

适于红外双色探测的光学系统*

孙强^{1,2)} 王肇圻²⁾ 李凤友¹⁾ 卢振武¹⁾ 陈波¹⁾

⁽¹⁾中国科学院长春光机与物理研究所应用光学国家重点实验室,吉林,长春,130022;

⁽²⁾南开大学现代光学研究所,光电信息技术科学教育部重点实验室,天津,300071)

摘要 设计了适于红外双色探测器的光学系统. 该系统在两个波段内同时较好的满足了像差校正. 波前差小于 $1/4$ 波长,光学传递函数接近衍射极限. 该系统透射比高,设计结构紧凑,片数小. 降低了对工艺水平的要求.

关键词 红外,双色探测,光学设计,像差.

AN OPTICAL SYSTEM FOR INFRARED TWO-COLOR DETECTOR*

SUN Qiang^{1,2)} WANG Zhao-Qi¹⁾ LI Feng-You²⁾ LU Zhen-Wu²⁾ CHEN Bo²⁾

⁽¹⁾State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130022, China;

⁽²⁾Institute of Modern Optics, Nankai University, The Key Laboratory of Opt-electronic Information Science and Technology, MOE, Tianjin 300071, China;)

Abstract A new optical system for infrared two-color detector was designed. It has a good performance for the dual band simultaneously. The wave front aberrations are less than one-fourth central wavelength, and the modulation transfer functions to are the diffraction limit. The system possesses higher transmittance, compacted structures with fewer elements and lower requirements in manufacture.

Key words infrared, dual-color detection, optical design, aberation.

引言

红外辐射主要有近红外(0.75~2.5 μm),中红外(3.2~4.5 μm)和热红外(8~14 μm)波段三个大气窗口. 现在的红外光学系统绝大多数为其中某个单波段系统,由于红外系统使用区域的不同、气候温度的改变、目标的伪装,单一波段的系统获取的信息自然就减弱,特别是探测目标本身的操作或者行为的改变导致辐射波段移动等原因,使成像系统探测不到目标或者探测准确度下降^[1]. 随着遥感和精密制导技术的发展,根据目标和背景的辐射和反射特性,对可见光或红外光谱中二个或多个波段的辐射进行探测和比较已显得非常重要. 最初用于测量和比较的方法有二种^[2],一是在具有宽响应波段的探测器前放置带有两种波段分离滤光片的转动圆盘,并进行相应的同步电子学处理. 这种方法不能在任

一波段上进行连续观察,同时光机结构和电子学设备较复杂. 二是在具有不同响应波段的探测器之间,采用光束分离片把入射光分开. 这种方法虽然能同时连续对两个波段的辐射进行测量,但每个探测器接收到的能量有较大损失,因而降低了系统的灵敏度,同时各光学部件之间的配置精度要求也很高. 由于上述系统的诸多局限性,国外学者进行了双色或多色探测器的研究^[3],即是将两个或多个响应于不同波段的探测器制备成叠层结构能同时连续探测两个或多个波段辐射的红外探测器. 其中双色探测器多为同心叠层结构,上面的一个探测器吸收一个波段的红外辐射并透过下面一个探测器所敏感的红外辐射. 这种双色探测器能同时记录双波段光谱信息而不必使用光束分离或光束色散系统,因而红外成像系统得到简化.

III-V族化合物铟化铟(InSb)晶体既是红外探

* 国家自然科学基金(批准号60277021)资助项目
稿件收到日期2002-11-30,修改稿收到日期2003-05-18

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China(No.60277021)
Received 2002-11-30, revised 2003-05-18

测器材料,又是红外光学材料,在 3~5 μm 波段是性能优良的红外探测器. 在 8~14 μm 波段有较好的透射特性,可用作窗口和透镜材料. 碲镉汞材料(HgCdTe)具有电子有效质量小,本征载流子浓度低的特点. 因此由它制成的光伏探测器具有反向饱和电流小,噪声低,探测率高,响应时间短,响应频带宽等优点,在 8~14 μm 波段具有优良的探测性能. 为此可以将上述材料的探测器叠合在一起制成双色探测器,上层的碲化铟用来探测 3~5 μm 频谱,下层的碲镉汞器件用来探测 8~14 μm 波段的频谱^[4,5].

