

中波/长波双色红外光学系统材料选择

付强^{1,2} 张新¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室,吉林 长春 130033

²中国科学院大学,北京 100049

摘要 为成功应用新一代红外探测器,须要设计出能够同时具备双/多色成像能力的光学系统。提出了针对双色红外光学系统材料选择的计算评价方法,其评价项包括绝对光焦度和设计谱段内多个波长下的平均离焦两项。利用该方法对可选的材料组合进行评价,可以快速高效地获得最佳材料组合和元件初始光焦度分配。通过分析评价,适用于中波/长波双色红外光学系统最佳的两片透镜材料组合方式为 ZnS/IG2,最佳的三片透镜材料组合方式为 Ge/ZnS/GASIR1。通过对组合的详细设计分析验证了该评价方法的有效性。最佳组合可作为透镜组元,为实际光学系统设计提供良好起点。

关键词 光学设计;红外光学系统;双色红外探测器;薄透镜理论

中图分类号 TN216 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0208003

Materials Choose for Mid-Wave/Long-Wave Dual-Waveband Infrared Optics

Fu Qiang^{1,2} Zhang Xin¹

¹Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To apply the new generation infrared detector successfully, it is necessary to design dual-band/multi-band optical imaging systems. A calculation evaluation method to select materials for dual-band infrared optical imaging systems is proposed. The criterion includes the absolute lens power and the average defocus evaluated at a number of wavelengths in the designing radiation waveband. Evaluation of all potential combinations of materials by using this method, the optimal combination of materials and the initial focal power distribution for optical components can be obtained rapidly and efficiently. Through analysis and evaluation, ZnS/IG2 is the best two-lens material combination mode for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics. Ge/ZnS/GASIR1 is the best three-lens material combination mode for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics. As it is proved that the method is valued through designing and analyzing the combinations detailed. These best combinations can be used as lens elements to provide a good starting point for designing actual optical systems.

Key words optical design; infrared optical system; dual-waveband infrared detector; thin lens theory

OCIS codes 080.3620; 220.3620; 110.2970; 160.4670

1 引言

随着第三代红外探测器技术的发展,探测器可以同时多个波段的红外辐射进行响应,输出相应波段的图像。多波段的图像天生自配准,给目标探测和识别带来极大好处^[1-5]。双/多色成像的使用变得越来越广

收稿日期: 2014-08-19; 收到修改稿日期: 2014-09-20

作者简介: 付强(1985—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事红外光学系统设计方面的研究。

E-mail: fuqianghit@163.com

导师简介: 张新(1968—),男,博士,研究员,主要从事非常规复杂光学系统设计方面的研究。E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

泛。为了成功应用新一代探测器,必须设计出能够同时具备多波段成像能力的光学系统^[6-8]。因此,研究双/多色红外光学系统的设计对军事领域和民用技术的发展意义重大。

光学材料对不同波长的单色光折射率不同。复色光经光学系统折射后,各种单色光被分开,在光学系统内以各自的光路传播,造成各种单色光之间成像位置和大小差异,这种由光学材料的色散特性引起的像差称为色差。为了满足特定谱段宽度下的成像质量要求,光学系统色差校正是必须的。色差校正一般采用多种材料、多个光学元件组合,使得材料色散效应在特定波长处彼此抵消^[9,10]。对于可见光波段 0.4861~0.6563 μm ,两端波长之间的比率为 1.35。对于中波/长波双色红外探测器,探测器响应谱段包括 3~5 μm 和 8~12 μm ,此时最长波长和最短波长之间的比率为 4。对于短波/长波双色红外探测器,探测器响应谱段包括 1~3 μm 和 8~12 μm ,此时比率为 12。该比率可以在一定程度上表征谱段宽度,从比率上可以看出,利用双/多色探测器时需要校正色差的相关谱段较可见光谱段要大得多。色差校正是双/多色红外光学系统设计面临的主要难题。

利用衍射元件可以在一系列分离波长处获得相同的光焦度,从而实现双波段红外光学系统的色差校正^[11-13],在改善成像质量、减小系统体积和降低成本等方面表现优异。但衍射光学元件一般仅在不同级次的中心波长处衍射效率高,偏离该波长,衍射效率显著下降,影响系统的透射率。本文仍主要探讨实现双色红外光学色差校正的材料组合匹配评价方法和实际效果。

