

# 空间外差拉曼光谱仪的光栅多级衍射杂散光 分析与抑制方法

李员赫<sup>1</sup>, 杨超<sup>1\*</sup>, 薛常喜<sup>1</sup>, 李晓天<sup>2</sup>, 马振予<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院先进光学技术制造中心, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光栅技术研究中心, 吉林 长春 130033

**摘要** 光栅的多级衍射杂散光对空间外差拉曼光谱仪的成像质量具有重要影响。为了提高其成像质量,使光谱特征更准确,针对空间外差拉曼光谱仪中光栅产生的多级衍射杂散光进行分析与抑制研究。依据光学传递理论,利用 ASAP 软件对空间外差拉曼光谱仪中光栅产生的多级衍射杂散光进行仿真与分析,利用挡板、光阑和光学陷阱等方法设计了能够抑制  $-2.5^{\circ} \sim 2.5^{\circ}$  视场范围内杂散光的结构。结果表明:光栅产生的多级衍射杂散辐射比由  $4.996 \times 10^{-3}$  降到了  $1.57 \times 10^{-8}$ ,设计的结构对空间拉曼光谱仪系统内因光栅产生的多级衍射杂散光具有良好的抑制效果,有效提高了系统的成像质量。

**关键词** 光谱学; 杂散光分析; 空间外差拉曼光谱仪; 光栅多级衍射; 杂散光抑制结构

中图分类号 O433.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0630001

## Stray Light Analysis and Control of Grating Multistage Diffraction in HRS

Li Yuanhe<sup>1</sup>, Yang Chao<sup>1\*</sup>, Xue Changxi<sup>1</sup>, Li Xiaotian<sup>2</sup>, Ma Zhenyu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Advanced Optical Technology Manufacturing Center, the School of Electro-Optical Engineering,  
Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>Grating Technology Research Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** Stray light resulting from grating multistage diffraction influences the imaging quality of the spatial heterodyne Raman spectrometer (SHRS). In this study, the stray light was analyzed and controlled to enhance the precision of the SHRS. The optical transmission theory was employed to study the stray light produced by grating multistage diffraction in the SHRS using the ASAP software; a stray light controlling structure was designed in  $-2.5^{\circ} \sim 2.5^{\circ}$  field-of-view via baffling, beam stopping, and light trapping. The results indicate that the stray light ratio of multistage diffraction is reduced from  $4.996 \times 10^{-3}$  to  $1.57 \times 10^{-8}$ . Thus, the developed structure can efficiently control the stray light from grating multistage diffraction and improve the imaging quality of the SHRS.

**Key words** spectroscopy; stray light analysis; spatial heterodyne Raman spectrometer; grating multistage diffraction; stray light controlling structure

**OCIS codes** 300.6310; 300.6450; 220.4830; 350.4600

## 1 引 言

由于物质的拉曼光谱与其分子结构一一对应,类似于人的指纹,具有极高的检测可信度,因此空间外差拉曼光谱仪(SHRS)广泛应用于考古、航空航

天、食品安全、化工等领域。拉曼光谱仪的性能(包括分辨率、灵敏度和信噪比等)直接影响着拉曼光谱检测的精度,决定了样品检测的准确性,而仪器的杂散光水平严重制约了其光谱性能<sup>[1-4]</sup>。目前,绝大多数关于 SHRS 的设计都是在入射窗处放置一个预

收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-01-28; 录用日期: 2019-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(51505078, 61505204)、吉林省重点科技研发项目(20180201030GX)、吉林省优秀青年人才基金(20170520167JH)、2018年“十三五”科学技术项目(JJKH20181111KJ)、长春理工大学青年科学基金(XQNJ-2017-06)

\* E-mail: yangchaoby@gmail.com

滤光片来阻挡仪器外部的杂散辐射进入仪器,而很少有人对仪器内部其本身产生的杂散光进行研究。美国南卡罗莱纳大学的 Michael Angel 等<sup>[5]</sup>提出,可将 SHRS 用于其他行星表面物质的探测。英国萨里大学的 Nathaniel 等<sup>[6]</sup>研究了用于火星探测的紫外 SHRS;Lamsal 等<sup>[7]</sup>提出将 SHRS 用于深紫外激发的测量可以将拉曼光谱与荧光光谱分离,使系统不受荧光干扰;Egan 等<sup>[8]</sup>使用 SHRS 成功地对方解石和白云石等样品进行了远程检测。在我国,中国科学院安徽光学精密机械研究所的叶松等<sup>[9]</sup>对空间外差光谱技术(SHS)进行了理论分析和实验研究,并对系统设计展开了研究;胡广骁等<sup>[10]</sup>采用 SHRS 实现了 10 m 处样品拉曼光谱的检测;罗海燕等<sup>[11]</sup>提出了一种超分辨空间外差光谱仪,其主要针对大气中的 OH 自由基进行探测,工作波段为 308.2~309.8 nm,并且通过实测验证了空间外差光谱技术在紫外波段实现超光谱分辨的能力;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的 Qiu 等<sup>[12]</sup>提出了 EMSHRS: Echelle grating-Mirror SHRS (Spatial Heterodyne Raman Spectrometer),利用光栅多级次衍射实现了系统的宽波段和高分辨率。目前记载于各种文献中的 SHRS 对于其内部的多级衍射杂散光均没有进行专门处理,仅仅依靠在样品与准直透镜前放置滤光片来滤除拉曼信号以外的干扰信号<sup>[13]</sup>(如荧光、仪器所在场所的背景光等)。根据 SHRS 的工作原理可知,若光栅使用级次以外的衍射光(在本文涉及的系统中指 0 级、+1 级、-2 级、-3 级)进入探测器,就会对系统像质形成较大干扰。随着 SHRS 系统向小型化方向发展,其内部结构愈加紧凑,多级衍射杂散光的传播路径会非常接近成像光路,影响更为严重,因此,杂散光的抑制是 SHRS 系统设计的关键环节<sup>[14]</sup>。本课题组利用 ASAP 软件对 SHRS 中的多级衍射杂散光进行了仿真分析,根据分析结果对系统杂散光抑制结构进行了设计及优化,有效地提高了系统的成像质量。

