

文章编号:1001-5078(2023)01-0108-06

· 光学技术 ·

无限远像距中波显微光学系统设计

孙 浩,武淑明,邓 岩,于 兴,马宇轩,梁进智
(北京华北莱茵光电技术有限公司,北京 100015)

摘 要:随着红外技术的发展,高性能红外显微系统在热物理化学、微生物及 MEMS 优化设计等科技领域起到了非常重要的作用,本文讨论了一种无限远像距显微系统的结构形式及设计方法,针对阵列规模 320×256 ,像元尺寸 $30 \mu\text{m}$ 相对孔径为 2 的中波制冷型红外探测器,设计了一款无限远像距中波显微光学系统,放大倍率为 $3 \times$,工作距离 35 mm ,数值孔径 (NA) 0.75,适合于高帧频下红外显微探测的需求以及类似显微物镜产品的系列化。

关键词:显微镜;红外光学;光学设计

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.017

Design of the MWIR microscope optical system with infinite image distance

SUN Hao, WU Shu-ming, DENG Yan, YU Xing, MA Yu-xuan, LIANG Jin-zhi
(Beijing North China Rhine Opto-Electronics Technology, Beijing 100015, China)

Abstract: With the development of infrared technology, high performance infrared microscope system plays an important role in scientific and technological fields such as thermophysical chemistry, microbiology and MEMS design optimization. In this paper, the structure and design method of an infinite image distance microscope system is proposed. An infinite image distance microscopy optical system is designed for MWIR detector with 320×256 array size, $30 \mu\text{m}$ pixel size and a relative aperture of 2. The designed system's magnification is $3 \times$, working distance is 35 mm , and numerical aperture (NA) is 0.75. It can be applied to infrared microscopic detecting with high frame rate and similar microscope objective products.

Keywords: microscope; infrared optics; optical design

1 引 言

随着红外探测器技术的快速发展,红外成像产品也在向各个应用领域延深。红外显微成像系统除了能观察物体的细微细节还能够了解其细微结构的热分布情况,对于微电子技术^[1-4]、生物医学^[5-6]、材料科学等领域的研究有着非常重要的作用^[7-8]。

红外显微光学系统能够收集待测物体的红外辐

射信号,将物体空间尺寸线性放大并成像至红外探测器是系统中重要的组成部分。2006 年,北京理工大学金伟其,高美静等基于 320×240 非制冷焦平面探测器搭建了红外显微成像系统^[9],设计了该系统中使用的 2 倍长波红外显微物镜,数值孔径 (NA) 0.45,工作距离 20 mm 。2011 年,王国栋等结合人机工程学,研制了放大倍率 3 倍非制冷红外显微成

像系统^[10]。2020年,吴凡,李森森等设计了大工作距离中波红外变焦显微光学系统^[11]。这些系统特别是基于非制冷探测器的红外显微成像系统已经产品化并在很多领域有重要的应用,但是其探测器件灵敏度低;相同孔径下长波艾里斑直径大,系统分辨率低,对于一些需要分辨小温差下的细节检测不适用,特别是在对微区域热扩散和热传导的研究中,非制冷器件无法在低照度下实现高帧频,热输运过程的高动态成像要求无法满足。国外 FLIR SC7000 系列、InfraTec ImageIR 5300 科研级红外热成像产品,核心器件都选用了中波制冷型红外探测器,帧率达到 115 Hz 以上,其中显微物镜最大放大倍率为 3 倍,数值孔径大,工作距离长,国内还没有同类型显微成像产品。

