

激光与光电子学进展

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光学系统先进制造技术重点实验室, 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。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 O439; O433.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221607

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*}

¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

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

Abstract Spontaneous Raman spectroscopy exhibits a broad spectrum and high resolution but weak signals; thus, the influence of stray light cannot be ignored. In this study, the mechanism of stray light generation in a self-designed single-cell Raman spectrometer system under gyration rotation is investigated. Moreover, the stray light suppression method is established, particularly the design method for eliminating a stray light optical trap in a multi-structure. The effectiveness of stray light suppression is verified using TracePro software simulation. The analysis results show that after stray light suppression the stray radiation ratios at different wavelengths decrease by 12%–47%, and the overall stray light level of the cell Raman spectrometer is lower than 10^{-6} . The spectrometer, after the stray light suppression, is valuable for detecting weak light signals.

Key words spectroscopy; single-cell Raman spectrometer; optical trap; TracePro; stray light suppression

1 引言

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 $600\sim 1800\text{ cm}^{-1}$ 范围内,考虑到准确识别细胞中的拉曼谱峰信息,需满足全波段 0.06 nm 的光谱分辨率。常用的激发光源为 532 nm 、 785 nm , 532 nm 的激发光源能量高,但有荧光背景, 785 nm 的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]。杂散光会导致弱信号探测系统的灵敏度和信噪比降

收稿日期: 2022-05-16; 修回日期: 2022-05-25; 录用日期: 2022-06-02; 网络首发日期: 2022-06-12

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)、白求恩医学工程与仪器中心基金(BQEGCZX2021010)、中国科学院科研仪器研制项目(YJKYYQ20210035)

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

低^[7-8],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。本课题组基于微机电系统(MEMS)工艺加工了高精度微硅狭缝,该狭缝刀口厚度约为 10 μm ,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]。因此将着重针对宽光谱、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 Lee 等^[12]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 等^[13]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周海金等^[14]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杨晋等^[15]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;北京理工大学周昭等^[16]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 these 抑制光栅非使用级次衍射光的方法均针对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,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

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空间的需求,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],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 30 nm,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。

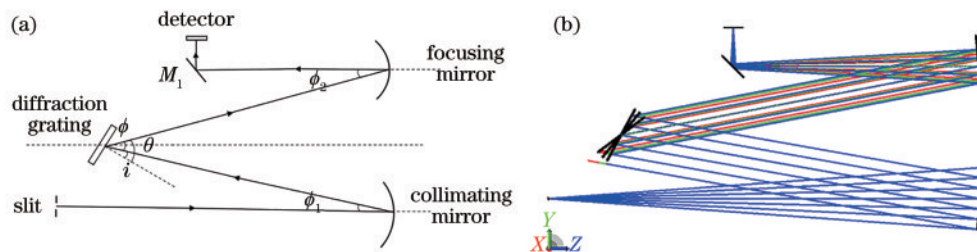


图 1 系统结构。(a)示意图;(b)仿真图

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

表 1 拉曼光谱仪性能参数

Parameter	Value
Spectral range /nm	530~1000
Spectral resolution /nm	0.06
Slit width / μm	50
Grating of groove spacing /($\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$)	1/1800
Single pixel size /($\mu\text{m}\times\mu\text{m}$)	16 \times 16
Number of valid pixel /($\text{pixel}\times\text{pixel}$)	1000 \times 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,同时采用了高精密切转台带动光栅旋转,