## 2 SHRS 的基本原理

SHRS 的光学结构如图 1 所示,激发光源向待测样品照射时会产生散射光,其中包含与激发光源波长相同的瑞利散射以及与激发光源波长不同的拉曼散射。散射光被滤光片处理后只含有拉曼散射,经透镜 L1 准直后照射到分束器,分成两束光,这两束光分别经过衍射光栅 G1 和 G2 衍射,两束衍射光相干形成干涉条纹,通过透镜 L2 将干涉条纹成像

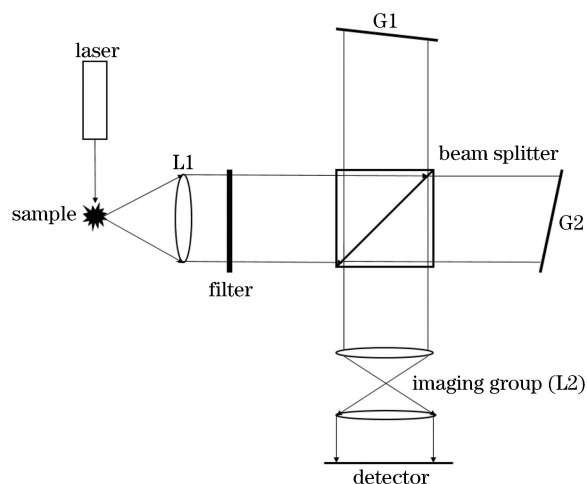


图 1 SHRS 的光学结构

Fig. 1 Optical structure of spatial heterodyne Raman spectrometer

在面阵探测器上,后经傅里叶变换获得拉曼信号中的光谱信息。

为了分析内部杂散光对仪器性能的影响,对一个红外激发的 SHRS 系统(参数见表 1,  $f$  为成像镜组的焦距,  $D$  为口径,  $\beta$  为放大率)进行仿真分析。该系统的 Littrow 波长设计为 1164 nm, Littrow 角为  $5.01^\circ$ , 使用级次为 -1, 分辨能力为 3000, 理论分辨极限约为  $2.86 \text{ cm}^{-1}$ , 光谱范围的理论值为  $994.5 \sim 1164 \text{ nm}$ , 即拉曼位移范围为  $0 \sim 1464.32 \text{ cm}^{-1}$ 。

表 1 SHRS 系统参数

Table 1 Parameters of SHRS system

| Component     | Specification   |
|---------------|---|
| Grating       | 150 line $\cdot \text{mm}^{-1}$ , effective width: 10 mm          |
| Beam splitter | 1:1 stereoscopic beam splitting prism                             |
| CCD           | 13 mm $\times$ 13 mm, 1024 pixel $\times$ 1024 pixel              |
| Imaging group | $f = 50 \text{ mm}$ , $D = 60 \text{ mm}$ , $\beta \approx 1:0.9$ |
| System size   | 255 mm $\times$ 160 mm $\times$ 90 mm                             |

## 3 杂散光分析与抑制方法

### 3.1 杂散光理论分析

在光学系统中,杂散光的存在会导致系统的灵敏度和信噪比降低,成像质量变差,严重时甚至会使得系统的目标信号被淹没,而光栅的多级衍射杂散光是伴随入射信号产生的,无法作为暗噪声去除<sup>[15]</sup>。

根据光学辐射传递理论,

$$\phi_{\text{stray}} = \pi \cdot \phi_{\text{source}} \cdot f_{\text{BRDF}} \cdot f_{\text{GCF}}, \quad (1)$$

式中:  $\phi_{\text{source}}$  为杂散光源辐射通量;  $f_{\text{GCF}}$  为反映杂散辐射表面与探测器之间的空间辐射能量传递关系的

几何构成因子;  $f_{\text{BRDF}}$  为被杂散辐射照射的表面的双向反射分布函数, 为出射辐射亮度与入射辐照度之比。  $f_{\text{BRDF}}$  的数学表达式<sup>[12]</sup> 为

$$f_{\text{BRDF}} = \frac{L(\theta, \phi, \lambda_0)}{E(\theta_0, \phi_0, \lambda_0)} = \frac{P_s / \Omega_s}{P_i \cos \theta_s}, \quad (2)$$

式中:  $\theta_0$  和  $\theta$  分别为入射光和散射光与发生散射表面的法线之间的夹角;  $\lambda_0$  为入射光波长;  $\phi_0$  和  $\phi$  分别为入射光和散射光绕散射表面法线的夹角;  $P_s$  为散射光功率;  $P_i$  为入射光功率;  $\Omega_s$  为探测器的接收立体角;  $\theta_s$  为探测器在散射表面投影的倾斜因子。

