

Littrow-Offner 型分光系统的分析与设计

刘旭霞 季轶群* 贺虎成 沈为民

(苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要 为了提高如拉曼光谱仪和高分辨率成像光谱仪等微弱信号光谱仪的信噪比, 应尽可能增大其相对孔径、增强其集光本领。Littrow-Offner 型分光系统兼具 Littrow 型和 Offner 型分光系统的优点: 结构简单紧凑、全部球面元件同心、固有初级像差小、可实现的相对孔径大和集光本领强。简要介绍该系统的结构与原理, 并分析了该系统的成像特性。运用球面反射镜和衍射光栅的弧矢和子午成像公式, 分析该系统的像散特性, 给出波长范围内消像散的方法。引入弯月透镜来进一步消除系统中的固有像散, 以拉曼光谱仪的分光系统为例, 优化设计得到体积小、相对孔径大、分辨率高且成像质量优异的分光系统。

关键词 光学设计; 光谱仪; 像差; 像散; 衍射光栅

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0422009

Analysis and Design of Littrow-Offner Spectroscopic System

Liu Xuxia Ji Yiqun He Hucheng Shen Weimin

(Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

Abstract The light collection power and the relative aperture of weak-light spectrometers, such as Raman and hyperspectral spectrometers, are expected as high or big as possible, in order to improve their signal-to-noise ratio (SNR). Littrow-Offner spectroscopic mount has the advantages of both Offner and Littrow mounts, including its simplicity and compactness, concentricity of all spherical elements, low inherent aberration, realizable big relative aperture and high light collection. Such combined mount structure and principle are briefly introduced and then its imaging performance is investigated. Its astigmatic characteristic then is investigated, through application of the sagittal and meridian imaging formulas of spherical mirror and diffractive grating. The means to eliminate astigmatism in the wavelength range is suggested. Furthermore, the inherent astigmatism is corrected by introducing a meniscus singlet with negative astigmatism. In the case of Raman spectrometer, a compact spectroscopic optics with big relative aperture and resolution and excellent imaging quality is optimally designed.

Key words optical design; spectrometer; aberration; astigmatism; diffraction grating

OCIS codes 220.4830; 300.6550; 220.1010; 300.6360

1 引 言

Littrow-Offner 型分光系统为同心型光学系统, 它具有结构简单紧凑、初级像差小、相对孔径大、分辨率高且成像质量好等优点。该三反射同心系统早在 1977 年以前就由 Thevenon 提出^[1], 直到 2004 年, Lobb 等^[2]报道了将该系统用于探测大气成分光

谱仪中的设计, 2009 年, Whyte 等^[3]报道将此系统成功应用于可见光波段的高分辨率成像遥感光谱仪中, 用于探测和分析地球静止轨道上的大气成分。

对于诸如拉曼光谱仪和高分辨率成像光谱仪等微弱光谱信号的光谱仪器来说, 具有较高的信噪比是至关重要的, 而提高信噪比主要途径就是要增大

收稿日期: 2012-11-26; **收到修改稿日期**: 2013-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(61205188)、高等学校博士学科点专项科研基金(20113201110016)和江苏省高校优势学科建设工程(PAPD)资助课题。

作者简介: 刘旭霞(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学设计与光学仪器等方面的研究。E-mail: liuxuxia7@163.com

导师简介: 沈为民(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学设计和仪器光学以及航天遥感技术等方面的研究。

E-mail: swm@suda.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: jiyiqun@163.com

光谱仪的光通量和减小噪音。Littrow-Offner 型分光系统继承了 Offner 型光学系统的优势:相对孔径大、固有像差小、成像质量高以及可大大提高系统的集光本领等;同时该系统还具有 Littrow 型光学系统的优势:结构简单、紧凑^[4,5],与经典的 Offner 型光学系统相比体积更小、重量更轻以及更加符合现代光谱仪的发展方向 and 趋势等。

