

〈系统与amp;设计〉

基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统设计

李升辉¹, 李欣², 李虹静¹

(1. 华中科技大学 工程实训中心, 湖北 武汉 430074; 2. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650233)

摘要: 设计了一种基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统。此光学系统的工作波段为3~5 μm及8~12 μm, 焦距为45 mm, F/#为2, 双色探测器为320×256、30 μm制冷型探测器。谐衍射光学元件改进了衍射光学元件在宽波段上的大色散问题, 解决了衍射光学元件在宽波段上的色散严重和衍射效率低下的问题。该光学系统采用谐衍射光学元件消宽波段色差和宽温度范围热差, 使中波红外和长波红外在不同衍射级衍射实现谐振共焦成像, 使用较少光学元件, 校正了双波段红外光学系统的像差和热差。基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统在改善像质、减小体积重量、宽波段消热差等方面表现出传统光学系统不可比拟的优势。随着双波段探测器和谐衍射透镜研发制造技术的进一步发展, 双波段光学系统必将在目标跟踪、识别、精确打击等军工系统中得到广泛应用。

关键词: 红外双波段; 消热差; 谐衍射; 共口径

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2020)01-0019-06

Design of Infrared Dual-Band Common Aperture Thermal Elimination Optical System Based on Harmonic Diffraction

LI Shenghui¹, LI Xin², LI Hongjing¹

(1. Engineering Training Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: We proposed an infrared dual-band common aperture optical system, without thermalization, based on harmonic diffraction in this study. The optical system has two working bands of 3-5 μm and 8-12 μm, a focal length of 45 mm, a value of F/# of 2, and a resolution ratio of the frigorific double-color detector of 320×256 with a 30 μm pixel size. The harmonic diffractive optical element improves the large dispersion problem of the diffractive optical element over a wide wavelength band and solves the severe dispersion problem of the diffractive optical element over a wide wavelength band and low diffraction efficiency. The optical system uses harmonic diffractive optical elements to widen the chromatic aberration of the band and temperature range, so that the mid and long-wave infrared diffracted at different diffraction orders, to achieve resonant confocal imaging, and the dual-band infrared optical system are corrected using fewer optical components. This optical system also reflects the incomparable advantages of traditional optical systems with respect to improving image quality, reducing volumetric weight, and wide-band athermalization. With the further investigation of the research and development (R&D) and manufacturing technology of dual-band detector harmonic diffractive lenses, this dual-band optical system could be widely used in military systems such as target tracking, identification, and precision strikes.

Key words: infrared double band, athermalization, harmonic diffraction, common aperture

收稿日期: 2019-08-28; 修订日期: 2020-01-02.

作者简介: 李升辉 (1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光学设计、电工电子的研究。E-mail: lishenghui@hust.edu.cn.

通信作者: 李虹静 (1989-), 女, 助理工程师, 主要从事电工电子和 PLC 的研究。E-mail: 739003778@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金 (61805089)

0 引言

红外光学系统大部分是中波或长波单波段系统，在获取信息方面有很大局限性，获取信息少，并且由于目标移动或其他变化使辐射波段改变等原因，从而使探测器探测不到目标，甚至探测到虚假目标。因此，研究人员提出了双波段成像，让光学系统同时探测双波段甚至多波段的信号，以获得更多的信息量。传统的光学系统在双波段范围内校正好系统的轴向色差和球差，必须依靠负透镜来消除色差，或使用稀有特殊色散的材料来改进设计，但这会导致光学系统体积大、分辨率低^[1-6]。

红外折/衍混合消热差光学系统在中波和长波光路设计中得到了普遍应用，不但提高了成像质量，而且减小了系统体积。同时衍射光学元件的焦距随波长的变化而变化，使其被局限在单波段光学系统中使用。谐衍射光学元件针对衍射光学元件在宽波段上的大色散问题做出了改进，使中波红外和长波红外在不同衍射级衍射实现谐振共焦成像，解决了衍射光学元件无法使用的难题。

