

激光与光电子学进展

不同波长的光源对疵病散射率的影响研究

王旭东, 高爱华*, 闫丽荣, 秦文罡, 李文瑾

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 基于积分散射检测的原理设计了一种多波长疵病检测系统, 选用了 635 nm、525 nm 及 405 nm 三种光源, 以光电倍增管作为光电探测器, 待测样品是两个刻有标准尺寸疵病的高透石英玻璃片, 其中一个的宽度和深度均为 20 μm , 另一个均为 25 μm , 光源的功率分别为 50 mW、80 mW。实验结果表明, 405 nm 所对应的散射率数值明显最高, 即 405 nm 的光源疵病检测能力更强。该研究对于小尺寸疵病的检测及获取疵病的深度信息, 具有很好的借鉴意义。

关键词 测量; 多波长; 积分散射; 疵病检测; 散射率

中图分类号 TN247

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1112002

Influence of Light Sources of Different Wavelengths on Scattering Rate of Defects

Wang Xudong, Gao Aihua*, Yan Lirong, Qin Wengang, Li Wenjin

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract Herein, a multi-wavelength defect detection system based on the theory of integral scattering detection is proposed. This system uses three light sources with wavelengths of 635 nm, 525 nm, and 405 nm and employs a photomultiplier tube as the photodetector. Two samples of high-transmittance quartz glass sheets with standard size defects, one with a width and a depth of 20 μm and the other with a width and a depth of 25 μm , are evaluated. The powers of the light source are 50 mW and 80 mW, respectively. Experimental results show that the highest scatter rate is achieved using the 405 nm light source. Therefore, the detection ability of the 405 nm light source is stronger than those of the 635 nm and 525 nm light sources. The findings of this study provide a reference for detecting small defects and achieving defect depth information.

Key words measurement; multi-wavelength; integrated scattering; defect detection; scattering rate

1 引言

超光滑表面元件作为精密光学器件或光学系统的重要组成部分,其表面的局部瑕疵或者缺陷都会影响其后续应用。如激光陀螺谐振腔中重要的组成部分——高反射镜,其反射率要求能够达到 99.99% 以上。而检测如此高精度的反射率是很难

的,若要检测高反射镜表面微米量级的疵病,尤其是有效地获取疵病的深度信息,则对疵病的检测方法提出了更高的要求。

现在检测疵病的方法有很多种,如干涉法、衍射法及散射法^[1-4]。其中散射法包括成像法和非成像法,而暗场显微散射成像检测正是成像法的一种,也是较为普遍的一种检测方法,但其大都采用

收稿日期: 2021-06-28; 修回日期: 2021-07-12; 录用日期: 2021-07-20

基金项目: 陕西省重点研发项目(2019GY-063)

通信作者: *freegah@126.com

多光源或环形光源作为入射光源^[5-8],会产生入射光源的准直性差,样品表面所获得的光能量不均匀从而会影响后续的检测结果。本文提出采用多种波长的光源,基于积分散射的原理,对于不同波长光源,探究待测样品表面疵病的散射特性。

2 积分散射检测

2.1 积分散射检测原理

基于积分散射法(TIS)设计了积分散射测量装置对已知表面疵病大小的光学镜片进行检测。当光入射到高反射镜表面时,其表面疵病就会产生散射光,疵病越大,散射光越强。假设 R_0 为总反射辐射, R_d 为散射辐射, R_s 是镜面反射辐射, n_i 是入射介质的折射率, θ_i 为入射角, σ 是粗糙度均方根值(RMS),则表面积分散射的值 α ^[9-10]可表示为

$$\alpha = \frac{R_d}{R_0} = \frac{R_d}{R_d + R_s} \approx 1 - \exp\left[-\left(\frac{4\pi n_i \cos \theta_i \sigma}{\lambda}\right)^2\right] \quad (1)$$

当光学元件表面粗糙度远小于入射波长 λ 时, α 可表示为

$$\alpha \approx 1 - \exp\left[-\left(\frac{4\pi n_i \cos \theta_i \sigma}{\lambda}\right)^2\right] \approx \left(\frac{4\pi n_i \cos \theta_i \sigma}{\lambda}\right)^2 \quad (2)$$