2 结构与原理

Littrow-Offner 型分光系统是 Littrow 和 Offner 型系统的组合,主要是由入射狭缝 S、凹面反射镜 M、凸面衍射光栅 G 及像平面 I 组成。反射镜 M 和光栅 G 的曲率中心重合于 C。入射狭缝 S 的取向垂直于纸面,平行于光栅槽取向。孔径光阑置于光栅 G 上。此系统结构以孔径光阑(光栅 G)为界分为前后两部分,且前后半部完全对称于孔径光阑,物像放大倍率是 1×。其结构如图 1 所示。其中 h 是狭缝偏离光轴的值, γ 是孔径角, α_2 、 β_2 分别是主光线在光栅上的入射角和衍射角, R_1 和 R_2 分别是反射镜和光栅的曲率半径。

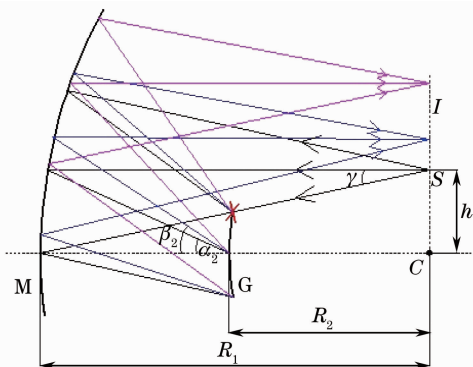


图 1 Littrow-Offner 型分光系统原理图
Fig. 1 Principle diagram of Littrow-Offner spectroscopic system

通过入射狭缝 S 进入系统的光束,经凹面镜 M 反射后入射到衍射光栅 G 上,衍射光栅 G 将光束按波长色散,色散后的光束返回到凹面镜 M,再经凹面镜 M 反射聚焦后,在像面 I 处形成不同波长的狭缝光谱像。在像面 I 处放置探测器便可以收集到对应于入射狭缝的线视场目标物的光谱像,且这些光谱像在像面上均匀排列。

3 成像特性

Littrow-Offner 型分光系统是反射系统,为了

防止入射光被挡,如图 1 所示,孔径角 γ 最大为

$$\tan \gamma = h/R_1, \quad (1)$$

由光栅方程得

$$\sin \alpha_2 + \sin \beta_2 = nm\lambda, \quad (2)$$

式中 n 为光栅线密度, m 为衍射级次, λ 为入射波长。为使得所有反射光都不被挡,若 λ_1 为短波限,有 β_2 不小于 α_2 。所以有

$$2\sin \alpha_2 \leq nm\lambda_1, \quad (3)$$

当 h 值不大时,可以得

$$\begin{cases} \gamma = \frac{h}{R_1} \\ \sin \alpha_2 = \frac{h}{R_1 - R_2} \end{cases}, \quad (4)$$

又因为

$$\gamma = \frac{1}{2F}, \quad (5)$$

所以

$$n \geq \frac{R_1}{R_1 - R_2} \frac{1}{m\lambda_1 F}. \quad (6)$$

若短波限 λ_1 和长波限 λ_2 对应的出射角分别为 β'_2 、 β''_2 ,根据光栅方程,可得到

$$\begin{cases} \sin \beta'_2 + \sin \alpha_2 = nm\lambda_1 \\ \sin \beta''_2 + \sin \alpha_2 = nm\lambda_2 \end{cases}, \quad (7)$$

整理得到

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta l}{nm(R_1 - R_2)}, \quad (8)$$

式中 $\Delta\lambda$ 为波长工作波段宽度, Δl 为光谱维宽度,光栅 G 的顶点曲率半径 R_2 与凹面反射镜的曲率半径 R_1 可作为系统的结构参数。

当衍射极限 m 取 +1 级、短波限 $\lambda_1 = 630 \text{ nm}$ 、 $R_1 = 2R_2 = 200 \text{ mm}$ 、光谱维宽度 $\Delta l = 26 \text{ mm}$ 时, F 数和工作波长宽度 $\Delta\lambda$ 与光栅线密度 n 之间的关系分别如图 2(a)、(b) 所示。由图 2 可知,Littrow-Offner 型分光系统的光栅线密度 n 、工作波长范围宽度 $\Delta\lambda$ 与 F 之间是相互关联和制约的,当 F 数很高时,光栅线密度需要很大,此时的工作波长范围宽度很窄,但是光谱维宽度大。所以此系统适用于宽光谱维、窄工作波段和高分辨率的光谱仪。