在红外成像领域,应用最为广泛的光谱波段为中波红外(3~5 μm)和长波红外(8~12 μm)。本文主要探讨设计中波/长波双色红外光学系统材料选择的诸多考虑。首先探讨了能够适用于中波/长波双色红外光学系统的可选材料;其次根据双色光学系统设计的特殊性对薄透镜理论进行了修改,提出了针对双色红外光学系统材料选择的评价方法,其评价项包括绝对光焦度和设计谱段内多个波长下的平均离焦两项。利用该评价方法对两片透镜组合和三片透镜组合进行了分析评价,得到最佳的两片透镜组合和三片透镜组合,并对这两种组合进行了详细的设计和分析,验证了该评价方法的有效性。

2 可选材料

光学材料的光谱透射率与材料的微观结构有关,特别是化学键和原子量,任何光学材料只能在某一波段具有较高的透射率。与可见光谱段各种各样的光学玻璃材料可供选择相比,适用于红外光学系统的材料种类要少得多。考虑实际工程应用中红外光学材料的主要性能,包括光谱透射率及其随温度的变化、折射率和色散及材料随温度的变化、抗腐蚀和防潮解能力、热膨胀系数和可能制备的样品尺寸等因素,易潮解的含卤族元素的绝大部分碱金属材料遭到遗弃,使得可选红外光学材料种类大幅度减少。

表 1 可选的红外光学材料

Table 1 Optional infrared optical materials

Material	Refractive index		$dn/dT@10 \mu\text{m} / \text{K}^{-1}$	Spectral range / μm
	$\lambda = 4 \mu\text{m}$	$\lambda = 10 \mu\text{m}$		
Germanium	4.0243	4.0032	0.000396	2.0~17.0
ZnS(cleartran)	2.2523	2.2008	0.000054	0.37~14
ZnSe	2.4331	2.4065	0.000060	0.55~20
BaF ₂	1.4580	1.4014	-0.000015	0.15~12.5
GaAs	3.3069	3.2778	0.000148	0.9~16
AMTIR-1	2.5141	2.4981	0.000072	0.75~14
AMTIR-2	2.7830	2.7613	0.000005	1.0~14
AMTIR-3	2.6216	2.6027	0.000091	1.0~14
GASIR1	2.5100	2.4944	0.000055	1.0~14
IG2	2.5132	2.4967	0.000060	0.75~14
IG3	2.8034	2.7869	0.000103	1.2~14
IG4	2.6220	2.6090	0.000020	0.8~14
IG5	2.6219	2.6038	0.000060	0.85~14
IG6	2.7947	2.7775	0.000032	0.85~14

中波/长波双波段红外系统可选择材料种类较中波波段或长波波段可选种类又进一步减少^[8]。可以提供的材料主要为锗、硫化锌、硒化锌、氟化钡、碲化镓和一些硫系玻璃,像 AMTIR 系列、GASIR 系列和 IG 系列玻璃。表 1 中列出了可供选择的常用红外光学材料,给出了材料在中波波段中心波长为 4 μm 和长波波段中心波长为 10 μm 下的折射率、折射率温度系数和光谱透射范围。从表中可以看出,硫系玻璃的光谱覆盖宽度一般可以覆盖短波红外、中波红外和长波红外。锗在长波红外光学系统中被广泛使用,但其色散特性在不同波段变化明显,锗在 3~5 μm 的阿贝数为 103,在光学系统中一般为负组;而其在 8~12 μm 的阿贝数却为 864,在光学系统中一般为正组。

3 设计理论

目前大部分光学设计者对于双色光学系统是将其看成一个宽谱段进行设计,设计理论和想法与可见光系统类似,如文献[10,14]中针对中/长波双色红外光学系统进行设计时,将中心波长定为 8 μm,3 μm 和 12 μm 分别为谱段的最短波长和最长波长。但多色探测器响应的谱段一般都是分立的,不应将其看成一个宽谱段,设计中要考虑其谱段分立的特殊性,为此,需要对通常的薄透镜公式进行适当修改。

通常采用的两片薄透镜的消色差光焦度计算公式为

$$\begin{cases} \phi_1 + \phi_2 = \phi \\ \phi_1/\nu_1 + \phi_2/\nu_2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 ϕ_1 和 ϕ_2 分别为两片薄透镜在中心波长处的光焦度; ν_1 和 ν_2 分别为两片透镜材料的阿贝数,阿贝数可以通过对可见光中的概念进行扩展得到, $\nu = [(n_0 - 1)/(n_F - n_C)]$,其中 n_0 为所选材料在中心波长下的折射率, n_F 和 n_C 分别为所选材料在设计谱段最短波长和最长波长下的折射率。上述计算公式使最小波长和最大波长成像的交点重合,也就是说,两片薄透镜的消色差计算公式可以使系统在两个波长下的焦距相等。

