

激光与光电子学进展

远红外显微成像光学系统的设计与仿真

汪越^{1,2}, 刘爱云¹, 石旺舟¹, 胡古今^{1*}, 刘赤县², 潘昌翊², 单玉凤², 张祎², 邓惠勇^{2**}, 戴宁²¹上海师范大学数理学院物理系, 上海 200234;²中国科学院上海技术物理研究所红外物理国家重点实验室, 上海 200083

摘要 为了使远红外探测器获得高信噪比的光电信号, 围绕与工作波段在 50~70 μm 、像元数量 64×64 、像元大小 $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ 的制冷型凝视焦平面阵列探测器相匹配的透射式远红外显微成像光学系统的设计与仿真等内容, 开展了相关工作。通过对杂散光的分析, 预测了冷反射效应所产生的不良影响并且提出了相应的解决方案; 仿真模拟结果表明, 当光学系统的空间分辨率、数值孔径、焦距、有效放大倍率、中心波长分别为 200 μm 、0.25、14 mm、10、61 μm 时, 系统的调制传递函数值和包围圆能量集中度在特征频率 $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 处分别达到 0.305 和 80%, 能够得到清晰可辨的物像, 符合焦平面阵列探测器的工作要求。

关键词 光学设计; 仿真模拟; 远红外制冷型探测器; 显微成像光学系统

中图分类号 O43

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1122005

Design and Simulation of Far Infrared Microscopic Imaging Optical Systems

Wang Yue^{1,2}, Liu Aiyun¹, Shi Wangzhou¹, Hu Gujin^{1*}, Liu Chixian², Pan Changyi²,
Shan Yufeng², Zhang Yi², Deng Huiyong^{2**}, Dai Ning²¹Department of Physics, College of Mathematics and Science, Shanghai Normal University,
Shanghai 200234, China;²State Key Laboratory for Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy
of Sciences, Shanghai 200083, China

Abstract This study focuses on the design and simulation of the transmission far infrared microscopic imaging optical system matched with the cooled staring focal plane array detector that operates in the wavelength range of 50—70 μm and contains pixel number 64×64 , each pixel is $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ in size in order to make the far infrared detector obtain optoelectronic signals with a high signal-to-noise ratio. Stray light analysis predicts the negative effect caused by cold reflection, and a solution is proposed to address it. The simulation results show that when the designed optical system's spatial resolution, numerical aperture, focal length, effective magnification, and central wavelength are 200 μm , 0.25, 14 mm, 10, and 61 μm , respectively, the modulation transfer function value reaches 0.305 at the characteristic frequency of $5 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$, and the energy concentration of the surrounding circle of the system exceeds 80%. Meanwhile, the optical system's produced object picture is easily distinguishable, indicating that it meets the functioning criteria of the focal plane array detector.

Key words optical design; analog simulation; far infrared cooled detector; microscopy imaging optical system

收稿日期: 2021-08-12; 修回日期: 2021-08-25; 录用日期: 2021-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(11933006)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-SLH018)

通信作者: *hugj@mail.sitp.ac.cn; **hydeng@mail.sitp.ac.cn

1 引言

稳定可靠的红外光学系统是实现高质量红外成像的先决条件,是红外探测技术在军事、天文、气象、工业、医学等领域获得广泛应用的基础。目前使用的红外成像系统基本采用广角或望远工作模式,这两种结构并不适用于对微小物体的探测和分析^[1]。针对宇宙尘埃、暗物质和暗能量、地外生命等目标,既需要靠高灵敏度的红外探测器实现信息获取,又需要借助显微成像技术进行高清晰度的图像捕获^[2]。因此,采用与之相匹配的红外显微成像光学系统尤为关键。

红外显微成像光学系统由显微物镜、红外焦平面阵列探测器、信号读出电路、图像处理软件、光学工作平台等部分组成,是集显微成像技术、红外光电探测器技术、信号转换和处理技术于一体的复杂系统^[3]。工作时,将待测目标放置在物镜前的合适位置,物体发出的红外辐射经过显微光学系统合理分布于焦平面合适位置处,并被探测器接收转换成电信号,同时将数据发送给采集分析系统,再通过读出电路处理输出实时的视频信号。红外显微成像系统最早出现在 20 世纪末,对于此类系统的实际应用,在国外科研人员研究的时间不是特别长,在国内也尚未被大范围的认识^[4]。目前,我国在该领域的工作主要聚焦在短波到中波红外波段,而在远红外波段,由于相当长时间内没有开发出足够灵敏的探测器,缺少可以在深低温下工作的读出电路,所以该波段的成像系统发展相对滞后,与之相匹配的远红外显微成像系统更是少有报道。目前,国内所用的红外显微成像系统国产化率低,而从国外进口核心部件价格极其昂贵^[5]。因此,研发具有自主知识产权的远红外显微成像系统具有重要的现实意义。