Littrow-Offner 型分光系统由于对称性,无初级彗差和畸变等垂轴的单色像差;全部采用反射元件,无色差;各个元件组成同心结构,无球差;通过选择反射镜的曲率半径实现场曲为零,实现平场,主要剩余像差是高级像散^[5]。

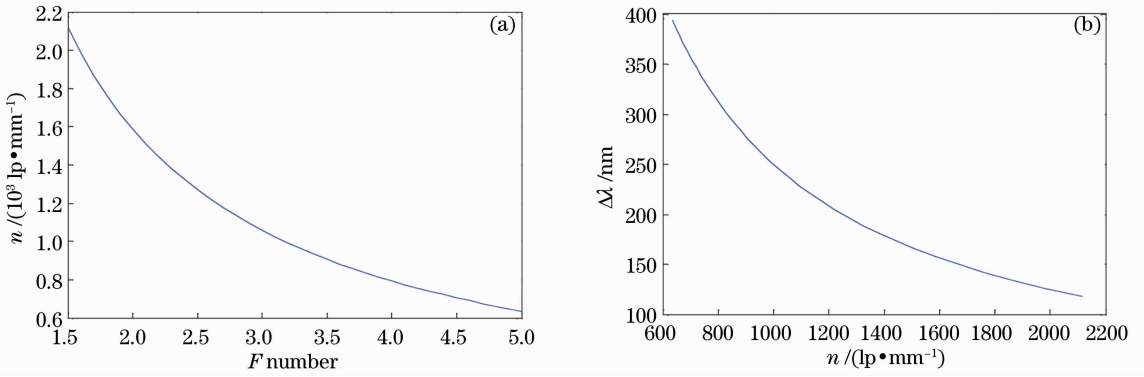

 图 2 光栅线密度 n 随 (a) F 数和 (b) $\Delta\lambda$ 的变化曲线

 Fig. 2 Curves of variation of grating line density n with (a) F number and (b) $\Delta\lambda$

4 波长范围内消像散

Littrow-Offner 型分光系统的主要剩余像差为像散,下面确定子午和弧矢的像点位置,求其像散。由杨氏公式:

$$\begin{cases} \frac{n'_R \cos^2 \beta}{r'_m} - \frac{n_R \cos^2 \alpha}{r_m} = \frac{n'_R \cos \beta - n_R \cos \alpha}{R} \\ \frac{n'_R}{r'_s} - \frac{n_R}{r_s} = \frac{n'_R \cos \beta - n_R \cos \alpha}{R} \end{cases}, \quad (9)$$

其中 n_R, n'_R 分别表示物像的折射率。可得,球面反射镜和球面衍射光栅的子午和弧矢的聚焦条件分别为

$$\begin{cases} \frac{\cos^2 \alpha}{r_m} - \frac{\cos \alpha}{R} + \frac{\cos^2 \beta}{r'_m} - \frac{\cos \beta}{R} = 0 \\ \frac{1}{r_s} - \frac{\cos \alpha}{R} + \frac{1}{r'_s} - \frac{\cos \beta}{R} = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

