

实现复消色差的超常温混合红外光学系统*

宋岩峰† 邵晓鹏 徐 军

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2008 年 2 月 29 日收到, 2008 年 3 月 24 日收到修改稿)

讨论了利用二元光学元件实现红外光学系统消热差的原理和方法, 分析了二元光学元件的色散特性及其在校正二级光谱中的优越性, 给出了实现复消色差和超常温消热差的混合红外光学系统设计实例. 该系统焦距 100 mm, 相对孔径 1/2, 视场角 6°, 工作波段 8—11 μm ; 采用了两种最常用的硅和锗材料, 共三片, 结构简单. 在 -80—200 °C 的超宽温度范围内, 成像质量稳定并达到衍射极限. 约在系统 0.7 孔径处轴向像差曲线基本相交于一点, 实现了系统的复消色差.

关键词: 红外光学系统设计, 消热差, 复消色差, 折射/衍射混合光学系统

PACC: 4215E, 4225F

1. 引 言

在现代军事和空间探测中, 特别是高分辨率成像和军事侦察等方面, 要求许多红外系统在 -50—+100 °C 甚至更高的温度范围内能够稳定工作^[1,2]. 因此, 具有良好热稳定性的高质量红外光学系统设计就显得尤为重要. 红外成像系统通过一定的补偿方式, 使得系统在一定的温度范围内成像质量稳定. 主要的补偿方式有三种, 即机械被动式、机电主动式和光学被动式. 其中, 光学被动补偿方式由于结构简单、尺寸重量小、可靠性高等优点受到了人们的极大关注^[3]. 对于传统的折射红外光学系统, 要实现被动光学系统的消热差, 必须选择合适的光学材料与镜筒结构材料相配合, 通过合理分配系统光焦度, 使得光学材料的色散因子和光热膨胀系数同时满足系统的消色差和消热差要求^[4]. 但是在现有的红外光学材料中, 能够满足加工要求和国防或空间技术使用要求的非常少, 很难在不增加系统体积和重量及成本的同时通过材料的组合来消除环境温度对系统的影响.

另外, 在传统的折射光学系统中, 特别是长焦距和高分辨率成像系统中, 二级光谱一直是一个严重障碍. 校正二级光谱的方法一般有两种, 一种是采用

具有特殊色散的光学材料, 但该方法只能在一定程度上减小系统的二级光谱, 而不能完全校正; 另一种方法是对系统进行复杂化处理, 而体积、重量、成本、累积误差和透过率等问题随之出现^[5]. 显然, 这两种方法均不能满足现代军事和空间探测高质量红外光学系统的要求.

二元光学元件(binary optics element, BOE) 由于具有正的光焦度、特殊的色散特性和部分色散特性以及温度特性, 能够为光学设计提供更多的自由度^[6-8], 被越来越多地应用于高质量红外光学系统的消热差设计^[9-11]和二级光谱的校正^[12,13]. 本文充分利用 BOE 的独特特性, 在实现了折/衍混合红外光学系统二级光谱校正的同时, 实现了系统的超常温消热差设计.

2. 混合光学系统的消热差原理

光学元件的温度特性由光热膨胀系数(即单位温度变化引起的光焦度相对变化)决定. 在薄透镜模型和空气介质条件下, 折射元件和 BOE 的光热膨胀系数分别为

$$x_{f,r} = \alpha_g - \frac{1}{n-1} \left(\frac{dn}{dT} - n \frac{dn_0}{dT} \right), \quad (1)$$

$$x_{f,d} = 2\alpha_g + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dT}, \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(批准号: 60407012)资助的课题.

† E-mail: song19781220@sina.com

式中 α_{f_a} 为折射元件的光热膨胀系数, α_{f_d} 为二元光学元件的光热膨胀系数, α_g 为材料的热膨胀系数, n 和 n_0 分别为光学材料和环境介质的折射率.

