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¹,杨超^{1*},薛常喜¹,李晓天²,马振予²

¹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; ²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°~2.5°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 4.996×10⁻³降到了 1.57×10⁻⁸,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 Yuanhe¹, Yang Chao^{1*}, Xue Changxi¹, Li Xiaotian², Ma Zhenyu²

 ¹ Advanced Optical Technology Manufacturing Center, the School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;
 ² 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 $-2.5^{\circ}-2.5^{\circ}$ field-of-view via baffling, beam stopping, and light trapping. The results indicate that the stray light ratio of multistage diffraction is reduced from 4.996×10^{-3} to 1.57×10^{-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^[1-4]。目前,绝大多 数关于 SHRS 的设计都是在入射窗处放置一个预

* E-mail: yangchaoby@gmail.com

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(XQNJJ-2017-06)

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^[5]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^[6] 研究了用于火星探测的 紫外 SHRS; Lamsal 等^[7]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^[8] 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^[9]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^[10]采用 SHRS 实现了 10 m 处样品拉曼光谱的检测;罗海燕 等[11]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^[12] 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^[13](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、一3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^[14]。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



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, β 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°, 使用级次为-1, 分辨能力为 3000, 理论分辨 极限约为 2.86 cm⁻¹, 光谱范围的理论值为 994.5~ 1164 nm, 即拉曼位移范围为 0~1464.32 cm⁻¹。

表 1 SHRS 系统参数

Table 1 Parameters of SHRS system

Component	Specification
Grating	150 line • 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 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^[15]。

根据光学辐射传递理论,

 $\phi_{\text{stray}} = \pi \cdot \phi_{\text{source}} \cdot f_{\text{BRDF}} \cdot f_{\text{GCF}},$ (1) 式中: ϕ_{source} 为杂散光源辐射通量; f_{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*_{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*_{BRDF}的数学表达式^[12]为

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

式中: θ_0 和 θ 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; λ_0 为入射光波长; ϕ_0 和 ϕ 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; Ω_s 为探测器 的接收立体角; θ_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 ϕ_{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_{BRDF} ;也可以通过加入光阑、遮光罩改变(1)式中 的 f_{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,在设计的视场范围内,用到达像面的杂散光能量 N_s与到达像面总能量 N_s之比来表示

$$R_{\rm SNR} = \frac{N_{\rm s}}{N_{\rm t}} \,. \tag{3}$$

系统使用时会存在一定的视场,本研究涉及的 SHRS视场范围为一2.5°~2.5°。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 涉及的系统中,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 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	0.66×10^{-3}
-2	0.16×10^{-2}
+2	0
-3	0.48×10^{-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 5×10⁻⁶,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。





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 θ 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 γ 。波数为 σ 的光的出射角 γ 由光栅 方程决定,即

 $\sigma[\sin \theta + \sin(\theta - \gamma)] = m/d$, (4) 式中: *m* 为衍射级次; *d* 为光栅刻线宽度。Littrow 角 θ 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 θ 角上 加一个视场角 α 即可引申到 α 视场的位置和孔径。 由(4)式得到

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

$$2R = 2D + 2L \tan |\gamma|_{\circ} \tag{6}$$

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 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 σ =10057.2 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 nm,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





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





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°~3.2°视场下的出射光基本 完全偏离探测器,信号强度为 0。在一2.5°~2.5°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°~2.5°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 ±1.3°和±2.5°视场的光谱。



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 θ 变为 $\theta+\alpha$,可以引申到视场角为 α 的情 况。将 θ 替换为 $\theta+\alpha$ 并代入(5)式后得到

$$\gamma' = \theta + \alpha - \arcsin\left[\frac{m}{d\sigma} - \sin(\theta + \alpha)\right]$$
. (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 α 时光阑的半 宽度为

$$R' = \frac{D}{\cos \alpha} + L \tan \gamma' = \frac{D}{\cos \alpha} + L \left\{ \tan \theta + \alpha - \arcsin \left[\frac{m}{d\sigma} - \sin(\theta + \alpha) \right] \right\} . \tag{8}$$

根据(7)~(8)式计算 2.5°时光阑的最大宽度, 将 α =2.5°和 σ =10057.2 cm⁻¹代入后,得到 $R'\approx$ 7.63 mm,这意味着将光栅 G2 前方的光阑孔径调整 为 15.26 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±1.3°和±2.5°视 场的光谱如图 14 所示。由仪器的工作原理可知,关 于 0°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。



(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 4.996×10^{-3} 下降到 1.57×10^{-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 视场干涉条纹,可 见,没有产生由杂散光引起的光斑和高频条纹,光谱 中也没有杂散光引起的高频光谱峰。



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 4.996×10⁻³下降到 1.57×10⁻⁸以下。此外,针对一2.5°~2.5°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 surfaceenhanced 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. Hyperresolution 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 echellemirror 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 signalto-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.