

# 手持式拉曼光谱仪探头系统的杂光抑制新方法

刘 兵<sup>1,2</sup> 于凡菊<sup>3</sup> 孙 强<sup>1</sup> 刘 英<sup>1\*</sup> 安 岩<sup>1,2</sup> 姜承志<sup>1,2</sup> 呼新荣<sup>1,2</sup>

<sup>1</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  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049  
<sup>3</sup> 山东省济宁市邹城第二中学, 山东 济宁 273500

**摘要** 手持式拉曼光谱仪的探头系统为光照明和光收集共光路系统,由此产生了除瑞利散射杂散光之外的由于照明激光多次反射的杂散光,成为此类探头系统必须解决的问题。根据获得的实际样机的结构数据,运用实际光线追迹的方法,通过建立合理的杂散光分析模型和理论计算,获得了杂散光聚焦大小和位置、出射方向、到达狭缝处能量大小等信息。根据对杂散光的分析,提出了在探头系统中采用黑点板遮挡杂散光的新方法,并确定了黑点板的大小和位置。光学仿真分析结果表明,此方法对激光反射杂散光的抑制水平达到  $10^{-13}$  数量级,满足手持式拉曼光谱仪系统对杂散光的抑制要求。采用黑点板技术,还可以将到达滤光片上的人射角大于  $2^\circ$  的约 50% 的激光反射光滤除。

**关键词** 光谱学; 手持拉曼光谱仪; 光学探头; 弱信号探测; 杂散光; 黑点板

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0115001

## New Approach of Stray Light Suppression for Probe System of Handheld Raman Spectrometer

Liu Bing<sup>1,2</sup> Yu Fanju<sup>3</sup> Sun Qiang<sup>1</sup> Liu Ying<sup>1</sup> An Yan<sup>1,2</sup>  
Jiang Chengzhi<sup>1,2</sup> Hu Xinrong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup> Shandong Province Jining City Zoucheng Second Middle School, Jining, Shandong 273500, China

**Abstract** Handheld Raman spectrometer probe system shares the same optical configuration for illumination and light receiving. Thus, stray light caused by multiple reflections of laser, except for Rayleigh scattering, is a problem to be solved for this kind of probe system. By real ray tracing method, setting up reasonable stray light analysis model and theoretical calculation, we get the total stray light information, together with our actual prototype structural data, such as the size and location of focus, emergent direction, energy in the slit and so on. Then a new approach of stray light suppression for spectrometer probe system that uses black board to block the stray light is proposed. The size and location of the black board are determined according to the analysis of the stray light. The optical simulation analysis results show that the black board suppresses stray light to the level of  $10^{-13}$  in Raman spectral region. This satisfies the requirements of the handheld Raman spectrometer. With black board method, almost 50% of the laser reflection with incidence angle larger than  $2^\circ$  on the notch filter can be filtered.

**Key words** spectroscopy; handheld Raman spectrometer; optical probe; detection of weak signals; stray light; black board

**OCIS codes** 300.6450; 300.6190; 170.5660; 290.2648

收稿日期: 2013-07-18; 收到修改稿日期: 2013-08-29

基金项目: 吉林省科技厅项目(20106015, 20125092)

作者简介: 刘 兵(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: liu32060209@163.com

导师简介: 孙 强(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: liuy613@163.com

## 1 引言

拉曼光谱技术具有分析效率高、样品用量少、携带信息丰富、拉曼位移与入射光频率无关等特点,已成为现代光学检测的重要手段,在生物化学、高分子学、矿物学、半导体材料学、医学、农业等领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。基于拉曼光谱技术的拉曼光谱仪可在非实验室环境工作,且对操作者的专业技能要求较低,适用于在线和现场检测。面对现场检测的巨大需求,越来越多的不同类型的便携式和手持式商品拉曼光谱仪在制药和化工产品现场检测、机场海关违禁物品检测、珠宝真伪鉴别等领域发挥着重要作用<sup>[2-4]</sup>。国外在拉曼光谱仪的研发上起步较早,各大公司(如美国 Ocean Optics 公司和 DeltaNu 公司)的便携式拉曼光谱仪产品,已占据我国市场。

拉曼光谱的探测属于弱信号检测,其强度为入射光的  $10^{-6} \sim 10^{-11}$ ,因此需要对系统中的杂散光严格抑制。杂散光<sup>[5-7]</sup>主要是由光学表面、光机边缘面、光阑边缘、镜筒等的反射与散射造成的,严重影响了弱信号的采集以及提取,甚至导致有用信号的淹没。对于台式拉曼光谱仪,杂散光主要源于瑞利散射光,通常可采用全息窄带带阻滤光片<sup>[8]</sup>(陷波滤光片)抑制。而用于现场检测的便携式或手持式拉曼光谱仪,为保证系统的紧凑性,样品的激光照明系统与拉曼散射光的收集系统通常共光路,从而不可避免地产生照明光在集光透镜内的多次反射,形成瑞利散射光以外的杂散光。为消除透镜多次反射的杂散光,首先要对透镜镀膜。在常用材料的拉曼光谱波

