



激光与光电子学进展
Laser & Optoelectronics Progress
ISSN 1006-4125, CN 31-1690/TN

《激光与光电子学进展》网络首发论文

题目：单细胞拉曼光谱仪杂散光抑制研究
作者：吕鑫，朱明尧，潘科宇，迟明波，吴一辉
网络首发日期：2022-07-18
引用格式：吕鑫，朱明尧，潘科宇，迟明波，吴一辉. 单细胞拉曼光谱仪杂散光抑制研究[J/OL]. 激光与光电子学进展.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20220714.1235.186.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

单细胞拉曼光谱仪杂散光抑制研究

吕鑫^{1,2}, 朱明尧^{1,2}, 潘科宇^{1,2}, 迟明波^{1**}, 吴一辉^{1*}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 自发拉曼光谱检测具有宽光谱高分辨但信号较弱的特点, 因此杂散光的影响不可忽视。本文针对自行设计的单细胞拉曼光谱仪光栅转动下系统杂散光产生的机理进行了研究, 给出了杂散光抑制方法, 特别是多重结构下消除杂散光光学陷阱的设计方法, 通过 TracePro 软件仿真验证了其杂散光抑制的有效性, 分析结果显示, 杂散光抑制前后不同波长处杂散辐射比降低了 12%~47%, 细胞拉曼光谱仪整体杂散光水平低于 10^{-6} , 经杂散光抑制后的光谱仪更加有利于微弱光信号的探测。

关键词 光谱学; 单细胞拉曼光谱仪; 光学陷阱; TracePro; 杂散光抑制

中图分类号 0439; 0433.4 **文献标志码** A

Stray light suppression of single-cell Raman spectrometer

Lü Xin^{1,2}, Zhu Mingyao^{1,2}, Pan Keyu^{1,2}, Chi Mingbo^{1**}, Wu Yihui^{1*}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Spontaneous Raman spectroscopy has the characteristics of wide spectrum and high resolution but weak signal, so the influence of stray light cannot be ignored. In this paper, the mechanism of stray light generation in the self-designed single-cell Raman spectrometer system under the rotation of grating is studied, and the stray light suppression method is given, especially the design method of eliminating stray light optical trap in the multi-structure. The effectiveness of stray light suppression is verified by TracePro software simulation. The analysis results show that, Before and after the suppression of stray light, the stray radiation ratio at different wavelengths decreased by 12%-47%, and the overall stray light level of cell Raman spectrometer was lower than 10^{-6} . The spectrometer after the suppression of stray light was more conducive to the detection of weak light signals.

Key words Spectroscopy; Single-cell Raman spectrometer; Optical trap; TracePro; Stray light suppression

OCIS codes 120.6200; 290.2648; 300.6190; 300.6450

1 引言

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(61727813)、吉林省科技发展项目(20200401043GX)

通信作者: *E-mail: yihuiwu@ciomp.ac.cn; **E-mail: chimb@sklao.ac.cn

拉曼光谱^[1,2]是基于光子激发振动发生非弹性散射而建立起来的一种无损光谱分析技术,具有“指纹”识别特点,能从分子水平提供物质的结构及组成信息,并且其检测过程不受水的干扰、无标记,而生物组织中的生物分子又多以水溶液状态存在,这使得拉曼光谱特别适用于组织和细胞等生物样品的分析。生物组织在病变或癌变过程中,通过对比正常以及患病细胞的拉曼光谱信息,可以对其进行病理分析和诊断^[3-5]。拉曼光谱仪的性能直接影响着拉曼光谱检测的精度。细胞的“指纹”谱峰通常在 $600\text{cm}^{-1}\sim 1800\text{cm}^{-1}$ 范围内,考虑到准确识别细胞中的拉曼谱峰信息,需要满足全波段 0.06nm 的光谱分辨率;常用的激发光源为 532nm 、 785nm , 532nm 激发光源能量高,但有荧光背景, 785nm 激发光源荧光干扰弱,但能量较低。拉曼散射强度只有入射光的 $10^{-6}\sim 10^{-9}$, 属于弱探测信号^[6]。杂散光对于弱信号探测系统^[7],会导致系统的灵敏度和信噪比降低^[8],光谱信号质量变差,严重时甚至会淹没系统的目标信号^[9],是主要的信号噪声来源之一,且考虑到细胞的损伤阈值较低,激发光源能量过大时会损伤细胞,所以对杂散光的抑制有较高要求。本课题组基于 MEMS 工艺加工了高精度微硅狭缝,该狭缝刀口厚度约为 $10\mu\text{m}$,狭缝边缘直线度也非常高,极大抑制了由狭缝刀口引入的杂散光^[10]。因此本文着重针对宽光谱、高分辨率的细胞拉曼光谱仪内部光学系统的杂散光抑制开展相关研究工作。