杂散光光源具有客观性, 其特性不可随意更改。但对于光栅多级衍射杂散光, 可以采取降低光栅非使用级次衍射效率的方法降低(1)式中的  $\phi_{\text{source}}$ ; 对光机系统内的反射表面进行处理, 能够改变(1)式中的  $f_{\text{BRDF}}$ ; 也可以通过加入光阑、遮光罩改变(1)式中的  $f_{\text{GCF}}$ , 以降低杂散光的影响。本研究重点通过使用杂散光抑制结构来降低仪器的杂散光。

### 3.2 系统杂散光的仿真与抑制

杂散辐射比最能直接反映杂散光的水平, 在设计视场范围内, 用到达像面的杂散光能量  $N_s$  与到达像面总能量  $N_t$  之比来表示

$$R_{\text{SNR}} = \frac{N_s}{N_t}. \quad (3)$$

系统使用时会存在一定的视场, 本研究涉及的 SHRS 视场范围为  $-2.5^\circ \sim 2.5^\circ$ 。由于视场角越大, 成像光偏离探测器的角度越大, 像面接收到的成像光线数量越少, 最终导致信号强度下降。以多视场验证仪器性能时, 主要观察光谱图中的噪声情况以及输入信号的峰高。

#### 3.2.1 杂散光的分析

目前, 国内外比较常用的杂散光分析软件有 TracePro、LightTools、ZEMAX、CODEV 和 ASAP 等, 其中 ASAP 具有最好的光线追迹效率, 并在追迹光线时使用 Monte-Carlo 算法, 更加适合对光机模型的杂散光进行分析。目前, 对于系统杂散光的研究大多集中在背景噪声及样品本身发出的荧光干扰方面, 而忽视了光栅多级衍射对系统性能的影响。由 SHRS 的工作原理可知, 使用级次外的衍射光与成像光一样, 也能形成一定频率的干涉条纹, 在光谱上产生峰。所以本次仿真研究仅对系统多级衍射进行分析。使用的级次外的衍射光并非来源于系统外部, 不属于暗噪声, 无法通过算法消除。

为了说明多级衍射杂散光对拉曼光谱的影响,

在系统内追迹光栅产生的所有级次衍射光。本研究涉及的系统, 150 line/mm 的光栅在 1164 nm 入射的情况下, 共有 0、 $\pm 1$ 、 $\pm 2$ 、 $\pm 3$ 、 $\pm 4$ 、 $\pm 5$ 、 $-6$  级衍射光。输入波长为 1120 nm ( $337.6 \text{ cm}^{-1}$ ) 的信号, 追迹 121 条光线[为方便查看各级次角度分布和光栅间的相互影响, 图 2(a) 中给出的是仅追迹一条光线且无外壳的结果], 光谱反演曲线如图 2(b) 所示, 各级次照度分布在表 2 中给出。

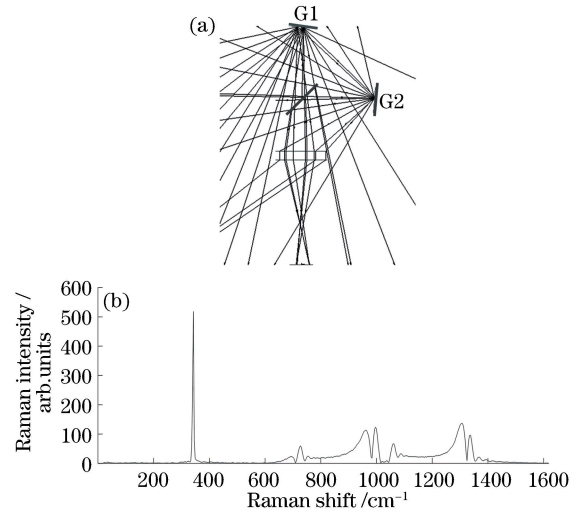


图 2 角度分布与拉曼光谱。(a)各级次角度分布; (b)单一波长多级衍射拉曼光谱

Fig. 2 Angular distribution and Raman spectrum. (a) Angular distribution for each diffraction order; (b) Raman spectrum of monochromatic light under multistage diffraction

表 2 各衍射级次照度分布

Table 2 Illuminance distribution for each diffraction order

| Diffraction order | Illuminance /lx       |
|-------------------|-----------------------|
| -1(imaging light) | 32.54                 |
| 0                 | 0.014                 |
| +1                | $0.66 \times 10^{-3}$ |
| -2                | $0.16 \times 10^{-2}$ |
| +2                | 0                     |
| -3                | $0.48 \times 10^{-5}$ |
| +3                | 0                     |
| -4                | 0                     |
| +4                | 0                     |
| -5                | 0                     |
| +5                | 0                     |
| -6                | 0                     |

由 SHRS 的工作原理可知,拉曼光谱的峰值横坐标与干涉条纹的频率有关。因此,当信号中含有多个波长时,产生干涉条纹的空间频率有可能相同,最终叠加在光谱上。若较高频率的信号产生了更高频率的杂散光,当超出仪器检测范围时则不能被完全采样,会发生混叠现象。如图 3 所示,信号中包含的波长越多,光谱图形越复杂。

