

## 远程激光拉曼光谱探测系统前置光学系统设计

王 帅<sup>1</sup>, 夏嘉斌<sup>1,2</sup>, 姚齐峰<sup>1</sup>, 董明利<sup>1</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

- (1. 北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016;
2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为实现远程物质高空间分辨力的拉曼光谱探测, 设计了共孔径远程激光拉曼光谱探测系统的前置光学系统。光学系统采用共孔径结构, 实现了激光发射系统、拉曼光收集系统及微区成像系统的共孔径、共光轴。设计的光学系统能够对激光进行聚焦以缩小激光光斑尺寸, 使系统具有优于 0.125 mrad 的空间分辨率。该拉曼光收集透镜有效通光口径为 50 mm, 拉曼散射光在耦合透镜焦平面上的像高小于 25  $\mu\text{m}$ , 可以与 50  $\mu\text{m}$  狭缝宽度的光谱仪进行空间光耦合, 也可使用 50  $\mu\text{m}$  芯径的光纤来耦合光学系统与光谱仪。该系统可用于远距离物质的激光聚焦、拉曼光谱探测及微区成像。

**关键词:** 拉曼光谱; 光学设计; 激光; 共孔径

**中图分类号:** TH744 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0418004

## Fore optical system design for remote laser Raman spectrum detection system

Wang Shuai<sup>1</sup>, Xia Jiabin<sup>1,2</sup>, Yao Qifeng<sup>1</sup>, Dong Mingli<sup>1</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2</sup>

- (1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;
2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to realize the Raman spectrum detection of high spatial resolution of remote material, a fore optical system of the common aperture remote laser Raman detection system was designed. The common aperture structure was applied in the optical system to realize the common aperture and common optical axis of the laser emission system, the Raman light collection system and the micro area imaging system. The designed optical system can focus the laser to reduce the size of the laser spot, so that the system has a better spatial resolution than the 0.125 mrad. The effective aperture of the Raman light collecting lens is 50 mm, Raman scattering light image height in coupling lens focal plane was less than 25  $\mu\text{m}$ , space optical coupling can be directed to spectrometer with the slit width of 50  $\mu\text{m}$ , optical fiber of 50  $\mu\text{m}$  core diameter can also be employed for coupling this optical system and spectrometer. The system can be used for laser focusing, Raman detection and micro region imaging of long distance materials.

**Key words:** Raman spectroscopy; optical system design; laser; common aperture

收稿日期: 2017-11-05; 修订日期: 2017-12-15

基金项目: 国家 863 计划(2015AA042308); 教育部“长江学者和创新团队”发展计划(IRT\_16R07)

作者简介: 王帅(1987-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计、测试计量技术及仪器方面的研究。Email: wangshuai@mail.bistu.edu.cn

导师简介: 祝连庆(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光纤传感与激光器、生物医学检测技术及仪器、精密测量与系统方面的研究。Email: zhulianqing@sina.com

## 0 引言

拉曼光谱是光与组成物质的分子内部振动及旋转运动相互作用产生的,通过光子与物质分子相互作用时产生的能量转移,来判断分子中的化学键、基团组成,分析分子的内部结构、相态、结晶度及成分信息。拉曼光谱技术是一种无损的分析技术,在多个领域<sup>[1-5]</sup>得到广泛应用,做出了诸多贡献。

为了实现对危险、有毒有害物质及空间物质非采样和非接触式的检测,近年来不断发展的远程拉曼光谱技术研究,成为该领域的研究热点<sup>[6-12]</sup>。2018年欧洲宇航局(ESA)和美国宇航局(NASA)将发射 Exo Mars<sup>[13]</sup>,其火星车将携带拉曼光谱仪(Raman Laser Spectrometer, RLS)开展火星表面和深层物质探测;NASA计划在2020年发射的火星2020科学漫游者(Mars 2020 rover)中携带拉曼光谱仪,用来探测细小的矿物及有机化合物。

远程拉曼光谱探测系统通常由激光发射系统、拉曼散射光收集系统,光谱采集系统及控制系统所组成。如何实现小型化,低功耗,防抗震和适应能力强的拉曼光谱仪成为今后研究的重点。

拉曼散射光收集系统是远程拉曼光谱探测系统中的重要组成部分,它的性能对系统探测的能力起着决定性的作用。国内外开展的远程拉曼光谱探测系统中,一般采用反射式望远镜作为拉曼散射光的收集系统。2009年美国波多黎各大学的 Ramirez-Cedeno M L 等使用远程拉曼光谱探测装在玻璃和塑料瓶中的危险液体,收集拉曼散射光使用的反射望远镜口径约 127 mm<sup>[6]</sup>;2012年美国夏威夷大学的 Anupam K. Misra 等对 120 m 距离上的物质进行了拉曼光谱探测,拉曼散射光收集系统使用的米德反射式望远镜口径为 203.2 mm<sup>[7]</sup>。2014年韩国国防发展局国防先进技术研究所的 Jin Hyuk Chung 等在 54 m 的距离上利用远程拉曼光谱探测爆炸性材料,拉曼散射光收集中使用的反射望远镜口径为 310 mm<sup>[9]</sup>。报道的拉曼散射光收集系统多数采用了反射式望远镜结构,而且这类系统通常工作在共轴情况下;对于共轴使用的反射式结构,系统通常具有一定的中心遮挡,为了获取更大的拉曼光谱收集能力,采用的共轴反射望远镜口径大,系统体积大质量