段,利用超宽增透膜的镀制工艺,采用多层膜结构<sup>[9-10]</sup>,可以保证集光透镜的反射系数小于等于 1%。然而靠镀膜技术能否保证激光多次反射的杂散光达到可以接受的水平,以及如何进一步抑制这种杂散光仍是共光路探头系统必须解决的问题。

针对文献[11]所报道的一款大数值孔径的手持式拉曼光谱仪样机,从探头系统的特性出发,对系统的杂散光特性进行了综合分析,进而利用光线追迹的方法设计了挡光部件,对杂光进行抑制,最后利用 TracePro 软件验证了所设计的挡光部件的有效性和可靠性。

## 2 探头系统参数

文献[11]所报道的手持式拉曼光谱仪样机如图 1 所示,系统由左侧的光学探头和右侧的光谱仪两部分组成。光学探头用于待测样品的照明和拉曼散射光的收集,光谱仪用于拉曼光谱分析。光学探头由收集系统  $O_1$ 、二向色镜(DBS)、陷波滤光片(NF)和会聚系统  $O_2$  组成。入射激光经二向色镜反射再经收集系统  $O_1$  聚焦在样品上,待测样品被激光照射产生散射光,散射光经光学探头会聚到光谱仪的狭缝上。光栅光谱仪对狭缝处的拉曼散射光进行分光,其光谱信息由电荷耦合器件(CCD)探测器接收,样机尺寸为  $167.6 \text{ mm} \times 43.6 \text{ mm} \times 16.0 \text{ mm}$ 。探头系统光学参数如表 1 所示。收集系统  $O_1$  的数值孔径为 0.37,会聚系统  $O_2$  与狭缝的距离为 54 mm。

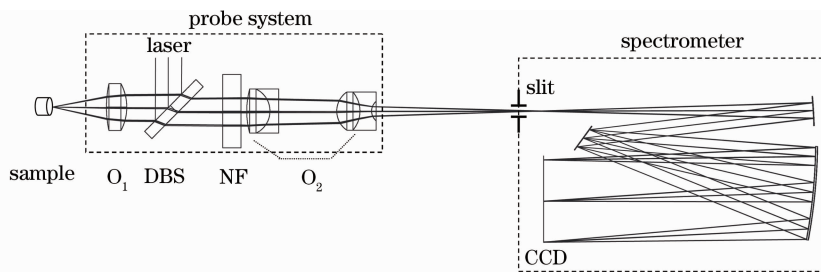


图 1 手持式拉曼光谱仪光学系统

Fig. 1 Optical system of the handheld Raman spectrometer

激光照射样品将产生瑞利散射和拉曼散射。瑞利散射光的强度为入射光的  $10^{-3} \sim 10^{-5}$ (强度系数为  $\alpha$ );拉曼散射光是瑞利散射光的  $10^{-3} \sim 10^{-6}$ (强度系数  $\beta$ ),即为入射光的  $10^{-6} \sim 10^{-11}$ 。

探头系统中杂散光的来源主要有三部分:1)激光在经过透镜  $O_1$  会聚于样品的过程中,将在透镜  $O_1$  内多次反射,而后经陷波滤光片、会聚系统  $O_2$  进入狭缝成为杂散光;2)样品的瑞利散射光经透镜  $O_1$ 、陷波

滤光片、会聚系统  $O_2$ ,进入狭缝成为杂散光;3)瑞利散射光经透镜  $O_1$  的多次反射后,经陷波滤光片、会聚系统  $O_2$ ,进入狭缝成为杂散光。因此,对于探头系统杂散光的分析,主要是对透镜  $O_1$  进行分析。设透镜  $O_1$  的反射系数  $R$  为 0.01,透射系数  $T$  为 0.99。会聚系统  $O_2$  不是杂散光的主要来源,设其为全透。二向色镜透射系数  $t$  为 0.5,反射系数  $r$  为 0.5。

表 1 探头系统光学参数  
Table 1 Optical parameters of probe system

	Diameter /mm	Radius /mm	Thickness /mm	Index of refraction
Sample		Infinity	20	
Collecting system	16	37.309	7	1.51637
$O_1$	16	-16.839	16	1
DBS	25	Infinity	3.5	1.72
Splitter	25	Infinity	16.77	1
NF	25.4	Infinity	6.3	1.52308
	25.4	Infinity	10.3	1
	15	27.981	8	1.563882
	15	-8.324	3	1.67764
Converging system $O_2$	15	Infinity	20	1
	13	7.842	8	1.563882
	13	-9.781	4	1.67764
	6.6	4.264	54	1
Slit		Infinity		