目前,针对传统光栅色散型光谱仪系统杂散光抑制的研究已经有很多结果,对于光栅元件本身缺陷产生的杂散光,通过选用高性能的闪耀光栅,可将由光栅元件带来的杂散光影响忽略不计^[11]。韩国公州国立大学的 Jin Ah Lee^[12]等人对紧凑型成像光谱仪中的光学支架和外壳结构进行了特殊设计处理,仿真证实系统视场之外到达探测器像面的鬼像和杂散光的相对强度为 10^{-5} ;德国 Merschdorf M^[13]等人对近红外成像光谱仪的杂散光来源和减少杂散光的方法进行了讨论;中国科学院安徽光学精密机械研究所的周海金^[14]等人主要通过设计遮光罩作为消杂光结构对星载大气痕量气体差分吸收光谱仪进行了杂散光的抑制,仿真结果显示视场外杂散光在像面照度同中心视场像面照度的比值为 5.4725×10^{-4} ;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的杨晋^[15]等人利用挡板、光阑等结构对便携式中阶梯光栅光谱仪系统杂散光进行了抑制,杂散光水平可以达到 10^{-5} 量级;北京理工大学的周昭^[16]等人改进了圆锥型光学陷阱对微型拉曼光谱仪光栅的 0 级衍射杂散光进行了分析;合肥工业大学的吴骥^[17]采用了改进型抛物面结构光学陷阱对微型光谱仪光栅的-1 级衍射杂散光进行了消除。但是这些抑制光栅非使用级次衍射光的方法均是针对于固定光栅下微型光谱仪结构,不适用于宽波段高分辨率光栅转动下光栅非使用级次衍射杂散光的抑制。而一般细胞拉曼光谱仪所需要

的宽波段和光谱分辨率均较高，光谱分辨率越高单次采集可探测光谱范围越窄^[18]，需要通过光栅转动来实现，此时杂散光的处理更加棘手。鉴于此，本文在光栅转动多重结构下对拉曼光谱仪进行消杂散光研究，在传统光学陷阱基础上设计了不同区域下不同倾角和间距对光栅 0 级衍射光进行了抑制，并运用 TracePro 软件对系统进行了建模、仿真和给出了杂散光的仿真评价方法。

2 细胞拉曼光谱仪光机系统

本文细胞拉曼光谱仪光学系统采用 Czerny-Turner 型光栅光谱仪结构，如图 1(a)所示。为了满足探测器安装需求的空间，在探测器前加一个平面反射镜 M_1 来改变光路。Zemax 中通过添加多重结构来模拟光栅旋转，在不同波长光栅衍射角与入射角差值一定的前提下，通过转动光栅改变光栅法线的角度，继而连续改变光栅入射角及衍射角^[19]，来实现不同波长的光线追迹，如图 1(b)所示。该光谱仪在单次测量时覆盖的光谱范围大约是 30nm，通过十余次旋转可以覆盖整个光谱范围，采用高精度转台旋转光栅，其角度定位精度可达 0.0001° ，从而保证光谱仪波长精度，使全波段波长测量误差控制 $\pm 0.1\text{nm}$ 。所研制的细胞拉曼光谱仪性能符合宽波段、高分辨率要求，光谱仪指标参数见表 1。

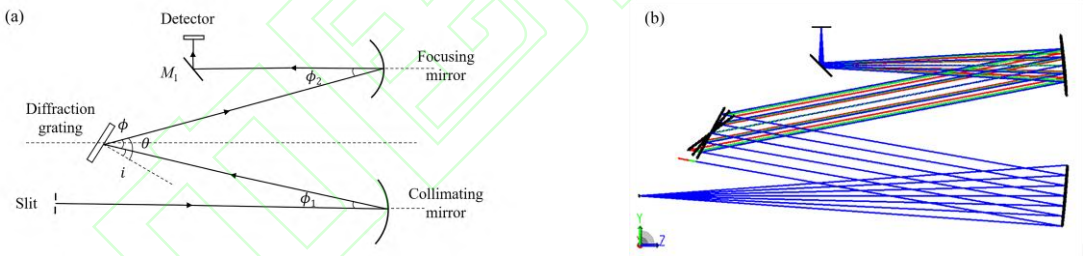


图 1 系统结构图。(a) 示意图；(b) 仿真图

Fig. 1 System structure diagram. (a)schematic diagram;(b)simulation diagram

表 1 拉曼光谱仪性能参数表

Table 1 Performance parameters of the Raman spectrometer

Parameter	Value
Spectral range/nm	530~1000
Spectral resolution/nm	0.06
Slit width/um	50
Grating of groove spacing/(lp/mm)	1/1800
Single pixel size/(um×um)	16×16
Number of valid pixels	1000×200