本文围绕应用于远红外波段的 64×64 元制冷型阻挡杂质带(BIB)焦平面阵列探测器的显微光学系统的结构设计、仿真模拟以及结果分析等内容展开了相关的工作。仿真模拟的结果表明,当探测器的工作波段为 $50 \sim 70 \mu\text{m}$,像元尺寸为 $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ 时,如果采用一个数值孔径(NA)为 0.25 的光阑和 5 块高阻硅透镜构成的透镜组作为光学系统的物镜,就可以得到工作中心波长为 $61 \mu\text{m}$,空间分辨率为 $200 \mu\text{m}$,放大倍率为 10 的远红外显微成像系统。

2 光学系统的设计指标

远红外显微成像系统设计中选用了本课题组自主研发的制冷型凝视焦平面阵列探测器,空间分辨率为 $200 \mu\text{m}$,中心波长为 $61 \mu\text{m}$,像元数量为 64×64 ,像元尺寸为 $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ 。综合考虑显微成像系统的衍射效应、像差校正难度及加工可行性等各项因素,系统整体设计参数指标如表 1 所示。

表 1 远红外显微成像光学系统的参数指标

Table 1 Parameter indexes of far infrared microscopic imaging optical system

Item	Value
Working wave range / μm	50-70
Zoom ratio	10
NA	0.25
Focal length /mm	14
Image height /mm	5

3 光学系统的设计

3.1 红外光学系统的工作原理

红外光学系统通过改变光束的分布,达到合理地利用辐射能的目的。红外光源辐射的红外光波进入光学系统时,通过折射、反射作用改变其传播路径,最终使得辐射光束按照一定的方向和形式到达像面^[6]。如果在像面上放置一个红外焦平面阵列探测器,则光学系统可以起到收集辐射的作用并将其合理分布到探测器上灵敏度高、盲元率低的区域,进而达到提高信噪比,增大系统成像能力的目的。

3.2 远红外显微成像光学系统构型设计

对于显微成像系统,构型设计可以考虑采用二次成像的方式,因为该系统的有效焦距较短,选用二次成像方式可以保证足够的工作距离。光学系统的第一组透镜分担一部分光焦度,后一组透镜起像差平衡的作用。对于制冷型红外系统,探测器是在低温杜瓦内工作的。探测器的冷光阑的位置和光学系统的出瞳位置在设计时也需要加以考虑,使得两者相互适配,这是因为一般情况下探测器的冷光阑就是光学系统的光阑。此外,综合考虑温度、冷反射及杜瓦空间等因素,可将部分镜片置于杜瓦内,其他镜片放置在杜瓦外。

3.3 远红外显微成像光学系统透镜的选取

光学系统设计中常用的普通光学玻璃在红外波段性能比较差,最高也只能让短波的红外辐射透过。对于中远红外波段,IV族材料Ge、金刚石和高阻硅,碱卤族化合物晶体和硫系玻璃,以及III-VI族化合物ZnS、ZnSe等是目前常用的材料^[7-9]。

红外材料会聚光线的的能力比较强,折射率高,相对于可见光材料更容易达到衍射极限,但同时也有利于校正系统的像差。目前,大部分材料对红外波段的透过率比较低,需要有针对性地选择合适的材料,并且根据工作的中心波长,对透镜组镀制增透膜,尽可能提高透镜的透过率。

为满足成像系统的工作中心波长 $61\ \mu\text{m}$,工作波段 $50\sim 70\ \mu\text{m}$ 的要求,综合考虑透镜材料的透过率、加工难度及选购成本等多方面因素,本文采用高阻硅材料制作的透镜。

3.4 初始参数设计

光学成像系统初始参数的设置一般有两种方法,一种是根据初级像差理论求得满足初级像差要求的解;另一种是在已有的设计方案中选取性能参数相当的数据作为初始参数^[10]。

