

## 红外宽波段双层谐衍射光学系统的设计

孙 婷,张宣智,常伟军,李 元,胡 博,郭小岗,杨华梅,陈秀萍

(西安应用光学研究所,陕西 西安 710065)

**摘 要:** 相比传统的折反射元件,衍射光学元件和谐衍射光学元件因其独特的色散性能和温度效应在消色差和补偿热差方面有得天独厚的优势,将其应用于混合光学系统,可以简化结构,提高像质。但是二者衍射效率均依赖于波长,降低了宽波段成像的对比度。而双层谐衍射元件可以减弱衍射效率对波长的依赖性。因此,该红外宽波段系统采用双层谐衍射元件,第一层材料为 Ge,第二层材料为 ZnSe,微结构厚度分别为  $73.3\ \mu\text{m}$  和  $149.3\ \mu\text{m}$ ,整个工作波段的衍射效率达到 97.5% 以上。在 Code V 中仿真优化得出:混合系统的各种像差性能都比较理想,特别是宽波段  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  的色差得到了很好的校正,二级光谱得到较好的控制,系统的调制光学传递函数接近衍射限。最终的性能测试结果显示:各项性能均可满足使用要求。

**关键词:** 红外宽波段; 双层谐衍射元件; 衍射效率

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-0951-04

## Design of infrared wide waveband double-layer harmonic diffractive optical system

Sun Ting, Zhang Xuanzhi, Chang Weijun, Li Yuan, Hu Bo, Guo Xiaogang, Yang Huamei, Chen Xiuping

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Diffractive optical element (DOE) and harmonic diffractive optical element (HDOE) have overwhelming superiority on achromatisation and athermalisation over traditional refraction and reflection optical elements due to their unique dispersion and temperature effect, which may improve the performance of the optical system and simplify the system structure. But, the diffraction efficiency of both are dependent upon wavelength, that will reduce the imaging contrast in wide waveband. However, Double-layer HDOE could weak the dependence. So, they were used in this infrared wide waveband system, the materials were Ge and ZnSe respectively, the microstructure thickness of corresponding diffractive surface were  $73.3\ \mu\text{m}$  and  $149.3\ \mu\text{m}$ . The diffraction efficiency of the system over whole waveband was larger than 97.5%. The emulational result in Code V indicates that various aberrations in system is satisfactory. Especially, the chromatic aberration of wide waveband ( $8\sim 14\ \mu\text{m}$ ) is well corrected, secondary spectrum is controlled preferably, and MTF closes to the limit of diffraction. Finally, the measured result indicate that all performances meet optical system expectation.

**Key words:** infrared wide waveband; double-layer harmonic diffractive optical element; diffraction efficiency

收稿日期: 2012-08-03; 修订日期: 2012-09-10

基金项目: 西安应用光学研究所创新基金(Y089222-1)

作者简介: 孙婷(1978-)女,博士,主要从事光学设计方面的研究。Email:sunting205@163.com

## 0 引言

衍射光学元件(DOE)和谐衍射光学元件(HDOE)由于独特的衍射色散和温度特性,对光学系统有良好的消色差和补偿热差作用,但因其衍射效率在设计波长之外衰减严重,大大限制了它们在宽波段光学系统中的应用。为了提高宽波段的衍射效率并使之均衡分布,多层 HDOE 应运而生。2000 年 9 月,Canon 宣布世界上第一片用于照相机摄影镜头中的“多层衍射光学元件”研制成功。该衍射元件实质是双层 HDOE,用于可见光宽波段(400~700 nm)成像<sup>[1]</sup>。其中双层 HDOE 的使用大大降低了非成像级次的光强比重,提高了衍射效率,改善了光学系统的 MTF,得到了很好的像质。近年来,关于 HDOE 和双层 HDOE 的研究时有报道<sup>[2-5]</sup>,但是,对于红外宽波段的系统设计鲜见详细报道,因此,文中进行红外宽波段双层 HDOE 的理论分析与设计。

## 1 双层谐衍射元件的设计原理

双层谐衍射元件的衍射效率可表示为<sup>[6-7]</sup>:

$$\eta_m = \text{sinc}^2 \left[ m - \frac{[n_1(\lambda) - 1]H_1 + [n_2(\lambda) - 1]H_2}{\lambda} \right] \quad (1)$$