为了减小拉曼光谱的荧光背景,采用波长为 785 nm 的窄带激光器作为照明光源,其带宽为 0.2 nm,光斑尺寸 2 mm×2 mm,光强遵循平均分布。在激光不同入射高度  $h$  处,能量比例系数  $\tau$  为

$$\tau = h. \quad (1)$$

对于光谱仪系统,狭缝越窄,光谱分辨率越高,但是进入光谱仪的能量也越小,影响弱拉曼信号的采集和提取。综合考虑,选择的狭缝宽度为 0.05 mm,长度为 2 mm。陷波滤光片能够削弱特定入射角度、特定波长的光能量,采用的陷波滤光片的波长为 785 nm,光密度(OD)为 6,即当 785 nm 入射光在  $\pm 2^\circ$  内时,强度衰减量级  $\gamma$  为  $10^{-6}$ ;在  $\pm 2^\circ$  外时,透射率为 0.99。表 2 所示为拉曼探头的主要参数。

表 2 拉曼探头主要参数

Table 2 Parameters of Raman probe

Parameter	Value
Laser wavelength /nm	785±0.5
Laser beam diameter /mm	2×2
Laser bandwidth /nm	0.2
Laser-sectional radius $w$ /mm	0.3967
Peak optical density in blocking region	6
Slit width /mm	0.05
Slit length $y$ /mm	2
Transmittance of dichroic beam splitter $t$	0.5
Reflectivity of dichroic beam splitter $r$	0.5
Transmittance of lens $O_1$ $T$	0.99
Reflectivity of lens $O_1$ $R$	0.01
Transmittance of converging system $O_2$	1
Rayleigh scattering intensity coefficient $\alpha$	$10^{-3} \sim 10^{-5}$
Raman scattering intensity coefficient $\beta$	$10^{-3} \sim 10^{-6} \alpha$

### 3 杂散光分析

#### 3.1 建立模型

为获得杂散光分析模型,利用子午面内光线光路计算公式<sup>[12]</sup>对整个探头系统进行光线追迹。即利用已知的物方孔径角  $u$  和物方截距  $l$ ,求出像方孔径角  $u'$  和像方截距  $l'$ 。

对图 1 所示的拉曼探头系统,按照从左至右拉曼散射光行进路线进行杂光分析。首先对透镜  $O_1$  进行分析,由于照明光路与拉曼光谱收集光路共用透镜  $O_1$ ,因此透镜  $O_1$  为产生杂散光的最主要的来源。图 2 所示为照明激光在透镜  $O_1$  上多次反射产生杂散光的情况,其中  $m$  为入射光, $b$  为激光经  $O_1$  前表面反射之后的一次反射光, $c$  为三次反射光, $d$  为五次反射光, $e$  为七次反射光; $p$  为激光经透镜  $O_1$  后表面反射之后的一次反射光。

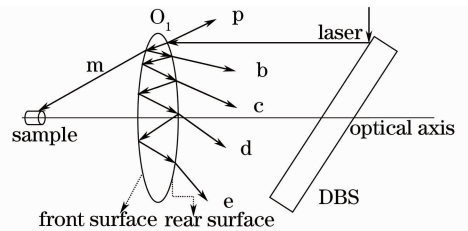


图 2 激光在透镜  $O_1$  上多次反射示意图  
Fig. 2 Schematic of multiple reflections of laser on the lens  $O_1$

图 3 所示为透射瑞利散射光及其在透镜  $O_1$  上多次反射形成的杂散光,其中  $k$  为散射光, $f$  为透射瑞利散射光, $g$  为二次反射瑞利光, $h$  为四次反射瑞利光。

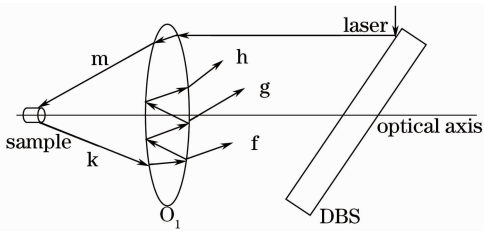


图 3 透射瑞利散射光和透镜  $O_1$  上多次反射瑞利光示意图

Fig. 3 Schematic of transmission Rayleigh scattering light and multiple reflections of Rayleigh light on the lens  $O_1$

利用子午面内光线光路计算公式对照明激光

及透射瑞利散射光在透镜  $O_1$  上多次反射产生的杂散光进行光线追迹。追迹初始物距为  $l$ , 孔径角为  $u$ 。经过透镜  $O_1$  后, 出射光线孔径角为  $u_0$ , 出射光线截距为  $l_0$ 。

经过透镜  $O_1$  之后, 杂散光能量初步计算结果如表 3 所示, 其中  $I_1$  为拉曼散射光强度。分析对比表 3 中数据可知, 在激光反射光中只需分析激光在  $O_1$  后表面的一次反射光和经  $O_1$  前表面反射的一次反射光、三次反射光、五次反射光。在散射光中只需分析透射瑞利散射光和二次反射瑞利光。