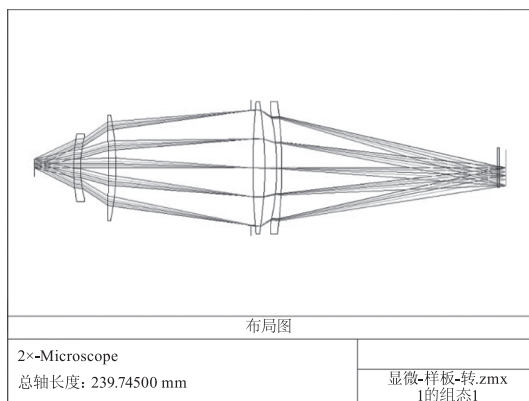


图1 2倍长波红外显微物镜

Fig. 1 2 × LWIR Microscope

本文在前人研究的基础上结合实际应用,从显微光学系统原理出发及制冷型红外器件后置孔径光阑的特点,针对阵列规模 320×256 ,像元尺寸 $30 \mu\text{m}$,相对孔径为 2 的中波制冷型红外探测器,设计了一款无限远像距中波显微光学系统,放大倍率为 $3 \times$,工作距离 35 mm ,数值孔径 (NA) 0.75 ,适合于高帧频下红外显微探测的需求以及类似显微物镜产品的系列化。

2 设计指标及原理

2.1 技术指标

显微光学系统适配阵列规模 320×256 的高帧频中波制冷型探测器,像元尺寸 $30 \mu\text{m}$,设计考虑制冷型探测器的特点,物镜的数值孔径需要匹配器件冷阑的相对孔径,兼顾系列化及通用性,相关的技术

指标如表 1 所示。

2.2 设计原理

相比于平行光入射的无限远物距成像光学系统,显微物镜属于有限物距放大成像系统,其物距在 2 倍焦距与 1 倍焦距之间。成像过程中系统对球面波前做了反向变换,如图 2 所示,这一变换过程必然包含平面波前的中间态。无限远像距显微系统是将放大成像的过程做了分段,将有限远的放大成像过程分为球面波转换为平面波的准直部分,以及平面波转换为球面波的汇聚成像部分。这样的系统结构解除了显微物镜系统内部各个光学组元之间的耦合关系。固定成像物镜组的光学参数,通过改变准直物镜焦距就能够实现多种放大倍率的切换,特别适合于系列化产品的开发;同时准直物镜的光学结构更为简单,也降低了制造成本;此外在准直物镜和成像物镜之间的平行光路部分方便设置分光镜、滤光片,为待测品光谱特性的研究提供了条件。

表 1 设计指

Tab. 1 Parameters of design

参数	技术指标
探测器	320×256
工作波段/ μm	$3 \sim 5$
像元尺寸/ μm	30
像方 F 数	2.0
放大倍率	3
工作距离/ mm	≥ 30
光学总长/ mm	≤ 420

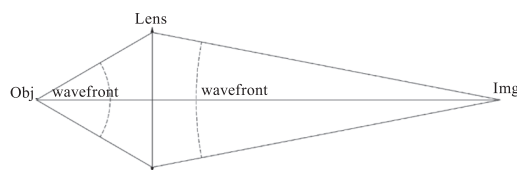


图2 显微光学原理

Fig. 2 Principle of microscope

定义 f_1 为准直物镜焦距, f_2 为成像物镜焦距,无限远物距显微系统放大倍率 β 有如下关系:

$$\beta = -\frac{f_2}{f_1}$$

由上式可知,成像物镜的焦距确定后,系统放大

倍率只和准直物镜焦距有关。成像物镜选择较长焦距,有利于增加工作距离,系统像差主要为孔径相关的球差及慧差,但会增加显微系统的整体长度,所以在设计时成像物镜焦距应该基于工作距离以及长度要求合理选择。