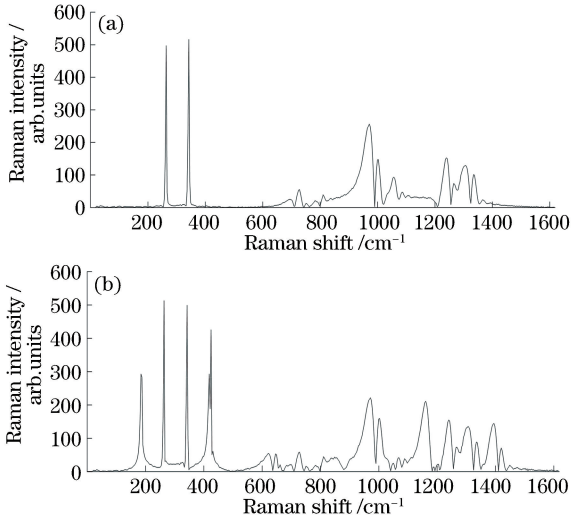


图 3 多波长噪声叠加。(a) 1120 nm 和 1130 nm 信号噪声; (b) 1110, 1120, 1130, 1140 nm 信号噪声

Fig. 3 Multiple-wavelength noise superposition. (a) Signal noise of 1120 nm and 1130 nm; (b) signal noise of 1110 nm, 1120 nm, 1130 nm, and 1140 nm

由表 2 可知,系统杂散光的主要来源为光栅的 0 级、+1 级和-2 级衍射光。-3 级衍射光由于能量很小,低于信号的  $5 \times 10^{-6}$ ,故不做讨论。为方便后续描述,将两块光栅产生的杂散光逐一编号,如图 4 所示,光栅 G1 产生的 0 级、+1 级、+2 级和-2 级衍射杂散光依次编号为杂散光①~④,以同样的顺序编号光栅 G2 产生的杂散光为⑤~⑧。

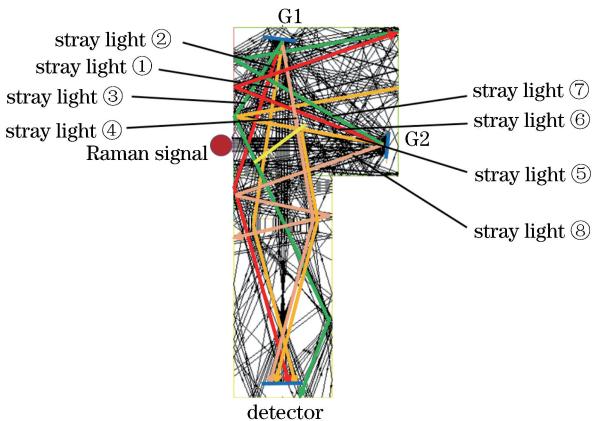


图 4 杂散光来源分布

Fig. 4 Distribution of stray light sources

### 3.2.2 杂散光的抑制方法

#### 3.2.2.1 降低外壳内壁反射率并使表面光滑

通过涂黑、贴膜等方法可以降低表面的反射率。仪器外壳及内部框架多由金属加工而成,反射率一般较高。涂黑所用的消光漆可以吸收不同波段的光线。仿真时,内壁的反射率不作为变量考虑,直接设定为 5%,光线分裂次数设定为 2。为了方便后续的杂散光控制,应使内壁表面光滑,以产生镜面反射。粗糙的表面会使光线产生漫反射,使杂散光从各个方向进入探测器,杂散光光路复杂不利于抑制。

#### 3.2.2.2 杂散光抑制结构的设计

##### 1) 0 视场杂散光抑制结果设计

SHRS 系统通常在 0 视场下工作,先针对 0 视场的情况对杂散光进行分析及抑制,以保证仪器能达到最高的性能。然后分析仪器其他视场的杂散光,其光路会与 0 视场时有一定偏差,最后对机械结构进行修改,以达到在一定视场范围内,都能实现杂散光的抑制。

入射光均以 Littrow 角  $\theta$  射向光栅,其中 Littrow 波数的光以原方向反射回分束器,非 Littrow 波数的反射光与 Littrow 波数的反射光之间有一个夹角  $\gamma$ 。波数为  $\sigma$  的光的出射角  $\gamma$  由光栅方程决定,即

$$\sigma[\sin \theta + \sin(\theta - \gamma)] = m/d, \quad (4)$$

式中:  $m$  为衍射级次;  $d$  为光栅刻线宽度。Littrow 角  $\theta$  也称为光栅的倾斜角。

按照图 5 光路中的几何关系,先以 0 视场为例推导出此时光阑的位置及孔径,然后通过在此  $\theta$  角上加一个视场角  $\alpha$  即可引申到  $\alpha$  视场的位置和孔径。由(4)式得到

$$\gamma = \theta - \arcsin\left(\frac{m}{d\sigma} - \sin \theta\right). \quad (5)$$

设光源半宽度为  $D$ ,光阑与光栅的最短距离为  $L$ ,光阑与分束器的距离为  $L'$ 。令光阑不遮挡入射光和出射光,通过几何关系可以得出,光阑的宽度应为

$$2R = 2D + 2L \tan |\gamma|. \quad (6)$$

光栅 G2 产生的杂散光的传播方向与探测器所在方位相反(或传播方向是逐渐远离探测器的),因此可以在光栅前直接用光阑限制,而光栅 G1 产生的杂散光的传播方向正是朝向探测器所在的方位,由于-1 与 0、-2 级衍射光分开的角度不大,即使使用光阑挡住部分杂散光,依然会有漏光进入探测器,所以不在光栅 G1 前使用光阑,而是通过光学陷阱及视场光阑来抑制。在 G2 前  $L = 25$  mm 处放置光