重;离轴反射式光学系统可以避免中心遮挡问题,但是离轴反射镜系统为了校正像差有时不得不采用非球面镜,从而增加系统制造难度,而且离轴反射式系统装配难度要比共轴系统大。

透射式光学系统可以用于拉曼散射光的收集,并且透射式系统不存在中心遮挡问题。2016年印度激光科学技术中心的 K K Gulati 等进行土壤和沙子中掺杂硝基芳烃的拉曼光谱探测,采用的透射望远镜口径为 50 mm,探测距离为 0.5 m<sup>[14]</sup>。2017年美国 Rd.F C 等采用口径 50.8 mm 的透射望远镜作为拉曼散射光收集系统,检测特制原生橄榄油的假货和次品,在 165 m 距离上可以检测最低浓度分别为 2.5% 的油菜油掺杂和 5% 的蓖麻油掺杂<sup>[15]</sup>。2016年国内周莉等<sup>[16]</sup>进行了傍轴的 532 nm 脉冲激光激发的远距离拉曼光谱探测实验,收集光路采用了通光口径 25 mm 的开普勒望远结构,在 10 m 的探测距离上可以获得硝酸盐的拉曼光谱。2016年姚齐峰等<sup>[17]</sup>采用伽利略望远镜系统进行拉曼光谱探测实验,系统具有较短的尺寸,体积小。上述报道的透射式拉曼散射光收集系统,透镜的口径都在 100 mm 以下;但是以上报道采用的是傍轴结构,即激光发射光路与拉曼散射光收集光路是分离的,对不同距离样品测试时需要精密的光路对准,这不利于快速的光路对准,特别是在极短测量时间要求下。

共孔径光学系统是近年来发展起来的新型光学系统。2012年中国科学院西安光学精密机械研究所的刘凯等设计了共口径的成像系统,实现了中波红外和长波红外双通道扫描成像<sup>[18]</sup>。2013年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的巩盾等研究了多种用于高功率激光技术的光学系统,介绍了发射与接收共口径的激光系统,避免了发射与接收系统的共轴误差<sup>[19]</sup>。2015年殷笑尘将红外成像传感器和激光雷达成像传感器整合为一个小型的导引头,实现了激光接收与红外成像的共口径,方便了光学设计<sup>[20]</sup>。2017年长春理工大学的贾冰等采用共口径结构,实现了一套可见光成像、激光成像和激光测高共孔径的跟踪引导系统<sup>[21]</sup>。共孔径系统可以在满足系统多波段、多性能用途上的同时,共用部分光学组件,从而在保证系统性能要求下降系统的整体空间尺寸,缩减体积,减轻系统的重量。

设计了透射式共孔径共轴的远程激光拉曼光谱

探测前置光学系统。设计的透射式光学结构,将激光发射系统、拉曼光谱收集系统、成像系统进行了共孔径、共轴的设计。通过激光发射系统使激光能够被聚焦,提高对样品的照射功率密度,降低对激光器性能的要求,对激光进行聚焦使系统具有高的空间分辨力;共轴设计保证了拉曼散射光收集系统与光谱仪器耦合的稳定性;采用了直接的空间光耦合方式,拉曼散射光聚焦点与光谱仪入口重合,避免了附加连接元件带来的损耗,实现了高效的光耦合;系统具有调焦功能,能够实现不同距离的调整对准,实现快速的远程物质拉曼光谱探测;系统具有可见光成像功能,能够对远距离物体进行精确对准和图像采集,实现空间远程的图像-拉曼光谱探测。对光学系统进行了分析和结构参数设计、质量评价及系统加工公差分析,利用系统进行了相应的远程物质的拉曼光谱探测,系统具有一定的实用价值。

### 1 远程激光拉曼光谱探测系统

设计的远程激光拉曼光谱探测系统使用 532 nm 脉冲激光作为激发光源,激光器出射口处单脉冲能量达 30 mJ,脉冲宽度 7 ns,重复频率 20 Hz。使用空间光谱仪作为光谱分光系统,光谱仪使用两块拼接的全息光栅作为色散元件,能够在宽谱段内完成分光,实现 0~4 000  $\text{cm}^{-1}$  范围的拉曼光谱采集,覆盖了大部分物质的拉曼光谱范围。使用了具有 ps 级门控功能的像增强型(ICCD)探测器,最短门控时间达到