要使系统实现消热差,就要使镜筒结构线膨胀引起的光学系统离焦以及光学系统的热离焦相补偿,即

$$\left(\frac{1}{h_1\phi}\right)^2 \sum h_i^2 x_i \phi_i = \alpha_n L, \quad (3)$$

式中 ϕ 为系统的光焦距, h_i 为系统第 i 个元件的近轴光线入射高, ϕ_i 为第 i 个元件的光焦距, x_i 为第 i 个光学元件的光热膨胀系数, α_n 为镜筒结构材料的线膨胀系数, L 为镜筒结构的长度.

由(1)式可以看出,折射元件的光热膨胀系数由材料的折射率性质和线膨胀系数决定.一般情况下红外光学材料折射率温度系数 dn/dT 值均较大,所以折射光学元件的光热膨胀系数大多为负值.在(3)式中,镜筒结构线膨胀系数 α_n 始终为正值,要使系统消热差,就需要采用光热膨胀系数绝对值大的材料作为负透镜,光热膨胀系数绝对值小的材料做正透镜.能够满足实际加工和使用要求的红外材料本来就少,这样就很难在保证消热差的同时满足系统消色差的要求,只有在某些特定的情况下才能实现无热化的同时实现消色差的要求.由(2)式可以看出,BOE的光热膨胀系数与材料的折射率性质无关,其值始终为正值,而BOE本身具有正的光焦距,一定程度上给光学设计提供了更大的自由度^[14,15].

3. 混合光学系统的消色差原理

折射元件的色散性质和二级光谱一般分别通过材料的阿贝数和相对部分色散来表示,即

$$V = \frac{n_R - 1}{n_S - n_L}, \quad (4)$$

$$P = \frac{n_S - n_R}{n_S - n_L}, \quad (5)$$

式中 V 为阿贝数, P 为相对部分色散, n_S, n_R, n_L 分别为短波、参考波和长波对应的材料折射率.

BOE的色散则决定于波长,其等效的阿贝数和相对部分色散可表示为

$$V^{\text{BOE}} = \frac{\lambda_R}{\lambda_S - \lambda_L}, \quad (6)$$

$$P^{\text{BOE}} = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\lambda_L - \lambda_S}, \quad (7)$$

式中 V^{BOE} 为等效阿贝数, P^{BOE} 为等效相对部分色散, $\lambda_S, \lambda_R, \lambda_L$ 分别为短波波长、参考波长和长波波长.

从(4)(5)式可以看出,对于折射元件,其色散和二级光谱由材料的性质决定且阿贝数为正,对于BOE,从(6)(7)式可以看出,其色散和二级光谱只与波长有关且阿贝数为负,对于确定的工作波段,其阿贝数和相对部分色散为一定值.

定义色差系数 $C = 1/V$,要实现系统色差的校正,就要使系统满足

$$\left(\frac{1}{h_1\phi}\right)^2 \sum_i h_i^2 C_i \phi_i = 0, \quad (8)$$

式中 C_i 为第 i 个光学元件的色差系数.

在(8)式中,对于折射光学系统,由于光学元件的色差系数都为正,系统需要负透镜来抵消正透镜的色差,这样就加重了系统正透镜光焦距的负担,从而限制了系统性能的提高.对于混合光学系统,BOE在具有正光焦距的同时具有负色散,不仅为系统校正色散提供了条件,同时分担了系统的正光焦距,有利于系统单色像差的校正.同时,含有二元光学面的混合透镜可以采用普通材料实现系统的消色差,从而降低了对材料的要求,降低了系统的成本^[16,17].

下面进一步说明BOE在校正系统二级光谱中的优越性.

