

# 镜面散射对显微物镜杂散光特性影响的仿真研究

胡慧杰<sup>1,2,3</sup> 巩岩<sup>2</sup> 武晓东<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院苏州生物医学工程技术研究所江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 杂散光是影响显微系统成像质量的重要因素之一,在光学镜面加工及光学镜面清洁过程中会带来不同程度的镜面散射,这部分镜面散射所带来的杂散光影响不可忽视。以放大倍率为20×,数值孔径为0.49的显微物镜为基础,利用TracePro光学分析软件,建立了黑斑法测量显微物镜杂散光系数的仿真模型,对照明数值孔径、照明视场以及黑斑位置三个影响杂散光测量条件的因素进行仿真探究,验证了模型的可行性。在此基础上,研究了表面粗糙度(2、5、10、20 nm)和表面颗粒污染水平(230、500、750)对不同NA显微物镜杂散光的影响。仿真结果表明,表面粗糙度大于10 nm或表面洁净度大于500均会严重影响显微物镜像面杂散光的分布,降低显微物镜的成像质量,尤其对大NA显微物镜影响更为明显。因此,为控制镜面散射对显微系统性能的影响,应提高镜面加工工艺并保持镜面清洁。

**关键词** 成像系统; 杂散光; 仿真测量; 表面粗糙度; 颗粒污染水平

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.101104

## Simulation about Influence of Specular Scattering on Microscope Objective Stray Light Characteristics

Hu Huijie<sup>1,2,3</sup> Gong Yan<sup>2</sup> Wu Xiaodong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jiangsu Provincial Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Stray light is one of the important factors affecting the image quality of microscopy systems. During the processing of optical elements, stray light caused by specular scattering can not be ignored. Taking microscope objectives with 20× magnification and NA=0.49 as a typical example and using the optical analysis software TracePro, a simulation model of measuring veiling glare of microscope objectives is built up. Through analyzing the factors affecting the model with different illuminance numerical apertures, different illuminance fields and different black spot positions, the feasibility of the model is verified. On this basis, the stray light intensity on the image plane with different NA microscope objectives is simulated quantitatively under the condition of different surface roughness (2, 5, 10, 20 nm) and different cleanliness levels (250, 500, 750). The results indicate that the surface roughness greater than 10 nm and the cleanliness level higher than 500 will change the stray light intensity distribution on the image plane, and affect the system performance significantly, especially for those microscope objectives with large NA. It is of critical importance to keep the surface of optical elements clean and to improve the processing technology of optical elements.

**Key words** imaging systems; stray light; simulation; roughness; cleanliness levels

**OCIS codes** 110.0180; 290.2648; 290.5880; 290.5850

收稿日期: 2015-04-28; 收到修改稿日期: 2015-06-03; 网络出版日期: 2015-09-23

基金项目: 国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2013-1)

作者简介: 胡慧杰(1990—),男,硕士研究生,主要从事显微物镜杂散光分析方面的研究。

E-mail: huhuijie1230@163.com

导师简介: 武晓东(1968—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事医用光学技术、医用激光技术等方面的研究。

E-mail: wuxiaodong2000@hotmail.com(通信联系人)

## 1 引言

光学系统的杂散光是指进入光学系统并在系统像面上引起有害光照度的非成像光线。杂散光来自系统视场的外部或内部,使像的对比度和调制传递函数(MTF)下降、清晰度变差,导致彩色饱和度下降和彩色失真,严重影响了光学系统的成像质量<sup>[1-3]</sup>。对成像质量要求高的荧光显微系统<sup>[4-6]</sup>而言,分析并消除杂散光至关重要。日本NHK技术研究所Matsuda等<sup>[7]</sup>为了评价电视镜头的质量,建立了杂散光系数测量装置并进行了实验;Martin等<sup>[8-9]</sup>提出了测量杂散光的小光源法并引入杂散光扩散函数的概念;刘瑞祥等<sup>[10]</sup>讨论杂光系数及其测量方法,分析了国外测量杂散光系数的方案;张国玉等<sup>[11-12]</sup>对杂散光测试原理和装置进行了理论分析,并提出采用差动线路及微型计算机的改进措施;上海光学仪器研究所和长春光学精密机械与物理研究所提出了一种测量显微物镜杂散光的装置,讨论了影响杂散光测试的因素,测量并分析了不同类型显微物镜的杂散光系数<sup>[13-14]</sup>。