表 3 杂散光能量初步计算

Table 3 Preliminary calculation of stray light's energy

Parameter	Formula	Value
$I_m$	$T \times T$	0.98
$I_b$	$T \times R \times T$	$9.8 \times 10^{-3}$
$I_c$	$T \times R^3 \times T$	$9.8 \times 10^{-7}$
$I_d$	$T \times R^5 \times T$	$9.8 \times 10^{-11}$
$I_e$	$T \times R^7 \times T$	$9.8 \times 10^{-15}$
$I_p$	$R$	$10^{-2}$
$I_f$	$T^2 \times \alpha \times T^2$	$9.6 \times 10^{-4} \sim 9.6 \times 10^{-6}$
$I_g$	$T^2 \times \alpha \times R^2 \times T$	$9.6 \times 10^{-8} \sim 9.6 \times 10^{-10}$
$I_h$	$T^2 \times \alpha \times T \times R^4 \times T$	$9.6 \times 10^{-12} \sim 9.6 \times 10^{-14}$
$I_i$	$I_m \times \alpha \times \beta \times T^2$	$9.6 \times 10^{-7} \sim 9.6 \times 10^{-12}$

图 4 所示为实际光线经二向色镜的追迹情形, 二向色镜倾斜  $45^\circ$ ,  $A$  为光轴 1 与二向色镜交点,  $B$  为入射光线与光轴 1 交点,  $C$  为入射光线延长线与二向色镜轴交点,  $A'$  为二向色镜与光轴 2 交点,  $B'$  为出射光线延长线与光轴 1 交点,  $C'$  为出射光线与二向色镜轴交点。  $\theta$  为线段  $AA'$  与二向色镜轴夹角。二向色镜折射率为  $n_1$ 。从透镜  $O_1$  出射的光线, 基于光轴 1 的孔径角为  $u_0$ , 截距为  $l_0$ ; 从二向色

镜出射的光线, 基于光轴 2 的孔径角为  $u_2$ , 截距为  $l_2$ 。  $d_1$  为透镜  $O_1$  与二向色镜距离,  $d_2$  为二向色镜厚度。基于光轴 1, 对于二向色镜,  $u_0$  为物方孔径角,  $d_1 - l_0$  为物方截距。进而基于二向色镜轴, 物方孔径角为  $u_1$ , 物方截距为  $l_1$ ; 经过二向色镜后, 像方孔径角为  $u'_1$ , 像方截距为  $l'_1$ 。进而基于光轴 1, 像方孔径角为  $u'_0$ , 像方截距为  $l'_0$ 。基于光轴 2, 像方孔径角为  $u_2$ , 像方截距为  $l_2$ 。

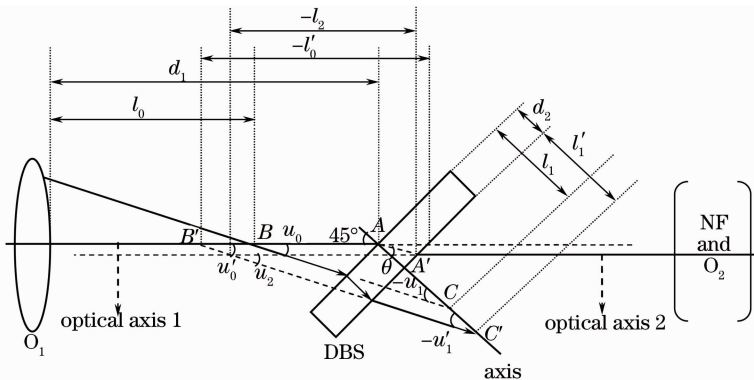


图 4 在二向色镜处实际光线追迹示意图

Fig. 4 Actual ray tracing in dichroic beam splitter

利用子午面内光线光路计算公式, 并且在  $\triangle ABC$  及  $\triangle AB'C'$  中应用正弦定理, 可以得到基于

光轴 1 和经过二向色镜的像方参数  $u'_0, l'_0$ 。根据折射定律可知,  $\sin 45^\circ = n_1 \sin \theta$ , 则以光轴 2 为基准的

经过二向色镜的像方参数  $u_2, l_2$  分别为

$$\begin{cases} u_2 = u'_0 \\ l_2 = l'_0 + d_2 \sin 45^\circ (1 - \tan \theta) \left(1 + \frac{1}{\tan u'_0}\right) \end{cases} \quad (2)$$

由(2)式即可知道实际光线到达陷波滤光片上的入射初始条件,并据此确定二向色镜的滤光限制情况。

根据二向色镜出射光线的孔径角  $u_2$  和截距  $l_2$  信息,可得陷波滤光片与会聚系统  $O_2$  的入射光线信息。再利用子午面内光线光路计算公式进行光线追迹,最终得到通过会聚系统  $O_2$  后的孔径角和截距等信息,即可知道整个探头系统各处的角度、截距等信息。

