

$$\begin{cases} X_1 > 0 \\ Y_1 = \frac{L_G}{2} \cos \alpha_1 \\ (X_1 - L_{CG} + R_c \cos \theta_c)^2 + (Y_1 + R_c \sin \theta_c)^2 = R_c^2 \end{cases} \quad (1)$$

若要防止二次衍射,则须满足

$$\frac{Y_1 + \frac{L_G}{2} \cos \alpha_1}{X_1 - \frac{L_G}{2} \sin \alpha_1} < \tan \gamma_1 \quad (2)$$

### 3.3 光栅与聚焦镜间的二次衍射

光栅与聚焦镜间的二次衍射如图 3 所示。为了便于计算,重新建立坐标系,仍以光栅中点  $G_2$  为坐标原点,沿原点处中心波长光线的衍射线  $G_2F_2$  为  $X$  轴正方向,逆时针转  $90^\circ$  为  $Y$  轴正方向。光栅中心到聚焦镜中心的距离为  $L_{GF}$ 。光栅的离轴角为  $\alpha_2$ ,光栅长度还是  $L_G$ ,中心波长光线的衍射角为  $\beta_2$ ,边缘波长光线的衍射角为  $\beta_3$ 。聚焦镜的离轴角为  $\theta_f$ ,曲率半径为  $R_f$ ,曲率中心为  $O_2$ 。

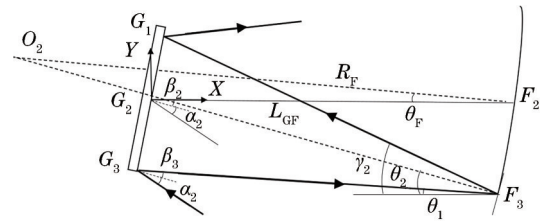


图 3 光栅与聚焦镜间的二次衍射

Fig. 3 Secondary diffraction between grating and focusing mirror

与 2.2 小节类似,若在光栅表面  $G_3$  处衍射的光线中,边缘波长光线的衍射光在聚焦镜表面反射的光线不再经过光栅表面产生二次衍射,则其他光线也不会。即点  $G_1$  应在点  $F_3$  处反射光线的下方。

从光学结构中可推出  $F_2$  的坐标为  $(L_{GF}, 0)$ ,且  $G_2(0, 0)$  是坐标轴原点,则  $G_1$  的坐标为  $(\frac{L_G}{2} \sin \beta_2, \frac{L_G}{2} \cos \beta_2)$ ,  $G_3$  的坐标为  $(-\frac{L_G}{2} \sin \beta_2, -\frac{L_G}{2} \cos \beta_2)$ 。令  $G_3$  处边缘波长光线的衍射光所在的直线与  $X$  轴负方向的夹角为  $\theta_1$ ,可得  $\theta_1 = \beta_2 - \beta_3$ 。

同时,点  $F_3$  为线  $G_3F_3$  与聚焦镜所在球面右侧的交点,且此平面切面的圆心为  $O_2(L_{GF} - R_f \cos \theta_f, R_f \sin \theta_f)$ ,则  $F_3(X_2, Y_2)$  的坐标为

$$\begin{cases} X_2 > 0 \\ Y_2 + \frac{L_G}{2} \cos \beta_2 \\ \frac{Y_2 + \frac{L_G}{2} \cos \beta_2}{X_2 + \frac{L_G}{2} \sin \beta_2} = \tan(\beta_3 - \beta_2) \\ (X_2 - L_{GF} + R_f \cos \theta_f)^2 + (Y_2 - R_f \sin \theta_f)^2 = R_f^2 \end{cases} \quad (3)$$



得到点  $F_3$  坐标后,令线  $O_2F_3$  与  $X$  轴负方向的夹角为  $\theta_2$ ,则有

$$\theta_2 = \arctan \frac{R_F \sin \theta_F - Y_2}{X_2 - L_{GF} + R_F \cos \theta_F} \quad (4)$$

令边缘波长衍射光在点  $F_3$  处的反射线与  $X$  轴负方向的夹角为  $\gamma_2$ ,则

$$\gamma_2 = 2\theta_2 - \theta_1 \quad (5)$$

若要防止二次衍射,则须满足

$$\frac{\frac{L_G}{2} \cos \beta_2 - Y_2}{X_2 - \frac{L_G}{2} \sin \beta_2} < \tan \gamma_2 \quad (6)$$

### 3.4 反二次衍射条件

由 3.2 小节与 3.3 小节可计算出反二次衍射条件:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Y_1 + \frac{L_G}{2} \cos \alpha_1}{X_1 - \frac{L_G}{2} \sin \alpha_1} < \tan \gamma_1 \\ \frac{\frac{L_G}{2} \cos \beta_2 - Y_2}{X_2 - \frac{L_G}{2} \sin \beta_2} < \tan \gamma_2 \end{array} \right. \quad (7)$$