经过查阅设计手册和相关文献资料以及综合考虑上述设计思路,初始结构选定为由五块镜片组成的光学成像系统,这些镜片均是弯月型透镜,分成两组。第一组中,二个透镜的近物面均为凹面,另一侧面为凸面;第二组中,三个透镜的镜面形状与前者正好相反。

3.5 设计结果

为了便于显微成像系统的设计和像质的评价分析,一般将内部像假定为物,而实际物面假定为像面。基于此规则,将初始参数输入到ZEMAX软件中。优化过程中,将镜片的曲率半径、厚度、镜片间距视为变量进行优化,最终得到远红外显微成像光学系统的最优结构参数,如表2所示。其中OBJ面为物平面(实际为像平面),STO面为光阑面,IMA面为像平面(实际为物平面)。系统总长为 $195\ \text{mm}$,五个透镜均为高阻硅镜片。该系统在OBJ面和IMA面之间依次设置第一、第二、第三、第四、第五透镜。第一、二、三、五透镜近OBJ面一侧为凹面,另一侧为凸面;第四透镜近OBJ面一侧为凸面,另一侧为凹面。光阑设置在镜片组与物面之间。图1为远红外显微成像光学系统的剖面图。

表2 远红外显微成像光学系统的优化结构参数

Table 2 Optimized structural parameters of far infrared microscopic imaging optical system

Surface	Radius of curvature /mm	Interval / μm	Glass
OBJ	∞	155	
STO	∞	2.002	
2	-19.081	2.219	Silicon
3	-15.828	2.229	
4	-13.729	3.624	Silicon
5	-16.499	5.575	
6	-11.389	3.003	Silicon
7	-14.988	2.430	
8	9.958	4.253	Silicon
9	9.945	4.663	
10	-58.684	5.151	Silicon
11	118.289	4.853	
IMA	∞	-	

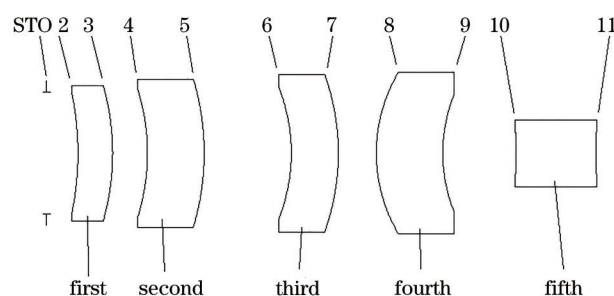


图1 远红外显微成像光学系统的剖面示意图

Fig. 1 Cross-sectional diagram of far infrared microscopic imaging optical system

4 系统像质的评价

调制传递函数(MTF)曲线与光学系统存在的衍射和像差有关,它是将傅里叶分析方法应用到光学领域,通过量化的方式客观地评价光学系统的成像效果,也是评价光学系统成像质量的主要手段之一。如果在探测器的特征频率处,MTF的值高于0.3,则说明本文设计的光学系统的成像质量已达到良好等级^[11]。图2给出了通过软件模拟得到的远红外显微光学成像系统的MTF曲线。由图2可知,在探测器特征频率 $5\ \text{lp/mm}$ 处,MTF的数值为0.305,大于0.3,这表明该光学系统具有较好的分辨率,达到了物像传递性目的,能满足系统的成像要求。

点列图是一个弥散的图形。这个图形是由于系统存在像差,物点经过光学系统到达像面后不能聚集成一个点而是产生一个弥散的光斑后形成的。

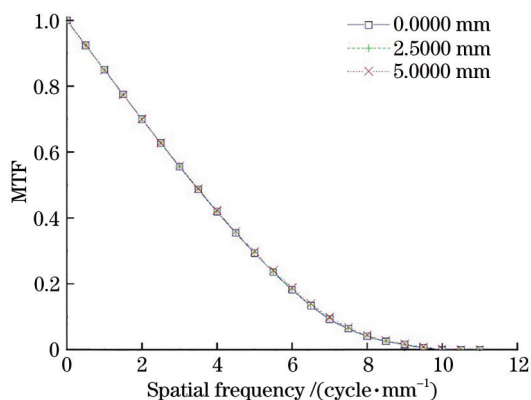


图 2 远红外显微成像光学系统的模拟 MTF 曲线
Fig. 2 Simulated MTF curve of far infrared microscopic imaging optical system