500 ps,像增强器的增益可以达到 1 000 倍,能够进行微弱光信号的放大,实现高时间分辨的光谱采集,通过计算机控制实现激光器和 ICCD 探测器的延迟,可以有效的避免背景光及荧光干扰,提高系统信噪比。采用空间光谱仪和面阵 ICCD,可以在单脉冲情况下获取物质的整个拉曼光谱信号,实现了快速测量。设计的共孔径透射式远程激光拉曼光谱探测系统如图 1 所示。激光束首先经过一个 3 倍扩束镜扩大光束口径以压缩激光发散角,然后经反射镜 M 后反射至二向色镜 NF 上,被二向色镜反射的激光光束与拉曼散射光收集系统及成像光学系统共轴。共轴激光束经透镜组 L2 和透镜组 L1 后聚焦在远距离的待测样品上,采用这种反望远镜聚焦方式,镜头焦距小于镜组与物体间的距离,可以通过设计透镜组 L1 和 L2 的焦距来达到所要求的聚焦焦距以控制激光光斑尺寸,通过调整透镜组 L1 和 L2 间的距离  $d$  完成不同距离的激光聚焦,使系统具有高的空间分辨力及远程可调焦性能。样品被激光激发的拉曼散射光被透镜 L1 收集被透镜 L2 准直后通过二向色镜向后传播,约 90% 的拉曼光通过分光棱镜 P 后经激光滤光片 F1、F2、日光滤光片 F3 被耦合透镜 CL 直接聚焦在空间光谱仪的入口狭缝上,空间光谱仪将光谱依波长展开并成像在 ICCD 探测器像平面上,ICCD 获取样品的拉曼光谱。

光路中加入了激光滤光片 F1、F2 和日光滤光片 F3,有效消除瑞利散射光及长波光进入光谱仪器,可

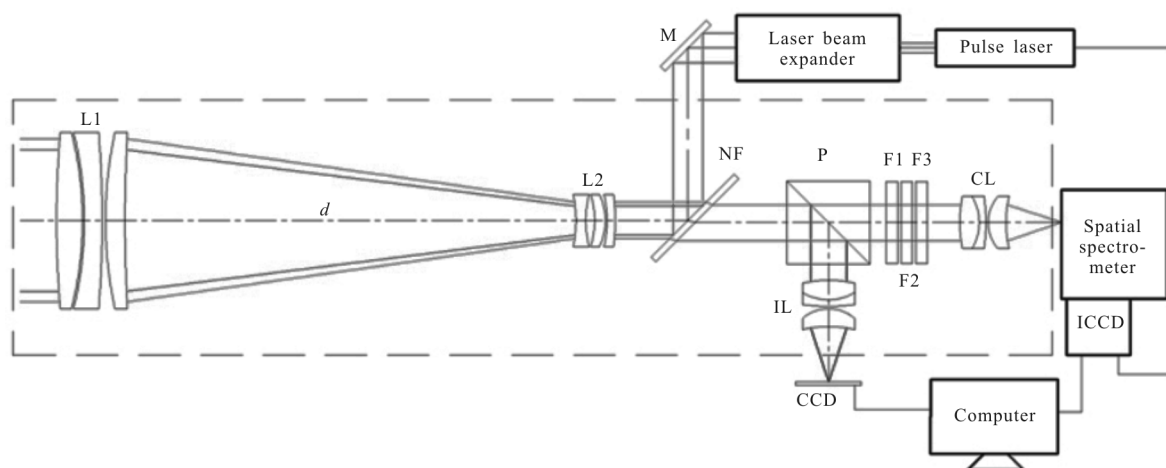


图 1 远程激光拉曼光谱探测共孔径光学系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of common aperture optical system for remote laser Raman spectrum detection

以抑制干扰提高系统的信噪比。

自然光照射样品表面产生的漫散射光依次经过透镜 L1 聚焦被透镜 L2 准直再依次通过二向色片到达分光棱镜 P, 分光棱镜 P 将约 10% 自然光反射转折进入成像透镜 IL, 位于成像透镜 IL 焦平面上的 CCD 探测器获取样品微区的像。通过 CCD 上的图像可以辅助完成透镜组 L1 的调焦。

使用透射式光学系统可以将激光发射系统、拉曼散射光收集系统、成像系统集成在一起, 共用部分光学元件, 避免系统的共轴误差, 减小系统体积, 有利于系统的集成化小型化, 并提高系统的稳定性。

## 2 光学系统性能与设计

### 2.1 光学系统的性能参数

系统使用倍频 532 nm 脉冲激光作为拉曼光激发光源, 拉曼光谱探测的范围为 50~4 000 cm<sup>-1</sup>, 按波长与波数关系, 根据公式(1)可以得到最大拉曼位移的拉曼光对应的波长 λ<sub>max</sub>。

$$\Delta k = \frac{1}{\lambda_{\text{base}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{max}}} \quad (1)$$