本文根据碲化铟和碲镉汞材料的上述特性,设计出了具有较大现场,适用于中红外和热红外双波段的红外光学系统. 成像质量接近衍射极限,具有 100% 冷光栏效率,适应双色探测要求的光学系统.

1 双色探测的光学系统设计原理

本系统涉及二个波段的系统设计,其中 3.2~4.5 μm 波段的光谱通过透镜组,成像在碲化铟接收平面上,而 8~12 μm 波段的光谱通过透镜组后,透过碲化铟薄体探测元件,成像在碲镉汞接收平面上,如图 1 所示. 在 3.2~4.5 μm 波段,如果系统采用三片式结构,材料分别为 Si, Ge, ZnSe 三种材料. 而在 8~12 μm 波段,系统光束还要通过 InSb 材料. 则此系统光焦度分配必须满足总光焦度要求,其中 8~12 μm 波段的系统光焦度要比 3.2~4.5 μm 波段 InSb 材料器件所贡献的光焦度要求,可以用式(1)和式(2)表示;另外需满足消轴向色差方程,即红辐射在通过光学系统时发生色散引起离焦的变化,用式(3)和式(4)表示

$$\sum_3^3 h_i \Phi_i = h_1 \Phi, i = 3 (3.2 \sim 4.5 \mu\text{m} \text{ 波段}), (1)$$

$$\sum_1^4 h_i \Phi_i = h_1 \Phi, i = 4 (8 \sim 12 \mu\text{m} \text{ 波段}). (2)$$

式(1)和式(2)中, Φ_i 为透镜组中的各个透镜的光焦度, h_i 为近轴光线在透镜组中的各个透镜上的入

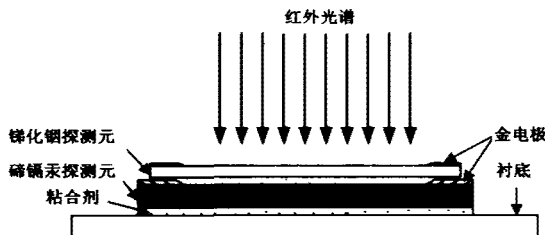


图 1 双色探测器件示意图
Fig. 1 The sketch of dual-color detector

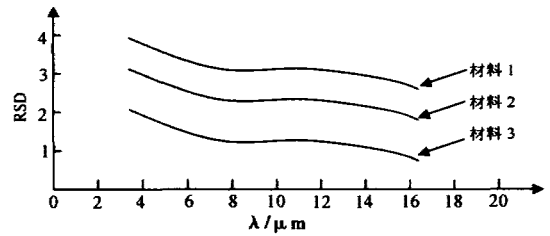


图 2 理想材料选择示意图(RSD 表示材料的折射率同相对应波长值的比)
Fig. 2 The sketch of ideal lens materials (RSD represent the ratio of refractive index to wavelength)

射高度, Φ 为 3.2~4.5 μm 波段系统的总光焦度.

$$\Delta f_b^r = \left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum (h_i^2 \omega_i \Phi_i) = 0, (3)$$

$i = 3 (3.2 \sim 4.5 \mu\text{m} \text{ 波段})$

$$\Delta f_b^r = \left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum (h_i^2 \omega_i \Phi_i) = 0, (4)$$

$i = 4 (8 \sim 12 \mu\text{m} \text{ 波段})$

式(3)和式(4)中, ω_i 为透镜组中的各个透镜材料的色散因子,即色散引起的光焦度的相对变化, h_i 为近轴光线在透镜上的入射高度.