为了准确获得黑点板的放置位置,需要分析任意入射角光线在光路中的聚焦位置。图 5 所示为经过整个探头系统后聚焦光线的分析模型,焦点位置  $S$  为弥散斑直径最小处,即上边缘光线与下边缘光线交点在光轴上的位置。 $l_{00}$  为截距,  $r_s$  为焦点  $S$  处弥散斑半径。 $S_1$  为上边缘光线与光轴的交点,对应的孔径角为  $u_{11}$ ,截距为  $l_{11}$ ;  $S_2$  为下边缘光线与光轴的交点,对应的孔径角为  $u_{22}$ ,截距为  $l_{22}$ 。 $D$  为狭缝处的弥散斑,  $z$  为偏移距离,其长度等于  $r_s$ 。

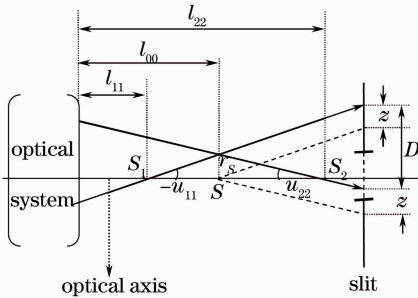


图 5 实际聚焦光线分析模型

Fig. 5 Analysis model of actual focused ray

根据几何关系

$$(l_{00} - l_{11}) \tan(-u_{11}) = (l_{22} - l_{00}) \tan u_{22} = r_s, \quad (3)$$

可以得到焦点  $S$  处的截距  $l_{00}$  和弥散斑半径  $r_s$  的信息。如图 5 所示,只要狭缝长度  $y$  满足

$$D - z < y, \quad (4)$$

即可认为有杂散光进入狭缝中,需要进行抑制。

由于在实际调试过程中存在一定的误差,导致入射激光可能与光轴有一倾斜角度  $\delta$ ,进而使大量杂散光进入狭缝中,因此在追迹光线时,需将调试误差的影响考虑进去。经计算,  $\delta \leq 5'$  均有拉曼散射光,故倾斜角度  $\delta$  也要作为初始参量进行考虑,而

$\delta \leq 5'$  是通常的实际装调指标。

### 3.2 数据分析以及杂光抑制

对照明激光在透镜  $O_1$  上多次反射产生的杂散光,追迹初始高度  $0 \leq h \leq 1$  mm,倾斜角度  $0 \leq \delta \leq 5'$ 。对透射瑞利散射光及其在透镜  $O_1$  上多次反射形成的杂散光,追迹初始物距  $l$  为 20 mm,入射孔径角  $0 \leq u \leq \arctan \frac{8}{20}$ 。利用子午面内光线光路计算公式以及(2)式,(3)式对整个探头系统进行光线追迹,获得各处出射光线聚焦位置、大小、出射方向以及到达狭缝处时的信息。

根据(4)式,获得入射激光倾斜角为  $\delta$  时,临界入射高度(杂散光刚刚可进入狭缝时激光的入射高度)处的信息如表 4 所示,瑞利散射光在临界入射孔径角(杂散光刚刚可进入狭缝时样品的入射孔径角)处的信息如表 5 所示。表 4 和表 5 中所有光线在陷波滤光片上的入射角度都小于  $2^\circ$ ,故入射角度不作为关键信息列入表中。为简化表格,将表中经透镜  $O_1$  前表面反射的一次反射光简称为前表面一次反射光;经透镜  $O_1$  前表面反射的三次反射光简称为三次反射光;经透镜  $O_1$  前表面反射的五次反射光简称为五次反射光;经透镜  $O_1$  后表面反射的一次反射光简称为后表面一次反射光。在透镜  $O_1$  处光线直径简称直径,经透镜  $O_1$  后焦点位置简称焦点,经透镜  $O_1$  后在焦点处光线直径简称直径-焦点处。

由表 4 可知,激光经透镜  $O_1$  前表面反射的一次反射光和五次反射光在透镜  $O_1$  后的不同位置处会聚,即形成鬼像;而经  $O_1$  前表面反射的三次反射光和  $O_1$  后表面一次反射光未产生鬼像。由表 5 可知,经  $O_1$  二次反射的瑞利光形成鬼像,而透射瑞利光不产生鬼像。

经透镜  $O_1$  前表面反射的一次反射光、三次反射光、五次反射光,经透镜  $O_1$  后表面的一次反射光,透射瑞利散射光,经  $O_1$  二次反射的瑞利光到达陷波滤光片上的入射角度均小于  $2^\circ$ ,因此陷波滤光片对这些杂散光都有很好的削弱作用,削弱量级  $\gamma$  为  $10^{-6}$ 。经过陷波滤光片后,到达狭缝处能量如表 6 所示。其中  $I'_x$  为不同的光  $x$  在狭缝处能量(见表 3),  $\tau$  见表 4。当  $\alpha = 10^{-3}$  时,透射瑞利光和二次反射瑞利光能量最大,表 6 中还给出了其最大值以及此时的拉曼散射光强度  $I'_\alpha$ 。