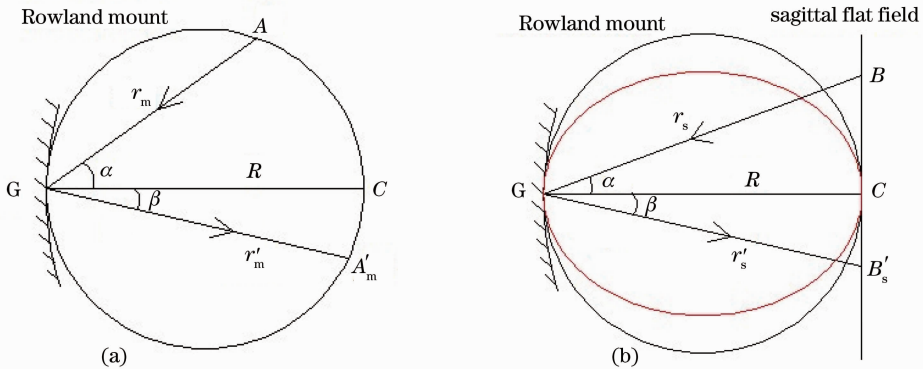


图 3 (a) 子午圆场和 (b) 弧矢平场成像示意图

Fig. 3 (a) Meridian circular field and (b) sagittal flat field

对于 Littrow-Offner 型分光系统, M 和 G 有共同的曲率中心 C , 它们的罗兰圆 C_1 和 C_2 相切于点 C 。由弧矢平场条件可知,当物点 O 在图 4 中的直线 OC 上移动时,其主光线经凹面镜 M 后的弧矢像点 I_{s_1} 、经衍射光栅 G 后的弧矢像点 I_{s_2} 和再经 M 后的弧矢像点 I_{s_3} 均位于直线 OC 上,实现弧矢平场成

式中 α, β 分别为主光线在反射镜或者光栅上的入射角和衍射角, r'_m 和 r'_s 分别为子午和弧矢像距, R 为反射镜或光栅的曲率半径, r_m 和 r_s 分别为子午和弧矢物距。

可以满足(10)式的一组解为

$$r_m = R \cos \alpha, \quad r'_m = R \cos \beta, \quad (11)$$

$$r_s = R / \cos \alpha, \quad r'_s = R / \cos \beta. \quad (12)$$

(11)式即罗兰圆成像条件。当物点 A 位于罗兰圆上时,其相应的子午像点 A'_m 也位于此罗兰圆上,即子午圆场条件。(12)式即弧矢平场条件,若物点 B 位于弧矢平场曲线上,其弧矢像点 B'_s 亦在该直线上,而此时子午像点位于罗兰圆内的椭圆曲线上^[6]。两种成像条件下的成像示意图分别如图 3(a)、(b)所示。

像,如图 4 所示。由(10)式和系统结构可得光线经过各个元件后的子午和弧矢像距公式分别表示为

$$\begin{cases} r'_{m,g} = \cos^2 \beta_g \left(\frac{\cos \alpha_g + \cos \beta_g}{R_g} - \frac{\cos^2 \alpha_g}{r_{m,g}} \right)^{-1} \\ r_{m,g+1} = d_g - r'_{m,g} \end{cases}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} r'_{s,g} = \left(\frac{\cos \alpha_g - \cos \beta_g}{R_g} - \frac{1}{r_{s,g}} \right)^{-1}, \\ r_{s,g+1} = d_g - r'_{s,g}, \end{cases} \quad (14)$$

式中下标 g 取 1、2、3，分别是指光线经过凹面镜、光栅、再经凹面镜的量， d_g 为反射镜与光栅的距离，且 $d_3 = d_1, R_3 = R_1$ 。为方便直观的观察，根据(13)式在极坐标中依次绘制出物点 O 的主光线经 M 、 G 和再经 M 后的子午像点 I_{m_1} 、 I_{m_2} 、 I_{m_3} ，如图 4 所示。图中 curve1、curve2、curve3 分别为经 M 、 G 和再经 M 后的子午聚焦曲线。