显微物镜的光学表面不是理想的光滑表面,具有一定的粗糙度,存在划痕、灰尘或指纹等污染颗粒,胶合元件的胶合面可能存在胶合剂等物质,因此在工作中会发生散射。Spyak等<sup>[15]</sup>对非理想镜面的散射特性进行了大量的研究,通过实测表面散射特性,拟合米氏散射模型,得出镜面散射与表面粗糙度、表面颗粒污染存在很大的关系。但是少有相关的研究工作能结合现有的镜面加工工艺和镜面清洁工艺,应用于研究显微物镜光学表面散射特性。

本文通过黑斑法建立显微物镜杂散光测量模型,针对光学镜面的加工工艺和镜面清洁水平,对不同数值孔径(NA)显微物镜杂散光进行分析,研究表面粗糙度(2、5、10、20 nm)和表面颗粒污染水平(230、500、750)对显微物镜杂散光系数的影响。

## 2 显微物镜系统杂散光分析模型

### 2.1 杂散光分析原理

黑斑法<sup>[12]</sup>是一种通过测量张角近似为 $\pi$ 的亮背景所产生的轴上点附近区域内杂散光的积分值来评估光学系统杂散光性能的常用测量方法。采用这一方法测量时,杂散光系数(VGI)定义为:在亮度均匀的扩展视场中放置一个黑斑,经被测物镜成像后,黑斑成像区域上的光照度与移去黑斑后像面同一处的光照度之比,即

$$f_{VGI} = \frac{E_b}{E_w}, \quad (1)$$

式中 $E_b$ 为有黑斑时黑斑成像处的光照度, $E_w$ 为移去黑斑的光照度,其值为成像光束和非成像光束产生的照度之和。

国家标准GBT 10988-2009<sup>[16]</sup>规定,采用图1所示装置测量显微物镜杂散光系数。均匀扩展光源1经过漫射屏10,通过匹配被测显微物镜9的物方数值孔径,照明整个被测显微物镜物方视场,将带黑斑的基板放在黑区2成像在像面接收检测器组7的入瞳光阑面8上,最后经过滤色片4及漫射屏5由光电倍增管6给出光照度数据 $E_b$ ;换上不带黑斑的基板后,测量系统光照度数据 $E_w$ 。

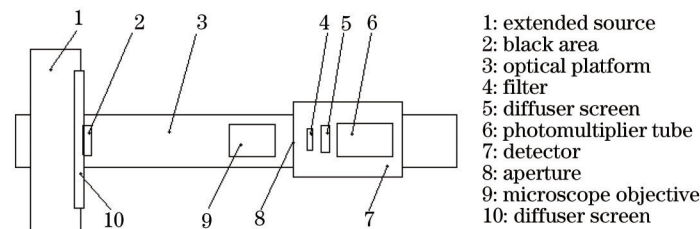


图1 显微物镜杂散光测量装置

Fig.1 Experimental setup for measuring glare of microscope with finite object distance

针对图1中的显微物镜杂散光测量装置,利用TracePro软件建模仿真,仿真参数设置如下:光源为朗伯体面光源,波长为 $0.5461 \mu\text{m}$ ,设定光线数为 $10^8$ 条,总能量为 $1 \text{ lm}$ ;TracePro不能追迹低于阈值的光线,因此需要调低光线追迹阈值,设置为 $5 \times 10^{-10} \text{ lm}$ ,同时,参照文献[17]将双向反射分布函数(BRDF)散射转为TracePro准幂函数倒数ABg模型,将机械零件表面和光学元件表面的特性作以下设定:

1) 机械零件表面涂层为 AeroglazeZ-306<sup>[18]</sup>, 吸收率为 0.96, 表面反射率为 0.02, 表面散射模型 BRDF 参数为  $A=0.007, B=0.1, g=0$ ;

2) 不带黑斑的基板透射率为 100%, 带黑斑的基板黑斑表面吸收率为 99.9%, 表面透射率为 0.1%;

3) 透镜光学表面吸收率为 0.01, 反射率为 0.01, 透射率为 0.97972, 表面散射模型 BRDF 参数为  $A=1 \times 10^{-5}, B=0.015, g=2$ ; 双向透射分布函数(BTDF)参数为  $A=1 \times 10^{-5}, B=0.01, g=2$ 。