表 4 激光反射杂散光理论分析

Table 4 Analysis of the laser reflection stray light

	$\delta$	Incidence height /mm	Diameter / mm	Focus position /mm	Diameter-focal point /mm	Diameter of optical line on the slit $D$ /mm	$z$ /mm	$\tau$
Third reflected light	$0^\circ$	0.075	0.156	-9.6863		1.9884		
	$5'$	0.076	0.158	-9.6863	0.00271	2.6086	0.0790	0.076
Fifth reflected light	$0^\circ$	0.035	0.020	2.3445		1.9869		
	$5'$	0.064	0.037	2.3444	0.02355	2.5591	0.5819	0.064
First reflected light from front surface	$0^\circ$	0.070	0.055	3.5072		1.9661		
	$5'$	0.070	0.255	3.5072	0.00258	2.5553	0.5690	0.070
First reflected light from rear surface	$0^\circ$	0.037	0.074	-8.4195		1.9933		
	$5'$	0.068	0.136	-8.4194	0.02448	2.5854	0.6081	0.068

表 5 瑞利光理论分析

Table 5 Analysis of the Rayleigh scattering stray light

	Entrance aperture angle /rad	Diameter / mm	Focus position /mm	Diameter-focal point /mm	Diameter of optical line on the slit $D$ /mm	$z$ /mm
Second reflected Rayleigh light	0.00328	0.0756	4.9035	0.0426	2.5402	0.5536
Transmission Rayleigh light	0.2895	13.4568	256.558	1.0202	6.6362	4.6397

表 6 狭缝处杂散光能量计算

Table 6 Calculation of stray light's energy on the slit

Parameter	Formula	Value
$I'_1$	$I_1 \times t^2$	$2.4 \times 10^{-7} \sim 2.4 \times 10^{-12}$
$I'_b$	$I_b \times t^2 \times \gamma \times \tau$	$1.715 \times 10^{-10}$
$I'_c$	$I_c \times t^2 \times \gamma \times \tau$	$1.862 \times 10^{-14}$
$I'_d$	$I_d \times t^2 \times \gamma \times \tau$	$1.568 \times 10^{-18}$
$I'_p$	$I_p \times t^2 \times \gamma \times \tau$	$1.7 \times 10^{-10}$
$I'_a$	$I_1 \times t^2$	$2.4 \times 10^{-7} \sim 2.4 \times 10^{-10}$
$I'_f$	$I_f \times t^2 \times \gamma$	$2.4 \times 10^{-10}$
$I'_g$	$I_g \times t^2 \times \gamma$	$2.4 \times 10^{-14}$

由表 6 可知,只需对激光经透镜  $O_1$  前表面反射的一次反射光和经  $O_1$  后表面的一次反射光做进一步杂散光抑制。由表 4 可知,经透镜  $O_1$  前表面反射的一次反射光在距  $O_1$  后表面 3.5072 mm 处形成一次鬼像,可在其一次鬼像处设置黑点板,此时一次鬼像在  $O_1$  后表面上的光线直径为 0.055 mm。经透镜  $O_1$  后表面的一次反射光从  $O_1$  出射后是发散的,若在  $O_1$  后表面处加黑点板,所需黑点板的直径为最小的 0.138 mm。此时对激光以及拉曼散射光的遮挡面积最小,可以认为不影响样品散射的激发以及拉曼散射光的收集。光线追迹表明,在  $O_1$  后表面处加黑点板,可以同时遮拦上述的两种杂散光。

### 3.3 其他杂散光分析

上述分析是对可以通过光学系统直接达到狭缝

的杂散光进行分析的。实际上有大量的激光反射杂散光虽然不能通过光学系统直接进入狭缝,但是经过光机边缘面、光阑边缘、镜筒等的机械壁多次反射后,还是有部分能量进入狭缝。特别是那些入射到陷波滤光片上大于  $2^\circ$  的激光反射杂散光,受陷波滤光片的作用有限,将成为系统杂散光的一个次要来源。并且提高陷波滤光片 OD 数或者是增加陷波滤光片数,对其滤除的效果均不明显。表 7 所示为对这部分杂散光的分析结果。表中光线在陷波滤光片上入射角度均大于等于  $2^\circ$ ,入射高度区间指到达陷波滤光片  $2^\circ$  入射角的激光入射高和激光最大 1 mm 入射高的区间,入射高度区间杂散光能量计算公式参见表 6,此时  $\gamma$  为 0.99<sup>2</sup>。

表 7 其余杂散光理论分析  
Table 7 Analysis of other stray light

	$\delta$	Incidence height range /mm	Diameter range of optical line on $O_1$ /mm	Focus position range after passing through $O_1$ /mm	Diameter range of optical line at the focal point after passing through $O_1$ /mm	Stray light energy
Third reflected light	$0^\circ$	0.325~1	0.67633~2.0897	-9.6881~-9.7045		$1.621 \times 10^{-7}$
	$5'$	0.311~1	0.64717~2.0897	-9.6879~-9.7045	0.0027092~0.027212	$1.654 \times 10^{-7}$
Fifth reflected light	$0^\circ$	0.282~1	0.16312~0.57463	2.3413~2.3028		$1.724 \times 10^{-11}$
	$5'$	0.279~1	0.16139~0.57463	2.3413~2.3027	0.023544~0.023407	$1.731 \times 10^{-11}$
First reflected light from front surface	$0^\circ$	0.310~1	0.24475~0.78938	3.5049~3.4811		$1.657 \times 10^{-3}$
	$5'$	0.305~1	0.2408~0.78938	3.5049~3.4811	0.025831~0.025817	$1.669 \times 10^{-3}$
First reflected light from rear surface	$0^\circ$	0.293~1	0.58618~2.0071	-8.4182~-8.4046		$1.698 \times 10^{-3}$
	$5'$	0.281~1	0.56216~2.0071	-8.4183~-8.4046	0.024496~0.024697	$1.726 \times 10^{-3}$