当入射光在空气中以 45° 入射时,式(2)可以表示为

$$\alpha \approx \frac{4\pi n_i \cos \theta_i \sigma}{\lambda} \approx \left(\frac{2\sqrt{2} \pi \sigma}{\lambda}\right)^2 \quad (3)$$

由式(3)可得,超光滑表面积分散射的值 α 仅与入射波长和粗糙度RMS有关。当入射光波长一定时,积分散射测量值能更好地表征光学元件表面的粗糙度。基于本研究所搭建的积分散射疵病检测系统,表面疵病的粗糙度从另一角度可以由散射率来体现,该检测方法能够有效地表征超光滑光学元件的表面质量。

2.2 积分散射检测装置

积分散射疵病检测原理图如图1所示。光源发出的光信号先通过衰减片对其功率进行衰减,然后经过斩波器的调制,入射到积分球内,当进行疵病检测时,光斑会照射到待测样品表面疵病处,此时,被照射的位置会发生反射、透射和散射,反射光及透射光会出射到积分球外,被消光装置所接收,而散射光会被积分球收集并匀光,之后被光电倍增管(PMT)所采集,然后采集到的信号经由后端放大电路的光电转换,转换成电压信号,锁相放大器依据斩波器所输出的参考信号与电流-电压(I-V)转换后的电压信号,基于互相关检测原理,提取到高信噪比的目标信号,最终通过后端的数据采集和处理,得到对应的电压值数据。

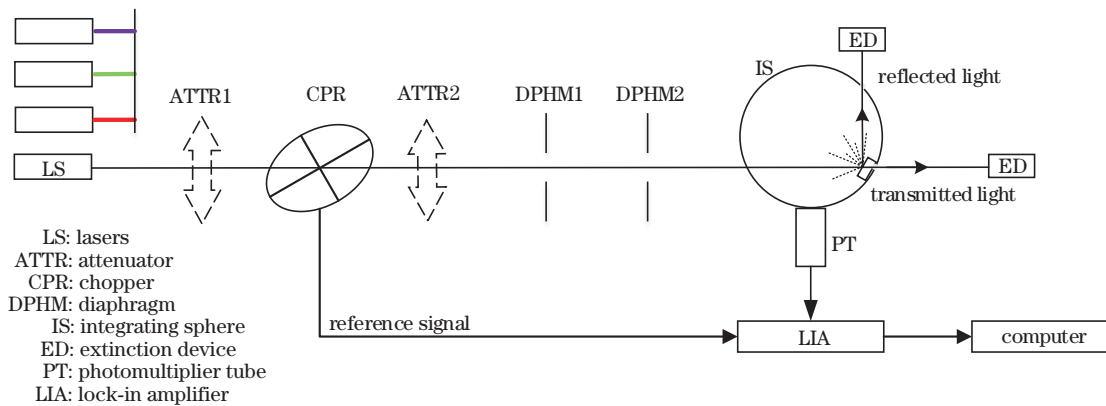


图1 积分散射检测原理图

Fig. 1 Schematic of integrated scattering detection

如图1所示,测量光路中,光阑1与光阑2可以确保光路的准直性,使得后期的重复性检测更有效率,更加精确;同时在待测样品位置不变的情况下,只需更换光源即可进行不同波长光源入射时的散射光信号测量,避免了装夹误差,从而提高测量精度及准确度。光电探测器的灵敏度计算公式为

$$I(\lambda) = S(\lambda) \cdot \Phi(\lambda), \quad (4)$$

式中: $I(\lambda)$ 是光电探测器的输出光电流; $\Phi(\lambda)$ 是入射的光功率。探测器在波长为 λ 的单色光照射下,输出的电压 $U(\lambda)$ 与 $\Phi(\lambda)$ 之比为光谱灵敏度,即:

$$S(\lambda) = \frac{U(\lambda)}{\Phi(\lambda)} \quad (5)$$

系统在进行基准标定时,所采集的标准衰减片的光电流为 I_0 ;在进行待测样品测量时,所采集的光

电流为 I_1 。光电探测器所采集的光信号会先转化为光电流,之后经后端的 I-V 转换放大电路、锁相放大模块,将光电流转化为电压信号输出到采集模块,最终系统采集的数据为电压值。若设标准衰减片的透过率为 T ,待测样品的散射率为 S' ,则根据测量原理,待测样品的散射率可表示为

$$S' = \frac{U_1}{U_0} \times T, \quad (6)$$

式中: U_1 为所采集的待测样品的电压值; U_0 为所采集的标准衰减片的电压值。

对于超光滑光学元件,其表面有效孔径内的微小瑕疵是影响其性能的重要因素,而散射率是描述待测物体表面微粒的散射光的光功率所占入射光功率大小的量,可以量化地体现超光滑光学元件的光学性能,如均匀性、色散特性等。