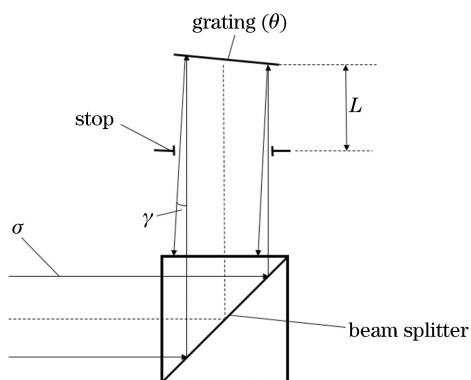


图 5 0 视场的部分光路

Fig. 5 Partial light path in 0° FOV

阑,将  $\sigma = 10057.2 \text{ cm}^{-1}$  (994.3 nm 的偏离角度最大)代入(5)式,再由(6)式可以计算出 0 视场光阑的宽度为 10.76 mm,以最大限度抑制 0 视场杂散光。同时,杂散光⑤和杂散光⑥经仪器内壁反射(图 4 右上方)后会回到 G2,可以用一个挡板改变光路,并与光阑一体化,同时可避免光阑反射的光线进入成像光路,杂散光⑦会在光阑内被多次反射吸收,杂散光⑧在到达探测器前已被仪器内壁吸收,能量为 0。光阑及挡板如图 6 中与外壳相连的粗实线所示,挡住了杂散光⑤的一部分,另一部分漏光照射到分束器后反射到探测器上。

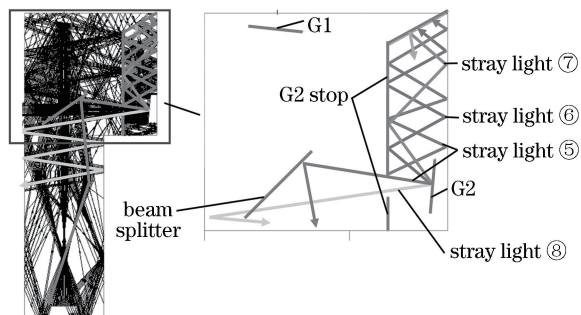


图 6 G2 光阑的位置

Fig. 6 Position of G2 stop

在某些关键位置使用光学陷阱,杂散光在光学陷阱内会产生多次反射,使其能量衰减至极低,不影响系统性能,图 7 是光学陷阱的放大示意图。光学陷阱可以根据杂散光光束的宽窄以及不同视场的入射角度来决定陷阱最外侧两个叶片的夹角,以覆盖较大的范围。内部叶片的数量取决于内部的反射次数,若反射次数较少,可以通过增加叶片数量使陷阱内局部变窄,增加杂散光在其内部的反射次数。光学陷阱可根据实际情况来设计,所以应用也比较灵活,最适合补偿漏光。

由于图 6 中部分杂散光⑤与成像光的光路重

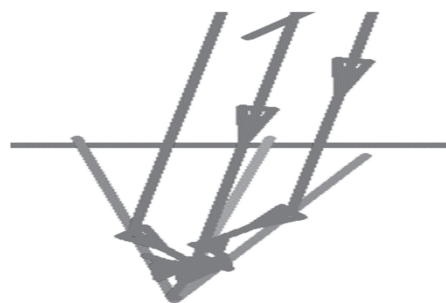


图 7 光学陷阱示意图

Fig. 7 Schematic of light trap

合,光阑无法抑制,需完全分开才能抑制。二者照射在分束器上的角度不同,经分束器反射后便完全分开,并且该部分漏光与杂散光⑧有一处交汇,在此处用光学陷阱最恰当,能同时抑制两束杂散光,光学陷阱位置在图 8 中以粗实线方框标出。

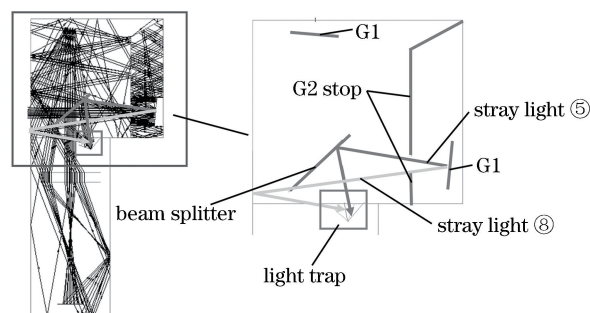


图 8 补偿漏光的光学陷阱的位置

Fig. 8 Position of light trap for compensating light leakage

因为光学陷阱等效于一个“没有光线出射”的抑制结构,且体积很小,所以适合用来抑制能量集中的杂散光,并减小抑制结构在仪器内部占用的面积。通过调整陷阱中叶片的数量和角度,能保证内部的反射次数足够多,令出射光能量低至可以忽略。

与前一个光学陷阱类似,杂散光①和③也有一处交汇,在此处也放置一个光学陷阱。同时发现杂散光②与内壁接触的地方可以利用一挡板与内壁形成一个角度,达到一个光学陷阱的效果。挡板和光学陷阱的位置以粗实线方框在图 9 中标出,可以有效抑制杂散光①、②和③。