由表 7 可知,激光经透镜  $O_1$  前表面反射的一次反射光与经  $O_1$  后表面反射的一次反射光的能量相当,而其他反射光分别为其能量的  $10^{-4}$  和  $10^{-8}$ 。对于  $O_1$  前表面反射的一次反射光,只要在  $O_1$  后 3.51 mm 处,放置直径 0.026 mm 黑点板,就能将其完全消除。而  $O_1$  后表面反射的一次反射光,因为是发散的,无法对其滤除。这样,采用黑点板技术,可以滤除掉入射到陷波滤光片上大于  $2^\circ$  的约 50% 激光杂散光。

综合 3.2 节和 3.3 节的分析结果,在透镜  $O_1$  后表面处放置直径为 0.138 mm 的黑点板,在  $O_1$  后 3.50 mm 处放置直径为 0.026 mm 的第二黑点板,能够将经拉曼探头系统进入狭缝的杂散光很好地消除。

### 4 仿真分析

对于理论建模,利用 TracePro 软件对其进行仿真模拟,以证明模型的可靠性。参数设置和理论建模一致,光线总能量设为 1 W,光强遵循平均分布。能够追迹光线的最低能量为  $10^{-13}$ 。首先对透镜  $O_1$  进行模拟仿真,结果如图 6 所示。在光轴上的一次鬼像点,与 3.2 节理论计算的一次反射光鬼像点在位置、大小、角度上均一致。由于五次鬼像点能量比较弱,所以在进行模拟仿真时鬼像点被淹没在大量光线内,无法观察,但理论计算可以得到五次鬼像点的完整信

息。对于二次反射的瑞利光鬼像点同样如此。

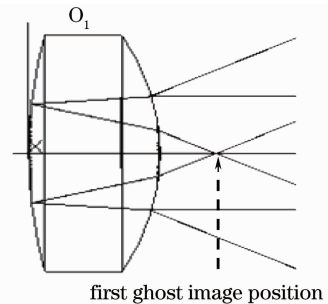


图 6 一次鬼像位置

Fig. 6 Position of the first ghost image

然后对整个系统进行 TracePro 分析。图 7 所示为未经过黑点板遮挡时的拉曼光谱仪 CCD 探测

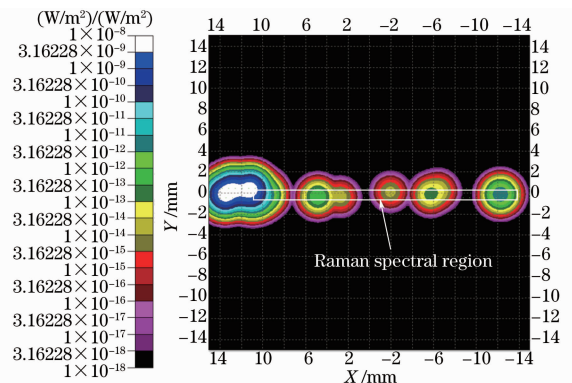


图 7 CCD 处杂散光照射

Fig. 7 Irradiance of stray light on the CCD

参 考 文 献

器处杂散光的照度图, CCD 在拉曼光谱区域接收到许多虚假光谱信息,这是由于杂散光进入狭缝后多次反射造成的。虽然杂散光都为 785 nm,但是却分布于整个光谱区域。图 8 为进行 3.2 节的黑点板遮挡之后的杂散光照度图,可知,进行遮挡后激光经透镜 O<sub>1</sub> 前、后表面的一次反射光均已经被挡住,仅剩有与拉曼散射光同量级的瑞利散射光。在拉曼光谱区域做到消杂散光数量级在 10<sup>-13</sup>。仿真模拟与理论计算结果相符。