对于中波/长波双色红外光学系统,要求光学系统在中波波段和长波波段的焦距尽量接近;同时为了在不调焦的情况下使双波段同时成像清晰,要求中波波段的焦深处在长波波段的焦深范围内。对(1)式进行修改,不再使谱段最小波长和最大波长的焦点重合,而是让中波波段中心波长 λ_1 和长波波段中心波长 λ_2 光焦度相等:

$$\begin{cases} \phi_1(\lambda_1) + \phi_2(\lambda_1) = \phi \\ \frac{\phi_1(\lambda_1)}{\nu_1(\lambda_2)} + \frac{\phi_2(\lambda_1)}{\nu_2(\lambda_2)} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $\nu_1(\lambda_2) = \frac{n_1(\lambda_1) - 1}{n_1(\lambda_1) - n_1(\lambda_2)}$ 和 $\nu_2(\lambda_2) = \frac{n_2(\lambda_1) - 1}{n_2(\lambda_1) - n_2(\lambda_2)}$,定义该变量为中心阿贝数。利用(2)式,就可以计算出对应中波波段中心波长 λ_1 和长波波段中心波长 λ_2 光焦度相等时两片薄透镜的光焦度。

消色差对于设计出满足要求的双色光学系统来说是必要非充分条件。使两个控制波长共焦点并不能保证谱段内其余波长能够有一个可接受的焦移残留。该焦移残留与材料的 $dn/d\lambda$ 和光学元件的光焦度有关。如果一个元件的光焦度过大,则元件表面曲率就会很陡,从而产生不可接受的单色像差,同时该单色像差随波长也可能变化明显。消色差且光焦度合理分配一般可以得到好的设计结果。

由于中波/长波光学系统可选光学材料种类少,在可选的材料中可以生成所有可能的多元透镜组合,可以对每一种组合进行评价,评价项包括两部分:绝对光焦度(定义为光学元件的光焦度绝对值之和)和设计谱段内多个波长下的平均离焦。绝对光焦度越小,组合的球差和色球差越小:

$$\begin{cases} \phi' = |\phi_1(\lambda_1)| + |\phi_2(\lambda_1)| \\ S = \sum_{i=1}^n \left| \frac{(f_{\lambda_i} - f)}{f} \right| / n = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\phi_1(\lambda_1)/\nu_1(\lambda_i) + \phi_2(\lambda_1)/\nu_2(\lambda_i)}{\phi_1(\lambda_1)/P_1(\lambda_i) + \phi_2(\lambda_1)/P_2(\lambda_i)} \right| / n \end{cases} \quad (3)$$

其中 ϕ' 为绝对光焦度, S 为设计谱段内多个波长下的平均离焦; $P_1(\lambda_i) = [n_1(\lambda_1) - 1]/[n_1(\lambda_i) - 1]$,

$$P_2(\lambda_i)=[n_2(\lambda_i)-1]/[n_2(\lambda_i)-1]。$$

利用两片不同材料光学元件设计的光学系统很难达到很好的像质,一般作为实际光学系统中的一个镜组。对于中波/长波双色红外光学系统,中波波段的焦深小,而中波波段的色离焦一般较大,仅色离焦就使得光学系统的像质严重偏离衍射极限。

为进一步减小色离焦,可采用三片不同材料的光学元件,三片薄透镜的消色差计算公式可以使系统在三个波长下的焦距相等。针对中波/长波双色红外光学系统,将中波中心波长 λ_1 、长波中心波长 λ_2 和中波最短波长 λ_3 光焦度相等。薄透镜光焦度分配计算方程如下:

$$\begin{cases} \phi_1(\lambda_1) + \phi_2(\lambda_1) + \phi_3(\lambda_1) = \phi \\ \frac{\phi_1(\lambda_1)}{\nu_1(\lambda_2)} + \frac{\phi_2(\lambda_1)}{\nu_2(\lambda_2)} + \frac{\phi_3(\lambda_1)}{\nu_3(\lambda_2)} = 0 \\ \frac{\phi_1(\lambda_1)}{\nu_1(\lambda_3)} + \frac{\phi_2(\lambda_1)}{\nu_2(\lambda_3)} + \frac{\phi_3(\lambda_1)}{\nu_3(\lambda_3)} = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