式中: Δk=4 000 cm<sup>-1</sup> 是拉曼光谱探测位移范围; λ<sub>base</sub>=532 nm 为对应拉曼位移为 0 cm<sup>-1</sup> 的激光器的波长; λ<sub>max</sub>=675.813 nm 为对应 4 000 cm<sup>-1</sup> 拉曼位移的拉曼散射光的波长。根据计算以上, 确定系统的波谱范围为 530~676 nm。

拉曼散射光通常为入射光的 10<sup>-6</sup> 甚至更低, 远程拉曼光谱探测的响应受系统各部分的综合影响, 可以用下公式(2)来进行计算<sup>[1]</sup>:

$$N_R = \int_0^D N_0 \eta_t \frac{d\sigma}{d\Omega} n_{\text{chem}} e^{-2\kappa R_s} \Omega(r) 10^{-(\alpha_i + \alpha_r)r} dr \quad (2)$$

式中: N<sub>0</sub> 为照射在样品上的光子数量; η<sub>t</sub> 为光学系统透过率; dσ/dΩ 为单位立体角拉曼散射截面; n<sub>chem</sub> 为待测分子数密度; κ 为大气消光系数; R<sub>s</sub> 为样品与拉曼散射光收集系统的距离; Ω(r) 为光学系统收集面大小相对于样品的立体角; α<sub>i</sub> 和 α<sub>r</sub> 为样品对入射光和拉曼散射光的吸收系数; D 为激光穿入样品的有效深度; N<sub>R</sub> 为探测器获得的拉曼散射光的光子数量。

系统使用的 ICCD 探测器增益可以达到 1 000 倍, 单个像元满井电子存储量为 100 000 个, 探测器光电转化效率约 11%, 根据公式(2)对于 10 m 处的物体, 并考虑光学系统的透过率, 使用 50 mm 口径的光学系

统来收集拉曼散射光是完全可以被探测器像元识别。

设计的光学系统结构, 处于透镜组 L2 和耦合透镜 CL 之间的光束为近平行光, 被测样品位于透镜组 L2 和 L1 组成的组合透镜焦平面上, 则样品激发的拉曼光在平行光路中的发散角与扩束后的激光光束发散角相同。为了保证激光光斑区域激发的拉曼光耦合进入光谱仪狭缝, 根据激光束发散角, 可以根据公式(3)计算光谱仪耦合透镜焦距。

$$y' = f' \times \tan \omega \quad (3)$$

式中: y' 为对应倾角为 ω 的平行光束经焦距为 f' 的镜头聚焦在镜头焦平面上的像点高度。脉冲激光器发出的激光光斑直径 3 mm, 全发散角为 1.5 mrad。为提高激光光束的准直性, 降低光束发散角, 使用了 3 倍激光扩束镜对激光光束进行准直, 准直后的光束口径 9 mm, 全发散角 0.5 mrad, 因此平行光路可以认为是具有 ±0.25 mrad 视场的平行光束。若将拉曼散射光耦合到 50 μm 的光谱仪狭缝上, 则可以得到耦合透镜 CL 的焦距 f<sub>CL</sub>' < 100 mm。实验采用的光谱仪 F 数为 f/1.8, 为充分利用衍射光栅面积并不导致光能溢出损失, 设计的耦合透镜 CL 的焦距为 25 mm。对应的边缘拉曼散射光主光线像高为 6.25 μm, 耦合透镜上对应的轴向光束入射高度不超过 6.94 mm。

将扩束准直的激光束聚焦照射在远距离的待测物质上, 对应 2~10 m 的探测距离, 希望空间分辨力优于 0.125 mrad, 即透镜组 L1 和 L2 的组合焦距小于物体距离的四分之一, 根据透镜组上光线投射高度, 设计的透镜组 L1 焦距为 186.37 mm, 透镜组 L2 的焦距为 -45.06 mm, 调焦过程中对应的透镜组间隔 d 为 157.23~141.77 mm, 对应 2 m 距离探测的激光光斑尺寸为 219 μm, 对应 10 m 距离探测的光斑尺寸为 1 132 μm, 对于如此小的光斑情况, 可以降低对激光器性能的要求, 实现低能耗的远程高空间分辨力的拉曼光谱探测。

### 2.2 光学系统的设计

根据上述分析和计算, 设计的共孔径透射式光学系统采用图 1 中反摄远系统 L1、L2、二向色反射镜 NF、分光棱镜 P、滤光片组 F1、F2、F3、耦合透镜组 CL 及成像透镜组 IL 相结合的方式。以实现激光发射系统、拉曼散射光收集系统和成像系统的共孔径、共光轴。

采用反摄远结构, 高功率激光光束在整个光路

中没有实聚焦点,防止元件被击伤损坏的可能,同时缩短了系统的整体长度。共轴设计保证了系统成像的共轭性,保证了激光光路与光谱仪耦合光路的高效耦合。

在优化过程中,通过控制各个镜组的焦距来控制光线在各镜组上的投射高,以及反摄远聚焦镜头的焦距,保证激光光斑尺寸和探测的高空间分辨力。经 Zemax 软件优化设计的光学系统结构参数如表 1 所示。