性能优良的光学系统要求弥散斑的均方根半径应该小于探测器像元的尺寸^[12]。图 3 为通过软件模拟得到的远红外显微成像光学系统的点列图。由图 3 可知,在所有视场下系统的弥散圆的均方根半径都不到 25 μm,而探测器的像元边长为 120 μm,这表明探测器的每个像元都能很好地接收通过光学系统调整过的红外辐射,满足系统的成像要求。

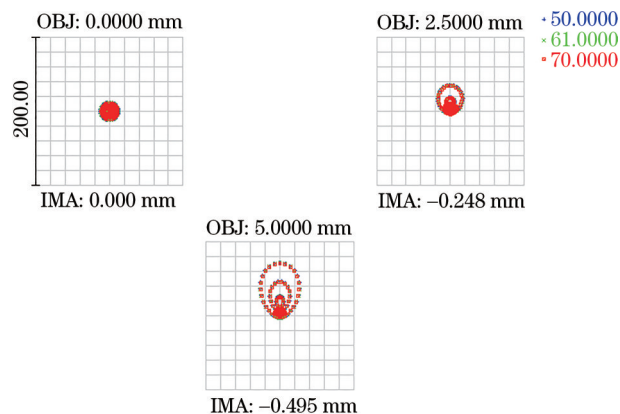


图 3 远红外显微成像光学系统的模拟点列图
Fig. 3 Simulated spot diagrams of far infrared microscopic imaging optical system

场曲曲线表示的是从实际像面到理想像面的距离关于视场坐标函数的图像,畸变反映了实际成像高度与参考光线的偏差^[13]。图 4、图 5 为软件模拟得到的远红外显微成像光学系统的场曲图和畸变图。由图 4、5 可知,不同波长下的场曲偏移值均在小范围内变化且偏移值不大,畸变曲线在不同波长下是重合的且都不超过 0.3%,这表明该光学系统的清晰度渐变小且实际像面的弯曲程度小,能满足成像系统的需求。

圈内能量是指像半径函数的能量百分比。圈内能量图为像平面上一定半径的几何圆内接收到

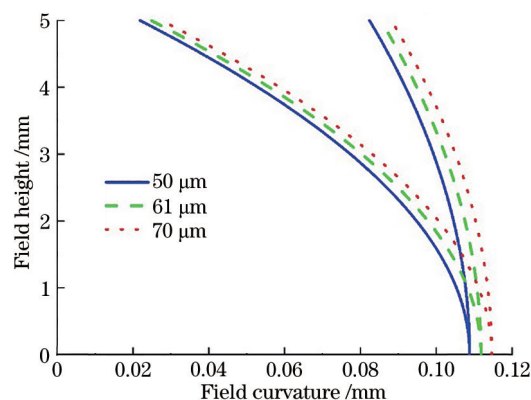


图 4 远红外显微成像光学系统的模拟场曲图
Fig. 4 Simulated field curvature of far infrared microscopic imaging optical system

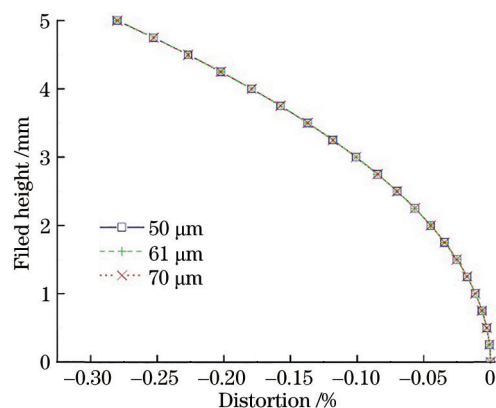


图 5 远红外显微成像光学系统的模拟畸变图
Fig. 5 Simulated distortion of far infrared microscopic imaging optical system

的光能与总入射光能的百分比随对应的包围圆半径变化的图像^[14]。根据斯特列尔判据,当系统存在像差的衍射斑的中心亮度和没有像差的衍射斑的中心亮度之比大于 0.8 时,可以说明该系统的成像质量较高^[15]。图 6 为软件模拟得到的远红外显微成