本文基于 $320 \times 256 \ 30 \mu\text{m}$ 制冷双色探测器，设计了一款双波段共口径消热差红外光学系统。该系统采用谐衍射光学元件和多种红外光学材料组合消色差和热差，减少了透镜的使用数量；采用双波段共口径的结构形式，在不增加系统体积和重量的情况下实现双波段同时成像。

1 谐衍射理论

谐衍射透镜与普通衍射透镜的不同点在于：发生谐衍射时相差 $p \cdot 2\pi$ 个周期 ($p \geq 2$)；对其而言，环带间的光程差为 $p\lambda_0$ 。

若对于使用波长 λ 的 i 级次成像，则焦距： $f_i = p \cdot \lambda_0 \cdot f_0 / (i \cdot \lambda)$ ，要求 f_i 和 f_0 重合，即 $p \cdot \lambda_0 = i \cdot \lambda$ ，说明对于谐衍射透镜，凡满足 $\lambda = p \cdot \lambda_0 / i$ 的一系列谐振波长，谐衍射透镜的焦距值都相同，都将汇聚到同一焦点。

查阅相关文献可知，谐衍射透镜第 i 级衍射的衍射效率公式为：

$$\eta_i = \sin^2 c^2 \left\{ \left[\frac{\lambda_0}{\lambda} \left[\frac{n(\lambda) - 1}{n(\lambda_0) - 1} \right] p - i \right] \right\} \quad (1)$$

如果不考虑材料色散的影响， $[n(\lambda) - 1] / [n(\lambda_0) - 1] = 1$ 则各衍射级次的衍射效率可以简单表示为：

$$\eta_i = \sin^2 c^2 \left(p \frac{\lambda_0}{\lambda} - i \right) \quad (2)$$

当入射波长满足 $\lambda = p \cdot \lambda_0 / i$ (其中 i 为衍射级次且 $i = p, p \pm 1, p \pm 2, \dots$)，得到一系列的离散谐振波长。在谐振波长上的理论衍射效率达到 100%。

对于设计波长为 $10 \mu\text{m}$ ，相位深度因子 $p = 5, 3, 2, 1$ 的谐衍射透镜，在波段 $3 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$ 上可以得到波长对应的衍射效率如图 1 所示，图中横坐标为波长 (单位： μm)，纵坐标为衍射效率。图 2 针对设计波长上 $i = p$ 衍射级次的衍射效率的一个对比，从中心波长开始向波长减小的方向，谐波长的衍射级依次升高。

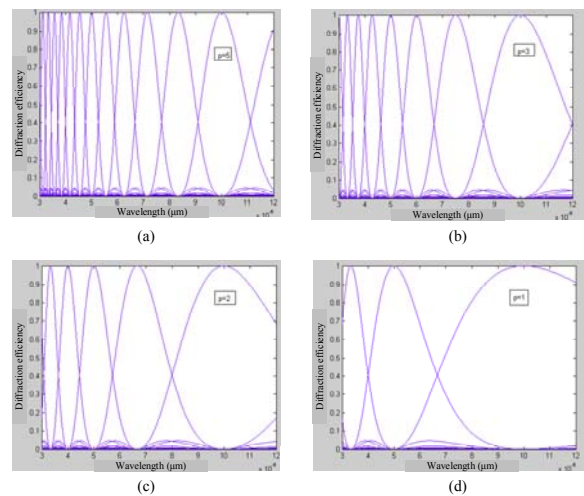


图 1 相同波段上不同 p 值所对应的衍射效率

(a) $p = 5$, (b) $p = 3$, (c) $p = 2$, (d) $p = 1$

Fig.1 Diffraction efficiency corresponding to different p with the same waveband (a) $p = 5$, (b) $p = 3$, (c) $p = 2$, (d) $p = 1$