由于光学系统的光焦度、面形结构、厚度等参数已经确定,对于红外材料的折射率变化,应满足在双波段内同时成像,同时校像差,特别是轴向色差的校正,则可用式(5)表示

$$\frac{\Phi_2^i}{n_2^i - 1} = \frac{\Phi_1^i}{n_1^i - 1}, i = 1, 2, 3 \dots (5)$$

式(5)中, $\Phi_2^i (i=1, 2, 3 \dots)$ 依次表示系统中每个透镜在热红外波段时的光焦度,而 $\Phi_1^i (i=1, 2, 3)$ 表示这个透镜在中红外波段时的光焦度.

从式(5)可以看出,所选定的每种红外材料在中红外和热红外各波长处的折射率值,同这点波长的比值所形成的假想曲线在相对应波长处的斜率值应相近,这样才能在各个波段内很好的协调消像差,材料

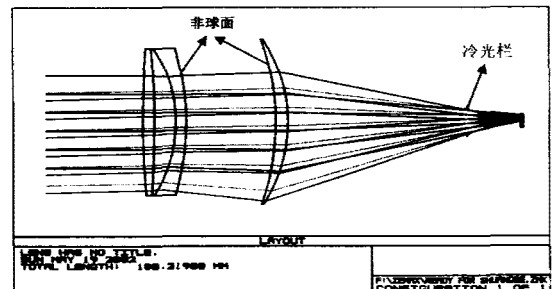


图 3 双色红外系统结构图
Fig. 3 The layout of dual-color infrared system

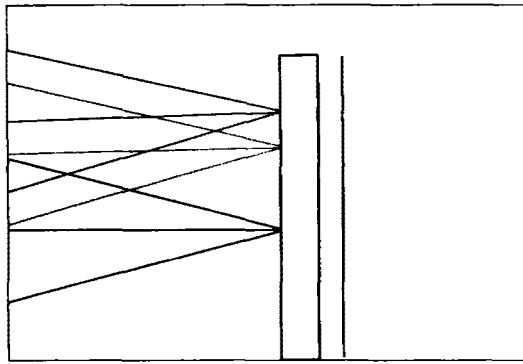


图4 3.2~4.5 μm 波段系统的探测平面放大图
Fig.4 The amplificatory layout of detectable plane for 3.2~4.5 μm wave band

选择示意图如图2所示. 这是理想状况下各种材料的折射率值同波长的比值随波长变化的关系曲线.

2 具体设计方案的结果与讨论

我们设计了通光口径为50mm、视场角为4°、波段为3.2~4.5 μm 时的有效焦距为92.6mm,波段为8~12 μm 时的有效焦距为93.4mm的适于双色探测,冷光栏效率为100%的光学系统. 材料为ZnSe和Ge. 首先根据公式(1)和式(3)计算出3.2~4.5 μm 波段系统的光焦度和初始结构. 当材料选定之后,在软件ZEMAX下进行数据处理. 利用软件中的优化函数的“多种配置”的优化功能加入8~12 μm 波段的“红外光谱波长”和碲镉汞平板器件的“厚度及折射率”等参数. 利用软件的强大数值优化能力重新微调各个镜片的光焦度分配和计算元件面型结构参数,使8~12 μm 波段的光谱通过整个系统时,考虑InSb平板器件产生的像差进行精心的优化,平衡二个波段的像差并形成较好的像平面. 最后确定整个系统的结构. 结构图如图3所示. 其中第4面