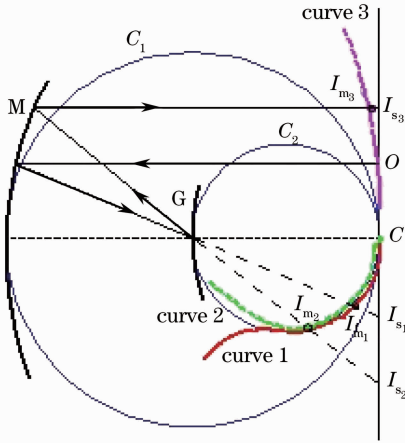


图 4 弧矢和子午聚焦曲线

Fig. 4 Focusing curves of sagittal and meridian

像散的产生可归因于球面反射镜子午面与弧矢面的曲率半径相同，导致其在离轴成像时子午焦距与弧矢焦距不等^[7]，所以子午像点和弧矢像点之间的距离即为系统的像散值，即

$$A_{sti} = r'_{m,3} - r'_{s,3}, \quad (15)$$

要校正正像散，只需使子午焦距与弧矢焦距之差为零或比较小的值即可，现要使像散在波段范围内

最小，则需要满足 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A_{sti}^2 d\lambda$ 取最小值，其中 λ_1 和 λ_2 分别对应系统工作波段的短波限和长波限。

5 光学设计

拉曼光谱是通过光子与物质分子发生非弹性碰撞，产生物质固有的分子振动光谱，它反映了分子的结构信息，现已广泛应用于各个领域并取得了准确的实用信息。为减少荧光干扰，设计采用波长为 632.8 nm 的半导体激光器作为拉曼光谱仪的激发光源^[8-10]。在自然界中，大多数物质的拉曼光谱的常规扫描范围为 $40 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ ，根据公式 $\frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\Delta\lambda} = \frac{1}{\lambda}$ 可

以得到，设计的拉曼光谱仪的波长范围为 630 ~ 850 nm。结合应用和波长响应，选择 DU920P BR-DD 型面阵探测器。光谱仪的集光本领与分光系统的相对孔径和狭缝长度直接相关，在数值上可用孔径立体角和狭缝面积的乘积表示。结合第 1 节中对系统的分析，综合考虑，光谱仪的指标参数如表 1 所示。

表 1 光谱仪指标参数

Table 1 Index parameters of spectrometers

Parameters	Value
Wavelength /nm	630~850
F number	2.4
Slit length /mm	6.0
Pixel size / μm	26×26
Pixel number /pixel	255×1024
Spectrum width /mm	26.6

系统采用直线槽光栅，级次取 +1 级，根据尺寸选取 $R_1 = 2R_2 = 200 \text{ mm}$ 。根据(8)式、(13)~(16)式，结合表 1 中的指标参数，在 Matlab 软件中模拟得到初始结构参数如表 2 所示，其中 h_1, h'_1 分别为物像点偏离光轴的值。

表 2 初始结构参数

Table 2 Initial structure parameters

Parameters	Value
R_1 /mm	200
R_2 /mm	-100
h_1 /mm	31.0
h'_1 /mm	56.9
n^{-1} /mm	0.827×10^{-3}
α_1 /($^\circ$)	-8.93
β_1 /($^\circ$)	8.93
α_2 /($^\circ$)	18.99
β_2 /($^\circ$)	34.71
$\alpha_3 / -\beta_3$	16.02

为减小系统体积和进一步消除像散，引入弯向像面的弯月透镜，其本身带有的正像散与系统中固有的负像散可相互抵消，能更好地提高成像质量。将得到的指标参数和初始结构参数输入光学设计软件中，建立合理的优化函数和约数条件，反复优化直到得到满足于指标且成像质量优异的光学系统。

图 5(a)是优化设计所得到的光学系统光路图，其中 O 为入射狭缝， M_1 为凹面反射镜， M_2 为弯月透镜， I 为像面。系统尺寸为 $185 \text{ mm} \times 115 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ，光栅线对数为 1252 lp/mm，中心波长在光栅上的入射角约为 16.68° ，一级衍射光的衍射角从 30.11° (630 nm) 到 51.00° (850 nm)。图 5(b)标出了系统的各个光学面，其中 1 为入射狭缝，2 为平面镜面，3, 4, 8, 9 为弯月透镜面，5, 7 为凹面反射镜面，6 为光栅面，10 为像面。