3 光电探测器的特性参数

光电倍增管电路输出的噪声包括器件本身的散粒噪声、闪烁噪声以及热噪声等^[10]。闪烁噪声可通过提高辐射的调制频率和减小通频带的方法来减低或消除,热噪声来自光电倍增管输出的负载电阻,通过适当设计负载电阻大小,可以小到忽略不计。因此,倍增管的噪声主要是散粒噪声,包括阴极电流产生的散粒噪声和各级倍增极产生的散粒噪声。

本系统采用的光电探测器是光电倍增管,其测量的频带宽可近似为

$$\Delta f = f - f_0, \quad (7)$$

式中:系统的调制信号频率 $f = 445 \text{ Hz}$; $f_0 = 0$ 。

1) 假设光电倍增管阴极电流的平均值为 I_K ,则阴极散粒噪声的均方值为

$$\overline{i_{nK}^2} = 2eI_K\Delta f, \quad (8)$$

式中: Δf 是频带带宽。

2) 假设阳极平均电流为 I_A ,则阳极平均电流 $I_A = MI_K$ 。因此,阳极散粒噪声的均方值为

$$\overline{i_{nA}^2} = 2eM^2I_K\Delta fK = 2eMI_A\Delta fK, \quad (9)$$

式中: M 是光电增益; I_A 是阳极电流; K 为噪声增强因子,一般地, $K = 1 \sim 2$ 。

3) 光电倍增管的噪声等效功率为

$$P_{NEP} = \frac{\sqrt{\overline{i_{nA}^2}}}{S_A}. \quad (10)$$

结合式(9)和(10)可得,

$$P_{NEP} = \frac{(2eM^2I_K\Delta fK)^{1/2}}{S_A} = \frac{(2eMI_A\Delta fK)^{1/2}}{S_K}, \quad (11)$$

式中: S_A 和 S_K 分别为阳极灵敏度和阴极灵敏度。

该型号光电倍增管的部分特性参数如表 1 所示,其光谱响应曲线如图 2 所示。

表 1 光电倍增管的部分特性参数表

Table 1 Partial characteristic parameter table of photomultiplier tube

Parameter type	Value
Anode sensitivity / $(V \cdot nW^{-1})$	15
Cathode sensitivity / $(mA \cdot W^{-1})$	78
Current gain M	10^5

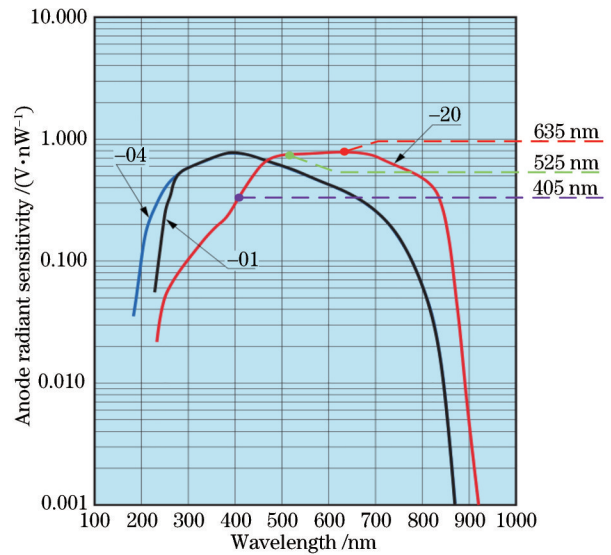


图 2 光电倍增管的光谱响应曲线图

Fig. 2 Spectral response curves of photomultiplier tube

如图 2 所示,该光电倍增管的光谱响应曲线对应的是一 -20 曲线,依曲线表明,本研究所采用的三种光源的波段所对应的光电倍增管的灵敏度特性已分别在图中标明了对应的位置,很显然,405 nm 处的灵敏度值低于 525 nm 及 635 nm,而波长为 525 nm 和 635 nm 所对应的灵敏度值大小近似相等。