表 1 光学系统结构参数

Tab.1 Structural parameters of optical system

Surface	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Diameter/mm
1	313.9	8	H-K9LGT	54
2	-109.4	0.5		
3	-112.85	5.5	H-ZF6	54
4	-345.76	1.0		
5	125.89	6.0	H-ZK3	54
6	501.574	157.23 ~141.77		
7	-37.296	3.0	H-ZK3	16
8	32.002	2.7		
9	-27.643	3.3	H-ZF6	16
10	-18.32	0.5		
11	-36.64	2.5	H-K9LGT	16
12	-70.63	22.3		
13	INF	2	F_SILICA	36
14	INF	29		
15	INF	25.4	H-K9LGT	25.4
16	INF	5		
17	INF	3.5	F_SILICA	25
18	INF	1		
19	INF	3.5	F_SILICA	25
20	INF	1		
21	INF	3.5	F_SILICA	25
22	INF	10		
23	36.07	6	H-K9LGT	16
24	-15.525	2.0	H-ZF6	16
25	-63.53	0.7		
26	12.11	5.5	H-ZK3	16
27	33.76	16.944		
IMG	INF			

成像镜头 IL 采用的是与耦合镜头 CL 同样的设计参数。成像的视场角为 $\pm 0.3^\circ$ ,由于只对中心视场的图像感兴趣,视场不大,边缘视场成像质量要求有所降低。光学系统的总长度小于 330 mm,最大透镜口径 54 mm,有效通光口径大于 50 mm。

由于系统对远距离物体成像,且视场较小,像差矫正主要考虑矫正球差、彗差、色差。系统设计所采用的材料较为常用,在系统工作波段内透过率高,光

学性能及加工工艺性优良,价格便宜。

### 2.3 系统质量评价

对于设计的光学系统,由于视场小,是用于能量耦合的光学系统,因此质量评价主要以系统对应的物像高以及点列图的弥散范围来评价。采用透镜组 L1 完成调焦,对不同距离,激光光斑尺寸大小改变,但是对应的拉曼散射光主光线的像高度不变。