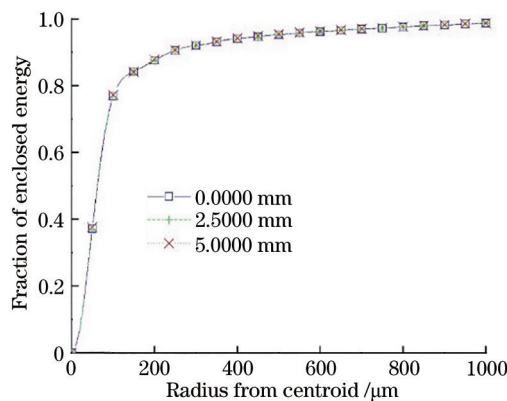


图 6 光学系统的包围圆能量图
Fig. 6 Enclosed energy map of optical system

像光学系统的圈内能量图。由图 6 可知,在不同的视场下,对应探测器的中心波长处,系统的能量在像元尺寸内的集中度大于 80%,这表明该光学系统具有较高的能量集中度,能满足系统的成像需求。

5 杂散光分析

5.1 红外成像系统杂散光分类

按照来源分类,红外成像系统的杂散光可以分为四类:冷反射、系统热辐射杂散光、鬼像和视场外杂散光。冷反射是指探测器接收到自身冷像的一种现象,是由制冷型红外探测器通过系统中光学元件的反射而形成的。系统热辐射的杂散光是由光学系统内部元件产生的红外热辐射经过折射、反射或衍射到达焦平面而形成的。鬼像是指在光学系统焦平面附近由透镜表面的一次或多次反射产生的像。视场外杂散光是由光学系统外的物体辐射、反射或散射的光经过系统内部构件的多次折射、反射或衍射到达焦平面而形成的^[16]。以上四类杂散光均能对红外系统的成像质量造成影响,但是具体问题需要具体分析,在不同的环境下,不同杂散光产生的影响所占权重不一样。对于制冷型的红外成像系统,其光学系统和探测器之间存在温差。尤其是对于深低温工作的探测器来说,如果冷反射的信号很强,则被测物体的信号会被掩盖,系统将不能正常工作,对于这种情况,就需要重点分析光学系统的冷反射问题^[17]。对于高能激光传输系统,甚至是一点微小的二次鬼像都会给系统造成巨大的伤害,这类系统需要着重分析二次鬼像的破坏程度^[18]。对于红外天文探测系统,由于它所需探测的目标信号十分微弱,其杂散光主要来自相对较大的自身辐射,这类系统需要专门考虑如何把自身的辐射对成像质量的干扰降到最低^[19]。对于视场外有强烈光源影响且探测目标信号较弱的空间光学系统,需要重点屏蔽视野外的杂散光^[20]。

5.2 冷反射分析

本文中远红外显微成像光学系统采用的是制冷型凝视焦平面阵列探测器。在制冷型红外成像系统中,冷反射现象是不可避免的,因此冷反射强度是衡量红外系统的一个重要指标。虽然对于凝视型焦平面阵列探测器来说,通过非均匀校正可以对冷反射效应进行一定的补偿,但是其影响还是需要加以考虑的^[19]。由于制冷系统存在冷源且红外元件表面对来自冷源的辐射光有较高的反射率,因

此,当冷源的辐射通过光学元件的反射落在焦平面上时,就会形成像点或者圈形态的冷像,严重影响系统的成像性能。光学元件表面上的特征控制量 YNI 贡献值可以用来对成像系统冷反射效应的大小进行表征,其计算公式为 $YNI = yni$,其中 y 为轴上边缘光线在透镜表面的入射高度, n 为透镜表面之前的折射率, i 为轴上边缘光线在透镜表面的入射角,其值可以根据光学系统的拉格朗日不变量予以推导。YNI 的绝对值越大代表冷反射强度越弱,数值越小代表冷反射强度越高,数值为 0 的时候冷反射最强。对于本系统,当一个面的 YNI 绝对值很小时,比如小于 1,可以认为,此面产生了比较严重的冷反射。表 3 列出了远红外显微成像系统中各个光学元件表面对应的 YNI 值。

表 3 光学元件表面的冷反射特性参数

Table 3 Cool reflection characteristic parameters of optical element surface

Surface	YNI
1	0.09694
2	-0.70972
3	-1.69917
4	-1.66539
5	-1.73224
6	-1.82608
7	-1.47518
8	2.19516
9	-0.05209
10	-0.61923
11	-0.29893