一般情况下,灵敏度作为光电探测器重要的特性参数,在不同波段范围内,灵敏度的差异性会影响最终的结果^[11]。而由式(6)可知,本研究采用的是比值测量法,因而在计算过程中,可以忽略灵敏度对测量结果的影响。

激光器工作时的最小光功率为 3 mW,此时的阴极电流 $I_K = S_K \cdot \phi = 0.234 \text{ nA}$ 。

取 $K = 1.5$,由式(11)可得:最小可探测光功率 $P_{NEP} = 2.886 \times 10^{-12} \text{ W}$ 。如果再考虑后续锁相放大

器的放大倍数及去噪能力,则 NEP 可以更小,说明本系统可以探测极其微弱的散射光信号,能够用于超光滑表面疵病的散射率测量。

4 数据处理与分析

该系统采用了三种波长的光源,分别是 LWVL635-100 mW、LWVL525-100 mW、LWVL405-100 mW,系统采用 1% 的标准衰减片进行基准测量(衰减器 2),待测样品是两个刻有标准尺寸疵病的高透石英玻璃片,其中一个的宽度和深度均为 20 μm ,另一个均为 25 μm 。光源的激光输出功率分别为 80 mW、50 mW,并加入 1% 的标准衰减片(衰减器 1)对其进行衰减,以衰减后的光源作为入射光源,后期利用计算机进行数据的采集及处理。

1) 疵病的宽度和深度分别为 20 μm 的待测样品测量结果

将三种波长光源的输出功率调到 50 mW 或 80 mW。实验时,将 1% 的标准衰减片放置到测量光路中,光线会入射到积分球内,而此时积分球是密闭的,系统所采集到的电压为基准电压。如表 2、表 3 所示。

表 2 不同波长的光源所对应的基准电压值(80 mW)

Table 2 Reference voltage values corresponding to light sources of different wavelengths (80 mW)

λ /nm	Reference voltage	voltage value /V	Average voltage value /V
635	3.7600	3.7620	3.7590
525	2.9210	2.9200	2.9180
405	0.3715	0.3720	0.3718

表 3 不同波长的光源所对应的基准电压值(50 mW)

Table 3 Reference voltage values corresponding to light sources of different wavelengths (50 mW)

λ /nm	Reference voltage	voltage value /V	Average voltage value /V
635	2.5700	2.5690	2.5710
525	1.9780	1.9770	1.9790
405	0.2559	0.2560	0.2561

实验时,将测基准时的标准衰减片去掉,把待测样品放置到积分球待测口处,使入射光的光斑打在划痕上,待测样品表面的透射光、反射光会出射到积分球外被消光装置吸收,此时样品表面疵病的散射光信号会被光电探测器所接收,然后经过 I-V 模块的光电转换,再经过锁相放大模块后调制输出

电压信号,最终采集系统得到的是待测样品的电压值。如表 4、表 5 所示。

表 4 不同波长的光源所对应的待测样品的电压值
(80 mW)

Table 4 Voltage values of sample to be tested corresponding to light sources of different wavelengths (80 mW)

λ /nm	Sample voltage	value /V	Average voltage value /V
635	3.7555	3.7560	3.7558
525	3.0350	3.0360	3.0340
405	0.4510	0.4513	0.4508

表 5 不同波长的光源所对应的待测样品的电压值
(50 mW)

Table 5 Voltage values of sample to be tested corresponding to light sources of different wavelengths (50 mW)

λ /nm	Sample voltage	value /V	Average voltage value /V
635	2.5600	2.5590	2.5610
525	2.0210	2.0220	2.0200
405	0.3060	0.3061	0.3059

表 2 和表 4 分别是在不同波长光源下,采集的基准及待测样品的电压值。

结合式(6)及表 1、表 2 中的数据,可以得到待测样品的散射率数据如表 6 所示。

表 6 不同波长的光源所对应的待测样品的散射率数据
(80 mW)

Table 6 Scattering rate data of sample to be tested corresponding to light sources of different wavelengths (80 mW)