其中 $\nu_3(\lambda_2) = \frac{n_3(\lambda_1) - 1}{n_3(\lambda_1) - n_3(\lambda_2)}$ 和 $\nu_3(\lambda_3) = \frac{n_3(\lambda_1) - 1}{n_3(\lambda_1) - n_2(\lambda_3)}$ 。利用(4)式,就可以计算出系统对应中波中心波长 λ_1 、长波中心波长 λ_2 和中波最短波长 λ_3 光焦度相等时三片薄透镜的光焦度。

参考前述两种材料组合选择的评价项,得到三种材料组合设计谱段内多个波长下的绝对光焦度值和平均离焦:

$$\begin{cases} \phi' = |\phi_1(\lambda_1)| + |\phi_2(\lambda_1)| + |\phi_3(\lambda_1)| \\ S = \sum_{i=1}^n \left| \frac{(f_{\lambda_i} - f)}{f} \right| \Bigg/ n = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\phi_1(\lambda_1)/\nu_1(\lambda_i) + \phi_2(\lambda_1)/\nu_2(\lambda_i) + \phi_3(\lambda_1)/\nu_3(\lambda_i)}{\phi_1(\lambda_1)/P_1(\lambda_i) + \phi_2(\lambda_1)/P_2(\lambda_i) + \phi_3(\lambda_1)/P_3(\lambda_i)} \right| \Bigg/ n \end{cases}, \quad (5)$$

其中 $P_3(\lambda_i)=[n_3(\lambda_i)-1]/[n_3(\lambda_i)-1]。$

最佳组合选择的一般性原则为:最低平均离焦或最小的绝对光焦度对应的组合一般不是最佳的组合,两者之间的折中选择可能最佳。最佳组合的评定与所要设计的光学系统的相对孔径和视场角(FOV)有关。一般大 F 数光学系统由于焦深大,可以在容忍大的绝对光焦度情况下,取得很好的焦距稳定性;而对于小 F 数光学系统,大的绝对光焦度将导致系统的单色像差难以校正,即使色差得到良好校正也对系统性能贡献甚微。

4 设计结果

4.1 两片透镜

利用上述表1中可选的14种红外光学材料,可以产生91种两片透镜组合。利用上节中修改的消色差光焦度计算公式和评价项对每一种组合进行计算和评价。在设计谱段内选择10个波长,中波波段5个波长,长波波段5个波长。经过计算,发现只有9种组合的平均离焦小于 $0.001f$, f 为光学系统的焦距。表2中按

表2 平均离焦小于 $0.001f$ 的9种组合

Table 2 Nine combinations of average defocus less than $0.001f$

No.	Combination	S	$\phi'(\phi=1)$
1	GaAs/IG4	0.000702	4.2846
2	GaAs/AMTIR2	0.000722	4.3103
3	GaAs/GASIR1	0.000794	10.5006
4	ZnS/IG2	0.000853	1.6953
5	ZnSe/IG2	0.000902	3.7270
6	ZnSe/ZnS	0.000903	2.6176
7	AMTIR2/AMTIR3	0.000914	5.0400
8	ZnS/AMTIR1	0.000953	1.7116
9	ZnS/GASIR1	0.000975	1.6627

平均离焦 S 由小到大的顺序列出了这 9 种组合,同时给出了每种组合在 $\phi = 1$ 时的绝对光焦度 ϕ' 。比较上述 9 种组合,根据最佳组合选择的一般性原则,最佳的两片透镜组合方式为 ZnS/IG2,因其具有适中的平均离焦和绝对光焦度。