机械装配图如图 2 所示。外壳内壁与夹持件均作发黑处理,可吸收大部分的漫反射和散射的杂散光。

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

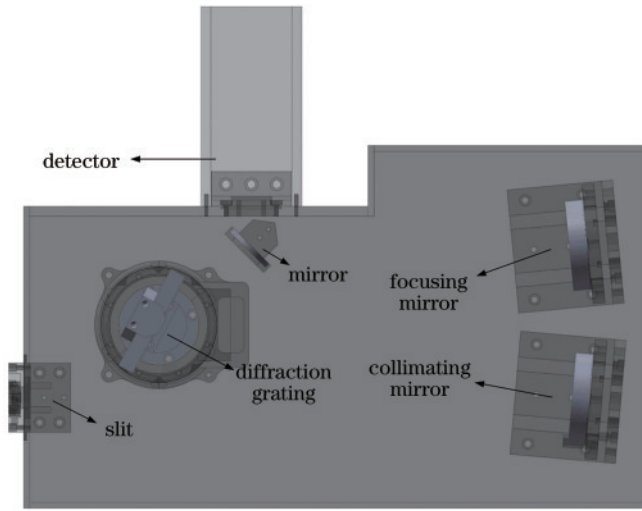


图 2 拉曼光谱仪系统的机械装配图

Fig. 2 Mechanical assembly drawing of the Raman spectrometer system

壁、夹持件的多次反射和散射。

光学系统杂散光辐射的传输方程可表示为

$$\Phi_{\text{stray}} = \Phi_{\text{source}} \cdot B_{\text{optics}} \cdot G_{\text{optics}} \cdot \pi, \quad (1)$$

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； B_{optics} 为光学系统的散射特性； G_{optics} 为光学系统的几何构成因子。由式(1)可知，抑制系统杂散光可以从 3 方面考虑：对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} ；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 B_{optics} ；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 G_{optics} 。

由于所研制的光谱仪的波段为 530~1000 nm，根据光栅方程及系统入射角计算可得，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，光栅方程为

$$d(\sin i + \sin \theta) = m\lambda, \quad (2)$$

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，不同波长的 0 级衍射光的位置也确定，光栅 0 级衍射光所占据的能量仅次于 1 级衍射光。根据光栅方程计算，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 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 级、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。

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 568 nm 为例，在 530~606 nm 每隔 1 nm 设置一个波长，每个波长追迹 80511 条光线，追迹结果如图 3 所示，只显示了非预期光路到达探测器像面上的光线，

表 2 拉曼光谱仪系统仿真参数

Table 2 Simulation parameters of the Raman spectrometer

Parameter	Value
Light source	Grid source
Mirror reflectivity / %	95
Image plane	Perfect absorb
Absorptivity of internal surface of mechanical structure / %	90
Scattering model	ABg function

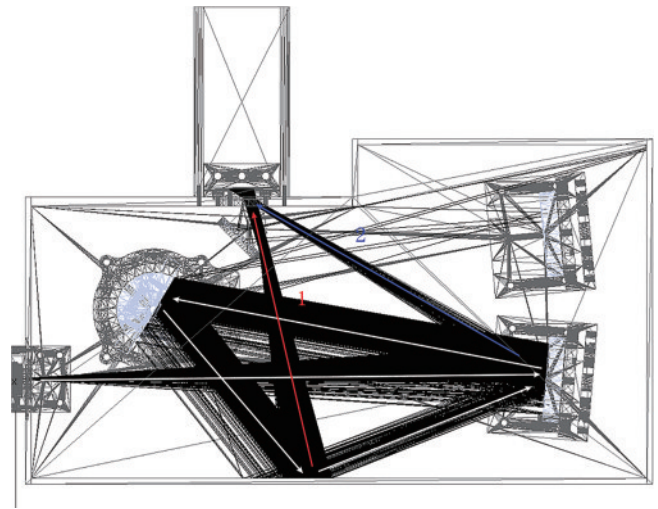


图 3 杂散光主要来源分布

Fig. 3 Main distribution of stray light

可以看出主要有 2 条路径的杂散光进入探测器像面：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 0 级衍射光的作用，为探测器像面的主要杂散光来源。除这 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 554~582 nm）的不同波长的 1 级衍射光影响，大部分照射在聚焦镜镜座和仪器壁上，这部分杂散光很少进入到探测器像面，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。