为了抑制背景辐射对成像探测的影响,制冷探测器杜瓦内会设置冷阑。冷阑的位置处在焦面前端为圆孔,冷阑直径与其到焦面距离的比值为像方 F 数。光学系统在设计时需要保证系统出瞳与冷阑匹配,这样冷阑即为系统的视场光阑。对于此类系统的设计,当成像系统焦距较短时可以使用冷阑作为系统孔径光阑,此时入瞳在系统内部,前端镜片尺寸因视场变大而增大。无限远像距中波显微系统的设计中前组准直物镜出瞳与后组成像物镜入瞳需要匹配,这要求前组物镜出瞳后置,后组物镜入瞳前置,同时后组还要满足出瞳为探测器冷阑位。为达到此要求,后组物镜需要采用二次成像的光学结构,如图 3 所示,后组物镜由摄远组和转像组组成,摄远组成像至中间像面,转像组将中间像成像至探测器焦面,摄远组孔径光阑前置,转像组孔径光阑为冷阑位。

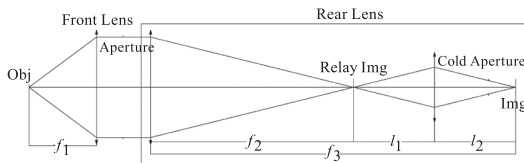


图 3 无限远像距显微系统

Fig. 3 Principle of infinite image distance microscope

此时系统的放大倍率 β 为:

$$\beta_{\text{rear}} = -\frac{l_2}{l_1}$$

$$f_3 = f_2 \cdot \beta_{\text{rear}} = -f_2 \cdot \frac{l_2}{l_1}$$

$$\beta = -\frac{f_3}{f_1} = \frac{f_2 \cdot l_2}{f_1 \cdot l_1}$$

其中, β_{rear} 为转像组放大倍率; l_1, l_2 分别为转像组物距和像距; f_2 为后组摄远部分焦距; f_3 为后组成像物镜焦距; f_1 为前组准直物镜焦距。

系统数值孔径 NA 等于前组准直物镜数值孔径 NA_{front} , 其中 NA_{rear} 为后组像方数值孔径, $F/\#$ 为像方 F 数。

$$NA = NA_{\text{front}} = \beta \cdot NA_{\text{rear}} \approx \beta \cdot \frac{F/\#}{2}$$

3 设计实例

基于上述设计原理,结合中波红外系统材料选取以及系统特点,对无限远像距显微中波显微系统进行设计。设计将系统分成准直组、成像组、转像组三个部分,定义转像组的放大倍率为 -1 ,此时准直组和成像组焦距比为 $1:3$,根据系统长度及物距的要求,定义成像组的焦距为 160 mm ,准直组焦距为 53.3 mm ,物方数值孔径为 0.75 。

3.1 准直组

常见显微物镜结构分为李斯特型及阿米西型,李斯特型可在中低倍率使用,阿米西型主要用在高倍显微镜中^[12]。为了满足探测器孔径匹配,虽然系统放大倍率不大,但数值孔径较大,设计仍应该参考阿米西型结构,使用多组正透镜递次分解孔径角,再采用正负透镜组合的形式引入负球差及色差才能达到较好的设计结果。可以反向设计但需要考虑入瞳直径的匹配,也可以正向设计,系统评价需要引入和后组焦距一致的理想物镜。设计结果如图 4 所示,正透镜选用了硅材料,负透镜选用了锗材料,全部使用球面面型,也可以引入非球面简化系统结构,但硅材料硬度较高,大尺寸硅的非球面透镜,采用金刚石单点车削的加工工艺其表面粗糙度难以达到使用要求。

3.2 成像组

成像组使用摄远结构,孔径光阑设置在准直组出瞳位,焦距 160 mm 相对孔径 $F/\#$ 为 2.0 。材料选用了硅、锗,在像面附近的透镜使用非球面以矫正像散及场曲。设计结果图 5 所示。

3.3 转像组

转像组使用了对称式结构,设计方法可参考双高斯构型的方式,定义物距在无穷远,先设计后组再做对称,以平衡残存的像散、场曲及倍率色差。物方数值孔径为 0.25 ,孔径光阑设置在探测器冷光阑位,材料选用硅、锗,设计结果如图 6 所示。