利用该最佳的两片透镜组合 ZnS/IG2,设计了一个中波/长波双色红外光学系统,系统主要技术指标见表 3。忽略冷阑匹配、温度适应性等实际工程应用中的设计考虑,主要探讨材料组合的色差抑制能力和不同波长下波前误差。图 1 中给出了 IG2/ZnS 两片透镜光学系统光路图,透镜表面均为球面,不含非球面和衍射元件。图 2 给出了该光学系统在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 下的色离焦曲线。从曲线可以看出中波波段中心波长 $4\ \mu\text{m}$ 与长波波段中心波长 $10\ \mu\text{m}$ 的焦距基本相等。中波波段的最大色离焦为 $237\ \mu\text{m}$,长波波段的最大色离焦为 $111\ \mu\text{m}$ 。根据瑞利判据,光学系统的焦深公式为 $\Delta l' = \pm 2\lambda F^2$,其中 F 为光学系统的 F 数,可以计算,系统在中波波段和长波波段的焦深分别为 $\pm 72\ \mu\text{m}$ 和 $\pm 180\ \mu\text{m}$ 。可以看出中波波段的色离焦大于中波波段焦深的 3 倍,长波波段的色离焦在焦深范围内。图 3 分别给出了 0° 、 2.8° 和 4° 视场在 $3\sim 12\ \mu\text{m}$ 不同波长下的均方根 (RMS) 波前误差,中波波段较长波波段成像像质差。随着视场的增加,光学系统像质的下降主要由像散和倍率色差未能得到校正导致。

表 3 红外光学系统技术指标

Table 3 Technology index of infrared optical system

Parameter	Value
Spectrum range	$3\sim 5\ \mu\text{m}/8\sim 12\ \mu\text{m}$
Focal length	100 mm
$F/\#$	3
Full FOV	4°

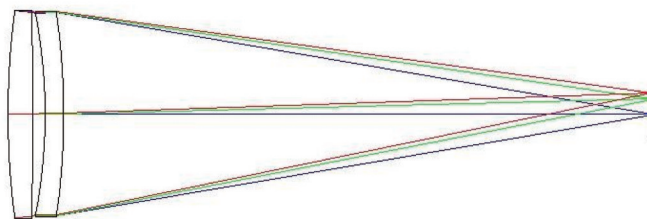


图 1 IG2/ZnS 两片透镜光学系统光路图

Fig.1 Beam path of IG2/ZnS two-lens system

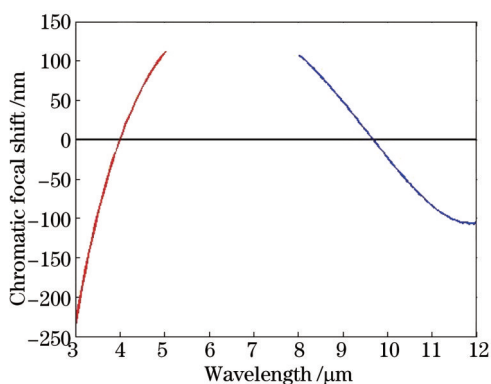


图 2 IG2/ZnS 两片透镜光学系统色离焦曲线

Fig.2 Chromatic focal shift of IG2/ZnS two-lens system

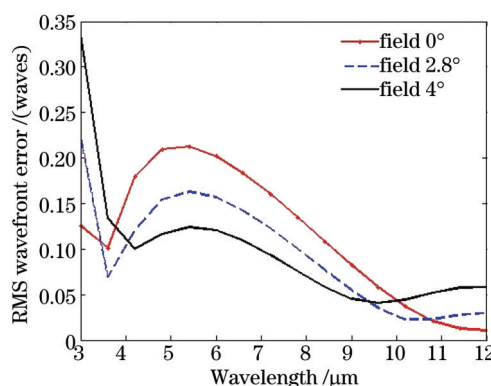


图 3 IG2/ZnS 两片透镜均方根波前误差

Fig.3 RMS wavefront error of IG2/ZnS two-lens system

4.2 三片透镜

利用上述表 1 中可选的 14 种红外光学材料,可以产生 364 种三片透镜组合。利用前述的三种材料消色差光焦度计算公式和评价项对每一种组合进行计算和评价。同样在设计谱段内选择 10 个波长,中波波段 5 个波长,长波波段 5 个波长。经过计算,发现只有 9 种组合的平均离焦小于 $0.0002f$ 。表 4 中按平均离焦 S 由小到大的顺序列出了这 9 种组合,同时给出了每种组合下 $\phi = 1$ 时的绝对光焦度值 ϕ' 。比较上述 9 种组合,

根据最佳组合选择的一般性原则,因绝对光焦度仅为 3.4211,故最佳的三片透镜组合方式为 Ge/ZnS/GASIR1。这 9 种组合中均至少含有一种硫系玻璃,可见硫系玻璃在中波/长波双色红外光学系统中的重要性。在不含有硫系玻璃的组合中,平均离焦最小的是 Ge/ZnS/ZnSe, S 为 0.000294 f , ϕ' 为 6.3226,本组合是利用归一化色差系数曲线图获得的最常用组合形式^[15]。通过上述分析,可见所提及的评价方法与利用归一化色差系统曲线图评价方法相当。但本课题组的方法简单、直观且计算快捷。