设置同样的光线阈值和光线条数，模拟光栅转动不同角度下的光线追迹，列出了波段范围内 3 个主要波长 530 nm、710 nm、880 nm 的光线追迹图，在相应光栅转角下设置了多个波长，如图 4 所示。以 530 nm 为例，在此处设置了 515 nm、520 nm、525 nm、530 nm、535 nm、540 nm、545 nm 等 7 个波长进行光线追迹，所设置的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。图 4 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。

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

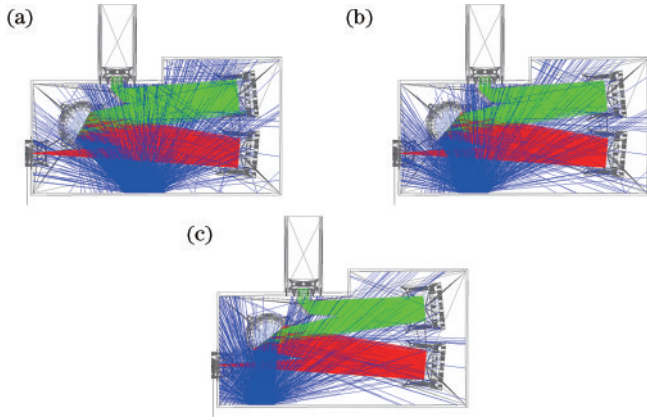


图 4 未添加抑制结构前拉曼光谱仪系统光线追迹图。

(a) 530 nm; (b) 710 nm; (c) 880 nm

Fig. 4 Ray tracing diagrams of Raman spectrometer system before adding the suppression structure. (a) 530 nm; (b) 710 nm; (c) 880 nm

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,因此梯度光学陷阱设计,如图 5(a)所示。

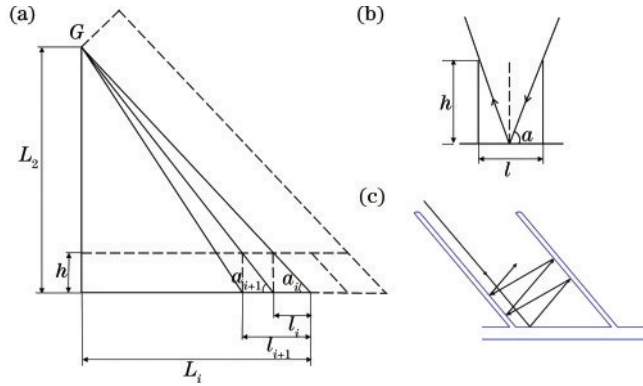


图 5 光学陷阱参数计算示意图。(a)光学陷阱总体设计;(b)90°倾角光学陷阱;(c)非 90°倾角光学陷阱

Fig. 5 Schematic diagrams of optical trap parameter calculation. (a) Overall design of optical trap; (b) 90° angle optical trap; (c) non-90° angle optical trap

G 为光栅中心,光栅转动时光栅的中心位置 G 不变,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为530 nm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 mm, $L_2=175$ 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作出抑制,正好可以放下2个挡板的位置来确定 $h=28$ 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 5 的几何关系和如下公式可以求得倾角 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:

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

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 所示。

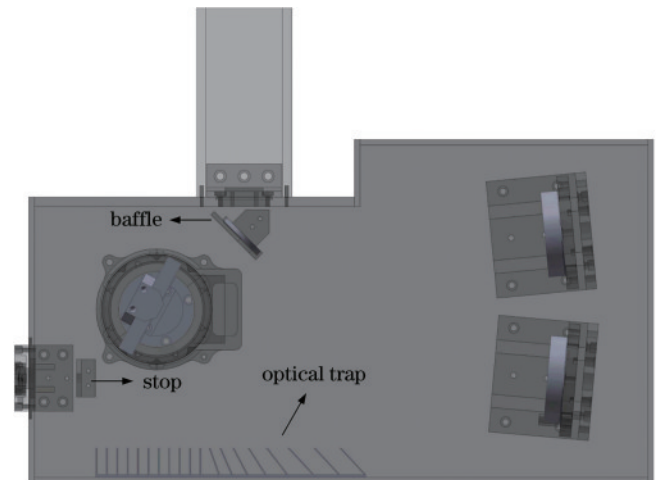


图 6 添加抑制结构后的机械装配图

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 所示,0 级衍射光照射在仪器壁上的反射和散射明显减少。用杂散辐射比 f_{SNR} 来评价光谱仪的杂散光水平:

$$f_{\text{SNR}} = N_s/N_t, \quad (6)$$

式中: N_s 为非预期光路到达像面的杂散光辐射能量; N_t 为像面上总辐射能量。

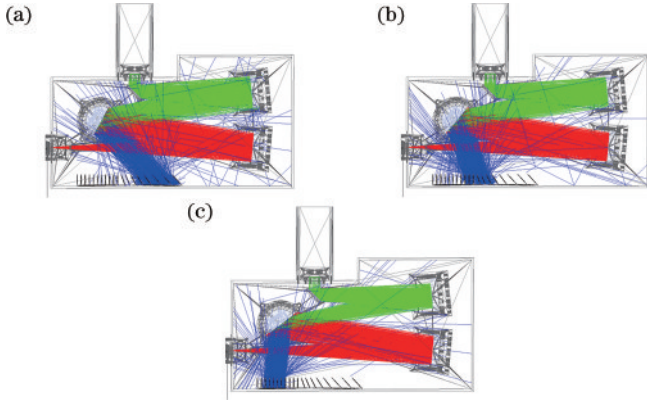


图 7 添加抑制结构后拉曼光谱仪系统光线追迹图。

(a) 530 nm; (b) 710 nm; (c) 880 nm

Fig. 7 Ray tracing diagrams of Raman spectrometer system after adding the suppression structure. (a) 530 nm; (b) 710 nm; (c) 880 nm

根据式(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 所示。由图 8 可知,未添加抑制装置前低波段 530~650 nm 杂散光影响严重,因为光栅 0 级衍射光经仪器内壁反射、散射后直接进入探测器;650~950 nm 杂散光相对较小,因为探测器前有反射镜镜座的遮挡,挡住了部分杂散光;950~1000 nm

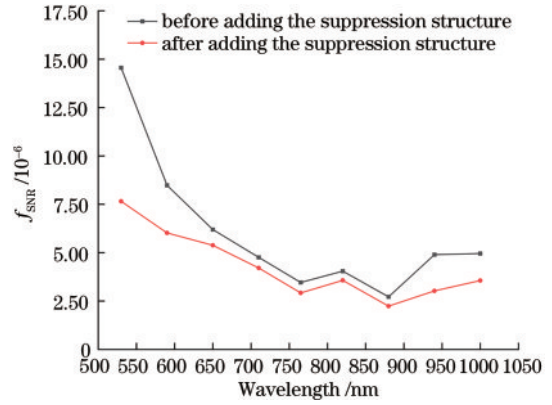


图 8 不同波长的杂散辐射比

Fig. 8 Stray radiation ratios at different wavelengths

处杂散辐射比略微上升,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少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%,以 532 nm 为激发光源时,细胞的“指纹谱”对应的光谱范围为 550~588 nm,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,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(530~710 nm)的光学陷阱抑制结构进行实际加工。中心波长为 568 nm(以 532 nm 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,如图 9 所示。每个颜色条代表一个波长,在 558~578 nm 光谱范围内均等设置了 5 个波长,除了颜色部分,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具