式中: $n_1(\lambda)$ 和 $n_2(\lambda)$ 分别为两层材料在工作波长 $\lambda$ 处的折射率; $H_1$ 和 $H_2$ 分别表示两层材料的微结构厚度; $m$ 为设计级次。两层的材料,即 $n_1(\lambda)$ 和 $n_2(\lambda)$ 确定以后,将以上关系在 Matlab 中进行模拟可以得出衍射效率满足设计要求时的 $H_1$ 和 $H_2$ 。

根据光程差公式:

$$[n(\lambda) - 1]H = p\lambda \quad (2)$$

便可求得相位压缩系数 $p_1$ 和 $p_2$ ,再依据相位分布公式:

$$\varphi = (2\pi/\lambda) \sum_{i=1}^{10} C_i r^{2i} = p_2 2\pi \quad (3)$$

和像差要求对相位系数 $C_i$ 进行优化,相位系数确定后,便可得出结构参数即环带半径 $r$ 。

## 2 系统拟设计参数与设计思路

系统拟设计参数:视场 $2\omega=2^\circ$ ,工作波段为 8~14  $\mu\text{m}$ ,焦距 $f'=100 \text{ mm}$ 。由于光学系统视场较小,主要考虑轴上像差的校正。系统工作波段较宽,会导致

轴向色差增大。该系统采用双层 HDOE,以实现宽波段消色差。其次,通光口径较大( $D=80 \text{ mm}$ ),会造成球差增大,因此,系统中加入非球面以减小球差。此外,为了保证谐衍射面和非球面的同轴性,提高系统的光学成像质量,采用在单块透镜的一个光学表面上集成谐衍射面和非球面的设计思想,将非球面设计在谐衍射面所在的基底光学表面上,使非球面和谐衍射面并存,以降低加工及装调难度。

## 3 光学系统设计

双层 HDOE 的第一层为 Ge,第二层为 ZnSe。经设计计算得出:Ge 的微结构厚度 $H_1$ 满足 $55 \mu\text{m} < H_1 < 80 \mu\text{m}$ 时,整个设计波段 8~14  $\mu\text{m}$ 的衍射效率可达 90%以上,如图 1 所示。为了保证整个工作波段衍射效率比较均衡, $H_1$ 和 $H_2$ 需要满足: $H_2 = 2.04H_1$ ,结合公式(1)可得: $H_1 = 73.3 \mu\text{m}$ , $H_2 = 149.3 \mu\text{m}$ 时,衍射效率分布最为理想,整个波段都在 97.5%以上,如图 2 所示。此时相应的 $p_1=20$ , $p_2=19$ 。图 3

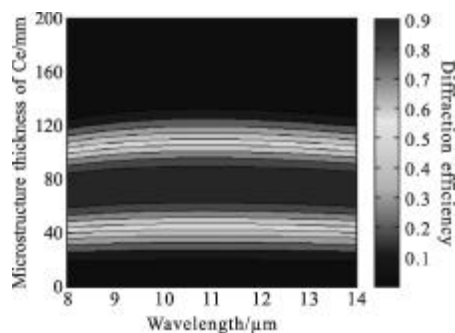


图 1 波长、微结构厚度及衍射效率三者之间的关系

Fig.1 Relation of wavelength, microstructure thickness and diffraction efficiency