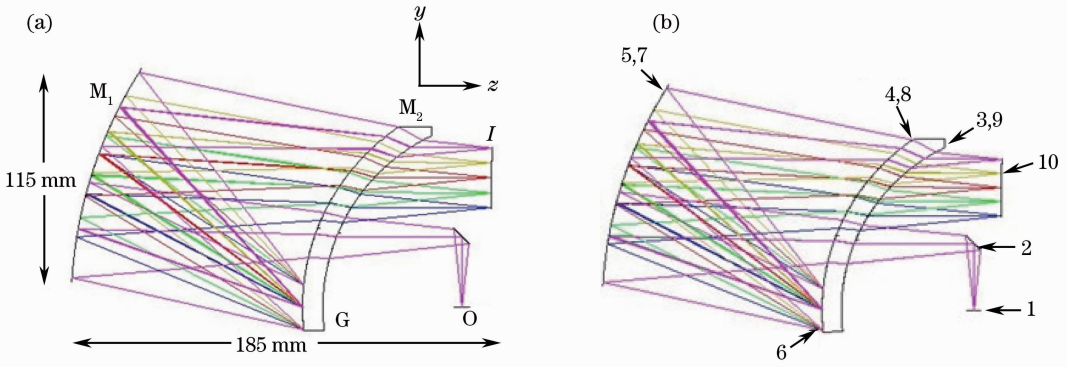


图 5 光学系统。(a)光路图；(b)光学面

Fig. 5 Diagram of optreal system. (a) Light path; (b) optical surface

图 6 是系统在探测器奈奎斯特频率(20 lp/mm)处的调制传递函数(MTF)曲线。图 6(a)~(c)分别为系统的短波限(630 nm)、中心波长(740 nm)和长波限

(850 nm)在不同视场处的 MTF 曲线图,图中的黑色虚线是衍射极限。由图可知,系统的最低 MTF 值大于 0.80,成像质量优异。

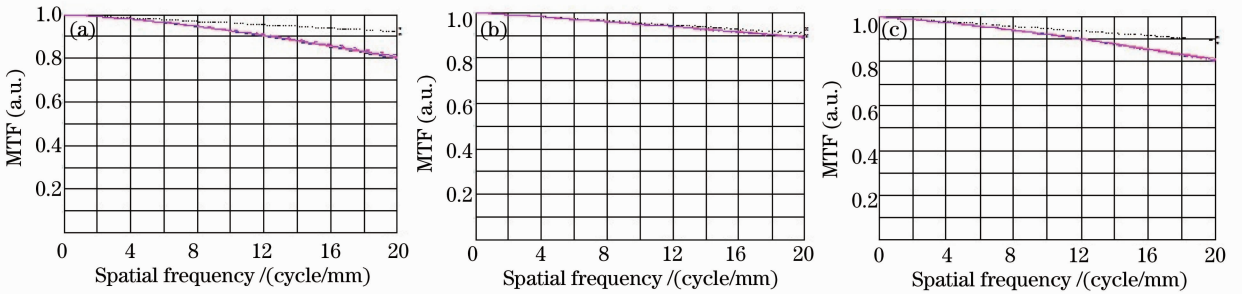


图 6 不同波长下的 MTF 曲线。(a) 630 nm; (b) 740 nm; (c) 850 nm

Fig. 6 Modulation transfer function curves at different wavelengths. (a) 630 nm; (b) 740 nm; (c) 850 nm

图 7 是系统的光线追迹点列图,横坐标是波长,纵坐标是视场。系统点列图的均方根值(RMS)半径值均小于 $6.82\mu\text{m}$,图中的方框代表探测器像元尺寸,边长为 $26\mu\text{m}$,所有像点都能比较集中的落在单个探测器像元范围内。图 8 是系统在长波限(850 nm)的衍射能量集中度曲线,横坐标为像元尺寸的一半,纵坐标为在单个像元尺寸范围内所集中衍射能量的占比,其中黑色曲线为衍射极限值,其他三条曲线基本重合,表示不同视场的能量集中度曲线。由图看出,系统在单个探测器范围内的衍射能量集中度大于 0.90,而其他波长的衍射能量集中度都高于长波限。