重点采样是一种蒙特卡罗技术, 设置重点采样面之后, 使得光线向特定的方向产生和传播, 增大光线朝重点采样面的采样概率。由于显微物镜杂散光在传输过程中衰减程度较强, 需要对整个光学系统的特定表面设置重点采样<sup>[9]</sup>, 以达到用较少的人射光线实现仿真的目的。本文根据重点采样的设置原则, 同时结合实际情况(主要是数值孔径匹配和照明视场大小匹配), 对光源面设置重点采样, 采样目标为显微物镜物方视场; 对所有透镜通光表面设置重点采样, 目标为像面。

根据以上设置, 利用 TracePro 对 20 倍、 $NA=0.49$  显微物镜<sup>[20]</sup>进行杂散光追迹, 仿真结果如图 2、图 3 所示, 其中图 2 为光线追迹图, 图 3 对应有无黑斑时像面的照度分布情况。

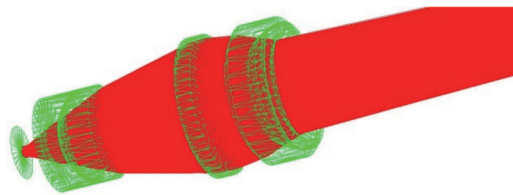


图 2 20 倍、 $NA=0.49$  显微物镜杂散光测量装置仿真模型的建模

Fig.2 Simulation model of 20×  $NA=0.49$  microscope objective for glare measuring

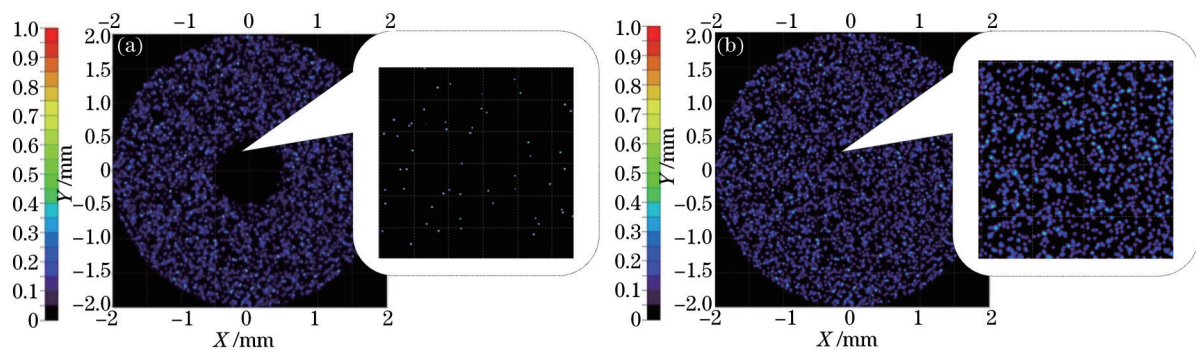


图 3 (a) 带黑斑基板像面照度分布及局部放大; (b) 不带黑斑基板像面照度分布及局部放大

Fig.3 Illuminance distribution of image surface and local amplification of base plate (a) with black spot and (b) without black spot

由图 3 可知, 黑斑像面能量分布呈现圆环状, 符合黑斑位于视场中心的情况, 相比于理想显微物镜黑斑成像像面中心, 像面中心局部放大发现存在少量分布凌乱的微弱光线, 这些光线即为杂散光。由国家标准 GBT 10988-2009 可知, 检测器组小孔光阑的尺寸不超过黑斑像面半径大小的 1/5, 分析数据得黑斑像面 1/5 区域的杂散光能量  $E_b=5.21 \times 10^{-6}$  lm, 无黑斑像面 1/5 区域的总能量  $E_w=2.02 \times 10^{-4}$  lm, 杂散光系数  $f_{vci} \approx 2.58\%$ 。