λ /nm	Scattering rate
635	0.009988
525	0.010395
405	0.012130

表 3、表 5 对应的是当三种光源的激光功率为 50 mW 时,采集的基准和待测样品的电压值,该功率下所对应的散射率数据如表 7 所示。

该样品在两种不同工作模式(不同入射光源的功率)下,所获得的样品散射率的对比如图 3 所示。

2) 疵病的宽度和深度分别为 25 μm 时的待测样品测量结果

表 8 是在不同波长光源下,采集的待测样品的电压值。

因每次测量时的基准电压值是不变的,故结合式(6)及表 2、表 8 中的数据,可以得到待测样品的散

表 7 不同波长的光源所对应的待测样品的散射率数据 (50 mW)

Table 7 Scattering rate data of the sample to be tested corresponding to light sources of different wavelengths (50 mW)

λ /nm	Scattering rate
635	0.009961
525	0.010217
405	0.011953

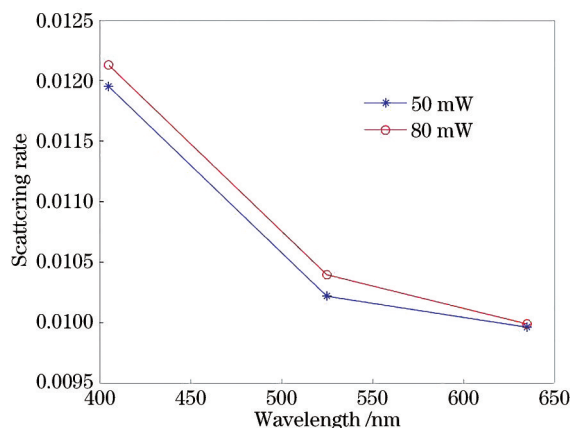


图 3 两种工作模式下样品散射率的对比图

Fig. 3 Comparison of sample scattering rate in two working modes

表 8 不同波长的光源所对应的待测样品的电压值 (80 mW)

Table 8 Voltage value of sample to be tested corresponding to light sources of different wavelengths (80 mW)

λ /nm	Sample	voltage	value /V	Average voltage value /V
635	4.4300	4.4295	4.4297	4.4297
525	3.6920	3.6917	3.6922	3.6920
405	0.5780	0.5778	0.5782	0.5780

射率数据如表 9 所示。

表 10 是当三种光源的激光功率为 50 mW 时,采集的待测样品的电压值,结合表 5 可得对应的散

表 9 不同波长的光源所对应的待测样品的散射率数据 (80 mW)

Table 9 Scattering rate data of sample to be tested corresponding to light sources of different wavelengths (80 mW)

λ /nm	Scattering rate
635	0.011780
525	0.012645
405	0.015546

射率数据,如表 11 所示。

表 10 不同波长的光源所对应的待测样品的电压值 (50 mW)

Table 10 Voltage value of sample to be tested corresponding to light sources of different wavelengths (50 mW)

λ /nm	Sample	voltage	value /V	Average voltage value /V
635	2.9870	2.9868	2.9871	2.9870
525	2.4340	2.4339	2.4338	2.4339
405	0.3680	0.3677	0.3681	0.3679

表 11 不同波长的光源所对应的待测样品的散射率数据 (50 mW)

Table 11 Scattering rate data of sample to be tested corresponding to light sources of different wavelengths (50 mW)