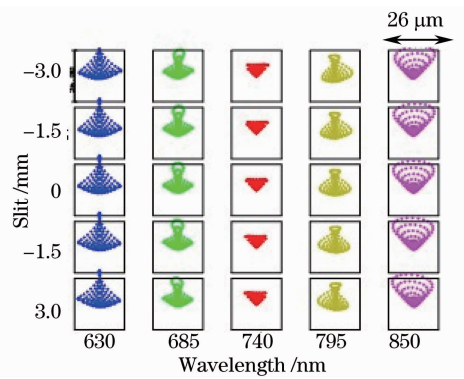


图 7 光线追迹点列图

Fig. 7 Spot diagram of ray tracing

系统的工作波段为 630~850 nm,短波的 2 倍大于长波,因此该系统的二级衍射光谱和一级衍射光谱不会叠加干扰。对光谱干扰的杂散光主要是系统中任意两个表面反射后最终经过系统所成的像——鬼像。因为此系统用于拉曼光谱仪中,鬼像对拉曼光谱的检测有很大影响,轻者降低灵敏度,重者会产生虚假信号,干扰检测。因此必须对系统的鬼像进行分析和控制,确保鬼像对系统影响降到最低^[11]。

在 Zemax 软件中进行鬼像分析可知:在长波波段鬼像不能达到像面,所以没有干扰,如图 9 所示。在短波波段只有弯月透镜前后表面[3,4,图 5(b)]反射形成的鬼像能到达像面,在像面后 8.3 mm 处聚焦,这是由弯月透镜的同心结构引起的,如图 10 所示。虽然调整弯月透镜的半径可以减少甚至除去鬼像^[12],但是 Littrow-Offner 型分光系统若改变同心结构,则其像质下降很大。综合考虑,可以在弯月

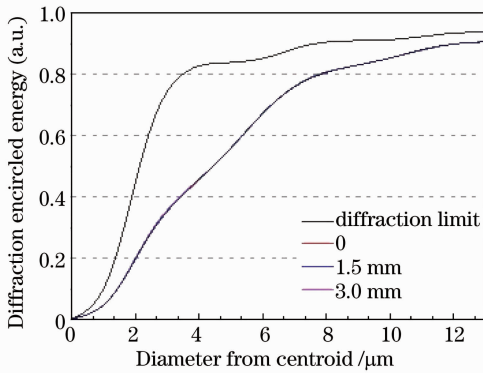


图 8 衍射能量集中度曲线

Fig. 8 Encircled energy curves

透镜上镀透过率高于 99.5% 的增透膜, 弯月透镜表面反射率低于 0.5%, 能大大减小鬼像的能量, 减小对信号检测的干扰。

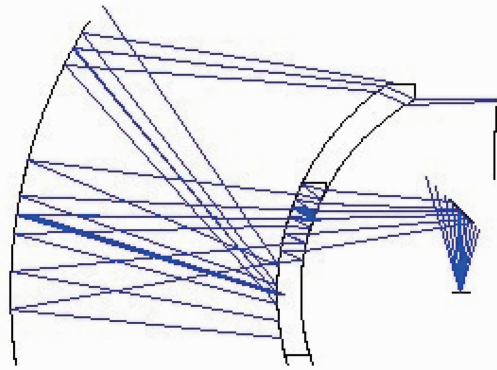


图 9 850 nm 的鬼像图

Fig. 9 Ghost image at 850 nm

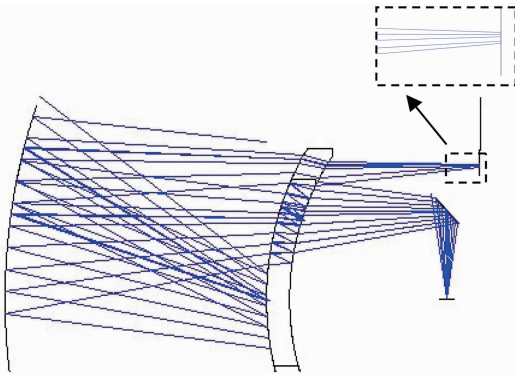


图 10 630 nm 的鬼像图

Fig. 10 Ghost image at 630 nm

6 结 论

分析了 Littrow-Offner 型分光系统的成像特点, 并运用子午和弧矢成像公式分析了该系统的像散特性。以拉曼光谱仪的分光系统为例, 在理论分析的指导下计算得到初始结构, 同时加入弯月透镜