## 2.2 模型可行性验证分析

为探究测试条件对测量结果的影响, 进一步验证仿真模型的可行性, 采用显微物镜放大倍率为 20×, 数值孔径为 0.49, 基于黑斑法仿真模拟照明数值孔径、照明视场大小以及黑斑相对视场中心的位置三个测试条件对测量结果的影响, 仿真结果如表 1~3 所示。其中, 表 1 模拟条件为全视场照明、黑斑处于视场中心; 表 2 模拟条件为照明数值孔径为 0.49、黑斑处于视场中心; 表 3 模拟条件为全视场照明、照明数值孔径为 0.49。

由表 1 和表 2 可知, 显微物镜杂散光系数随照明数值孔径的增大而增大, 随照明视场范围的增大而增大, 杂散光系数数量级及变化趋势与上海光学仪器研究所实验结果<sup>[11]</sup>大体一致, 由此可得显微物镜杂散光测量仿真模型可行。由表 3 可知, 抛开边缘视场, 黑斑越靠近视场边缘, 显微物镜杂散光系数越小, 最大的杂散光系数来源于中心视场, 表明中心视场的杂散光特性具有代表性, 能够体现一个显微光学系统最大的杂散光水平, 这也是国内外普遍使用黑斑处于中心来衡量显微物镜杂散光系数的原因。

表1 显微物镜不同数值孔径匹配比值下的杂散光系数

Table 1 VGI of microscope objective with different illuminance numerical apertures

NA of condenser / NA of objective	VGI /%
2/3	1.68
1	2.58
4/3	2.89

表2 显微物镜不同照明视场下的杂散光系数

Table 2 VGI of microscope objective with different illuminance fields

Size of condenser view / size of objective view	VGI /%
2/3	1.21
1	2.58
4/3	4.34

表3 黑斑在视场中不同位置条件下的杂散光系数

Table 3 VGI of microscope objective with different black spot positions

Position of black spot in the field of view	VGI /%
0	2.58
0.3	2.19
0.5	1.71
0.7	1.15
0.9	1.82

### 3 光学元件表面散射对杂散光系数的影响

镜面加工工艺和镜面清洁水平的缺陷导致实际显微物镜的镜面并不是标准的透射表面,可以将光学镜面 BRDF 分成两部分,洁净镜面 BRDF 和污染镜面 BRDF。其中洁净镜面的散射主要与镜面加工的粗糙度相关<sup>[21]</sup>,表面的粗糙特性直接影响散射测量光斑的光强<sup>[22]</sup>,可以通过洁净镜面表面散射的测量来确定表面粗糙度的大小,进而探究表面粗糙度对杂散光系数的影响;颗粒污染散射主要与镜面的污染水平相关,可以通过污染镜面表面散射的测量来确定表面颗粒污染的大小,进而探究表面颗粒污染对杂散光系数的影响。

#### 3.1 镜面粗糙度对杂散光系数的影响

粗糙度是指表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度,粗糙度越小,表面越光滑。洁净镜面上由表面粗糙度引起的半球空间内的散射量(TIS)可表示为<sup>[23]</sup>

$$f_{\text{TIS}} = 1 - \frac{R}{R_0} = 1 - \exp[-(4\pi\delta/\lambda)^2] \approx (4\pi\delta/\lambda)^2, \quad (2)$$

式中  $f_{\text{TIS}}$  为半球空间内总的散射量,反映散射面总反射率;  $\delta$  为表面粗糙度;  $\lambda$  为工作波长。

在分析中,分别选取镜面粗糙度为 2、5、10、20 nm,系统工作波长为 546.1 nm。根据镜面加工工艺,粗糙度远小于入射光的波长且没有灰尘污染的洁净镜面散射满足线性位移不变性,可以采用修正的哈维模型描述散射特性,可表示为

$$f_{\text{BRDF}}(\theta, \theta_0) = b_0 \left[ 1 + \left( \frac{\sin \theta - \sin \theta_0}{L} \right)^2 \right]^{\frac{s}{2}}, \quad (3)$$

式中  $\theta, \theta_0$  分别为散射角和反射角;  $s$  为倾斜因子;  $L$  为翻转角;  $b_0$  为常数,可由公式  $f_{\text{TIS}} \approx \frac{2\pi b_0 L^s}{s+2}$  计算得到。