表 4 平均离焦小于 0.0002 f 的 9 种组合

Table 4 Nine combinations of the average defocus less than 0.0002 f

No.	Combination	S	$\phi'(\phi = 1)$
1	GaAs/ZnS/GASIR1	0.0000447	6.6728
2	ZnSe/GaAs/GASIR1	0.0000792	7.7120
3	GaAs/GASIR1/IG3	0.0000855	9.0903
4	Ge/GaAs/GASIR1	0.0000909	9.1314
5	ZnSe/GASIR1/IG3	0.0001089	10.3537
6	Ge/ZnS/GASIR1	0.0001120	3.4211
7	ZnS/GASIR1/IG3	0.0001332	6.7956
8	Ge/ZnSe/GASIR1	0.0001347	6.2532
9	Ge/ZnS/IG3	0.0001479	5.4682

利用最佳的三片透镜组合 Ge/ZnS/GASIR1 设计前述中波/长波双色红外光学系统,同样按表 3 中的主要技术指标设计。仍然忽略冷阑匹配、温度适应性等实际工程应用中的设计考虑。根据光焦度分配公式计算可得,在该组合中,GASIR1 的光焦度为 0.0221,在光学系统中为正组;Ge 和 ZnS 的光焦度为-0.00785 和-0.00425,在光学系统中为负组。

图 4 给出了 GASIR1/Ge/ZnS 三片透镜光学系统光路图,透镜表面均为球面,不含非球面和衍射元件。图 5 给出了该光学系统在 3~5 μm 和 8~12 μm 下的色离焦曲线。虽然(4)式能够保证三个波长处的焦距相等,但实际色离焦曲线显示有 4 个波长处的焦距相等,这也是该组合平均离焦小的原因。中波波段的最大色离焦为 7 μm ,而在长波波段的最大色离焦为 13 μm 。根据焦深公式计算系统在中波波段和长波波段的焦深分别

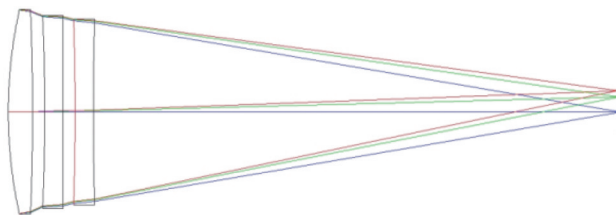


图 4 GASIR1/Ge/ZnS 三片透镜光学系统光路图

Fig.4 Beam path of GASIR1/Ge/ZnS three-lens system

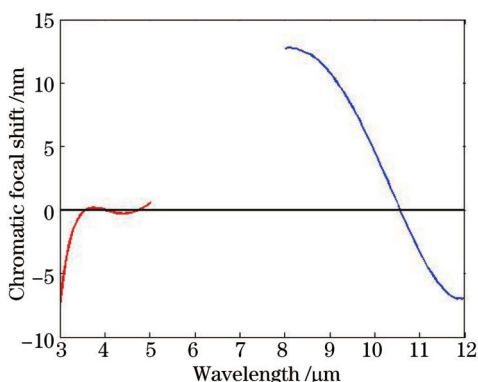


图 5 GASIR1/Ge/ZnS 三片透镜光学系统色离焦曲线

Fig.5 Chromatic focal shift of GASIR1/Ge/ZnS three-lens system

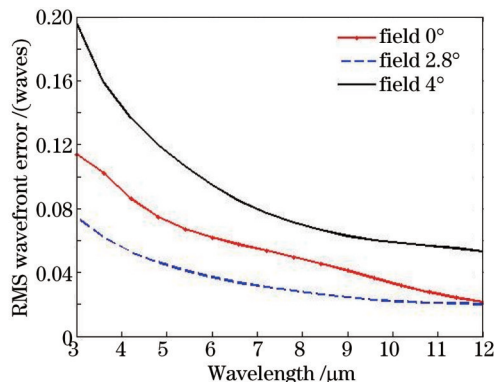


图 6 GASIR1/Ge/ZnS 三片透镜光学系统均方根波前误差

Fig.6 RMS wavefront error of GASIR1/Ge/ZnS three-lens system

为 $\pm 72 \mu\text{m}$ 和 $\pm 180 \mu\text{m}$,可见中长波的色离焦均在焦深范围内。与前述两片透镜相比,中波波段和长波波段的色离焦下降明显。图6分别给出了 0° 、 2.8° 和 4° 视场在 $3\sim 12 \mu\text{m}$ 不同波长下的均方根波前误差,所有波长不同视场的均方根波前误差均小于0.2个波长,该三片透镜组合设计得到的系统具有良好的成像质量。