拉曼光谱仪内部机械结构对光学夹持件进行了可调俯仰的设计，同时采用了高精密转台带动光栅旋转，机械装配图如图 2。外壳内壁与夹持件均做发黑处理，可吸收大部分的漫反

射和散射的杂散光。

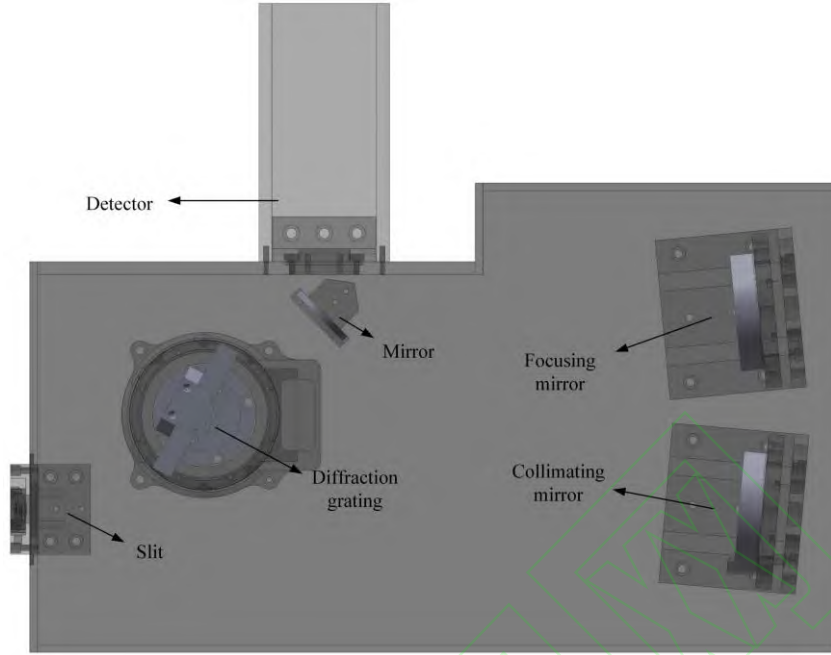


图 2 拉曼光谱仪系统的机械装配图

Fig. 2 Mechanical assembly drawing of the Raman spectrometer system

3 细胞拉曼光谱仪杂散光分析与抑制

3.1 杂散光理论分析

杂散光是指光学系统中通过非预期光路到达像平面的不必要的光线，产生于漏光、光学表面的散射光和机械结构等非光学表面的残余反射，杂散光的存在会增加像面上的噪声，影响成像质量。光谱仪的狭缝尺寸很小，限制了外部光线进入光谱仪内部，光谱仪的杂散光主要来自于光栅非使用级次的衍射光经内部光学元件和仪器内壁、夹持件的多次反射、散射引起的。

根据光学系统杂散光辐射的传输方程：

$$\Phi_{stray} = \Phi_{source} \cdot BSDF_{optics} \cdot GCF_{optics} \cdot \pi \quad (1)$$

式中： Φ_{stray} 为像面上接收到的杂散光能量； Φ_{source} 为杂散光源辐射通量； $BSDF_{optics}$ 为光学系统的散射特性； GCF_{optics} 为光学系统的几何构成因子。从(1)式中可以分析出，抑制系统杂散光可以从三方面考虑：对于光栅多级衍射杂散光，可以采用闪耀光栅降低光栅非使用级次衍射效率，来降低 Φ_{source} 的强度；可以对光机系统内的反射表面进行发黑处理、表面粗糙化的方式来降低光学系统 $BSDF_{optics}$ 的散射特性；可以通过添加光阑、挡板等合理

的机械结构来减小杂散光传输的几何构成因子 GC_{Optics} 。

由于所研制的光谱仪的波段为 $530\text{nm}\sim 1000\text{nm}$ ，根据光栅方程式(2)及系统入射角进行计算可得，本系统中 2 级及以上级次的衍射光不工作，避免了光栅级次重叠带来的影响，但 0 级衍射光对光路的影响不容忽视，光栅方程如下：

$$d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda \tag{2}$$

式中： d 为光栅常数； i 为入射角； θ 为衍射角； m 为衍射级次； λ 为波长。当光栅的转角确定了，不同波长的 0 级衍射光的位置也就确定了，而且光栅 0 级衍射光所占据的能量除主要使用级次 1 级衍射光外是最强的。并根据光栅方程算出，光线经光栅衍射后，只有 0 级和 1 级衍射光出射。

3.2 杂散光抑制

根据表 2 中的系统仿真参数，对光谱仪光机结构在 TracePro 中进行光线追迹，光栅衍射级次主要设置了 1、0 级，且衍射效率设置为 2：1，总衍射效率为 90%，其他光被散射和吸收。

表 2 拉曼光谱仪系统仿真参数表

Table 2 Simulation parameter of the Raman spectrometer

Parameter	Value
Light source	Grid source
Mirror	Reflectivity:95%
Image plane	Perfect absorb
Internal surface of mechanical structure	Absorptivity:90%
Scattering model	ABg function

将仿真软件中光线追迹的随机光线数设置为 2，门槛数值设置为 0.1%，以光栅转动后中心位置对应的波长 568nm 为例，从 $530\text{nm}\sim 606\text{nm}$ 每隔 1nm 设置一个波长，每个波长追迹 80511 条光线，追迹结果如图 3，只显示了非预期光路到达探测器像面上的光线，可以看出主要有 2 条路径的杂散光进入到了探测器像面上：1. 狭缝-准直镜-光栅-仪器壁-像面；2. 狭缝-准直镜-光栅-仪器壁-准直镜-像面。这 2 条路径杂散光为不同波长光栅的 0 级衍射光的作用，为探测器像面的主要杂散光来源。除了这 2 条主要路径外，还有光栅转动后非成像在探测器像面上(此光栅转角下成像在探测器上的波段范围为 $554\text{nm}\sim 582\text{nm}$)的不同波长的 1 级衍射光的影响，大部分照射在了聚焦镜镜座和仪器壁上，且这部分杂散光很少有进入到探测器像面上的，对聚焦镜镜座和仪器壁进行发黑处理可以减弱此路径杂散光。