从 3.2 小节可知,引发光栅与准直镜间二次衍射的因素主要是光栅的长度与离轴角。从 3.3 小节可知,引发光栅与聚焦镜间二次衍射的因素主要是光栅的长度和离轴角及聚焦镜的离轴角。

## 4 方法验证与讨论

光谱仪内各元件参数被像差理论与几何光学约束,因此要进行整体化设计,在实现光谱仪功能的同时,尽量减少像差对成像效果的影响<sup>[12-13]</sup>。

### 4.1 消慧差优化

在 Czerny-Turner 光学系统中,慧差是准直镜与聚焦镜均在离轴条件下使用而产生的。慧差会降低

低光谱分辨率,导致出现假谱线,使得系统的成像质量下降等。因此必须进行慧差校正,而消除中心波长处的初级慧差<sup>[14]</sup>需满足

$$\frac{\sin \theta_F}{\sin \theta_C} = \frac{R_F^2 (\cos \theta_F)^3 (\cos \alpha)^3}{R_C^2 (\cos \theta_C)^3 (\cos \beta)^3} \quad (8)$$

式中: $\alpha$ 为光栅入射角; $\beta$ 为光栅衍射角。

### 4.2 设计实例

为了验证上述方法的正确性,在 Czerny-Turner 结构的基本参数相同的情况下,研究不同离轴角对光路的影响,并通过 Zemax OpticStudio 软件进行仿真验证。使用波长范围为 200~500 nm 的复色光在序列模式中进行光线追迹模拟仿真<sup>[15-16]</sup>。系统结构的基本参数如表 1 所示。

表 1 Czerny-Turner 结构的基本参数  
Table 1 Basic parameters of Czerny-Turner structure

| Basic parameter                                     | Value |
|---|-------|
| Slit width / $\mu\text{m}$                          | 25    |
| Relative aperture                                   | 1/4   |
| Central wavelength / nm                             | 350   |
| Grating constant / (line $\cdot$ mm <sup>-1</sup> ) | 1/600 |

当光栅常数一定时,在式(8)的约束下, $\theta_F$ 由 $\alpha$ 与 $\theta_C$ 决定,因此选取不同 $\alpha$ 与 $\theta_C$ 作为对照组,使用 Matlab 软件计算出结构的其余参数,结果如表 2 所示,其中  $L_{SC}$  为入射狭缝到准直镜中心的距离, $L_{FD}$  为聚焦镜中心到光谱探测器中心的距离。

经计算,当 $\alpha = 5^\circ, \theta_C = 10^\circ$ 时,计算出的数值不满足光栅与准直镜之间的反二次衍射条件;当 $\alpha = 8^\circ, \theta_C = 10^\circ$ 时,在计算出的数值条件下不会出现二次衍射现象;当 $\alpha = 12^\circ, \theta_C = 6^\circ$ 时,计算出的数值不满足光栅与聚焦镜之间的反二次衍射条件。

图 4 所示为不同 $\alpha$ 和 $\theta_C$ 下对应的光路结构。可以发现,在图 4(a)中,在光栅衍射出来的光线中,部分

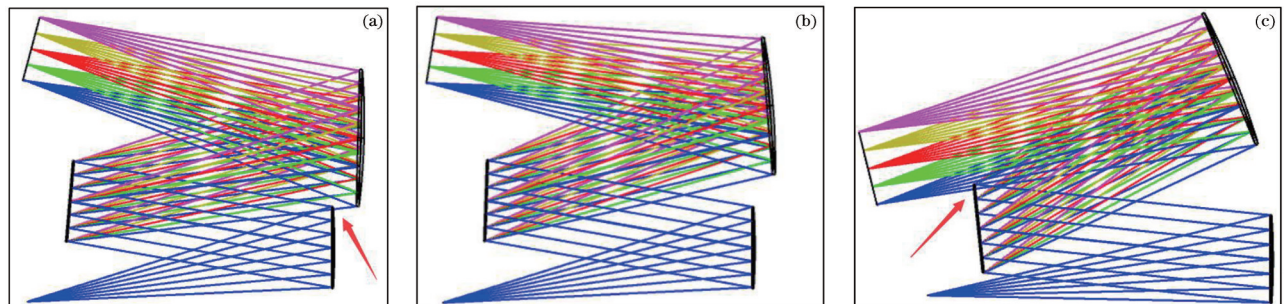


图 4 不同  $\alpha$  和  $\theta_C$  下对应的光路结构。(a)  $\alpha = 5^\circ, \theta_C = 10^\circ$ ; (b)  $\alpha = 8^\circ, \theta_C = 10^\circ$ ; (c)  $\alpha = 12^\circ, \theta_C = 6^\circ$