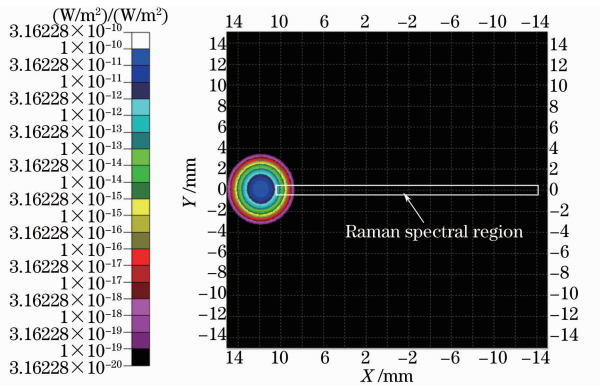


图 8 进行遮挡处理后 CCD 处照度

Fig. 8 Irradiance of stray light on the CCD with an obscured plate

5 结 论

用于现场检测的手持式拉曼光谱仪,由于其探头系统的光照明和光收集共光路的特点,需对其杂散光进行抑制。根据自行研制的一款拉曼光谱仪样机的结构数据,运用实际光线追迹的方法,建立了探头系统的杂散光分析模型并进行了数值计算,得出系统的主要杂光的量值及其路径,进而提出采用加黑点板的方法对杂散光进行有效抑制的方法。光学仿真分析表明,对激光反射杂散光的整体抑制水平达到 10<sup>-13</sup>数量级。透射瑞利光和反射瑞利光经陷波滤光片抑制,其水平达到与拉曼散射光同量级。在探头系统中加黑点板的方法,可以满足拉曼光谱仪对于杂散光抑制水平的要求。

采用黑点板技术,还可以将到达滤光片上的入射角大于 2°的激光杂散光滤除约 50%。这部分杂散光实际上是不可避免的,而且由于机械壁对它的多次反射,通常是可以部分进入光谱仪狭缝的。而提高陷波滤光片 OD 数或者再加一片陷波滤光片,对这部分杂光的滤除效果有限。

- 1 Jianhua Mo, Wei Zheng, Zhiwei Huang. Fiber-optic Raman probe couples ball lens for depth-selected Raman measurements of epithelial tissue[J]. Biomed Opt Express, 2010, 1(1): 17-30.
- 2 Rich Cox, Brad Williams, Mark H Harpster, et al.. Identification of targets at remote distances with Raman spectroscopy[C]. SPIE, 2012, 8374: 83740O.
- 3 Chunyuan Song, Jeremy D Driskell, Ralph A Tripp, et al.. The use of handheld Raman system for virus detection[C]. SPIE, 2012, 8358: 83580I.
- 4 Yu Yong'ai, Wu Wei, Zhu Dongyin, et al.. Portable Raman spectroscopy and Raman spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(8): 85-87.  
于永爱, 吴 维, 朱冬寅, 等. 拉曼光谱技术与便携式拉曼光谱仪[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(8): 85-87.
- 5 Liu Kun, Yu Feihong. Stray light analysis and suppression of LCoS micro-projector optical engine[J]. Optical Instruments, 2012, 34(1): 11-15.  
刘 昆, 余飞鸿. LCoS 微型投影光引擎杂散光分析与抑制[J]. 光学仪器, 2012, 34(1): 11-15.
- 6 Li Haiwen, Hao Peng, Wu Yihui. Generation and suppression of stray light in UV-Vis spectrometer based on micro-silicon-slit[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 737-742.  
黎海文, 郝 鹏, 吴一辉. 微硅狭缝紫外-可见光谱仪杂散光的产生与抑制[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 737-742.
- 7 Zhang Yan, Zhang Yanli, Li Xiaoyan, et al.. Study on sensitivities of ghost images to lens fabrication errors in high power laser facilities[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3568-3573.  
张 燕, 张艳丽, 李小燕, 等. 高功率激光装置透镜误差对鬼像点位置的敏感性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3568-3573.
- 8 Tang Minxue, Zhao Yanjiao, Wu Jianhong. Application of holographic notch filters in Raman spectrometer [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(7): 135-139.  
唐敏学, 赵艳皎, 吴建洪. 全息窄带带阻滤光片用于拉曼光谱测试仪[J]. 光电工程, 2006, 33(7): 135-139.
- 9 Zhang Jiabin, Fu Xiuhua, He Caimei. Design and fabrication of visible and infrared band broadband AR coating [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(5): 528-531.  
张家斌, 付秀华, 贺才美. 可见与近红外增透膜的设计和制备 [J]. 激光与红外, 2009, 39(5): 528-531.
- 10 Tan Yu, Liang Hongjun, Liu Yongqiang, et al.. 0.4 μm ~ 1.1 μm AR film prepared with TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> and MgF<sub>2</sub> [J]. J Applied Optics, 2007, 28(5): 623-626.  
谭 宇, 梁宏军, 刘永强, 等. 用二氧化钛、二氧化硅和氟化镁膜料镀制 0.4 μm~1.1 μm超宽带增透膜[J]. 应用光学, 2007, 28(5): 623-626.
- 11 An Yan, Liu Ying, Sun Qiang, et al.. Design and development of optical system for portable Raman spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0330001.  
安 岩, 刘 英, 孙 强, 等. 便携式拉曼光谱仪的光学系统设计及研制[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0330001.
- 12 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics (2nd Edition) [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. 7-9.  
郁道银, 谈恒英. 工程光学(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006. 7-9.

栏目编辑:张 腾