来进一步减小像散。运用光学设计软件, 优化设计出结构紧凑、初级像差小、相对孔径大、分辨率高且成像质量优异的分光系统, 并对其进行了评价。理论上, 此分光系统用于 632.8 nm 激光器作为激发光源的拉曼光谱仪中, 具有完整的拉曼光谱覆盖范围, 可以用于检测拉曼位移在 $40 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的所有可检测物质。此分光系统采用凸面全息衍射光栅, 可以减少杂光, 降低噪音提高信噪比; 系统采用球面反射镜和球面衍射光栅, 对环境温度变化不敏感, 加工相对容易。

参 考 文 献

- 1 L. Mertz. Concentric spectrographs [J]. *Appl. Opt.*, 1977, **16**(12): 3122~3124
- 2 D. Lobb. Design of a spectrometer system for measurements on earth atmosphere from geostationary orbit [C]. *SPIE*, 2004, **5249**: 191~202
- 3 C. Whyte, R. J. Leigh, D. Lobb *et al.*. Assessment of the performance of a compact concentric spectrometer system for atmospheric differential optical absorption spectroscopy [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2009, **2**: 789~800
- 4 Headwall Photonics, Inc., Fitchburg. Multi-Channel, Multi-Spectrum Imaging Spectrometer [P]. United States Patent: US 7,518,722 B2, 2009-04-14
- 5 Xue Rudong, Ji Yiqun, Shen Weimin. Design of the spectroscopic system for SWIR Offner imaging spectrometer [J]. *J. Soochow University*, 2011, **27**(3): 61~66
- 薛如东, 季轶群, 沈为民. Offner 型短波红外成像光谱仪分光系统的设计 [J]. *苏州大学学报*, 2011, **27**(3): 61~66
- 6 Shen Weimin. Second order circular and flat field imaging properties of holographically concave gratings [J]. *Laser Journal*, 1998, **19**(5): 25~29
- 沈为民. 全息凹面光栅二阶圆场和平场成像特性 [J]. *激光杂志*, 1998, **19**(5): 25~29
- 7 Liu Jianpeng, Tang Yi, Huang Gang. Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322007
- 刘健鹏, 唐义, 黄刚. 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0322007
- 8 Ma Jun, Xu Ming, Gong Longjing *et al.*. Near-infrared Raman spectroscopy for detection of gastric cancer peritoneal dissemination in vivo [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0915001
- 马君, 徐明, 巩龙静等. 近红外激光拉曼技术在体探测胃癌腹膜播散 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0915001
- 9 Li Quanchen, Jiang Yuejuan. *Spectrum Instrument Principle* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999
- 李全臣, 蒋月娟. *光谱仪器原理* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999
- 10 Li Shuling. Raman spectrometer and its application [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 1998, **17**(4): 312~316
- 李淑玲. 拉曼光谱仪及其应用进展 [J]. *岩矿测试*, 1998, **17**(4): 312~316
- 11 Jin Ning, Li Li, Cao Hongqu *et al.*. Analysis and calculation for ghost image in optical system of photoelectric system [J]. *Infrared Technology*, 2005, **27**(4): 375~379
- 金宁, 李力, 曹红曲等. 对光电系统中的光学系统二次成像的分析计算 [J]. *红外与技术*, 2005, **27**(4): 375~379
- 12 Liu Hongjie, Liu Lanqin, Su Jingqin. Lens design based on ghost image and aberration analysis in high-power laser facility [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 976~980
- 刘红婕, 刘兰琴, 粟敬钦. 基于鬼像和像差分析的高功率激光装置透镜设计 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 976~980

栏目编辑: 张 腾