从表 3 数据可以看出,序号为 1、2、9、10、11 的表面冷反射都比较大。

5.3 冷反射抑制

红外光学系统冷反射抑制的方式有很多种^[21-23]。其中一种常用的方法是,利用非均匀校正消除部分冷反射效应,对整个系统进行专门的校正。这种技术的缺点在于不能保证在一定温度范围内,探测器焦平面上不再出现冷反射杂散光。我们认为,在确保一定像质的前提下,除了采用非均匀校正的手段外,还可以通过优化光学系统的结构参数和提高光学元件透过率相结合的方法,进一步减弱远红外显微成像光学系统中的冷反射效应。根据几何光学原理,如果冷光线通过透镜表面反射后,在探测器的焦平面上产生的会聚作用良好,那么冷反射效应的效果就会较强。因此,在抑制红外

光学系统冷反射效应的过程中,可以运用光学设计的手段,来减弱冷光线聚焦在探测器焦平面上的程度。由于焦平面上的冷光斑半径与 YNI 值成正比,显然通过提高透镜表面的 YNI 值可以增大冷光斑的半径,进而有效地减弱冷光线的聚焦程度,达到抑制冷反射效应的目的。需要指出的是,这种方法同样有明显的不足之处,在对单个透镜进行调整时,整个光学系统的像差也会随之变化,为保证光学系统的成像质量,其他透镜的结构参数也需要随之进行优化。最后,针对每个透镜进行特定的镀膜工艺,增大其表面的透过率,减小其表面的反射率,便可以有效地消除系统的冷反射效应带来的不良影响,同时还可以提升光学系统在其他方面的性能。综上所述,对于 5.2 节中提到的序号为 1、2、9、10、11 的表面,我们可以通过在其表面上镀制特定的光学薄膜来抑制冷反射杂散光的干扰,提高系统的成像质量。

6 结 论

针对制冷型远红外凝视焦平面阵列探测的实际应用需求,本文设计了一种透射式远红外显微成像光学系统。该系统结构简单,所有透镜均为球面,降低了加工难度和成本。通过分析杂散光,判断出冷反射效应为系统的主要成像缺陷,可以采用合理的结构设计和特殊的镀膜工艺有效消除冷反射效应的影响。仿真结果表明,当光学系统的空间分辨率、数值孔径、焦距、有效放大倍率、中心波长分别为 $200\ \mu\text{m}$ 、0.25、14 mm、10、 $61\ \mu\text{m}$ 时,系统的调制传递函数值和包围圆能量集中度在特征频率 $5\ \text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ 处分别达到 0.305 和 80%,能够得到清晰可辨的物像,满足红外凝视焦平面阵列探测对冷光学系统的要求。

参 考 文 献

- [1] 王宇,许阳阳,刘爱云,等.长波红外显微成像光学系统的设计与仿真[J].光学学报,2020,40(6):0622001.
Wang Y, Xu Y Y, Liu A Y, et al. Design and simulation of long-wavelength infrared microscopic imaging optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0622001.
- [2] 廖开升.硅基阻挡杂质带红外探测器研制及其光电特性研究[D].上海:中国科学院上海技术物理研究所,2015.
Liao K S. Silicon-based blocked impurity band infrared detectors for space detection[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [3] 岳静静,吴之茂,木二珍,等.红外显微热成像系统研究及应用[J].红外技术,2017,39(11):973-978.
Yue J J, Wu Z M, Mu E Z, et al. Research and applications of infrared thermal microscope imaging system[J]. Infrared Technology, 2017, 39(11): 973-978.
- [4] 李晓婷,朱大洲,潘立刚,等.红外显微成像技术及其应用进展[J].光谱学与光谱分析,2011,31(9):2313-2318.
Li X T, Zhu D Z, Pan L G, et al. FTIR microspectroscopy and its progress in application[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(9): 2313-2318.
- [5] 韩杰.红外显微成像系统关键技术研究[D].北京:北京理工大学,2015.
Han J. Research on the key techniques of thermal microscope imaging system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [6] 王国栋.红外显微热成像系统结构设计及分析[D].昆明:昆明理工大学,2011.
Wang G D. Structure design and analysis of infrared microscopy thermal imaging system[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [7] 王曼霞,赵稼祥.国外红外材料的现状与展望[J].宇航材料工艺,1996,26(3):1-6.
Wang M X, Zhao J X. The present status and further development of IR materials abroad[J]. Aerospace Materials & Technology, 1996, 26(3): 1-6.
- [8] 王衍行,祖成奎,赵华,等.长波红外玻璃的研究[J].功能材料,2010,41(S2):196-200.
Wang Y H, Zu C K, Zhao H, et al. Study on long-wavelength infrared glasses[J]. Journal of Functional Materials, 2010, 41(S2): 196-200.
- [9] 付强,张新.中波/长波双色红外光学系统材料选择[J].光学学报,2015,35(2):0208003.
Fu Q, Zhang X. Materials choose for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0208003.
- [10] 邓大政.单兵、特种车辆微光夜视仪(单管单目)的设计[D].南京:南京理工大学,2008.
Deng D Z. Design of the night-vision viewer (monoscope and monocular) for single-soldier and special type vehicle[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [11] 赵志远.一种可以兼顾远近距离的紧凑型武警用红