三部分分别设计完成后对系统进行拼接,得到 3 倍无限远像距显微物镜,结果如图 7 所示。拼接后系统的弥散斑直径比各个部分单独评价时增大,简单优化后弥散斑收敛,能够满足使用要求。

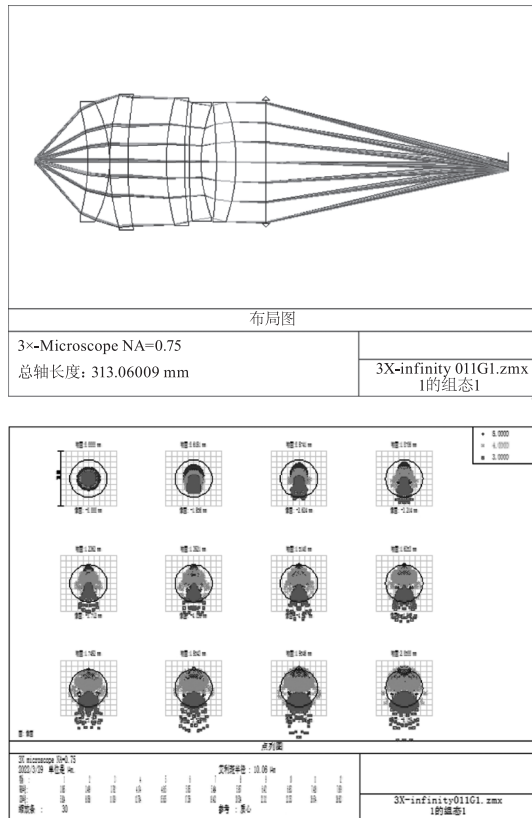


图4 准直组

Fig.4 Collimator lens

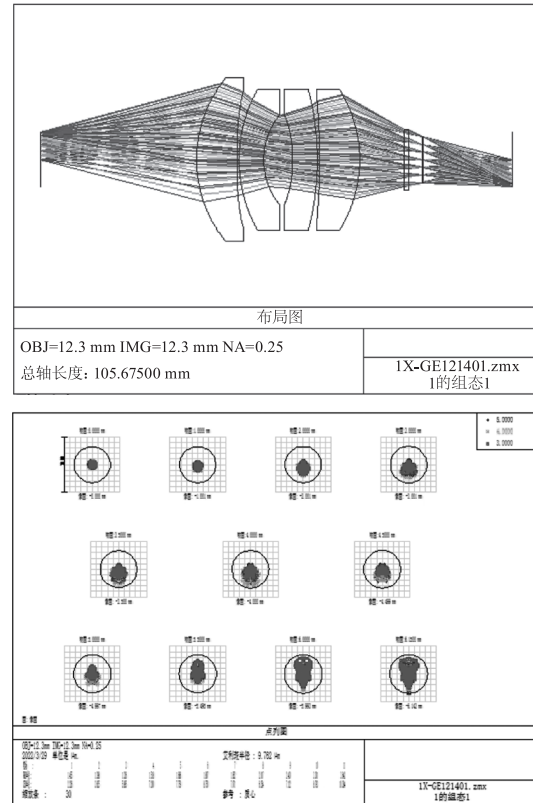


图6 转像组

Fig.6 Relay lens

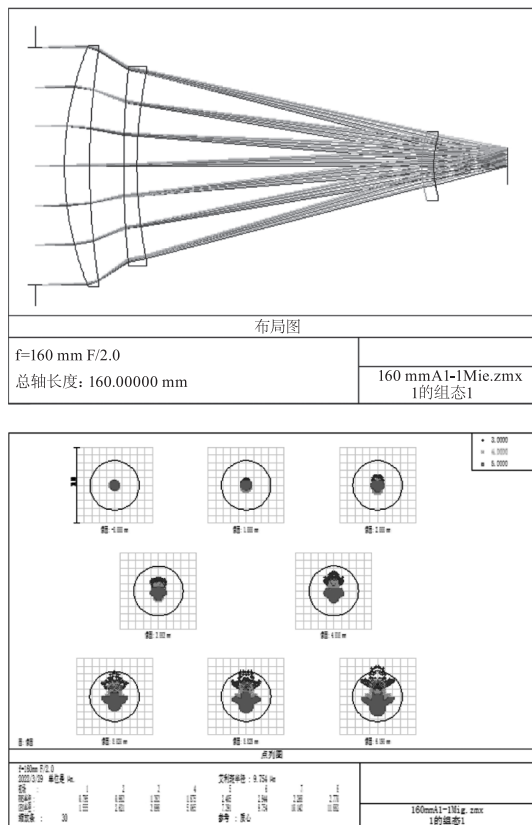


图5 成像组

Fig.5 Imaging lens

成像组和转像组共同组成的后组望远系统也可以考虑独立优化,进一步减少镜片数量。系统各个表面的 YNI 值大于 1,冷像强度较低对成像影响可忽略。准直物镜组各组元承担了较大孔径压力,透镜偏心及透镜与结构装配的偏心公差对系统性能影响明显,结构设计及装调需要采用定心装配的工艺以保证系统成像质量。

表2 表面 YNI

Tab.2 Surface YNI

Surface	YNI	Surface	YNI
1	33.31665	13	-32.60724
2	-1.73372	14	-3.55371