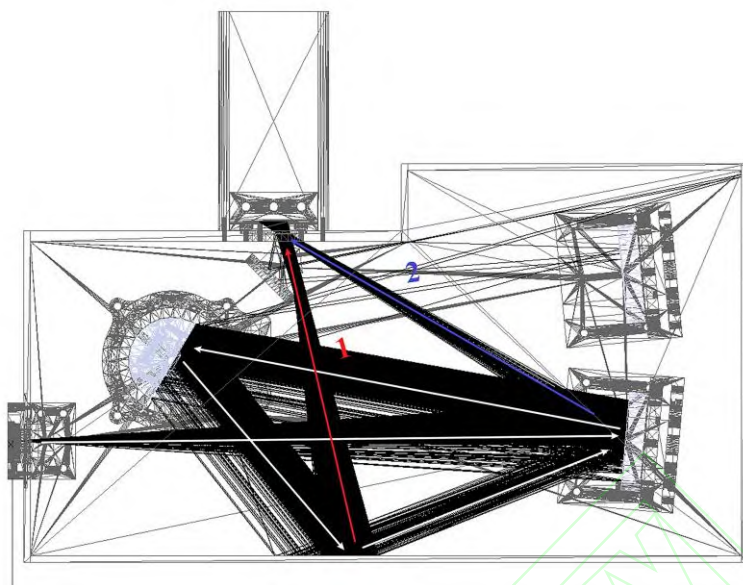


图 3 杂散光主要来源分布

Fig. 3 The main distribution of stray light

同样的光线阈值和光线条数设置，模拟光栅转动不同角度下的光线追迹，列出了波段范围内三个主要波长 530nm、710nm 和 880nm 处的光线追迹图，并在相应光栅转角下设置了多个波长。以 530nm 为例，在此处设置了 515nm、520nm、525nm、530nm、535nm、540nm、545nm 七个波长进行光线追迹，所设置波段范围为该光栅转角下可以成像在探测器上的波长范围。如图 4，图中只显示了 0.1% 的光线，光栅 0 级衍射光照射到仪器壁上形成反射和散射产生大量杂乱光线，甚至有部分光线到达探测器像面上形成杂散光。

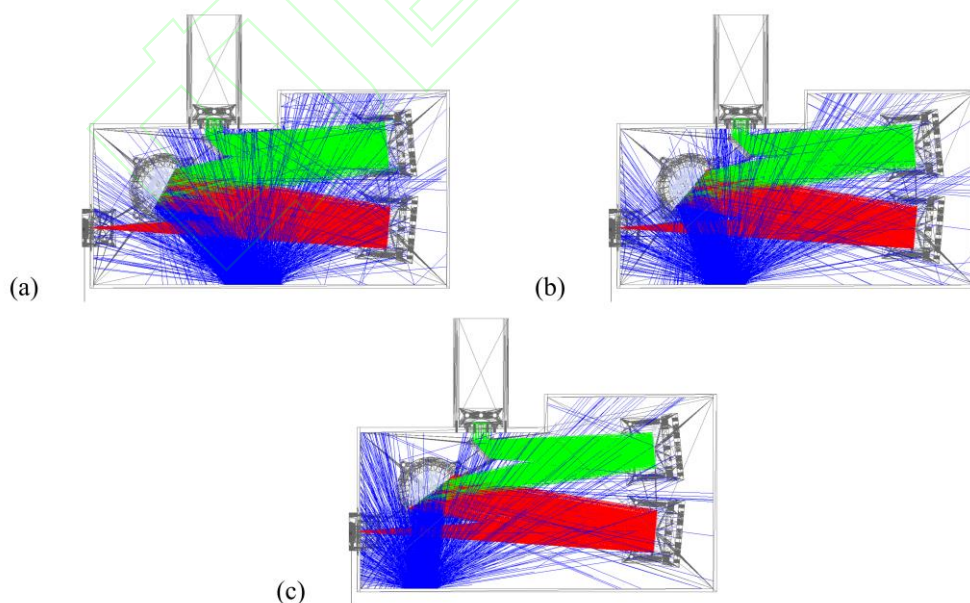


图 4 未添加抑制结构前拉曼光谱仪系统光线追迹图(a)530nm、(b)710nm、(c)880nm

Fig. 4 The ray tracing diagram of Raman spectrometer system before adding the suppression structure

(a)530nm、(b)710nm、(c)880nm

目前抑制光栅 0 级衍射光的最好方法是在光谱仪内部设计光学陷阱，让光栅 0 级衍射光在光学陷阱内多次反射来减小能量直至消失。常规的光学陷阱为等间距倾角一致排列的挡板，挡板越密集杂散光抑制效果越好。由于倾角一致，仅对光栅固定时特定角度入射的光线有很好的效果。考虑到光栅转动，不同光栅转角下光线与仪器壁的夹角不同，杂散光所处区域也不同，在宽波段扫描过程中，对不同光栅转角下杂散光分布特点进行针对性光学陷阱设计，因此提出如图 5(a)所示梯度光学陷阱设计。