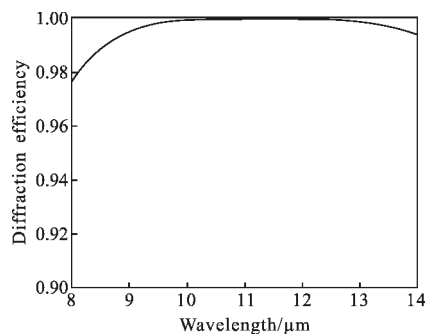


图 2 双层 HDOE 的衍射效率

Fig.2 Diffraction efficiency of double-layer HDOE

和图 4 分别给出了单层 DOE 和 HDOE 的衍射效率曲线,对比图 2 与图 3 和图 4 可知,双层 HDOE 衍射效率明显提高。

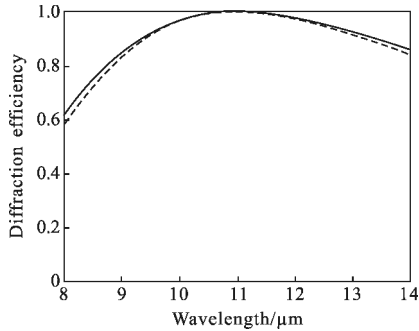


图 3 单层 DOE 的衍射效率

Fig.3 Diffraction efficiency of DOE

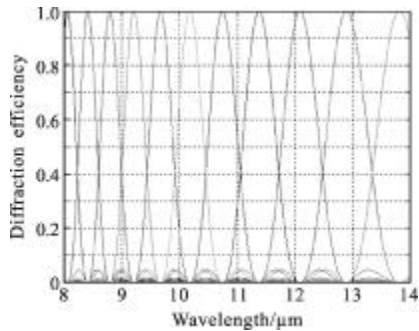


图 4 单层 HDOE 的衍射效率

Fig.4 Diffraction efficiency of HDOE

图 5 为优化得到的系统图。图 6~图 8 为像质评价结果,依次为点列斑,像差曲线和 MTF。由图可知:宽波段的色差得到了很好的校正(以 8  $\mu\text{m}$  和 14  $\mu\text{m}$  为校正波长),二级光谱(设计波长 11  $\mu\text{m}$  相对 8  $\mu\text{m}$  和 14  $\mu\text{m}$  的色差)得到较好的控制,系统的 MTF 已经达到衍射限。表 1 和表 2 为两个谐衍射面的环带参数。由表 1 和表 2 可知:两个谐衍射面有相同的环带数目和相等的环带半径,有利于两个

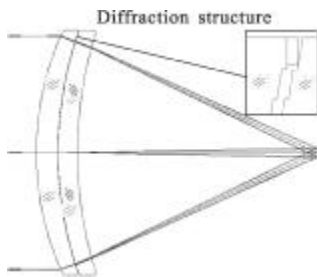


图 5 光学系统及衍射结构图

Fig.5 Optical system and diffraction structure

谐衍射面的高精度装调。将衍射相位转换为几何结构分布,如图 9 和图 10 所示。可以看出,第二个面的微结构深度明显大于第一个面的微结构深度,符合宽波段高衍射效率对厚度的要求。