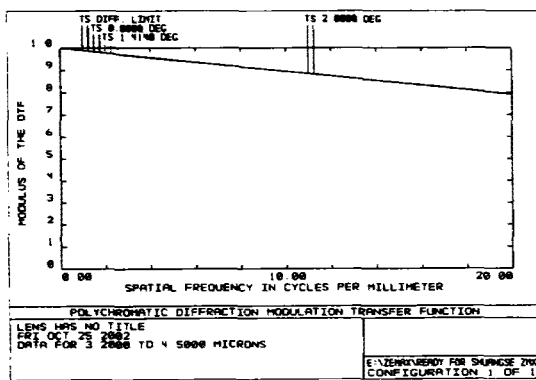


图5 3.2~4.5 μm 波段系统的光学传递函数
Fig.5 The MTF layout of 3.2~4.5 μm wave band

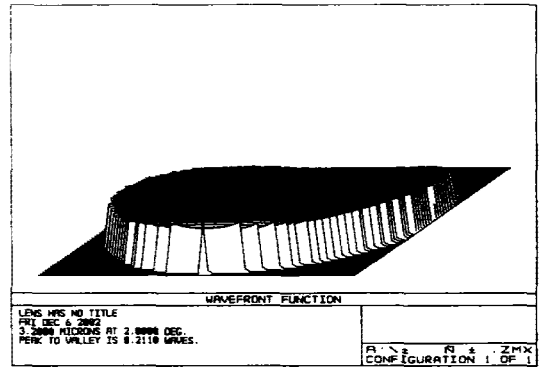


图6 3.2~4.5 μm 波段系统的波前差
Fig.6 The layout of wave front error for 3.2~4.5 μm wave band

和第5面为高次非球面,加上高次非球面的目的是更有利于消球差和彗差. 冷光栏接于第3个Si镜后像平面前.

图4是3.2~4.5 μm 波段系统的探测平面放大图,从图中能够看到成像光线非常好地入射到InSb探测器平面上,图5表明了它的系统的光学传递函数情况,结果表明,在频率为20线对时达到衍射极限,图6为3.2~4.5 μm 波段系统全视场的波前差曲线(结果为0.211 λ_0).

图7为8~12 μm 波段系统的探测平面放大图,从图中能够看到光线很好地入射到HgCdTe探测器平面上,图8表明系统的光学传递函数情况. 结果表明,在频率为20线对时接近衍射极限,图9为8~12 μm 波段系统全视场波前差曲线(结果为0.237 λ_0).

由设计结果可以看出,系统在二个波段的全视场波前差都 $< 1/4\lambda_0$,小于像质评价“瑞利判据”的标准,即当实际波面与理想波面的最大差别不超过

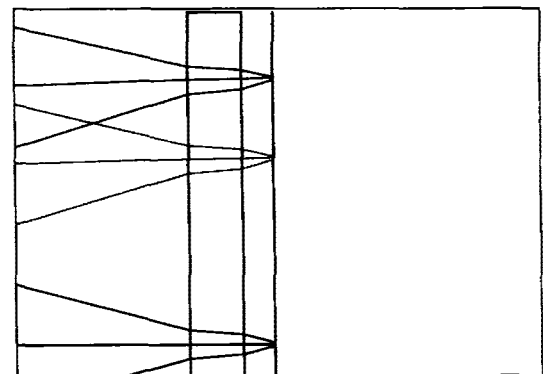


图7 8~12 μm 波段系统的探测平面放大图
Fig.7 The amplificatory layout of detectable plane for 8~12 μm wave band