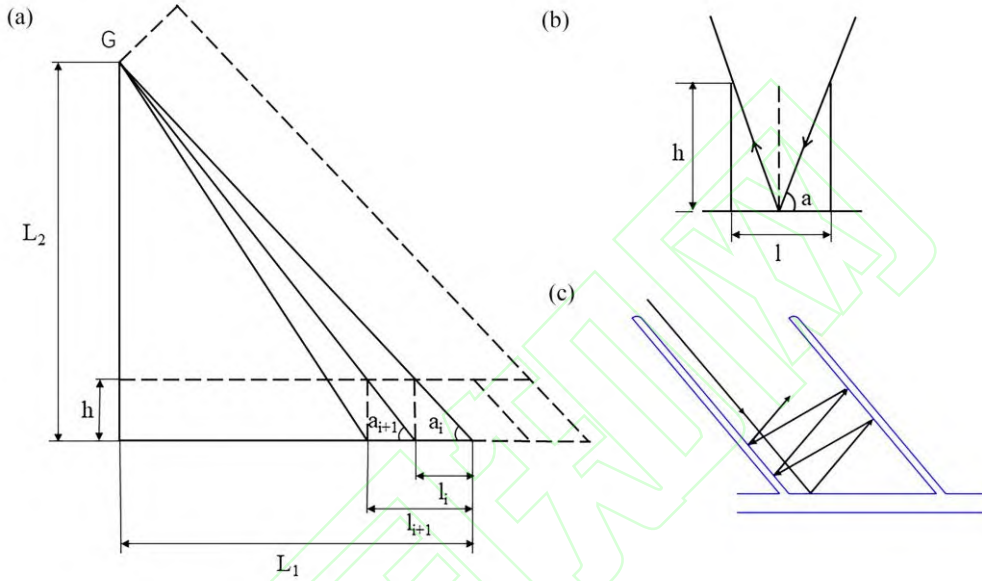


图 5 光学陷阱参数计算示意图

Fig. 5 The schematic diagram of optical trap parameter calculation

G 为光栅中心，光栅转动时光栅的中心位置 G 是不变的，根据这一特点，采用中心位置 G 点与仪器壁不同位置的连线便可以模拟光栅转动过程中不同波长 0 级衍射光在仪器壁该区域的入射情况，根据光线入射角度设计挡板倾角，当挡板在仪器壁方向上的投影大于等于挡板间的间距时，相比于等间距 90° 倾角的光学陷阱，会增加光栅 0 级衍射光线在光学陷阱内的反射次数，从而进一步降低杂散光的出射能量； L_1 为光栅中心处边缘波长 530nm 时光栅 0 级衍射光与仪器壁的交点位置到光栅中心的垂直距离， L_2 为光栅中心到仪器壁的距离， L_1 、 L_2 可通过光路结构算出， $L_1=162\text{mm}$ ， $L_2=175\text{mm}$ ； h 为光学陷阱的高度，挡板的高度越高可增加光线在内部的反射次数，但高度过高会遮挡成像光路光线，由于梯度光学陷阱设计只考虑了光栅中心处的光线，未考虑到整个光栅平面，虚线部分为未对考虑到的部分做出的抑制，正好可以放下两个挡板的位置来确定 $h=28\text{mm}$ ； a_i 为挡板的倾角， l_i 为挡板到右侧边缘的距离，令 $l_0=0$ ，根据图中的几何关系和公式(3)、(4)可以求得倾角 a_i 和距离 l_i 。

$$a_i = \arctan \frac{L_2}{L_1 - l_{i-1}} \quad (3)$$

$$l_i = \frac{h}{\tan a_i} + l_{i-1} \quad (4)$$

当倾角 a_i 大于一定角度时, 挡板分布变密, 挡板数量过多会增加光学陷阱自身重量, 中间部分和光栅中心左侧改为倾角为 90° 等间距的挡板, 如图 5(b)所示, 选取的间距 l 和光线的角度 a (a 取 80° 可避免大部分光线只反射一次就离开光学陷阱) 关系满足下式:

$$l \leq \frac{2h}{\tan a} \quad (5)$$

倾斜的挡板设计可以使光线在其内部进行多次反射, 当光线的入射角度与挡板倾斜角度相同时, 光线在其内部抑制效果最佳, 光线交错平行反射, 为了减小挡板顶部的边缘散射, 将其设计为圆弧形, 如图 5(c)所示。对光学陷阱进行发黑处理, 避免加入光学陷阱后引入新的杂散光, 发黑处理后的表面吸收率大约为 90%, 所以光线在光学陷阱内反射一次杂散光能量就下降一个数量级, 大部分光线都可以满足反射次数大于 5 次, 使杂散光的能量降低到 10^{-5} 以下^[20]。并设计其他抑制杂散光的装置, 在探测器左侧前加上挡板, 避免反射和散射过来的杂散光进入探测器; 在狭缝后加入光阑, 使进入狭缝入射光的数值孔径与准直镜数值孔径匹配。加入杂散光抑制装置后的机械装配图如图 6。