3	38.46912	15	-1.14056
4	16.4097	16	-1.16108
5	25.90255	17	10.93988
6	-2.26966	18	-5.49157
7	-3.65643	19	-2.31541
8	60.17955	20	5.45818
9	35.75571	21	-2.14137
10	29.77245	22	3.21193
11	33.97706	23	4.33742
12	34.36634	24	-9.9508

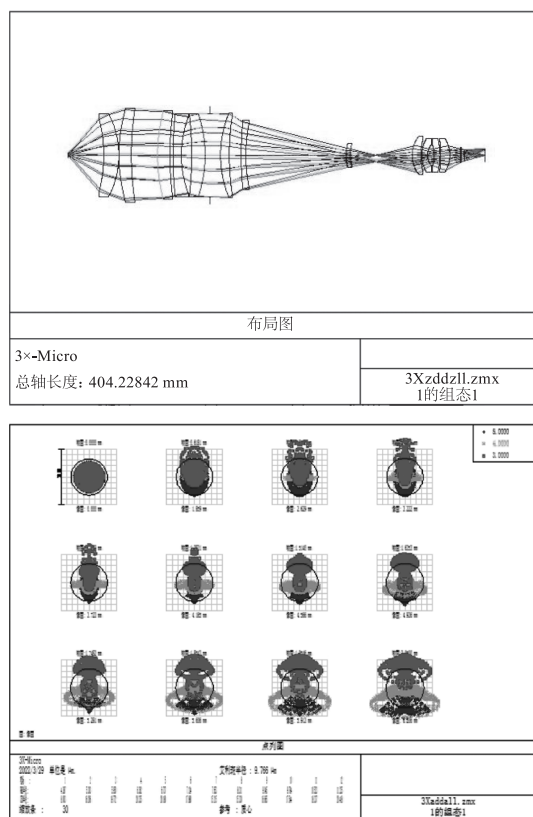


图7 3×中波红外显微物镜

Fig.7 3× MWIR microscope

4 结论

随着红外技术的发展,高性能红外显微系统在热物理化学、微生物及 MEMS 优化设计等科技领域起到了非常重要的作用,本文讨论了一种无限远像距显微系统的结构形式及设计方法,复用后成像物镜,通过前准直物镜的更换改变显微镜放大倍率,十分适合系列化产品的开发,结合中波制冷型红外探测器,设计了一款工作距离 35 mm,数值孔径(NA) 0.75 的 3 倍中波显微成像光学系统,系统由硅、锗材料组成的 12 片透镜组成,成像质量良好。