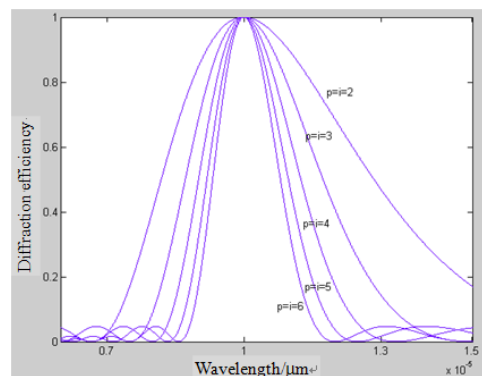


图 2 $p = i$ 时， p 对设计波长处衍射效率波段宽度的影响

Fig.2 The influence of p on the waveband width of diffraction efficiency at the designed wavelength with $p = i$

由以上分析可知，在设计谐衍射透镜时，相位深度因子 p 存在一个合理的 p 值可以平衡谐振波长个数和高衍射效率波段的宽度。实际上 p 就是材料色散和衍射色散之间的平衡问题，其决定谐衍射光学元件的衍射环带结构，在设计过程中需要特别注意。

根据以上分析,由于谐衍射元件的衍射效率曲线在每个谐波处相对短波方向下降得快,而长波方向下降得慢些,所以选取设计波长 $\lambda_0=10\ \mu\text{m}$, $p=2$ 。产生一系列谐波长 $\lambda=20\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 、 $6.67\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 、 $4\ \mu\text{m}$ 、 $3.33\ \mu\text{m}$ 、 $2.85\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$,分别对应衍射级次为 $i=1、2、3、4、5、6、7、8$ 。其中谐波长 $10\ \mu\text{m}$ 和 $4\ \mu\text{m}$ 正好落在所设计光学系统的中心波段偏短波段,即选取 $10\ \mu\text{m}$ 和 $4\ \mu\text{m}$ 为方案所用的中心波长。衍射级次分别为2和5,两波段内衍射效率如图3所示。

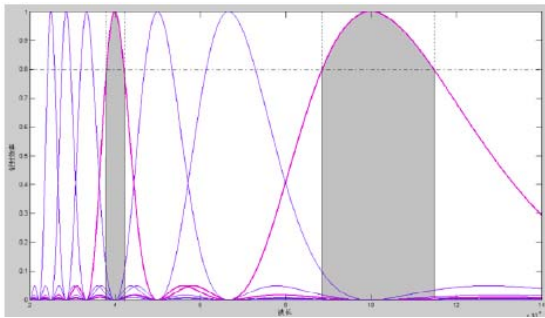


图3 $p=2, \lambda_0=10\ \mu\text{m}$ 时,谐衍射元件的衍射效率曲线图
Fig.3 The curves of diffraction efficiency of harmonic diffraction element with $p=2$ and $\lambda_0=10\ \mu\text{m}$

综合考虑衍射效率对红外成像质量的影响和实际材料透过率情况,取 $i=2$ 和 $i=5$ 谐波段衍射效率曲线大于80%的波段作为我们设计的红外工作波段范围,如图3的阴影部分所示。衍射效率曲线大于80%的具体波段数值范围是:中波红外波: $3.8\ \mu\text{m}\sim 4.3\ \mu\text{m}$;长波红外波段: $8.8\ \mu\text{m}\sim 11.5\ \mu\text{m}$ 。经计算, $10\ \mu\text{m}$ 的第2衍射级次在波段 $8.8\ \mu\text{m}\sim 11.5\ \mu\text{m}$ 上的平均衍射效率可达到93%, $4\ \mu\text{m}$ 的第5衍射级次在波段 $3.8\ \mu\text{m}\sim 4.3\ \mu\text{m}$ 上的平均衍射效率可以达到93%,满足光学系统对能量要求^[5-8]。

该光学系统同时消热差和像差需要满足以下3个公式:

各元件光焦度之和等于总的光焦度:

$$\varphi = \sum_{h_i}^i h_i \varphi_i = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \dots + \varphi_i + \varphi_{3d} \quad (3)$$

轴向消色差方程:

$$h_1^2 \omega_1 \varphi_1 + h_2^2 \omega_2 \varphi_2 + h_3^2 \omega_3 \varphi_3 + \dots + h_i^2 \omega_i \varphi_i = 0 \quad (4)$$