从图 10 所示的光路来看,0 视场下已经没有杂散光进入探测器,但抑制结构的实际效果还需参考光谱的质量。通过对比抑制前后的光谱图可知,杂散光抑制结构改善了光谱质量,控制了杂散光后,得到的光谱已经和理论上的图形一致,如图 11 所示。

### 2) -2.5°~2.5°视场内杂散光结构抑制分析

系统应能够在一定的视场下工作,随着光源入射角改变,照射在探测器上的光束位置随之改变,即

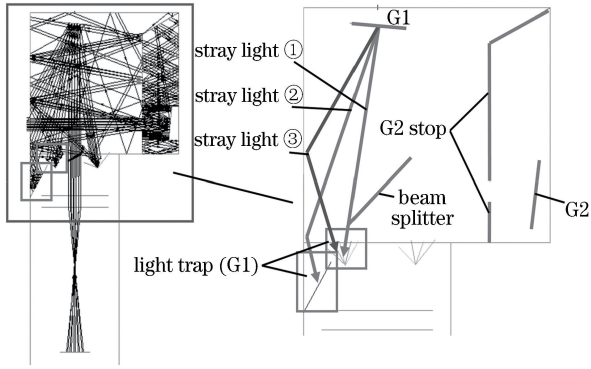


图 9 光学陷阱及挡板的位置  
Fig. 9 Positions of light traps and baffles

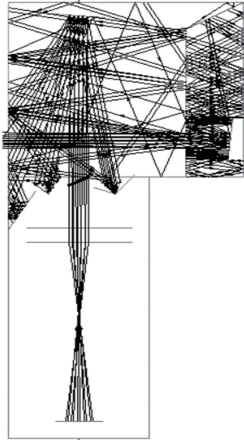


图 10 抑制杂散光后的系统光路图  
Fig. 10 Light path after stray light control

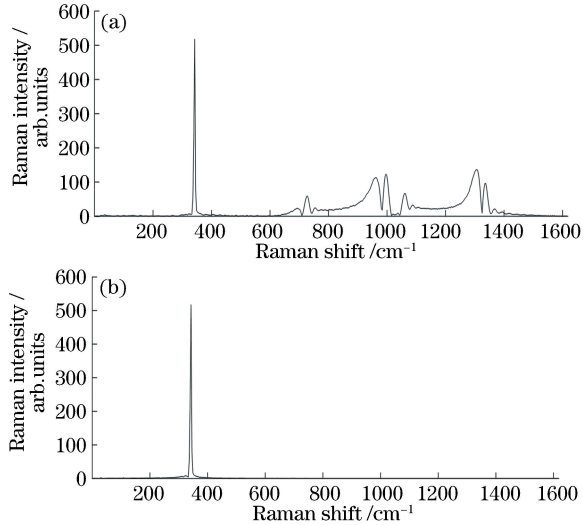


图 11 0 视场杂散光抑制前后的光谱。(a)抑制前;(b)抑制后  
Fig. 11 Raman spectra before and after stray light control in 0° FOV. (a) Before control; (b) after control

照射在像面上的光线数量发生变化,部分光线偏离探测器,导致信号能量降低。通过几何光学原理计算可知,本系统在 $-3.2^\circ \sim 3.2^\circ$ 视场下的出射光基本

完全偏离探测器,信号强度为 0。在 $-2.5^\circ \sim 2.5^\circ$ 视场范围内,信号强度最低为 0 视场的一半。因此,在 0 视场抑制结构的设计上进行优化,以保证系统在 $-2.5^\circ \sim 2.5^\circ$ 视场范围内的性能。

在前文所述 0 视场已经抑制了杂散光的条件下,改变视场以验证其抑制效果,结果发现,视场改变后,最明显的问题是漏光,杂散光与两束成像光线发生干涉,对光谱有严重影响,由杂散光引起的高频信号强度甚至高于信号强度。如图 12 所示是 $\pm 1.3^\circ$ 和 $\pm 2.5^\circ$ 视场的光谱。

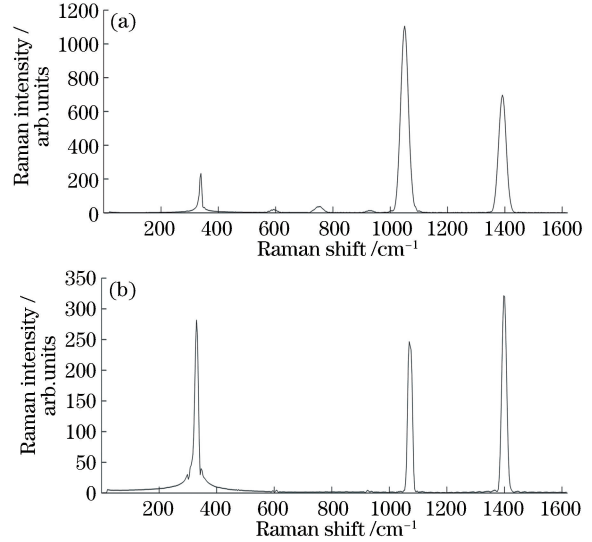


图 12 不同视场范围的光谱。(a)  $\pm 1.3^\circ$ ; (b)  $\pm 2.5^\circ$   
Fig. 12 Spectra in different FOV ranges. (a) FOV of  $\pm 1.3^\circ$ ; (b) FOV of  $\pm 2.5^\circ$