参考文献:

- [1] Gao Meijing, Xu Jie, Jin Weiqi, et al. Status and prospect on thermal microscope imaging technology [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(1): 13 – 18. (in Chinese)
高美静, 许杰, 金伟其, 等. 显微热成像技术研究现状与展望[J]. 激光与红外, 2017, 47(1): 13 – 18.
- [2] Zhu Dezhong, Gu Yuqin. Study of thermal performance of power transistor by micro-thermo-video system [J]. Laser

& Infrared, 1996, 26(2): 134 – 135. (in Chinese)

朱德忠, 顾毓沁. 显微热像测试功率晶体管热性能 [J]. 激光与红外, 1996, 26(2): 134 – 135.

- [3] Zhu Dezhong, Zhang Ronghai, GU Yuqin, et al. Thermal characteristics measurement of MEMS devices using infrared thermography [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(4): 679 – 681. (in Chinese)
朱德忠, 张荣海, 顾毓沁, 等. 用红外热成像技术测量 MEMS 器件的热特性 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(4): 679 – 681.
- [4] Liang Faguo, Zhai Yuwei, Wu Aihua. Reliability analysis of power devices by infrared thermography [J]. Micronano Electronic Technology, 2011, 48(95): 338 – 344. (in Chinese)
梁法国, 翟玉卫, 吴爱华. 用显微红外热成像技术分析功率器件可靠性 [J]. 微纳电子技术, 2011, 48(95): 338 – 344.
- [5] V Chelladurai, D S Jayas, N D G White. Thermal imaging for detecting fungal infection in stored wheat [J]. Journal of Stored Products Research, 2010, 46(3): 174 – 179.
- [6] Xin Wang. Applications of FTIR Spectroscopy and Imaging in the study of Gastric Cancer and Traditional Chinese Medicine [D]. Changsha: University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)
王欣. 红外谱学与显微成像在胃癌与中药研究中的应用 [D]. 长沙: 中国科学技术大学, 2012.
- [7] Park H, Choi M, Park J, et al. A study on detection of micro-cracks in the dissimilar metal weld through ultrasound infrared thermography [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 62(0): 124 – 131.
- [8] Yuan Lihua, Wang Jiangfei, Zhu Zhengguang, et al. Detection of material surface cracks by infrared thermal imaging microscope [J]. Infrared Technology, 2018, 40(6): 612 – 617. (in Chinese)
袁丽华, 汪江飞, 朱争光, 等. 材料表面裂纹的红外热像显微检测 [J]. 红外技术, 2018, 40(6): 612 – 617.
- [9] Gao Meijing, Jin Weiqi, Wang Haiyanl. The new thermal

- microscope imaging system for electronic device analysis [J]. Electronics & Packaging, 2008, 8(4): 41 – 44. (in Chinese)
- 高美静, 金伟其, 王海岩. 电子器件分析用新型显微红外热像仪[J]. 电子与封装, 2008, 8(4): 41 – 44.
- [10] Wang Guodong. Structure design and analysis of infrared microscopy thermal imaging system [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- 王国栋. 红外显微镜热成像系统结构设计及分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [11] Wu Fan, Li Sensen, Lan Xirui. Optical design of infrared zoom microscope system with long working distance [J]. Electro-Optic Technology Application, 2020, 35(4): 9 – 14. (in Chinese)
- 吴凡, 李森森, 兰喜瑞. 大工作距红外变焦显微光学系统设计[J]. 光电技术应用, 2020, 35(4): 9 – 14.
- [12] Kuang Yuguang. Lens design of the flat field, apochromatic CF microscopic objective [J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(5): 558 – 560. (in Chinese)
- 匡裕光. 平象场复消色差大视场显微物镜光学设计[J]. 光学学报, 1994, 14(5): 558 – 560.