Fig. 4 Optical path structures under different  $\alpha$  and  $\theta_C$ . (a)  $\alpha = 5^\circ, \theta_C = 10^\circ$ ; (b)  $\alpha = 8^\circ, \theta_C = 10^\circ$ ; (c)  $\alpha = 12^\circ, \theta_C = 6^\circ$

表 2 Czerny-Turner 结构的设计参数

| Specification        | $\alpha = 5^\circ$ ,  | $\alpha = 8^\circ$ ,  | $\alpha = 12^\circ$ , |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                      | $\theta_c = 10^\circ$ | $\theta_c = 10^\circ$ | $\theta_c = 6^\circ$  |
| $L_G / \text{mm}$    | 36.0                  | 36.0                  | 35.3                  |
| $R_C / \text{mm}$    | 283.9328              | 282.7183              | 276.5303              |
| $R_F / \text{mm}$    | 317.7038              | 312.0461              | 301.8105              |
| $L_{CG} / \text{mm}$ | 120.0041              | 119.4908              | 116.8754              |
| $L_{SC} / \text{mm}$ | 139.8096              | 139.2116              | 137.5077              |
| $L_{GF} / \text{mm}$ | 134.2774              | 131.8862              | 127.5601              |
| $L_{FD} / \text{mm}$ | 154.3639              | 151.4908              | 149.2958              |

入射到准直镜表面,这些光线在准直镜表面反射后必定会再次到达光栅表面,形成二次衍射;在图 4(c)中,光栅衍射出来的光线在聚焦镜表面反射后也有部分再次到达光栅表面,出现二次衍射现象。

在 Czerny-Turner 结构中,部分光线若经光栅二次衍射,就无法到达并聚焦于像面表面,而是变成杂散光,造成目标光谱缺失,降低系统的成像质量。

### 4.3 软件优化与成像质量分析

在第二组实验  $\alpha = 8^\circ, \theta_c = 10^\circ$  的光路结构基础上,为了提高光谱仪的成像质量,使用软件对部分参数进行优化<sup>[17]</sup>。以探测器与光谱像面的位置一致及离轴角一致等为优化目标,评价函数选择 Y-spot。

图 5 为 Y 轴方向点列均方根(RMS)半径和衍射极限随波长的变化,其中实线为工作波段内的 Y 轴方向的点列均方根半径,在 200~500 nm 波段内小于 16  $\mu\text{m}$ ,边缘较高而中间较低;虚线是光学系统的衍射极限,在工作波段内呈现为递增状态,在 200 nm 处为 1.12  $\mu\text{m}$ ,在中心波长 350 nm 处为 1.96  $\mu\text{m}$ ,在 500 nm 处为 2.80  $\mu\text{m}$ <sup>[18]</sup>。

图 6 是由软件计算得到的像面点列图,可以看出,谱线均可以清晰分开,表明该光学系统在测量

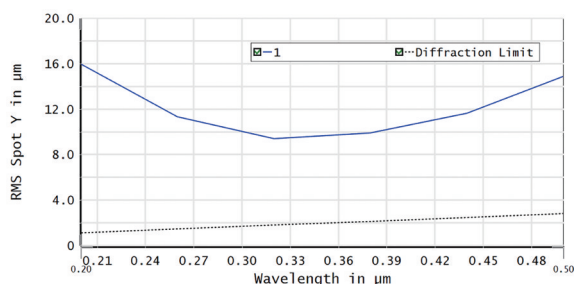


图 5 Y 轴方向点列均方根半径和衍射极限随波长的变化  
Fig. 5 RMS radius of point column in Y-axis direction and diffraction limit versus wavelength

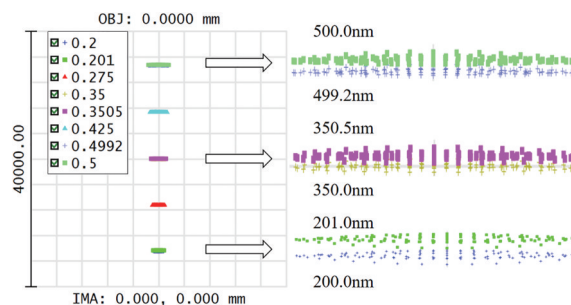


图 6 像面点列图

Fig. 6 Spot diagram of image plane

范围内的光谱分辨率优于 1 nm。由以上分析可知,经软件优化出来的光学结构在工作波段内有良好的成像质量。

## 5 结 论

对传统的 M 型 Czerny-Turner 光谱仪在校正像差时可能出现的二次衍射现象进行了理论分析与数值计算,得出了 M 型 Czerny-Turner 结构的反二次衍射条件。通过选取不同离轴角,在消慧差的基础上计算出结构中的各参数。使用 Zemax OpticStudio 仿真软件进行对比实验,仿真结果与理论分析计算吻合,即不满足反二次衍射条件的结构会出现二次衍射现象,而满足条件的则不会。对该光路结构进行软件优化,由成像质量分析可以发现,此光学系统能实现 200~500 nm 波段内的分光成像,且分辨率优于 1 nm。