对于合成焦距为 f' 的复消色差系统,不妨假设系统由三个透镜组成,焦距分别为 f^a, f^b, f^c ,那么

$$\begin{aligned} f^a &= f' \frac{E(V^a - V^c)}{(P^b - P^c)P^a}, \\ f^b &= f' \frac{E(V^a - V^c)}{(P^c - P^a)P^b}, \\ f^c &= f' \frac{E(V^a - V^c)}{(P^a - P^b)P^c}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 V^a, V^b, V^c 分别为三个透镜材料的阿贝值, P^a, P^b, P^c 分别为三个透镜材料的部分色散, E 定义为 $E = \frac{V^a(P^b - P^c) + V^b(P^c - P^a) + V^c(P^a - P^b)}{V^a - V^c}$, (10)

其几何意义是任意波段的 P - V 图上所选的透镜材料的对应点与 a, c 材料对应点连线在 P 方向上的垂直距离 ΔP , b 透镜的对应点在此连线上方时 E 取正值,反之取负值.对于某一确定的总光焦距, E 的绝对值越大,则各个复消色差透镜的光焦距越小,也就越有利于二级光谱的校正^[18].图1给出了几种常用红外光学材料 3—5 μm 波段的相对部分色散与阿贝数的关系图,同时给出了BOE在图中的位置.

可以看出几种红外光学材料分布在一条起伏不大的曲线上, E 的绝对值较小; BOE 则距离较远(从图 1 中可以看出, 材料 Ge 与 BOE 和材料 Si 的连线在 P 方向上的垂直距离相对较大), E 的绝对值较大, 有利于二级光谱的校正。

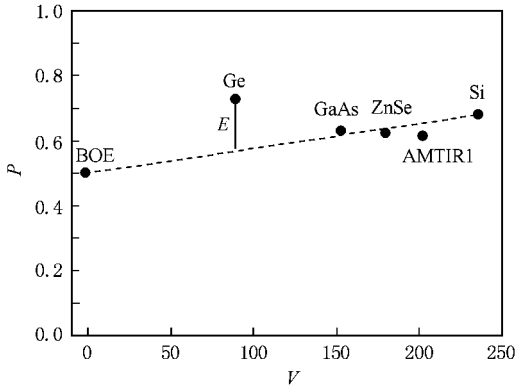


图 1 3—5 μm 波段的相对部分色散与阿贝数的关系图

4. 衍射效率

不考虑衍射效率的衍射光学设计是没有意义的, 衍射光学之所以能够兴起并得到应用, 就在于其近乎完美的浮雕表面位相结构极大地提高了成像 BOE 的衍射效率. 从定义上讲, 衍射效率是指该级衍射光的能量占总能量的比例. 理论上衍射效率可以达到 100%, 但实际上只能是对参考波长而言, 随着波长变化, 衍射效率也随之降低^[19]. 通常对于第 m 级衍射光, 其衍射效率可以表示为

$$\eta_m = \text{sinc}^2(\alpha - m) = \text{sinc}^2\left[\frac{\lambda_0 [n(\lambda) - 1]}{\lambda [n(\lambda_0) - 1]} - m\right], \quad (11)$$

式中 λ 为工作波长, m 为工作的衍射级次, λ_0 为设计波长, 通常情况下 m 值为 1.

5. 实现复消色差的折/衍混合光学系统超常温消热差设计实例

系统主要参数包括: 焦距 100 mm, 相对孔径 $1/2$, 视场 6° , 工作波段 8—11 μm , 工作温度 -80 — 200°C , 镜筒结构为 AL(线膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) 要求系统具有 100% 冷光阑效率, 具有接近衍射极限的成像质量.

对于超常温的消热差系统, 在设计时除了要考

虑系统需具有更好的热性能外, 需要另外考虑材料的透射率温度系数, 这是因为许多红外光学材料在高温条件下透过率会迅速下降. 由于材料 Ge 在温度超过 200°C 时透过率会迅速降到 0, 所以本系统高温极限为 200°C .

考虑到衍射效率, 图 2 给出了设计波长为 9.3 μm 的波长与衍射效率关系图. 可以看出, 此时在工作波段 8—11 μm 内, 衍射效率都超过了 90%, 所以这里选择参考波长为 9.3 μm .