将测量到的 BRDF 散射模型转换成 TracePro 中的 ABg 模型,不同粗糙度对应的 ABg 散射模型参数<sup>[24]</sup>如表 4 所示。

表4 不同粗糙度对应的 ABg 模型参数

Table 4 ABg model parameters with different roughness

Roughness /nm	A	B	g	TIS
2	$6.355 \times 10^{-5}$	$1.188 \times 10^{-5}$	1.689	0.0011156
5	$3.975 \times 10^{-4}$	$1.188 \times 10^{-5}$	1.689	0.00697
10	$1.589 \times 10^{-3}$	$1.188 \times 10^{-5}$	1.689	0.0279
20	$6.355 \times 10^{-3}$	$1.188 \times 10^{-5}$	1.689	0.11156



设置 TracePro 模型中光学表面 ABg 参数来改变显微物镜光学表面的粗糙度,分析不同 NA 显微物镜的光学表面散射特性,模拟光学表面粗糙度对显微物镜杂散光的影响,仿真结果如图 4 所示。

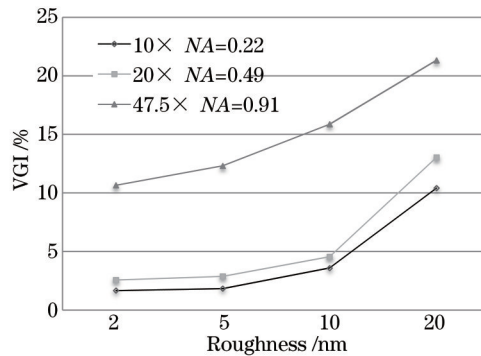


图 4 粗糙度、NA、杂散光系数的关系

Fig.4 Relationship among roughness, NA and VGI

由图 4 可知,不同 NA 的显微物镜在相同表面粗糙度下杂散光系数存在差异,杂散光系数随 NA 的增大而增大,表明在因表面粗糙度引起杂散光的前提下,大 NA 显微物镜控制杂散光的能力较差。同时,随着镜面粗糙度的逐渐增加,相同 NA 的显微物镜杂散光系数变大,相比于粗糙度为 2 nm 时的杂散光系数,当透镜表面粗糙度为 20 nm 时,杂散光系数增加了 10%。通过以上分析可知,由于受到加工水平以及制作工艺的限制,杂散光在任何实际的显微物镜系统中都是存在的,不可能完全消除。因此需根据不同成像质量要求采取不同的表面粗糙度加工精度,尽量抑制杂散光,降低杂散光对成像结果的影响。

### 3.2 镜面颗粒污染对杂散光系数的影响

洁净镜面颗粒污染水平通常描述为表面光洁度(CL),一般采用 MIL-STD-1246 标准来定义 CL 与颗粒分布的关系,可表示为

$$\log N = 0.926 \times [(\log f_{cl})^2 - (\log a)^2], \quad (4)$$

式中  $f_{cl}$  为表面洁净度; $N$  为每平方英尺内直径大于等于  $a$ (变量)的污染微粒数目。

颗粒污染覆盖率<sup>[25]</sup>(PAC)与表面光洁度的关系为  $f_{pac} = 2 \times 10^{-12} \times f_{cl}^{4.1}$ ,颗粒污染覆盖率和  $f_{cl}^{4.1}$  成正比,并且颗粒污染 BRDF 与覆盖率成比例,因此不同 CL 水平对应不同颗粒污染 BRDF。表面光洁度为 230、500、750 分别对应基本洁净、轻度污染和重度污染三种镜面污染情况,对这三种情况进行了仿真分析。将 BRDF 转换成 TracePro 中的 ABg 散射模型<sup>[26]</sup>,不同颗粒污染水平对应的 ABg 散射模型参数<sup>[26]</sup>如表 5 所示。

表 5 不同 CL 的污染颗粒散射对应的 ABg 模型参数

Table 5 ABg model parameters with different CL

CL	A	B	g	TIS
230	$4.40 \times 10^{-6}$	$2.549 \times 10^{-5}$	2.097	0.000182
500	$3.84 \times 10^{-5}$	$2.549 \times 10^{-5}$	2.097	0.00159
750	$5.065 \times 10^{-4}$	$2.549 \times 10^{-5}$	2.097	0.0209

假定所有颗粒污染在镜面上的分布是均匀的,且所有颗粒污染互不重叠,颗粒之间的间隔远大于颗粒的半径。通过设置光学表面 ABg 参数来改变表面颗粒污染水平,分析不同 NA 显微物镜光学表面的杂散光系数,分析结果如图 5 所示。