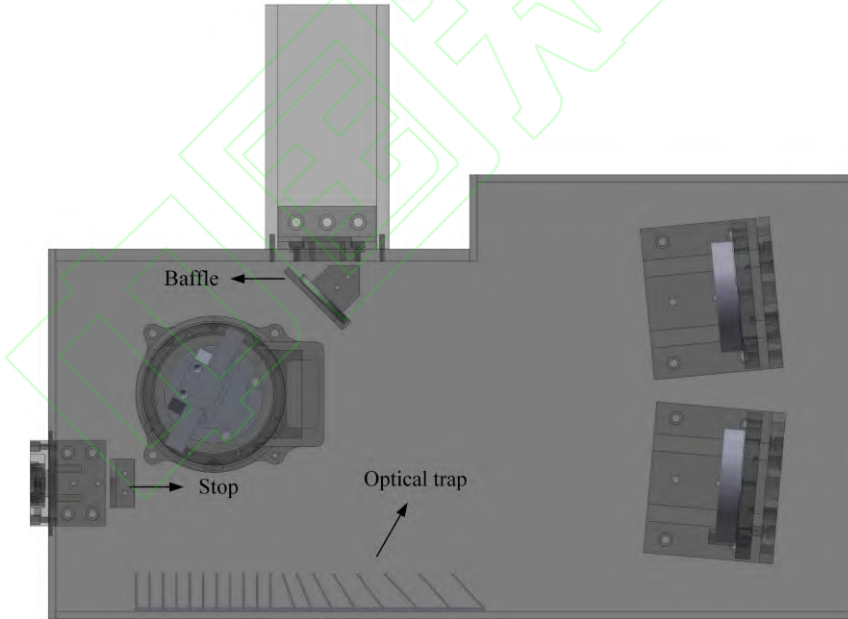


图 6 添加抑制结构后的机械装配图

Fig. 6 Mechanical assembly drawing after adding the suppression structure

3.3 仿真结果评价

对所设计的拉曼光谱仪添加抑制结构后进行光线追迹仿真实验, 追迹结果如图 7, 0 级衍射光照射在仪器壁上的反射和散射明显减少。并通过杂散辐射比来评价光谱仪的杂散光水平, 用非预期光路到达像面的杂散光辐射能量 N_s 与像面上总辐射能量 N_t 的比值来表示:

$$SNR = \frac{N_s}{N_t} \quad (6)$$

根据公式(6)得到的抑制前后不同波长杂散辐射比仿真实验结果如图 8, 可以看出在未添加抑制装置前低波段 530nm~650nm 杂散光影响严重, 是因为光栅 0 级衍射光经仪器内壁反射、散射后直接进入到了探测器; 650nm~950nm 杂散光相对较小是由于探测器前有反射镜镜座的遮挡, 挡住了部分杂散光; 950nm~1000nm 处杂散辐射比略微上升的原因是此时入射光的衍射角过大, 导致系统光通量变小, 部分衍射光入射到仪器壁和镜座上带来了更多的杂散光, 可以通过对仪器壁和镜座进行发黑处理尽量减小这种情况产生的杂散光。在添加光学陷阱、挡板和光阑后, 不同波长处杂散辐射比降低了 12%~47%, 在以 532nm 为激发光源时, 细胞的“指纹谱”对应光谱范围为 550nm~588nm, 此波段抑制效果尤为明显, 但对中间及长波段抑制效果甚微, 且该波段初始杂散辐射比也较小, 同时考虑到加工难易程度和加工成本, 所以只对短波长范围内(530nm~710nm)的光学陷阱抑制结构进行实际加工。图 9 是中心波长 568nm(以 532nm 为激发光源时, 细胞“指纹谱”中心波数对应的波长值)处添加抑制装置前后细胞拉曼光谱仪探测器表面辐照度分析图, 每个蓝色条代表一个波长, 从 558nm~578nm 光谱范围内均等设置了 5 个波长, 除了蓝色部分的其余均为杂散光, 杂散光明显减少, 抑制对拉曼光谱仪应用于细胞内成分拉曼光谱检测上具有重要意义。在全波段范围内相对杂散光水平基本在 10^{-6} 量级, 具有较低杂散光水平。

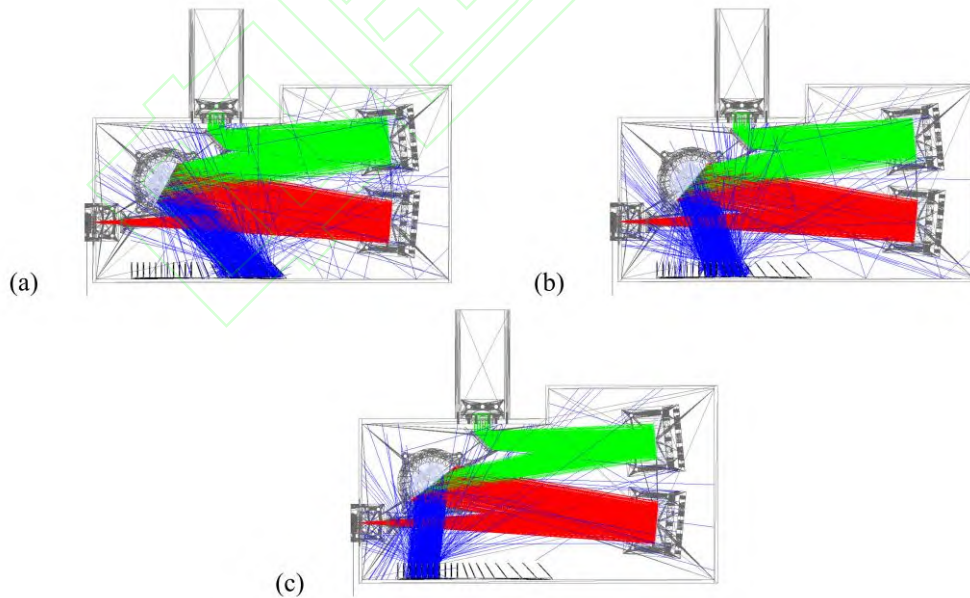


图 7 添加抑制结构前拉曼光谱仪系统光线追迹图(a)530nm、(b)710nm、(c)880nm

Fig. 7 The ray tracing diagram of Raman spectrometer system after adding the suppression structure