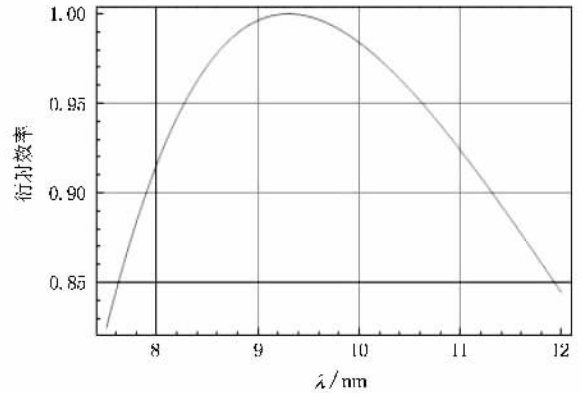


图 2 波长与衍射效率关系图(参考波长 9.3 μm)

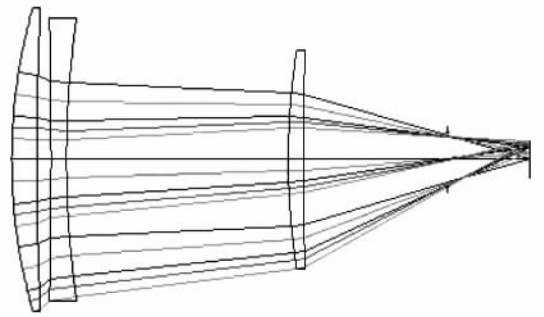


图 3 系统结构示意图

表 1 系统结构参数

| 镜面 | 曲面类型 | 半径/mm | 厚度/mm | 材料 |
|----|------|--------|-------|----|
| 1 | 标准球面 | 105.3 | 8.0 | Si |
| 2 | 标准球面 | 331.0 | 7.6 | 空气 |
| 3 | 标准球面 | 3088.0 | 5.0 | Ge |
| 4 | 标准球面 | 158.4 | 51.8 | 空气 |
| 5 | 标准球面 | 207.2 | 4.8 | Si |
| 6 | 二元光学 | 无穷大 | 44.4 | 空气 |
| 光阑 | | — | 26.00 | 空气 |

系统在 20°C 时的结构如图 3 所示, 具体参数见表 1, 其中第六面为衍射面; 为了实现 100% 冷光阑

效率,系统光阑远离最后一透镜,距离像面约 26 mm.

在 -80—200 °C 的温度范围内,系统焦距变化范围为 100.1—99.8 mm,同时很好地补偿了温度变化引起的镜筒长度变化带来的像面位移.