系统对于 2 m 距离物体的 MTF 如图 2 所示,在 100 lp/mm 处 MTF 大于 0.5。

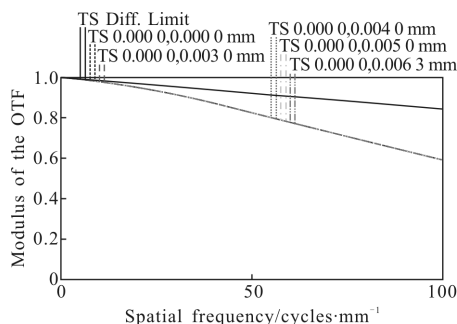


图 2 2 m 距离光学系统 MTF

Fig.2 MTF of optical system at 2 m distance

系统对于 5、10、20、50m 距离物体的 MTF 如图 3~6 所示,在 100 lp/mm 处 MTF 均大于 0.4。

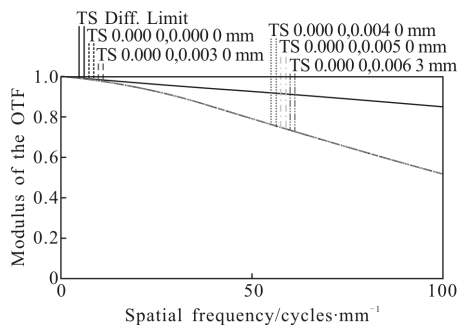


图 3 5 m 距离光学系统 MTF

Fig.3 MTF of optical system for 5 m distance

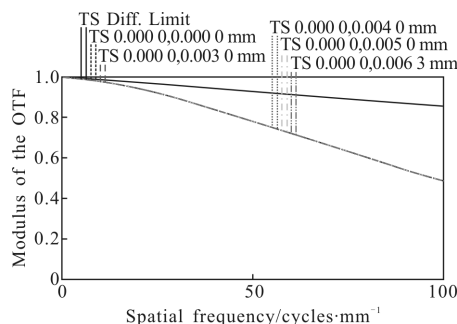


图 4 10 m 距离光学系统 MTF

Fig.4 MTF of optical system at 10 m distance

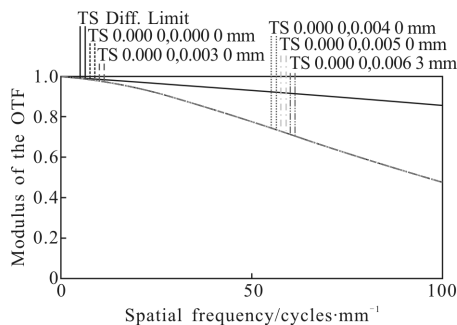


图 5 20 m 距离光学系统 MTF

Fig.5 MTF of optical system at 20 m distance

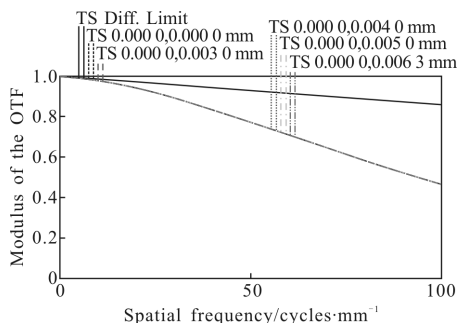


图 6 50 m 距离光学系统 MTF

Fig.6 MTF of optical system at 50 m distance

系统成像点列图如图 7 所示, 在各个视场的 RMS 半径, 边缘视场的像高及成像特性如表 2 所示。从表 2 可知, 拉曼散射光像斑全部处于  $\pm 25 \mu\text{m}$  范围内。

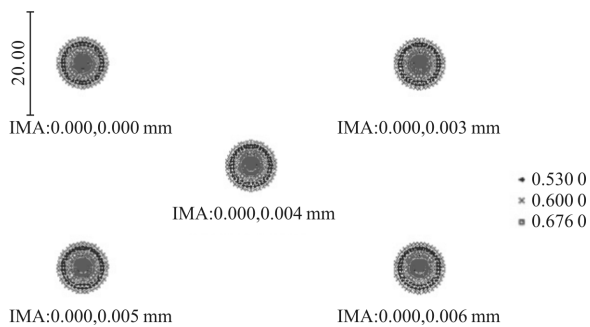


图 7 光学系统点列图

Fig.7 Spot diagram of optical system

表 2 光学系统成像性能参数

Tab.2 Imaging performance of optical system

OBJ distance /m	Paraxial image height/ $\mu\text{m}$	RMS Spot radius/ $\mu\text{m}$	Geo radius/ $\mu\text{m}$
2	6.25	2.549	5.07
5	6.25	2.943	7.298
10	6.25	3.120	7.872
20	6.25	3.195	8.092
50	6.25	3.234	8.203

系统像面离焦如图 8 所示, 图中离焦量为偏离像面的距离( $\mu\text{m}$ ), 可见当出现离焦时, 光斑迅速扩大, 表明系统具有较高的定焦灵敏性。

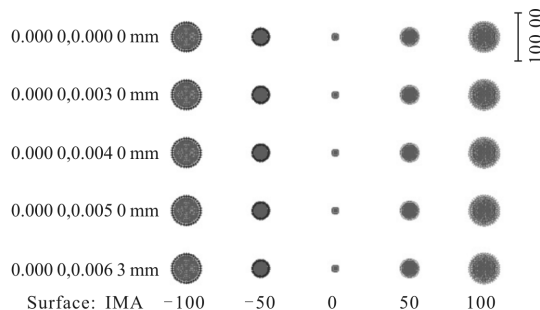


图 8 光学系统离焦光斑图

Fig.8 Spot diagrams through defocus of optical system

## 2.4 系统公差分配

系统的公差分配要考虑系统在实际制造中可实现的可能性, 便于元件加工过程中的控制和检测, 有利于整机系统的实现。通过 Zemax 对光学系统表面面形, 局部不规则, 表面倾斜与偏心, 元件厚度, 空间间隔, 元件倾斜与偏心公差进行了灵敏度分析和反灵敏度分析。分析表明, 透镜组 L1 的元件偏心、元件倾斜及面倾斜是制造和装配中造成成像质量降低的主要因素, 经过多次模拟分析最终确定该系统的公差分配如表 3 所示。

表 3 系统公差分配

Tab.3 Tolerance data of optical system

Thick-ness /mm	Radius /Fringes	Irreg /Fringes	Surface dec /mm	Surface tilt /(')	Element dec /mm	Element tilt/(')
0.05	2	0.2	0.03	1.2	0.03	1.2

通过灵敏度和反灵敏度分析, 材料的阿贝值公差为 0.5%, 折射率公差为 0.001。

按表 3 的元件公差及材料公差进行多次灵敏度分析, 并以第 6 面厚度作为像差补偿参量, 补偿其它公差引起的像差变化, 模拟结果表明, 若按拟定的公差进行产品的生产和装配, 有 90% 的产品的像点 RMS 半径小于  $3.34 \mu\text{m}$ , 与优化的结果相比较, 加入公差引起的光斑半径尺寸增加不大。通过公差分配可以看出, 系统加工公差较为宽松, 加工装配比较容易, 有利于系统的实际制造。