λ /nm	Scattering rate
635	0.011623
525	0.012305
405	0.014371

该样品在两种不同工作模式(不同入射光源的功率)下,所获得的样品散射率的差别如图 4 所示。

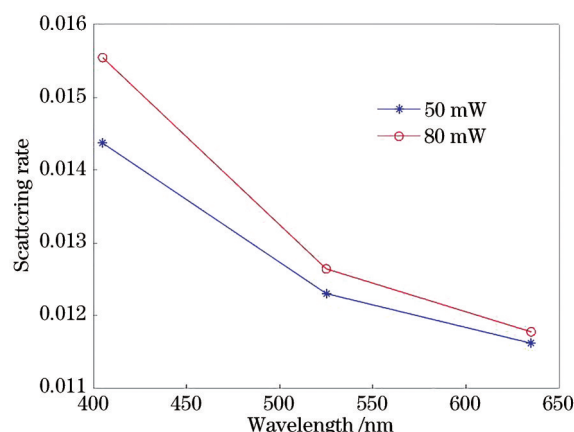


图 4 两种工作模式下样品散射率的对比图

Fig. 4 Comparison of sample scattering rate in two working modes

根据图 3、图 4 可知,405 nm 波长相较于 525 nm、635 nm 波长,光源的波长越短,对应的疵病散射率越大,其疵病的检测能力更强。

5 结 论

本研究搭建了一种基于积分散射原理的疵病检测系统,该系统采用三种不同波长的光源作为入射光源,以此来探究疵病的散射率变化,依实验数

据可知,405 nm 的疵病检测能力明显优于 525 nm 及 635 nm。

对于超光滑表面,表面微米量级的疵病是影响其性能的重要因素,传统的检测方法是通过获取疵病图像来表征其疵病信息,但这种检测方法无法获取疵病的深度信息,而本系统可以基于积分散射检测的原理,通过设置多波长光源,有效地获取由疵病三维尺寸信息决定的疵病散射率信息,为疵病的表征提供一种有效的手段。本研究对于超光滑表面光学元件的表面质量检测及小尺寸疵病检测具有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Sumi Y, Ozawa N, Nagaosa S, et al. Application of optical coherence tomography (OCT) to nondestructive inspection of dentures[J]. Archives of Gerontology and Geriatrics, 2011, 53(2): 237-241.
- [2] Lee S, Jo J H, Kim J S, et al. Detection system for sub-micrometer defects of a photo-mask using on-axis interference between reflected and scattered lights[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2013, 17(1): 73-80.
- [3] 王世通. 精密表面缺陷检测散射成像理论建模及系统分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Wang S T. Imaging theoretical modeling and system analysis of smooth surface defect evaluation based on light scattering method[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [4] 谢世斌, 杨雨英, 刘东, 等. 精密表面疵病检测美标数字化评价实现算法[J]. 应用光学, 2015, 36(2): 266-271.
Xie S B, Yang Y Y, Liu D, et al. Digital evaluation algorithm of American standard in defects inspection of precise surface[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(2): 266-271.
- [5] 闫凯, 杨雨英, 周林, 等. 基于机器视觉的精密元件表面缺陷数字化检测技术[C]//第十六届全国光学测试学术交流会摘要集. 北京: 中国光学学会, 2016.
Yan K, Yang Y Y, Zhou L, et al. Digital detection technology for surface defects of precision components based on machine vision[C]//Abstracts of the 16th National Optical Testing Academic Exchange. Beijing: The Chinese Optical Society, 2016.
- [6] 王贵林, 朱俊辉, 李嘉祥, 等. 大口径光学元件表面疵病在位检测与评价研究[J]. 应用光学, 2019, 40(6): 1167-1173.
Wang G L, Zhu J H, Li J X, et al. *In situ* detection and evaluation of surface defects for large-aperture optical elements[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(6): 1167-1173.
- [7] 杨飞, 高爱华, 刘卫国, 等. 高反射镜表面疵病激光散射显微成像检测[J]. 电子测量技术, 2019, 42(4): 110-116.
Yang F, Gao A H, Liu W G, et al. High reflection mirror surface defects of laser scattering imaging detection[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(4): 110-116.
- [8] 韦瑶, 高爱华, 秦文罡. 暗场显微成像系统的光源研究[J]. 光学与光电技术, 2020, 18(5): 75-79.
Wei Y, Gao A H, Qin W G. Research on light source of dark-field microscopic imaging system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2020, 18(5): 75-79.
- [9] 黄聪, 张科鹏, 王翔, 等. 基于总散射测量的表面质量检测新方法[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0712005.
Huang C, Zhang K P, Wang X, et al. Method for surface quality inspection based on total scattering measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0712005.
- [10] 李乐, 汪龙祺, 黄煜, 等. 光电探测系统噪声特性研究与降噪设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2674-2683.
Li Y, Wang L Q, Huang Y, et al. Study on noise characteristics of photoelectric detection system and noise reduction design[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(12): 2674-2683.
- [11] 余皓, 刘秉琦, 鲁军, 等. 三通道非成像氧气吸收被动测距系统中光电倍增管光谱特性测量[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0804002.
Yu H, Liu B Q, Lu J, et al. Spectral characteristics measurement of photomultiplier tube in three-channel non-imaging passive ranging system based on oxygen absorption[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0804002.