消热差方程:

$$\left(h_1^2 x_1 \varphi_1 + h_2^2 x_2 \varphi_2 + h_3^2 x_3 \varphi_3 + \dots + h_i^2 x_i \varphi_i \right) \frac{1}{h_1 \varphi} = \alpha n L \quad (5)$$

式中: $\varphi_1、\varphi_2、\varphi_3、\varphi_4、\varphi_5、\varphi_6$ 分别表示6个折射透镜的光焦度; φ_{3d} 表示谐衍射面的光焦度。

2 设计实例

基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统采用 $320\times 256、30\ \mu\text{m}$ 双色红外探测器,其主要光学参数如表1所示。

基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统焦距较短,采用一次成像的结构形式,共4片透镜,分别为ZnSe球面透镜、ZnS非球面透镜、锗非球面谐衍射面透镜和硫系玻璃球非球面透镜。在透镜三锗非球面透镜上加谐衍射面,设计参数 $p=2, \lambda_0=10\ \mu\text{m}$,产生的2级谐波长 $10\ \mu\text{m}$ 和5级谐波长 $4\ \mu\text{m}$ 正好分别落在长波和中波的中心波长处。光学系统示意图如图4所示。

表1 光学设计参数

Table 1 Parameters of the designed optical system

Parameters	Value
Spectral range	3-5 μm 8-12 μm
Focus	45 mm
FOV	$12.18^\circ \times 9.15^\circ$
image size	9.6 mm \times 7.2 mm
F/#	2
Temperature range	$-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$

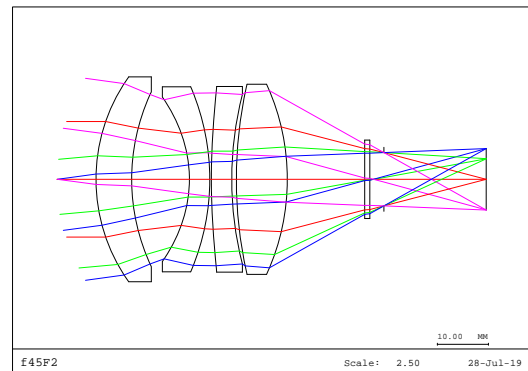


图4 f45F2双波段红外光学系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of f45F2 dual-band infrared optical system

冷反射是含制冷探测器的红外光学系统的一种特有现象。是由于冷光阑经光学系统镜片反射再透射在探测器上形成的成像缺陷。这种成像缺陷会造成探测器所接受的背景能量降低,从而在画面上形成一个黑斑^[9-10]。

基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统设计时尽力控制其冷反射强度,控制各个表面的YNI(the paraxial marginal ray height \times the index \times the angle of incidence at the surface,近轴像高 \times 折射率 \times 入射角)值,保证像面不会产生冷反射现象。同

时利用材料搭配和谐衍射面综合控制光学系统的像差和热差，最终得到了满足使用要求的红外双波段共口径消热差光学系统。

3 系统像质分析

基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统主要使用 MTF、点列图及畸变图来进行评价。

1) MTF 分析

该光学系统在各个温度下的 MTF 如图 5 所示。

由图 5 可知，3 个温度下在空间频率为 16 lp/mm 时的 MTF 轴上 >0.5，轴外 >0.4；满足双色探测器使用要求。

2) 点列图分析

系统各个温度下的点列图如图 6 所示。

由图 6 可知基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统 3 个温度下的 RMS 弥散圆均方根值均小于双色探测器的一个像元尺寸，从而保证了该光学系统 -40℃~60℃ 宽温度范围内均具有较好的像质。

3) 畸变分析

系统各个温度下的畸变图如图 7 所示。

由图 7 可知基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统 3 个温度下的畸变值均小于 2%，满足使用要求。