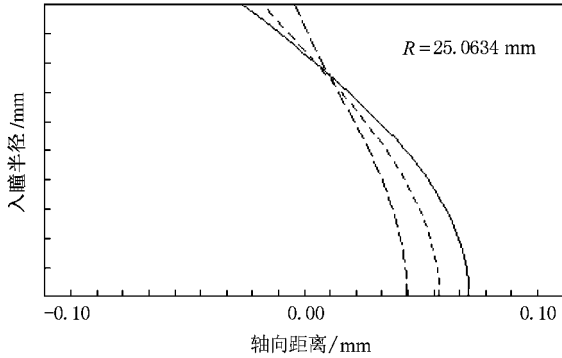


图 4 -80 °C 时系统轴向像差曲线

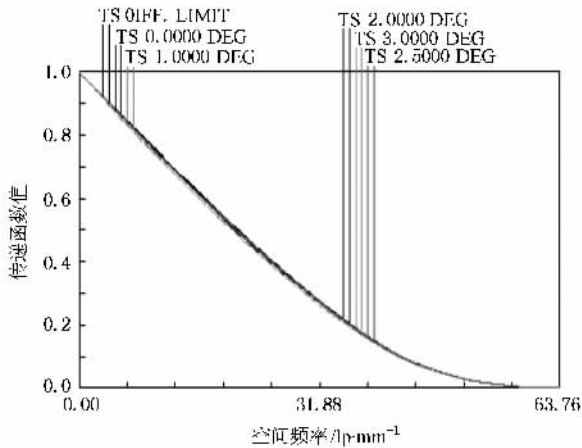


图 5 -80 °C 时系统光学传递函数曲线

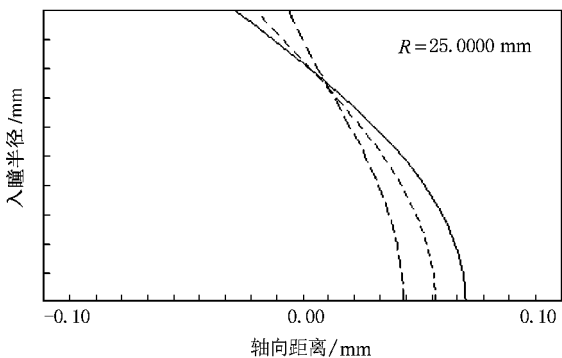


图 6 20 °C 时系统轴向像差曲线

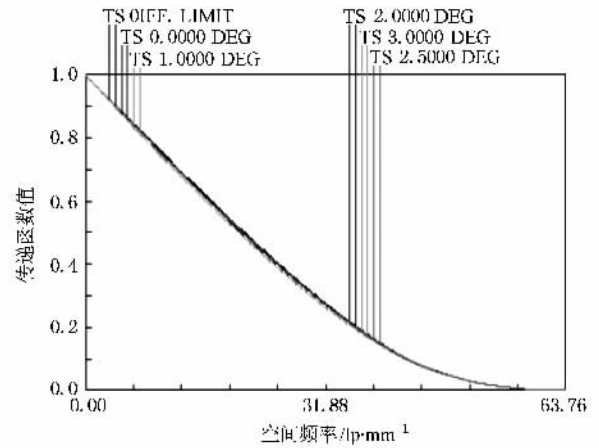


图 7 20 °C 时系统光学传递函数曲线

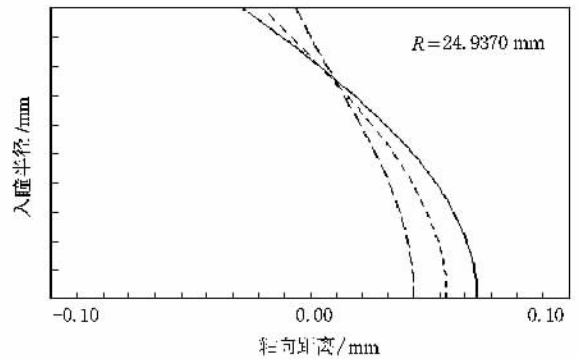


图 8 120 °C 时系统轴向像差曲线

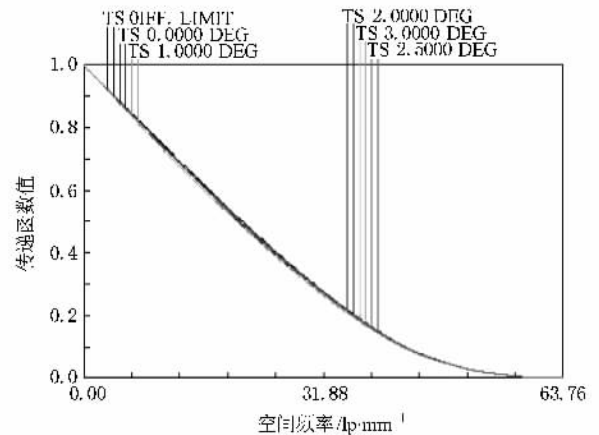


图 9 120 °C 时系统光学传递函数曲线

曲线和光学传递函数曲线.首先从系统光学传递函数曲线可以看出,系统成像质量在不同温度时都基本达到了衍射极限,成像质量稳定可靠,达到了很好的超常温消热差效果;从轴向像差曲线可以看出,系