(a)530nm、(b)710nm、(c)880nm

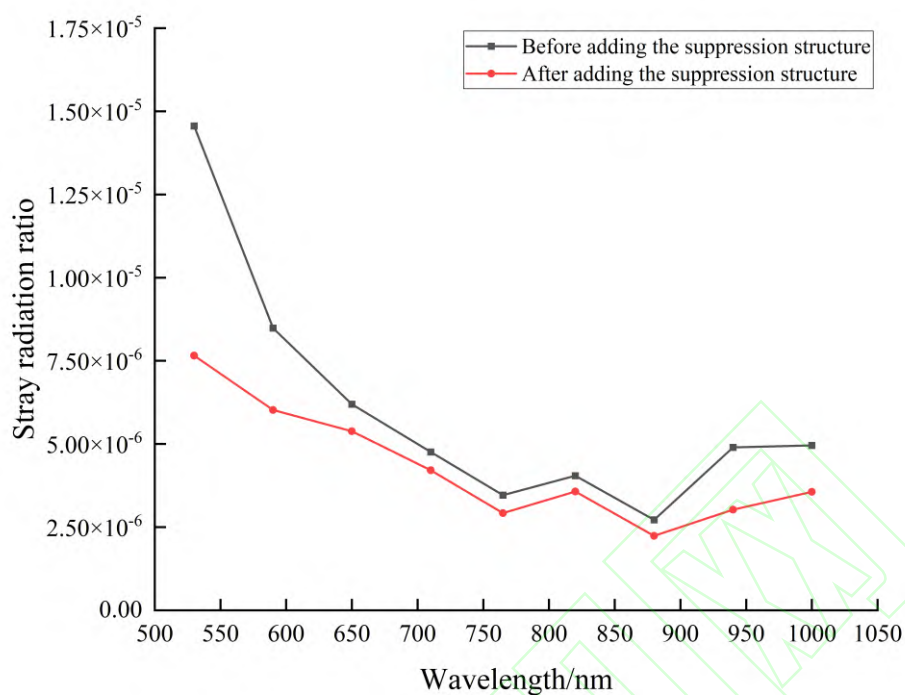


图 8 不同波长的杂散辐射比

Fig. 8 Stray radiation ratios at different wavelengths

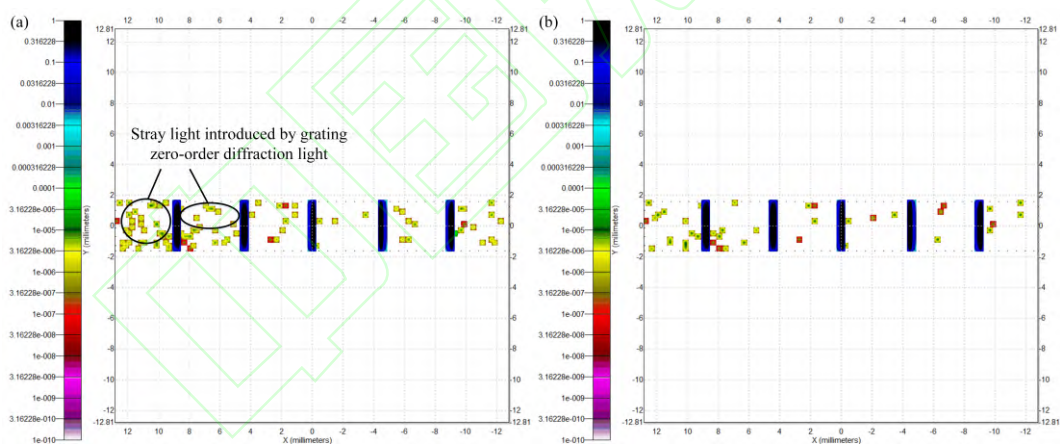


图 9 中心波长 568nm 处添加抑制装置前后探测器表面辐照度分析图

(a)未添加抑制结构、(b)添加抑制结构

Fig. 9 The irradiance analysis of detector surface before and after adding the suppression structure at the central wavelength of 568nm

(a)before adding the suppression structure、(b)after adding the suppression structure

4 结 论

本文利用 TracePro 光学仿真软件对拉曼光谱仪光机结构杂散光进行了分析，重点对光栅转动下光栅 0 级衍射光产生的杂散光进行了抑制，主要通过添加光学陷阱的方法使杂散

光抑制前后不同波长处杂散辐射比降低了 12%~47%，系统整体杂散光水平低于 10^{-6} 量级。对以 532nm 为激发光源时所激发的波段抑制效果明显，杂散光抑制对拉曼光谱仪应用于细胞内成分拉曼光谱检测上具有重要意义。