- 外热像仪光学系统[J]. 红外技术, 2020, 42(12): 1159-1163.
- Zhao Z Y. Optical system of compact thermal imager for near and far distances for armed police[J]. Infrared Technology, 2020, 42(12): 1159-1163.
- [12] 周昊. 高变焦比中波红外连续变焦光学系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- Zhou H. Study on midwave infrared continuous zoom optical system with a large zoom ratio[D]. Changchun: Changchun Institute of Physics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [13] 马海宽, 张述伟, 吴宁, 等. 海洋浮游生物显微光学成像系统设计[J]. 光电子技术, 2020, 40(1): 35-38, 43.
- Ma H K, Zhang S W, Wu N, et al. Design of micro-optical imaging system for marine plankton[J]. Optoelectronic Technology, 2020, 40(1): 35-38, 43.
- [14] 王宇. 长波红外显微成像光学系统的设计仿真与模拟[D]. 上海: 上海师范大学, 2020.
- Wang Y. Design and analog simulation of the long-wavelength infrared microscopic imaging optical system[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2020.
- [15] 李航. 中波红外目标探测装置关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- Li H. Research on key techniques for medium wave infrared target detection device[D]. Changchun: Changchun Institute of Physics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [16] 江伦. 大变焦比长焦距中波红外连续变焦距系统研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- Jiang L. The research of large zoom ratio long focal length MWIR zoom optical system[D]. Changchun: Changchun Institute of Physics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [17] 张良. 凝视型红外光学系统中的冷反射现象[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S2): 8-11.
- Zhang L. Narcissus effect in staring infrared optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S2): 8-11.
- [18] 李晓彤, 岑兆丰, 何志平, 等. 大功率激光光学系统杂散光分析的数据结构[J]. 激光与红外, 2002, 32(5): 295-296, 299.
- Li X T, Cen Z F, He Z P, et al. Data structure of stray light analyzing in high power laser systems[J]. Laser & Infrared, 2002, 32(5): 295-296, 299.
- [19] 牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2267-2271.
- Niu J X, Zhou R K, Liu Z H, et al. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2267-2271.
- [20] 钟兴, 贾继强. 空间相机消杂光设计及仿真[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 621-625.
- Zhong X, Jia J Q. Stray light removing design and simulation of spaceborne camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 621-625.
- [21] 刘洋, 安晓强, 王茜, 等. 基于光学离焦量的致冷型长波变焦红外成像系统冷反射效应的分析与控制[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0422003.
- Liu Y, An X Q, Wang G, et al. Analysis and control of narcissus effect of long-wavelength cooling infrared imaging system based on optical defocusing[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0422003.
- [22] 马永龙. 红外热成像系统中冷反射的分析和控制[J]. 光学与光电技术, 2010, 8(6): 67-70.
- Ma Y L. Analysis and restrain of narcissus effect in scanning infrared system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2010, 8(6): 67-70.
- [23] 王珊珊, 梁宇宏, 向阳. 一种基于光学优化设计的冷反射抑制[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(3): 16-18.
- Wang S S, Liang Y H, Xiang Y. A inhibition of narcissus based on optical optimization design[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 35(3): 16-18.