此时可以通过在成像透镜组后方用视场光阑来补偿漏光,在前文讨论的基础上,通过(5)~(6)式将入射角从 $\theta$ 变为 $\theta + \alpha$ ,可以引申到视场角为 $\alpha$ 的情况。将 $\theta$ 替换为 $\theta + \alpha$ 并代入(5)式后得到

$$\gamma' = \theta + \alpha - \arcsin\left[\frac{m}{d\sigma} - \sin(\theta + \alpha)\right] \quad (7)$$

此时入射光在光阑面上的宽度应为 $D/\cos \alpha$ ,将其代入(6)式和(7)式可得到视场为 $\alpha$ 时光阑的半宽度为

$$R' = \frac{D}{\cos \alpha} + L \tan \gamma' = \frac{D}{\cos \alpha} +$$

$$L \left\{ \tan \theta + \alpha - \arcsin\left[\frac{m}{d\sigma} - \sin(\theta + \alpha)\right] \right\} \quad (8)$$

根据(7)~(8)式计算 $2.5^\circ$ 时光阑的最大宽度,将 $\alpha = 2.5^\circ$ 和 $\sigma = 10057.2 \text{ cm}^{-1}$ 代入后,得到 $R' \approx 7.63 \text{ mm}$ ,这意味着将光栅 G2 前方的光阑孔径调整为 $15.26 \text{ mm}$ 可不遮挡在 $-2.5^\circ \sim 2.5^\circ$ 视场范围内的 G2 成像光。同时,在透镜组后方放置两个孔径为

6 mm的光阑,能够补偿视场改变带来的漏光,其位置和抑制效果在图 13 中的光路中可以明显看出,两道视场光阑(用粗实线表示)共同将漏光挡在探测器之外。

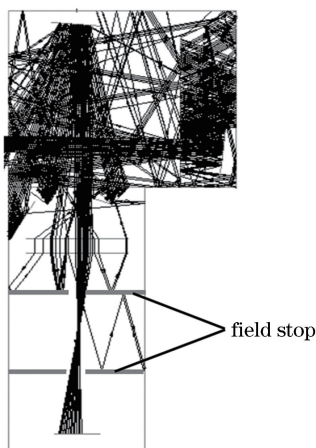


图 13 视场光阑示意图

Fig. 13 Schematic of field stop

再次输入 1120 nm 信号,得到 $\pm 1.3^\circ$ 和 $\pm 2.5^\circ$ 视场的光谱如图 14 所示。由仪器的工作原理可知,关于 $0^\circ$ 对称的两个视场得到的干涉条纹频率相同,即光谱峰位置相同。

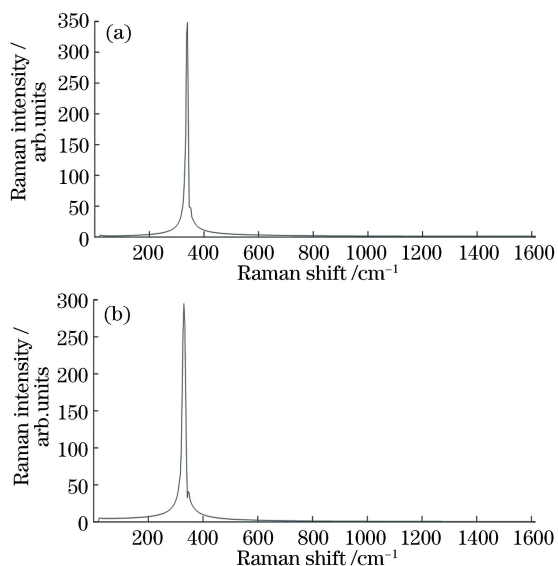


图 14 抑制后的多视场光谱。(a)  $\pm 1.3^\circ$ 视场;  
(b)  $\pm 2.5^\circ$ 视场

Fig. 14 Spectra in multiple FOVs after control.

(a) FOV of  $\pm 1.3^\circ$ ; (b) FOV of  $\pm 2.5^\circ$

图 14(a)、(b)两图中的光谱效果良好,仅强度和位置有少许变化。强度变化是因为已经有部分光线偏离探测器,横坐标变化是因为视场角变化后,出射波前夹角相应变化,导致干涉条纹空间频率发生改变,符合仪器的工作原理,属于正常变化。反演光

谱上没有噪声,说明调整后的抑制结构能够配合这个视场范围工作。

增加了杂散光抑制结构的系统结构如图 15 所示,该设计能够在 $-2.5^\circ \sim 2.5^\circ$ 视场内抑制多级衍射杂散光,系统的多级衍射杂散辐射比由 $4.996 \times 10^{-3}$ 下降到 $1.57 \times 10^{-8}$ 以下。