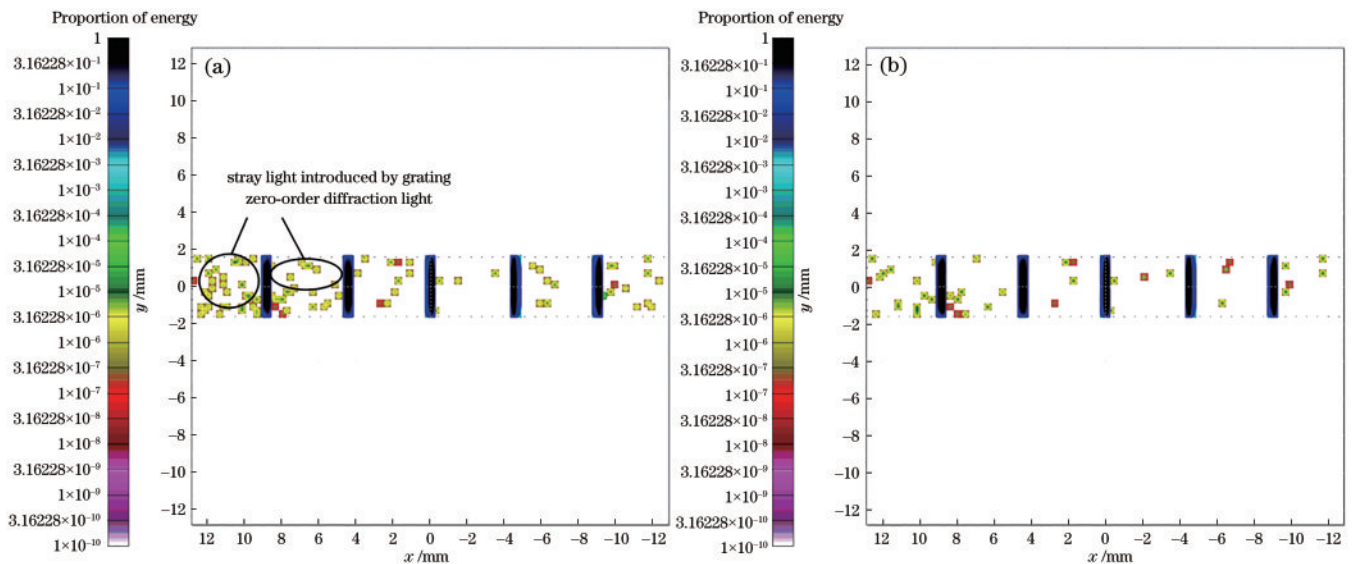


图 9 中心波长为 568 nm 处添加抑制装置前后探测器表面辐照度分析图。(a) 未添加抑制结构; (b) 添加抑制结构

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

(a) Before adding the suppression structure; (b) after adding the suppression structure

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。

4 结 论

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 532 nm 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具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 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.
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.
- [2] 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(6): 0617016.
Liu F X, Zhang L H, Huang X. Application of Raman spectroscopy in cancer diagnosis[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(6): 0617016.
- [3] 郭晓溪, 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(1): 135-142.
Guo 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(1): 135-142.
- [4] 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(3): 0307007.
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(3): 0307007.
- [5] 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): 220001.
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): 220001.
- [6] 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(6): 0630001.
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(6): 0630001.
- [7] 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(1): 0115001.
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(1): 0115001.
- [8] 张志强, 宋凤民, 张秦, 等. 气溶胶微生物粒子计数仪光学系统设计[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0707002.
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(7): 0707002.
- [9] 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): 1822003.
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): 1822003.
- [10] 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.
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(4): 737-742.
- [11] 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.
Liu K. Research on the key technology of the miniature spectrometer and its application system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 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[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11180: 111802R.
- [14] 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.
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.
- [15] 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.
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.
- [16] 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(3): 772-777.
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(3): 772-777.
- [17] 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.
Wu S. Optical design and analysis of micro Czerny-Turner grating spectrometer[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [18] 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(8): 083003.
- 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(8): 083003.
- [19] 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(2): 249-257.
- Chi M B, Han X X, Xu Y, et al. Broad band and high resolution scanning spectrum calibration technology[J]. Chinese Optics, 2020, 13(2): 249-257.
- [20] 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: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2014.
- Mei C. The study of stray light analysis and suppressing technology in large pupil multi-spectral zoom optical system[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014.