### 3 实验结果与讨论

#### 3.1 实验设计与装置

实验采用上述设计的共孔径远程激光拉曼光谱探测系统,耦合透镜末端采用芯径为 50 μm 的光纤与光谱仪 50 μm 狭缝连接,使用光纤的方式引入了额外的光能损失。在实验室房间内 3.5 m 距离上探测粉末状的硝酸钠(NaNO<sub>3</sub>)、硝酸锶(SrNO<sub>3</sub>)、高氯酸铵(NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub>)、高氯酸钠(NaClO<sub>4</sub>)的拉曼光谱,选择这类物质是因为它们经常被用来制作爆炸物,而高氯酸根与硝酸根具有不同的拉曼散射位移,可以验证系统的光谱分辨能力。样品粉末放置在融石英烧杯里。实验过程是在打开实验室日光灯照明的情况下进行的,可以检测时间分辨光谱采集方式对背景干扰的抑制效果。

实验中使用的组装的装置如图 9 所示。虽然光纤的芯径与光谱仪狭缝宽度一样,但是仍然引入了光能损失。

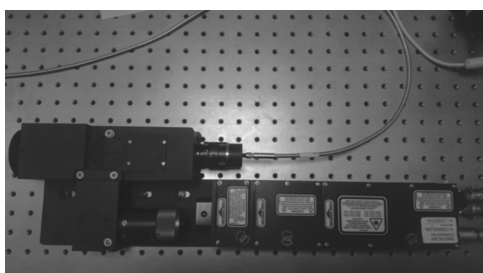


图 9 实验集成光学系统

Fig.9 Integrated optical system for experiment

#### 3.2 实验结果与讨论

使用共孔径远程激光拉曼光谱探测获取的硝酸钠(NaNO<sub>3</sub>)、硝酸锶(SrNO<sub>3</sub>)、高氯酸铵(NH<sub>4</sub>ClO<sub>4</sub>)、高氯酸钠(NaClO<sub>4</sub>)的拉曼光谱如图 10 所示。

图 10 中获得的光谱数据为直接从 ICCD 探测

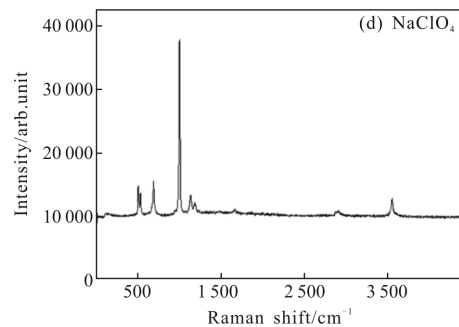
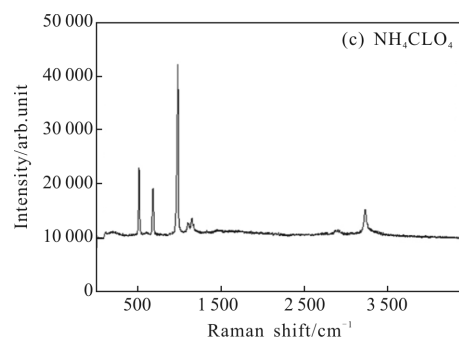
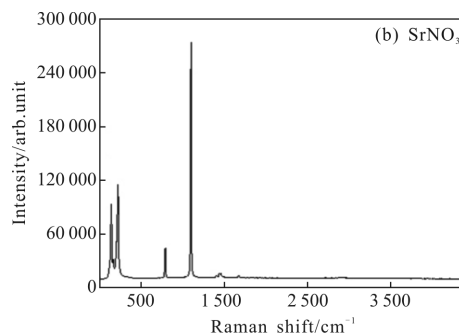
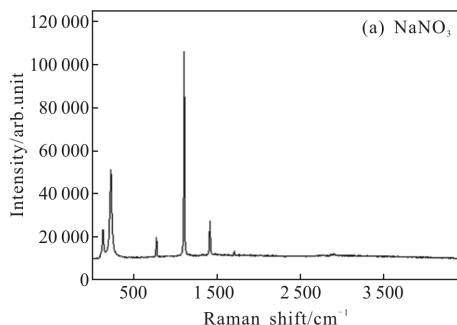


图 10 粉末拉曼光谱

Fig.10 Raman spectrum of powder

器中读出的数据,未做数据处理。对四种物质的测量均是照射了 20 个激光脉冲,ICCD 探测器的门宽为 10 ns,在实验室照明条件下,四幅光谱图均表明背景干扰十分平稳,噪声波动小,系统具有较高的信噪比,这有利于后续光谱数据的处理。

实验获得的拉曼光谱峰值清晰,峰值位置准确。从图 10(a)、(b)拉曼光谱图对比中可以清楚的看到可以根据在 1 415 cm<sup>-1</sup> 处的拉曼峰来快速区分硝酸钠和硝酸锶。从图 10(c)、(d)拉曼光谱图对比中可以看出,可以根据相关拉曼峰的相对强度比来区分高氯酸铵和高氯酸钠。