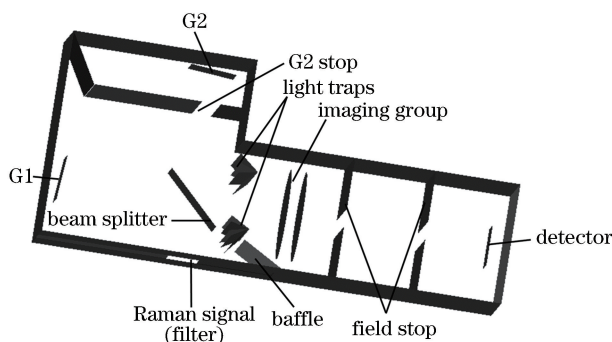


图 15 系统结构图

Fig. 15 Structural diagram of system

图 16 是探测器上接收到的 $0^\circ$ 视场干涉条纹,可见,没有产生由杂散光引起的光斑和条纹,光谱中也没有杂散光引起的高频光谱峰。

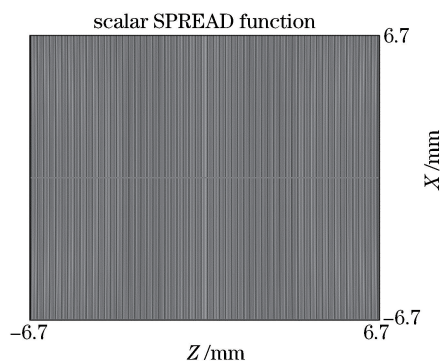


图 16 干涉条纹

Fig. 16 Interference fringes

## 4 结 论

研究了 SHRS 中光栅多级衍射杂散光对系统成像质量的影响,利用 ASAP 光学仿真软件对 SHRS 中光栅产生的多级衍射杂散光进行仿真与分析,基于挡板、光阑和光学陷阱设计了 SHRS 杂散光抑制结构,研究结果表明:对于小型化 SHRS,光栅多级衍射杂散光会严重影响系统的成像质量,必须进行合理抑制;通过挡板、光阑和光学陷阱等方法的合理化设计,杂散辐射比从 $4.996 \times 10^{-3}$ 下降到 $1.57 \times 10^{-8}$ 以下。此外,针对 $-2.5^\circ \sim 2.5^\circ$ 视场内的杂散光进行了分析,优化了抑制结构。以上研究成果对解决小型化 SHRS 杂散光的问题提供了思路。

## 参 考 文 献

- [1] Todd Nathaniel. Spatial heterodyne Raman spectroscopy[D]. Guildford: University of Surrey, 2011: 21- 27.
- [2] Du J M. The enhancement mechanism of surface-enhanced Raman scattering applied in food security [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.  
杜俊梅. 应用于食品安全的表面增强拉曼的机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [3] Li C, Feng Z C, Cao N. Development of deep ultraviolet laser Raman spectrometer[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2011, 26(5): 589-592.  
李灿, 冯兆池, 曹凝. 深紫外激光拉曼光谱仪研制[J]. 中国科学院院刊, 2011, 26(5): 589-592.
- [4] Overton G. Planetary and deep-space applications push spectroscopy to the outer limits [J]. Laser Focus World, 2012, 48(7): 36-45.
- [5] Michael Angel S, Gomer N R, Sharma S K, *et al.* Remote Raman spectroscopy for planetary exploration: a review [J]. Applied Spectroscopy, 2012, 66(2): 137-150.
- [6] Todd Nathaniel, Craig Underwood. A compact spatial heterodyne remote Raman spectrometer for Mars exploration [ C ]//62nd International Astronautical Congress, October 2011, Cape Town, South Africa. France: IAF, 2011: 1261-1271.
- [7] Lamsal N, Michael Angel S. Deep-ultraviolet Raman measurements using a spatial heterodyne Raman spectrometer (SHRS) [J]. Applied Spectroscopy. 2015, 69(5): 525-534.
- [8] Egan M J, Angel S M, Sharma S K. Standoff spatial heterodyne Raman spectrometer for mineralogical analysis[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2017, 48(11): 1613-1617.
- [9] Ye S, Fang Y H, Hong J, *et al.* System design of spatial heterodyne spectrometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(6): 959-964.  
叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱仪系统设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 959-964.
- [10] Hu G X, Xiong W, Luo H Y, *et al.* The research of spatial heterodyne Raman spectroscopy with standoff detection [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(12): 3951-3957.  
胡广骁, 熊伟, 罗海燕, 等. 用于远程探测的空间外差拉曼光谱技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(12): 3951-3957.
- [11] Luo H Y, Fang X J, Hu G X, *et al.* Hyper-resolution spatial heterodyne spectrometer for hydroxyl radical OH [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(6): 0630003.  
罗海燕, 方雪静, 胡广骁, 等. 中高层大气 OH 自由基超分辨空间外差光谱仪[J]. 光学学报, 2018, 38(6): 0630003.
- [12] Qiu J, Qi X D, Li X T, *et al.* Development of a spatial heterodyne Raman spectrometer with echelle-mirror structure[J]. Optics Express, 2018, 26(9): 11994-12006.
- [13] Yang J, Yin L, Yao X F, *et al.* Optical design and stray light suppression of a new portable echelle spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0812001.  
杨晋, 尹禄, 姚雪峰, 等. 新型便携式中阶梯光栅光谱仪光学设计与消杂散光研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0812001.
- [14] Luo H Y, Xiong W, Shi H L, *et al.* Study for signal-to-noise ratio of spatial heterodyne spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0612001.  
罗海燕, 熊伟, 施海亮, 等. 空间外差干涉光谱仪信噪比研究[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0612001.
- [15] Zhu Y. Study on the suppression of stray radiation in space optical system [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 12-14.  
朱杨. 空间光学系统杂散辐射抑制研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2016: 12-14.