4) 冷反射分析

本系统冷反射分析结果如表 2 所示。

经过分析冷反射列表，可发现 YNI 值的绝对值均大于 0.3，不会产生明显的冷反射。

4 结论

设计了一种基于谐衍射的红外双波段共口径消热差光学系统。该系统的焦距为 45 mm，波段为中波和长波，利用折射/谐衍射及材料搭配消除了红外宽波段的像差和热差，实现了红外双波段共口径消热差成像，系统的 MTF 较高，RMS 均方根值小于双色红外探测器的一个像元尺寸，成像质量满足使用要求。随着双波段探测器和谐衍射透镜研发制造技术的进一步发展，双波段共口径光学系统必将在目标跟踪、识别、精确打击等军工系统中得到广泛应用。

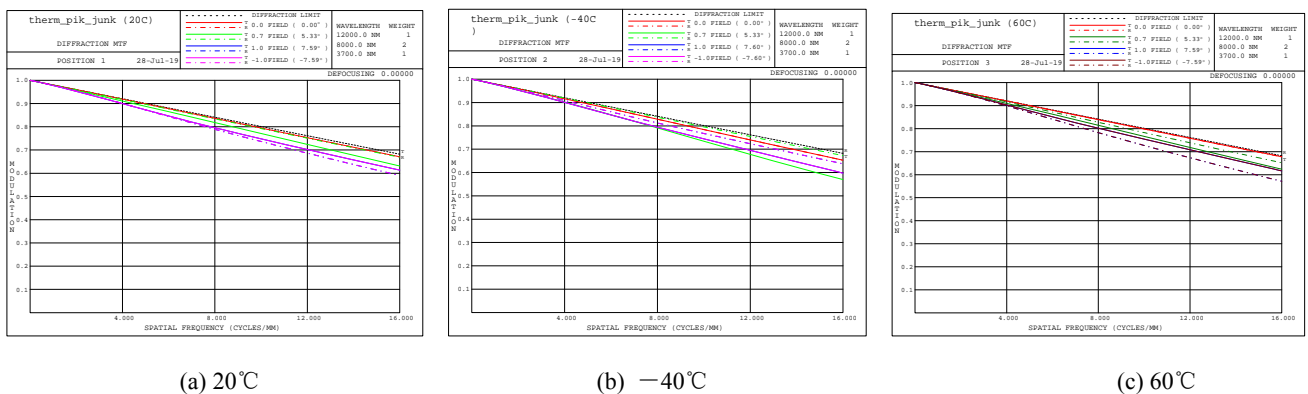


图 5 不同环境温度下的 16 lp/mm 光学系统传递函数

Fig.5 Transfer function of 16 lp/mm optical system at different temperatures

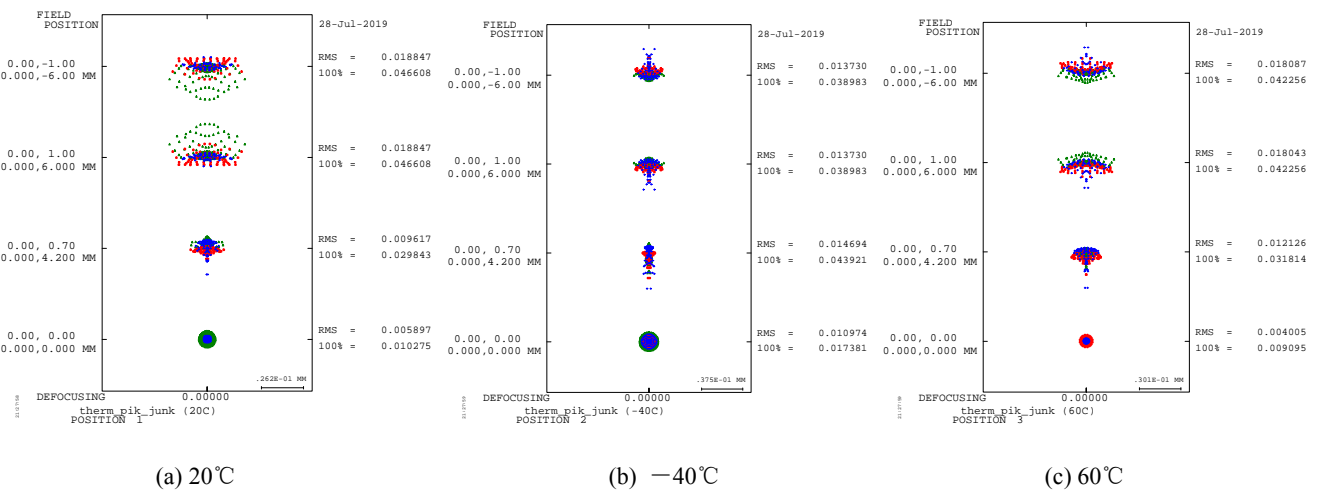
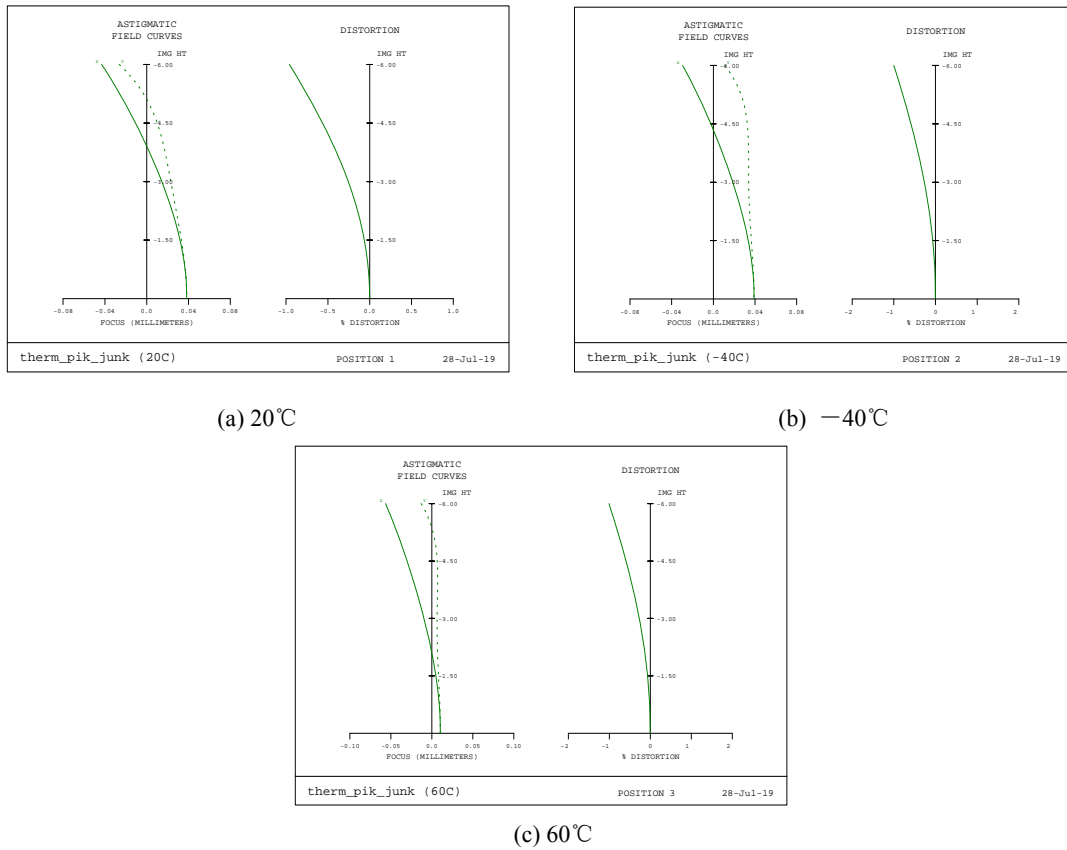