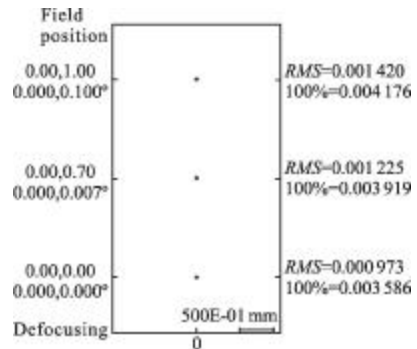


图 6 系统的点列斑

Fig.6 Spot diagram of optical system

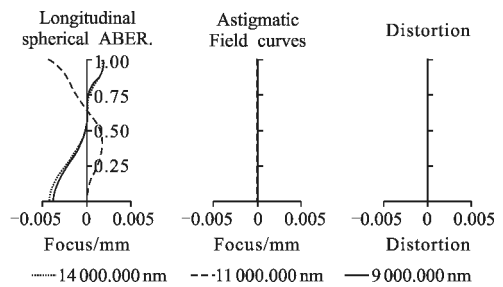


图 7 系统的像差曲线

Fig.7 Aberration curves of optical system

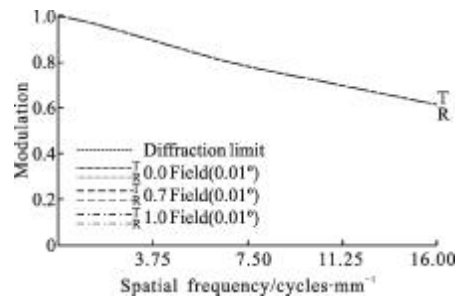


图 8 系统的 MTF 曲线

Fig.8 MTF plot of optical system

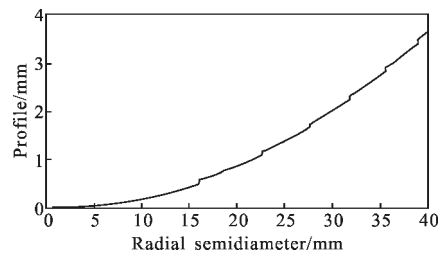


图 9 Ge 谐衍射面的几何结构分布

Fig.9 Profile of Ge HDOE surface

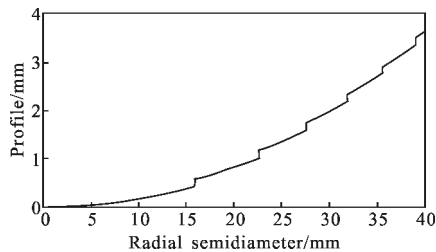


图 10 ZnSe 谐衍射面的几何结构分布  
Fig.10 Profile of ZnSe HDOE surface

表 1 Ge 谐衍射面的环带参数

Tab.1 Parameters of zones on Ge HDOE surface

Zone number	Zone semidiameter/mm
1.0	16.418 1
2.0	23.006 3
3.0	27.930 8
4.0	31.981 6
5.0	35.472 8
6.0	38.564 2

表 2 ZnSe 谐衍射面的环带参数

Tab.2 Parameters of zones on ZnSe HDOE surface

Zone number	Zone semidiameter/mm
1.0	16.418 1
2.0	23.006 3
3.0	27.930 8
4.0	31.981 6
5.0	35.472 9
6.0	38.564 2

#### 4 性能测试

按设计要求加工装调了一套系统,并对系统的性能进行了测试。透过率和焦距测试结果显示:平均透过率 92.3%,焦距为 100.320 mm,相对焦距误差为 0.3%。MTF 测试曲线如图 11 所示。对比图 11 与图 8 可知,实测的 MTF 与设计值相比有一定的下降。通过在 CodeV 中进行误差分析发现,这主要是由于加工误差、装调误差及测试误差对高频的影响比较明

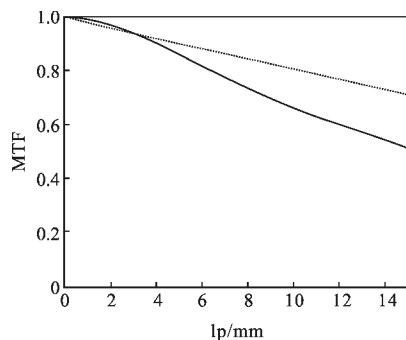


图 11 8~12 μm 宽波段的 MTF 曲线  
Fig.11 MTF curves of 8~12 μm

显所致,其中加工误差包括中心厚、中心偏、面型误差、衍射结构死角等,而面型误差和衍射结构死角对高频的影响占主导地位<sup>[8]</sup>。

#### 5 结论

采用双层 HDOE,整个工作波段的衍射效率可达到 97.5%以上。Code V 仿真结果表明:混合系统的各种像差性能都比较理想,特别是宽波段 8~14 μm 的色差得到了很好的校正,二级光谱得到较好的控制,系统的 MTF 接近衍射限。性能测试结果表明:平均透过率为 92.3%,焦距为 100.320 mm,相对焦距误差为 0.3%。实测 MTF 相比设计值有一定程度的下降,经分析是由加工、装调和测试误差所致。实测 MTF 虽有下降,但已高于一般红外光学系统对 MTF 的要求。

#### 参考文献:

- [1] Ayami Imamura, Tetsuya Ishii. Diffractive optical element [P]. US: 5847877, 1998-12-08.
- [2] Ma Tao. The design theory and application in hybrid imaging system of multi-layer DOE [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [3] Lou Di. The design theory and application of harmonic diffractive optics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [4] Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao, et al. The design of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(7): 1266-1270. (in Chinese)
- [5] Sun Ting, Jiao Mingyin. Development of multi-layer diffractive optical element [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(S): 13-18. (in Chinese)
- [6] Sun Ting, Jiao Mingyin, Zhang Yuhong. Analysis on the diffraction efficiency of single-layer and double-layer harmonic diffractive optical element [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(4): 622-624. (in Chinese)
- [7] Sun Ting, Jiao Mingyin, Zhang Yuhong. Analysis on the diffraction efficiency of double-layer harmonic diffractive optical element [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(6): 637-639. (in Chinese)
- [8] Sun Ting, Guo Xiaogang, Yang Huamei. Analysis on shadowing effect of diamond turning harmonic diffractive element [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(S): 145-148. (in Chinese)