5 结 论

红外光学系统的每一步发展都是以红外探测器的突破为基础的,为成功应用新一代双/多色红外探测器,设计出能够同时具备双/多色成像能力的光学系统成为必然。对中波/长波双色红外光学系统设计进行了探讨,提出了针对双色红外光学系统材料选择的计算评价方法,评价项包括绝对光焦度和平均离焦两项。利用该评价方法评估所有的两片透镜和三片透镜组合,可以快速有效地获得最佳消色差中波/长波双色红外光学系统的材料选择和初始光焦度分配。通过分析评价,最佳的两片透镜组合方式为ZnS/IG2,最佳的三片透镜组合方式为Ge/ZnS/GASIR1,并对这两种组合进行了详细的设计和分析,验证了该评价方法的有效性。这些最佳组合,可以作为实际光学系统设计的基本组份,通过调整元件顺序、分裂大光焦度元件、增加场镜、使用非球面等手段获得满足工程应用的中波/长波双色红外光学系统。进一步研究将结合使用上述组元与谐衍射光学元件,降低光学系统复杂程度,设计适应能力更强的双色红外光学系统;同时计算成像中部分技术可能作为双色红外光学系统色差校正的新的有效方法。

参 考 文 献

- 1 Y Reibel, F Chabuel, C Vaz, *et al.*. Infrared dual band detectors for next generation [C]. SPIE, 2011, 8012: 801238.
- 2 W Cabanski, K Eberhardt, W Rode, *et al.*. 3rd gen focal plane array IR detection modules and applications [C]. SPIE, 2004, 5406: 184-192.
- 3 D F King, J S Graham, A M Kennedy, *et al.*. 3rd-generation MW/LWIR sensor engine for advanced tactical systems [C]. SPIE, 2008, 6940: 69402R.
- 4 W A Radford, E A Patten, D F King, *et al.*. Third generation FPA development status at raytheon vision systems [C]. SPIE, 2005, 5783: 331-339.
- 5 A Rogalski. Infrared detectors for the future [J]. Acta Phys Pol A, 2009, 116(3): 389-406.
- 6 J Vizgaitis, J Miller, J Hall, *et al.*. 3rd generation FLIR demonstrator [C]. SPIE, 2008, 6940: 69400U.
- 7 J N Vizgaitis. Dual F-number optics for 3rd generation FLIR systems [C]. SPIE, 2005, 5783: 875-886.
- 8 J N Vizgaitis. Third generation infrared optics [C]. SPIE, 2008, 6940: 69400S.
- 9 T H Jamieson. Decade wide waveband optics [C]. SPIE, 1998, 3482: 306-320.
- 10 T H Jamieson. Ultrawide waveband optics [J]. Opt Eng 1984, 23(2): 111-116.
- 11 Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng, *et al.*. Optical design of harmonic diffractive infrared dual-band and dual-field system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1122001.
李 岩, 张 葆, 洪永丰, 等. 谐衍射红外双波段双视场光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1122001.
- 12 Zhang Xinting, An Zhiyong. Design of infrared athermal optical system for dual-band with double-layer harmonic diffractive element [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622004.
张欣婷, 安志勇. 双层谐衍射双波段红外消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0622004.
- 13 Zhang Yu, Wang Wensheng. Design of cooled infrared dual-band common path reflective-diffractive telephoto objective [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0522006.
张 宇, 王文生. 制冷式红外双波段共光路折衍混合摄远物镜设计[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0522006.
- 14 A Ucar, M Kabak. Optical design of a broadband (3-12 μm) athermal infrared imager [C]. SPIE, 2010, 7660: 766029.
- 15 Zhang Chunyan, Shen Weimin. Design of an athermalized MWIR and LWIR dual-band optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1323-1328.
张春艳, 沈为民. 中波和长波红外双波段消热差光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 41(5): 1323-1328.

栏目编辑: 韩 峰