图 6 不同环境温度下的 RMS 点列图

Fig.6 The optical point diagram of RMS at different temperatures



(a) 20°C

(b) -40°C

(c) 60°C

图7 不同环境温度下对应的畸变图

Fig.7 The optical distortion corresponding to different temperatures

表2 冷反射分析结果

Table 2 The analysis results of the cold reflection system

Surface	Surface of cutting grays	YNI	I/IBAR	Angle of cold reflection	Degree of cold reflection
1	11(R)	3.6898	1.893	0.143142	0.08191
2	11(F)	0.3382	-0.283	0.505071	1.00000
3	11(R)	-4.4107	0.921	0.095700	0.03665
4	11(R)	-1.5652	0.597	0.205884	0.16914
5	11(F)	1.2526	-1.884	0.505071	1.00000
6	11(R)	3.2019	5.474	0.287938	0.32972
7	11(R)	2.8800	9.130	0.359371	0.51163
8	11(R)	-3.9525	1.041	0.126942	0.06444
9	11(R)	-14447	0.838	0.392413	0.60877

参考文献:

[1] 孙强, 卢振武, 王肇圻. 谐衍射/折射双波段系统设计[J]. 光学学报, 2004, 24(6): 830-833.
SUN Qiang, LU Zhenwu, WANG Zhaoqi. The dual band design of harmonic diffractive/refractive optics system[J]. *Acta Optic Sin*, 2004, 24(6): 830-833.

[2] Yoel Aredli, Shmuel Ozeri, Naftali Eisenberg. Design of a diffractive optical element for wide spectral bandwidth[J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(11): 823-824.

[3] Ayami I Mamura, T Etsuyalshii. Diffractive optical elemen[P]. US: 5847877[1998-12-08].

[4] 范长江, 王肇圻, 吴环宝, 等. 红外双波段双层谐衍射光学系统设计[J]. 光学学报, 2007(7): 1266-1270.
FAN Changjiang, WANG Zhaoqi, WU Huanbao, et al. The Design of Infrared Dual-Band Double-Layer Harmonic Diffractive Optical System[J]. *Acta Optic Sin*, 2007(7): 1266-1270.

[5] 孙婷, 张宣智, 常伟军, 等. 红外宽波段双层谐衍射光学系统的设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 951-954.

- SUN Ting, ZHANG Xuanzhi, CHANG Weijun, et al. Design of infrared wide waveband double-layer harmonic diffractive optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(4): 951-954.
- [6] 李林, 安连生. 计算机辅助光学设计的理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 21-23.
- LI Ling, AN Liansheng. *The Theory and Application of Computer Aided Optical Design*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 21-23.
- [7] 李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 112-113.
- LI Xiaotong, CEN Zhaofeng. *Geometric Optics & Aberration & Optical Design*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003: 112-113.
- [8] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 72-74.
- XIAO Zexin. *Engineering Optical Design*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 72-74.
- [9] 李升辉, 杨长城. 折/衍混合红外光学系统的消热差设计[J]. *光学与光电技术*, 2006(4): 1-3.
- LI Shenghui, YANG Changcheng. Athermal design for infrared hybrid refractive/reflective optical system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006(4): 1-3.
- [10] 阙俊, 崔小强, 李升辉. 基于衍射元件的两档轴向移动式红外变焦光学系统设计[J]. *光学与光电技术*, 2015, 13(2): 91-94.
- QUE Jun, CUI Xiaoqiang, LI Shenghui. Design of infrared zoom optical system with two steps axial movement based on diffractive element[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(2): 91-94.

《红外技术》第八届编辑委员会名单

荣誉主编: 褚君浩 姜会林 曾毅 曾桂林

主 编: 苏君红

执行主编: 姚立斌

副主编: 刘逸平 唐剑 李凯 朱颖峰 陈钱

蔡毅 何力 金伟其 郑云峰(常务)

编委(以姓氏笔画为序)

马文坡 王双保 王霞 石峰 卢进 史衍丽 白廷柱 白瑜

朱颖峰 刘逸平 麦绿波 苏君红 巫广华 李云红 李凯 李晓峰

杨宇 吴一冈 吴晗平 何力 邹继鑫 汪岳峰 张长泉 张若岚

张建奇 陆卫 陈钱 陈效双 陈福胜 金伟其 郑云峰 郑凯

赵勋杰 赵俊 胡伟达 施加林 姚立斌 顾国华 凌福日 郭杰

唐利斌 唐良瑞 唐剑 姬荣斌 常本康 葛宝臻 蒋亚东 曾宇

蔡毅 熊平