由图 5 可知,洁净镜面的表面洁净度至关重要,随着 CL 的增加,表面颗粒污染变得严重,显微物镜的杂散光系数也有不同程度增加,对于大 NA 显微物镜,杂散光系数甚至增加 6%。实际情况中,同批次加工清洁的相同显微物镜设定镜面颗粒污染程度的不同,是实际测量相同显微物镜出现不同杂散光系数的影响因素之一。因此应尽量使 CL 低于 500,保证基本清洁,这样镜面颗粒污染造成的杂散光影响相对较低。在维护光学系统性能方面,在光学镜面已经确定的情况下,要十分注重光学镜面的清洁工作。平时物镜应保持在洁净的器皿内,降低镜面的污染程度。

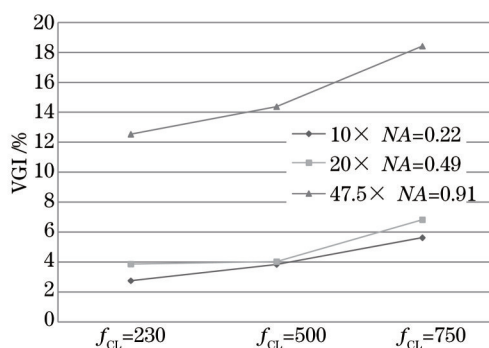


图5 表面洁净度、NA、杂散光系数的关系

Fig.5 Relationship among CL, NA and VGI

## 4 结 论

基于黑斑法,利用TracePro软件对显微物镜杂散光测量系统进行建模。在20倍、NA=0.49显微物镜的基础上,通过改变照明数值孔径、视场大小、黑斑位置来研究不同测试条件对杂散光系数的影响,验证了仿真模型的可行性,即模拟结果证实了基于黑斑法的杂散光测量易受测试条件影响,同时也证明了黑斑所处物面视场中心的合理性,因此实验测量时,须严格控制测试条件并统一测试标准。最后,通过对不同NA显微物镜表面散射模型ABg参数的设定,深入研究了光学表面粗糙度和镜面颗粒污染水平对杂散光测量的影响,结果表明杂散光系数随着表面粗糙度和镜面颗粒污染水平的增大而增大,因此要减小一个显微物镜系统的杂散光,需通过光学精加工严格控制表面粗糙度大小,并保证镜面洁净程度在一定水平以下。

## 参 考 文 献

- 1 Yuan Yukai. Stray light suppressing measure of optical system[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2007, 2(1): 6-10.  
原育凯. 光学系统杂散光的消除方法[J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(1): 6-10.
- 2 Shu Xingxing, Liu Weilin. Suppression of stray light in visible light optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 121101.  
舒星星, 刘卫林. 可见光光学系统杂散光抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 121101.
- 3 Sun Mingzhe, Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, *et al.*. Stray light suppression of the large field of view coronagraph optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 49(5): 052203.  
孙明哲, 张红鑫, 卢振武, 等. 大视场日冕仪光学系统杂散光抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 49(5): 052203.
- 4 Zhu Yue, Gao Wanrong. High-resolution full-field optical coherence tomography for biological tissue[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0804002.  
朱 越, 高万荣. 全场高分辨生物组织光学层析成像[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0804002.
- 5 Wei Tongda, Zhang Yunhai, Xiao Yun, *et al.*. Effects of polarization state and effective numerical aperture on the resolution in confocal total internal reflection microscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011102.  
魏通达, 张运海, 肖 响, 等. 偏振态和有效数值孔径对共聚焦全内反射显微术分辨率的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011102.
- 6 Wang Yunxin, Wang Dayong, Yang Yishu, *et al.*. Application and analysis in the biomedicine field using digital holographic technology[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209002.  
王云新, 王大勇, 杨怡姝, 等. 数字全息技术在生物医学成像和分析中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209002.
- 7 S Matsuda, T Nitoh. Flare as applied to photographic lenses[J]. Appl Opt, 1972, 11(8): 1850-1856.
- 8 S Martin. Glare characteristics of lenses and optical instruments in the visible region[J]. Opt Act, 1972, 19(6): 499-513.
- 9 R J Brewer. The measurement of veiling glare[J]. Opt Act, 1972, 19(6): 547-548.
- 10 刘瑞祥. 杂光系数及其测量[J]. 光学机械, 1977, (5): 11-16.
- 11 Zhang Guoyu, Li Fengchun, Gao Yujun. Theoretical study of stray light black-spot measurement for optical system[J]. Optical Technology, 1997, 3(2): 37-40.  
张国玉, 李凤春, 高玉军. 光学系统杂光黑斑测量的理论研究[J]. 光学技术, 1997, 3(2): 37-40.