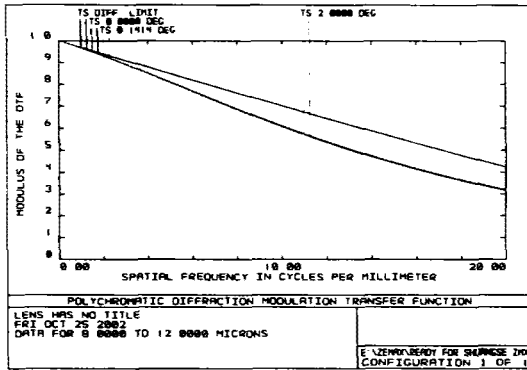


图8 8~12 μm 波段系统的光学传递函数
Fig.8 The MTF layout of 8~12 μm wave band

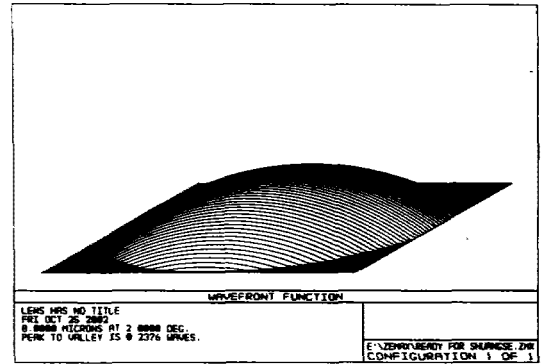


图9 8~12 μm 波段系统的波前差
Fig.9 The layout of wave front error for 8~12 μm wave band

$\lambda/4$ 时,此波面可看作无缺陷;两个波段的光学传递函数均达到或者接近衍射极限,所以该系统可在实际中使用. 并且系统在 3.2~4.5 μm 波段的校像差更好,这是因为在我们设计过程中,最初是以 3.2~4.5 μm 波段为标准的,很好地完成了系统的各种像差. 然后再利用软件中的优化函数“多种配置”的优化功能加入 8~12 μm 波段的波长,对系统进行微校正,但由于波长变化,使系统像差加大,焦距变长,而作为既是透镜材料,又是探测材料的 InSb 平板器件也将产生像差,且 InSb 器件只能是平面和厚度是不变的,这就减少了 8~12 μm 透过波段设计的自由度,影响了这个波段像差的校正. 另外也是由于选定的每种红外材料在中波红外和热红外每个波长处折射率值,同这点波长的比值所形成的假想曲线上的相对应波长处的斜率值在热红外波段很接近,而在热红外波段不能如此,所以导致系统品质下降.

我们同时考虑到实际加工的可能性,使用软件 ZEMAX 对系统进行了公差分析,当系统中的透镜及其面形倾斜度为 $\pm 0.3^\circ$ 、 \pm 偏心 0.3mm、曲率半径偏差 $\pm 0.4\text{mm}$ 时,按照对 MTF 的影响进行公差估计,结果表明,MTF 在 20 线对/mm 时降低了 0.0431,对系统的影响比较小. 所以该套系统能够进行实际加工.

3 结论

本文成功地完成了红外双色系统的设计,使系统在两个波段内同时较好的完成了系统的像差校正,波

前差都 $< 1/4$ 波长,光学传递函数接近衍射极限. 设计结构紧凑,片数少,透射比高,具有良好的消像差特性. 所以双色或多色探测使红外光学系统在信息丰富、色调判读、立体遥感、识别真伪、杂波背景抑制、反侦察、反隐身、多目标跟踪及全天候性能方面具有无法比拟的优势,而且体积小、精度和分辨率高. 双色成像技术除了在军事应用外,在工业、医学、航天、气象等民用方面均具有广泛的应用前景.

致谢 此项目得到中国科学院长春光机与物理研究所应用光学国家重点实验室基金资助.

REFERENCES

- [1] WU Zong-Fan, LIU Mei-Lin, ZHANG Shao-Ju, et al. *Infrared and Glimmer Technology*. Beijing: National Defence Industry Publishing House (吴宗凡,柳美琳,张绍举,等. 红外与微光技术. 北京:国防工业出版社), 1998, 286—300
- [2] GUO Yong-Hong, SHEN Mang-Zuo, LU Yong-Kang. Athermal design for infrared refractive/diffractive optical system. *Acta Optica Sinica* (郭永红,沈忙作,陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计. 光学学报), 2000, 10: 2392—2395
- [3] Thomas H. Jamieson. Ultrawide waveband optics. *Opt. Eng.*, 1997, 23(2): 111—116
- [4] LI Shi-Xian, LI Lin. *Optical Design Handbook*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (李士贤,李林. 光学设计手册. 北京:北京理工大学出版社), 1995, 69—116
- [5] YUAN Xu-Cang. *Optical Design*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press (袁旭沧. 光学设计. 北京:北京理工大学出版社), 1998, 96—143