参考文献

- [1] Chen S Y, Li S Y, Chen C H, et al. Development actuality and trend of spectroscopy technique[J] Applied Chemical Industry, 2017, 46(12): 2441-2446.
陈思媛, 李姝彦, 陈春红, 等. 光谱技术发展现状及趋势[J]. 应用化工, 2017, 46(12): 2441-2446.
- [2] Liu F X, Zhang L H, Huang X. Application of Raman Spectroscopy in Cancer Diagnosis[J] Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(06): 249-259.
刘凤翔, 张礼豪, 黄霞. 拉曼光谱技术在肿瘤诊断中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(06): 249-259.
- [3] Duo X Y, Yasheng P, Liu C Y, et al. Development of Raman spectroscopy and its applications in biomedicine[J] Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(01): 135-142.
郭晓媛, 排尔哈提·亚生, 刘晨阳, 等. 拉曼光谱技术的发展及其在生物医学领域中的应用[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(01): 135-142.
- [4] Lu J, Zhu S S, Cui X Y, et al. Raman spectroscopic imaging technology and its biomedical applications[J] Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(03): 70-79.
路交, 朱姗姗, 崔笑宇, 等. 拉曼光谱成像技术及其在生物医学中的应用[J]. 中国激光, 2018, 45(03): 70-79.
- [5] Qi Y F, Liu Y H, Liu D M. Research progress on application of Raman spectroscopy in tumor diagnosis[J] Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 9-27.
祁亚峰, 刘宇宏, 刘大猛. 拉曼光谱技术在肿瘤诊断上的应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 9-27.
- [6] Li Y H, Yang C, Xue C X, et al. Stray light analysis and control of grating multistage diffraction in HRS[J] Acta Optica Sinica, 2019, 39(06): 391-398.
李员赫, 杨超, 薛常喜, 等. 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[J]. 光学学报, 2019, 39(06): 391-398.
- [7] Liu B, Yu F J, Sun Q, et al. New approach of stray light suppression for probe system of handheld Raman spectrometer[J] Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(01): 219-226.
刘兵, 于凡菊, 孙强, 等. 手持式拉曼光谱仪探头系统的杂光抑制新方法[J]. 中国激光, 2014, 41(01): 219-226.
- [8] Zhang Z Q, Song F M, Zhang Q, et al. Design of Optical System of Aerosol Microbial Particle Counter[J] Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(07): 174-181.
张志强, 宋凤民, 张秦, 等. 气溶胶微生物粒子计数器光学系统设计[J]. 中国激光, 2021, 48(07): 174-181.
- [9] Chen X H, Li B C, Zhu J C, et al. Diffraction Stray Light Analysis and Elimination of VIS-IR Imaging Spectrometer Based on Multi-Zone Grating[J] Acta Optica Sinica, 2021, 41(18): 201-207.

- 陈新华, 李碧岑, 朱嘉诚, 等. 基于分区光栅的可见-红外光谱成像系统的衍射杂散光分析及抑制方法[J]. 光学学报, 2021, 41(18): 201-207.
- [10] Li H W, Hao P, Wu Y H. Generation and suppression of stray light in UV-vis spectrometer based on micro-silicon-slit[J] Optics and Precision Engineering, 2011, 19(04): 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(04): 737-742.
- [11] Liu K. Research on the key technology of the miniature spectrometer and its application system[D] Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
刘康. 微型光谱仪关键技术及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [12] Lee J A, Lee J H. Stray Light Analysis of a Compact Imaging Spectrometer for a Microsatellite STSAT-3[J]. Korean Journal of Optics and Photonics, 2012, 23(4): 167-171.
- [13] Merschdorf M, Platos L, Petruck P, et al. Evaluation of Straylight Characteristics of the Sentinel-5 NIR Spectrometer Optics[C]. International Conference on Space Optics (ICSO), 2018.
- [14] Zhou H J, Liu W Q, Si F Q, et al. Stray light suppression of space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas[J] Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2331-2337.
周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2331-2337.
- [15] 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(08): 129-136.
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(08): 129-136.
- [16] Zhou Z, Chen H, Zhang Y C, et al. The improved suppression and analysis of stray light in the miniature Raman spectrometer[J] Spectroscopy and spectral analysis, 2017, 37(03): 772-777.
周昭, 陈和, 张寅超, 等. 微型拉曼光谱仪杂散光分析及抑制方法的改进[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(03): 772-777.
- [17] Wu S. Design and analysis of optical system of miniature Czerny-Turner grating spectrometer[D] Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
吴骥. 微型 Czerny-Turner 光栅光谱仪的光学设计与分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [18] Du S, Zhang G Y, Han X X, et al. Design of wide-spectrum high-resolution spectral analysis system[J] Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(08): 254-260.
杜杉, 张国玉, 韩欣欣, 等. 宽光谱高分辨率光谱分析系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(08): 254-260.
- [19] Chi M B, Han X X, Xu Y, et al. Broad band and high resolution scanning spectrum calibration technology[J] Chinese Optics, 2020, 13(02): 249-257.
迟明波, 韩欣欣, 徐阳, 等. 宽谱段高分辨扫描光谱定标技术[J]. 中国光学, 2020, 13(02): 249-257.
- [20] Mei C. The study of stray light analysis and suppressing technology in large pupil mulit-spectral zoom optical system[D] Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechnics, Chinese Academy of Science, 2014.
梅超. 大口径多光谱变焦光学系统杂散光分析与抑制技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2014.