- 12 Zhang Guoyu, Li Fengchun. Research and advancement of measuring equipment of veiling glare[J]. Optical Technology, 1994, 108(4): 21-27.  
张国玉, 李凤春. 杂光测试装置的研究及改进[J]. 光学技术, 1994, 108(4): 21-27.
- 13 Wang Yali, Liu Ruixiang, Cao Ming. The results and analysis of a survey of the veiling glare characteristics of microscope objectives[J]. Guangxue Jixie, 1992, (1): 30-37.  
王雅黎, 刘瑞祥, 曹明. 显微镜杂光特性普查对比的结果与分析[J]. 光学机械, 1992, (1): 30-37.
- 14 Research Group for Measuring Veiling Glare of Microscope Objective - Shanghai Institute of Optical Instruments. Technical research on measuring veiling glare of microscope objectives[J]. Optical Instruments, 1988, 10(2): 5-10.  
显微镜物杂散光测试组-上海光学仪器研究所. 显微镜杂散光测试技术研究[J]. 光学仪器, 1988, 10(2): 5-10.
- 15 P R Spyak, W L Wolfe. Scatter from particulate-contaminated mirrors part 2-4[J]. Opt Eng, 1992, 31(8): 1757-1784.
- 16 Standardization Administration. GB/T 10988-2009 Veiling glare of optical systems - methods of measurement[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.  
国家标准化管理委员会. GB/T 10988-2009 光学系统杂(散)光测量方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- 17 Wang Meiqin, Wang Zhonghou, Bai Jianguang. Stray light analysis for hyper-spectral imaging spectrometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(6): 1532-1537.  
王美钦, 王忠厚, 白加光. 高光谱成像仪的杂散光分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1532-1537.
- 18 S M Pompes, R R Pfisterer, J M Morgan. A stray light analysis of apache point observatory 3.5 meter telescope system [C]. SPIE, 2003, 4842: 128-138.
- 19 Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(2): 316-318.  
钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 316-318.
- 20 M Laikin. Lens Design[M]. Zhou Haixian, Chen Yunfang, Trans. Beijing: China Machine Press, 2011: 123-125.  
莱金著. 镜头设计[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2011: 123-125.
- 21 Xiao Jing, Zhang Bin, Yao Xiuwen, *et al.*. Influence of contaminated mirror on the stray radiation performance of infrared optical systems[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 402-407.  
肖静, 张彬, 姚秀文, 等. 镜面污染对红外光学系统杂散辐射性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(3): 402-407.
- 22 Chen Hao, Zhu Jigui, Xue Bin. Impact of rough surface scattering characteristics to measurement accuracy of laser displacement sensor based on position sensitive detector[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0808003.  
陈浩, 郝继贵, 薛彬. 粗糙表面散射特性对基于 PSD 的激光位移传感器测量精度的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0808003.
- 23 H E Bennett. Scattering characteristics of optical materials[J]. Opt Eng, 1978, 17(5): 480-488.
- 24 Shi Dongliang. Research on Stray Light of Optical and Mechanical System Based on BRDF[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.  
石栋梁. 基于 BRDF 的光机系统杂散辐射研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- 25 K Balasubramanian, S Shaklan, A Give'on. Stella coronagraph performance impact due to particulate contamination and scatter[C]. SPIE, 2009, 7440: 74400T.
- 26 S Ellis, R N. Pfisterer. Advanced Technology Solar Telescope (ATST): Stray and Scattered Light Analysis[DB/OL]. [http://dkist.nso.edu/sites/atst.nso.edu/files/docs/opt\\_sys/PhotonEngineering1.pdf](http://dkist.nso.edu/sites/atst.nso.edu/files/docs/opt_sys/PhotonEngineering1.pdf)

栏目编辑: 吴秀娟