高氯酸根拉曼主峰与硝酸根拉曼主峰的明显位置差异可以快速判定物质是硝酸盐还是高氯酸盐。

## 4 结论

设计了一款用于远程激光拉曼光谱仪的透射式共孔径光学系统。使用 Zemax 软件对光学系统进行了设计并给出了设计结果。设计的系统具有高空间分辨力的远程拉曼光谱探测能力,可以实现 2m 至 10m 甚至更远距离物体的拉曼光谱探测。拉曼散射光斑可以直接耦合到 50  $\mu\text{m}$  的空间光谱仪狭缝或相同芯径的光纤中,实现了高效的光耦合。实验结果表明,在实验室照明条件下,通过门控获取的拉曼光谱数据中背景干扰稳定,便于光谱数据的处理。设计的光学系统实现了激光发射光路与拉曼散射光收集光路、微区成像光路的共孔径设计,降低了系统整体尺寸,提高了系统集成度。光学系统的制造公差较为宽松,系统便于制造和装配,具有较高的实用价值。

## 参考文献:

- [1] Mogilevsky G, Borland L, Brickhouse M, et al. Raman spectroscopy for homeland security applications [J]. *International Journal of Spectroscopy*, 2012, (2012): 808079.
- [2] Ferrari A C, Meyer J C, Scardaci V, et al. Raman spectrum of graphene and graphene layers[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(18): 13831-13840.
- [3] Yi L, Wang G, Zhang Z. Laser Raman spectrometry and its applications in petrochemical field [J]. *Petrochemical Technology*, 2014, 43(10): 1214-1220.(in Chinese)
- [4] Olcott Marshall A, Marshall C P. Field-based Raman spectroscopic analyses of an Ordovician stromatolite. [J]. *Astrobiology*, 2013, 13(9): 814-820.
- [5] Sun M J, Liu J X, Wang X, et al. Application of Raman spectroscopy in the microbiology[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2012, 10: 63-68. (in Chinese)
- [6] Ramirez-Cedeno M L, Ortiz-Rivera W, Pacheco-Londono L C, et al. Remote detection of hazardous liquids concealed in glass and plastic containers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(3): 2036373.
- [7] Misra A K, Sharma S K, Acosta T E, et al. Single-pulse standoff raman detection of chemicals from 120 m distance during daytime [J]. *Applied Spectroscopy*, 2012, 66 (11): 1279-1285.
- [8] Sadate S, Kassu A, Farley C W, et al. Standoff Raman measurement of nitrates in water [C]//SPIE, 2011, 8156(1): 10353.
- [9] Jin H C, Cho S G. Nanosecond gated raman spectroscopy for standoff detection of hazardous materials [J]. *Bulletin-Korean Chemical Society*, 2014, 35(12): 3547-3552.
- [10] Skulinova M, Lefebvre C, Sobron P, et al. Time-resolved stand-off UV-Raman spectroscopy for planetary exploration [J]. *Planetary & Space Science*, 2014, 92(3): 88-100.
- [11] Eshelman E, Daly M G, Slater G, et al. Time-resolved detection of aromatic compounds on planetary surfaces by ultraviolet laser induced fluorescence and Raman spectroscopy [J]. *Planetary & Space Science*, 2015, 119(12): 200-207.
- [12] Beegle L, Bhartia R, White M, et al. SHERLOC: Scanning habitable environments with Raman & luminescence for organics & chemicals[C]//IEEE, 2015: 1-11.
- [13] Pérezl C, Diazl E, Morall A, et al. Raman laser spectrometer development for ExoMars [J]. *EPSC Abstracts*, 2013 (8): EPSC2013-935.
- [14] Gulati K K, Gambhir V, Reddy M N. Detection of nitro-aromatic compound in soil and sand using time gated Raman spectroscopy [J]. *Defence Science Journal*, 2017, 67 (5): 588-591.
- [15] Rd F C, Kassu A, Bose N, et al. Short distance standoff raman detection of extra virgin olive oil adulterated with canola and grapeseed oils[J]. *Applied Spectroscopy*, 2017, 71 (6): 1340-1347.
- [16] Li Z, Zheng H Y, Wang Y P, et al. Characteristics of Raman spectrum from stand-off detection [J]. *Acta Physica Sinica-Chinese Edition*, 2016, 65(5): 134-143. (in Chinese)
- [17] Yao Q, Shuai W, Xia J, et al. Remote Raman spectrum detection system of material [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1103001. (in Chinese)
- [18] Liu K, Chen R L, Chang L Y, et al. Common-aperture dual-channel infrared scanning imaging optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(2): 395-401. (in Chinese)
- [19] Gong D, Hong W, Tian T. Optical design of various optical systems applied in high power laser technology [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 118-122. (in Chinese)
- [20] Yin X C, Fa Y H. Optical design of common aperture IR/ladar dual-mode imaging seeker [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2015, 44(2): 428-431. (in Chinese)
- [21] Jia Bing, Cao Guohua, Lv Qiongying, et al. Optical design of tracking/guiding system with multi-spectrum and common aperture [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2017, 46 (2): 0218001. (in Chinese)