## 参 考 文 献

- [1] 沈宇航,倪争技,黄元申,等. 凸面光栅同心结构成像光谱仪的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0900002.  
Shen Y H, Ni Z J, Huang Y S, et al. Research progress of concentric imaging spectrometer with convex grating[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0900002.
- [2] 夏果,吴骥,黄禅,等. 交叉非对称型 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 422003.  
Xia G, Wu S, Huang S, et al. Design of crossed-asymmetric Czerny-Turner spectrometer optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 422003.
- [3] Lachance G P, Niyonambaza S D, Boisselier É, et al. Critical comparison of sequential and non-sequential modes usage for the design of a Czerny-Turner spectrometer[C]//2020 18th IEEE International New

- Circuits and Systems Conference, June 16-19, 2020, Montreal, QC, Canada. New York: IEEE Press, 2020: 162-165.
- [4] 唐义, 郑成, 南一冰, 等. 消像散型 Czerny-Turner 成像光谱仪图像变形校正研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 112007.  
Tang Y, Zheng C, Nan Y B, et al. Study of anamorphose correction of astigmatism-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 112007.
- [5] 彭雪峰, 魏凯华, 刘艳萍, 等. 高分辨率 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计[J]. 光子学报, 2014, 43(10): 1022003.  
Peng X F, Wei K H, Liu Y P, et al. Optical system design of Czerny-Turner spectrometer with high resolution[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(10): 1022003.
- [6] 赵意意, 杨建峰, 薛彬, 等. 宽波段消像散 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1182-1187.  
Zhao Y Y, Yang J F, Xue B, et al. Optical system design of broadband astigmatism-free Czerny-Turner spectrometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1182-1187.
- [7] An Y, Wang Z Y, Zhu T, et al. Development status and aberration overview of micro spectrometer with Czerny-Turner structure[C]//2016 IEEE Optoelectronics Global Conference, September 5-7, 2016, Shenzhen, China. New York: IEEE Press, 2016: 16397806.
- [8] 尤泽樟. 宽波段微型光谱仪光学系统设计 with 优化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018: 24-36.  
You Z Z. Design and optimization of optical system for wide band micro spectrometer[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018: 24-36.
- [9] 李欣航. 宽波段复合消像散型 Czerny-Turner 结构光谱仪光学系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017: 34-42.  
Li X H. Research on the Czerny-Turner spectrometer system with compound anastigmatic methods on broad band[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017: 34-42.
- [10] 吴骥. 微型 Czerny-Turner 光栅光谱仪的光学设计与分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018: 20-28.  
Wu S. Design and analysis of optical system of miniature Czerny-Turner grating spectrometer[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018: 20-28.
- [11] 张志强, 宋凤民, 张秦, 等. 气溶胶微生物粒子计数器光学系统设计[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0707002.  
Zhang Z Q, Song F M, Zhang Q, et al. Design of optical system of aerosol microbial particle counter[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0707002.
- [12] 黄良坤, 温泉, 温志渝, 等. 微型紫外光谱仪分析系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 053003.  
Huang L K, Wen Q, Wen Z Y, et al. Micro-ultraviolet spectrometer analysis system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 053003.
- [13] Zhou S H, Qiu Y Q, Ye Y X. Ultraviolet micro optical-fiber spectrometer based on linear array CMOS[C]//2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 5-8, 2019, Huangshan, China. New York: IEEE Press, 2019: 19257606.
- [14] Shafer A B, Megill L R, Droppelman L. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. Journal of the Optical Society of America, 1964, 54(7): 879-886.
- [15] 钟卉. 高分辨率宽光谱范围微型光谱仪的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 153004.  
Zhong H. Design and analysis of micro-spectrometer with high resolution and wide spectral range[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 153004.
- [16] 杜杉, 张国玉, 韩欣欣, 等. 宽光谱高分辨率光谱仪分析系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 083003.  
Du S, Zhang G Y, Han X X, et al. Design of wide-spectrum high-resolution spectral analysis system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 083003.
- [17] 孟鑫, 王丽, 王静静, 等. 全固态 266 nm 激光拉曼光谱仪研究[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1530002.  
Meng X, Wang L, Wang J J, et al. All solid-state 266 nm laser Raman spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1530002.
- [18] Nagdive A, Dongre M, Makkar R. Design and simulation of NIR spectrometer using Zemax[C]//2017 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), March 17-18, 2017, Coimbatore, India. New York: IEEE Press, 2017: 17509283.