图 4—11 分别给出系统在不同温度下轴向像差

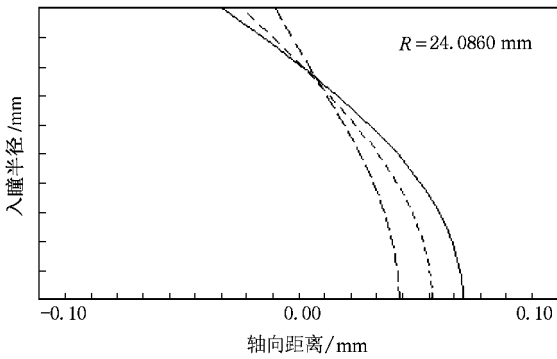


图 10 200 °C 时系统轴向像差曲线

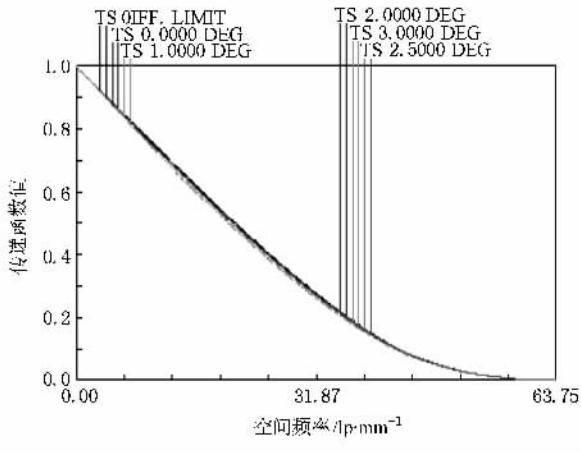


图 11 200 °C 时系统光学传递函数曲线

统约在 0.7 孔径处 轴向像差曲线相交于一点 ,很好地完成了系统的色差以及二级光谱的校正 ,实现了系统的复消色差 .

6. 结 论

本文对折/衍混合红外光学系统的消热差原理进行了较为详细的分析 ,并对 BOE 在校正系统色差及二级光谱方面的优越性进行了讨论 .利用 BOE 具有的正光焦度性质、独特的色散性质和热特性 ,本文采用两种最常用的红外光学材料 Si 和 Ge ,共三片透镜实现了折/衍混合光学系统的复消色差和超常温消热差设计 .该系统在整个超宽的温度范围内 ,成像质量稳定且达到了衍射极限 ;系统轴向像差曲线在 0.7 孔径处相交于一点 ,实现了系统的复消色差 ;系统性能相对传统的折射系统也有了很大的提高 .因此 ,将 BOE 应用到红外成像光学系统中 ,能够解决很多传统光学技术中无法解决的问题 ,对缩小系统体积、减小系统重量、提高系统性能和成像质量、降低制造成本等方面有着重要的意义 .

[1] Sun Q ,Liu H B ,Wang Z Q ,Zhang H J ,Wang J Z ,Lu Z W 2003 *Acta Photo . Sin .* **32** 466 (in Chinese) [孙 强、刘宏波、王肇圻、张惠娟、王吉增、卢振武 2003 光子学报 **32** 466]

[2] Zhang Y N ,Wang Z Q ,Sun Q 2005 *Chin . J . Lasers* **32** 311 (in Chinese) [张轶楠、王肇圻、孙 强 2005 中国激光 **32** 311]

[3] Guo Y H ,Shen M Z 2000 *Acta Opt . Sin .* **20** 1392 (in Chinese) [郭永洪、沈忙作 2000 光学学报 **20** 1392]

[4] Jamieson T H 1995 *Opt . Eng .* **20** 156

[5] Cui Q F 1994 *Acta Opt . Sin .* **14** 877 (in Chinese) [崔庆丰 1994 光学学报 **14** 877]

[6] Sun Q ,Yu B ,Wang Z Q ,Mu G G ,Lu Z W 2004 *Acta Phys . Sin .* **53** 756 (in Chinese) [孙 强、于 斌、王肇圻、母国光、卢振武 2004 物理学报 **53** 756]

[7] Liang W X ,Zhang J J ,Li J F ,Liao R 2001 *Chin . Phys .* **10** 1129

[8] Sun J X ,Sun Q ,Li D X ,Lu Z W 2007 *Acta Phys . Sin .* **56** 3900 (in Chinese) [孙金霞、孙 强、李东熙、卢振武 2007 物理学报 **56** 3900]

[9] Jiao M Y ,Feng Z X 2001 *J . Optoelectronics · Laser* **12** 1226 (in Chinese) [焦明印、冯卓祥 2001 光电子和激光 **12** 1226]

[10] Jiao M Y 2001 *Acta Opt . Sin .* **21** 1360 (in Chinese) [焦明印 2001 光学学报 **21** 1360]

[11] Bai J ,Sun T ,Shen Y B ,Hou X Y ,Yang G G 1999 *Acta Opt . Sin .* **19** 997 (in Chinese) [白 剑、孙 婷、沈亦兵、侯西云、杨国光 1999 光学学报 **19** 997]

[12] Cui Q F ,Kuang Y G 1995 *Acta Opt . Sin .* **15** 499 (in Chinese) [崔庆丰、匡裕光 1995 光学学报 **15** 499]

[13] Hong X H ,Yang J F ,Chen L W ,Zheng L ,Zhang X D ,Chang L Y ,Zhao B C 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **10** 421 (in Chinese) [洪新华、杨剑峰、陈立武、郑 黎、张向东、常凌颖、赵葆常 2004 强激光与粒子束 **10** 421]

[14] Zhang Y ,Yang C C ,Yang K T 2005 *Acta Opt . Sin .* **25** 1535 (in Chinese) [张 羽、杨长城、杨坤涛 2005 光学学报 **25** 1535]

[15] Hudyma R M 1995 *SPIE* **2540** 229

[16] Tamagawa Y ,Tajime T 1996 *Opt . Eng .* **35** 3001

[17] Dong K Y ,Sun Q ,Li Y D ,Zhang Y C ,Wang J ,Ge Z J ,Sun J X ,Liu J Z 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 4602 (in Chinese) [董科研、孙 强、李永大、张云翠、王 健、葛振杰、孙金霞、刘建卓 2006 物理学报 **55** 4602]

- [18] Jin G F , Yan Y B , Wu M X 1998 *Binary Optics* (Beijing : National Defence Industry Press) p193 (in Chinese) [金国藩、严瑛白、邬敏贤 1988 二元光学(北京 : 国防工业出版社)第 193 页]
- [19] Cui Q F 2006 *Infrared and Laser Engineering* **35** 12 (in Chinese) [崔庆丰 2006 红外与激光工程 **35** 12]

Design of a hybrid infrared apochromatic optical system beyond normal temperature *

Song Yan-Feng[†] Shao Xiao-Peng Xu Jun

(School of Technical Physics , Xidian University , Xi'an 710071 , China)

(Received 29 February 2008 ; revised manuscript received 24 March 2008)

Abstract

The principle and design method of employing diffractive optical element to athermalize an infrared optical system are discussed. An analysis is made on the diffractive optical element's dispersion characteristics and its superiority in correcting the second spectrum. A hybrid infrared optical system , as a practical application example , which has realized apochromatism and works beyond normal temperature , is presented. The parameters of the system are as follows : the focal length is 100 mm , relative aperture is 1/2 , field of view is 6° , and the working waveband is 8—11 μm . In the system , only two materials , namely silicon and germanium , are used. The image quality of the system achieves the diffractive limit within the temperature range of - 80—200 °C . At about 0.7 aperture , three longitudinal aberration curves of the system intersect at one point , and the apochromatism of the optical system is achieved.

Keywords : infrared optical system design , athermalization , apochromatism , diffractive/refractive hybrid optical system

PACC : 4215E , 4225F

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60407012).

[†] E-mail : song19781220@sina.com