

文章编号: 0253-2239(2007)07-1266-5

# 红外双波段双层谐衍射光学系统设计\*

范长江 王肇圻 吴环宝 张梅

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要:** 将谐衍射透镜应用在传统红外单波段佩茨瓦尔(Petzval)物镜上, 设计得到工作波段处于  $3.4\sim4.2\text{ }\mu\text{m}$  和  $8\sim11\text{ }\mu\text{m}$  的红外双波段单层谐衍射光学系统。但单层谐衍射元件的衍射效率只在设计波长处衍射效率最高, 随着波长相对设计中心波长向两侧偏离, 主衍射级次的衍射效率逐渐下降。为提高含单层谐衍射元件光学系统的衍射效率, 基于双层衍射元件衍射效率表达式研究了双层谐衍射元件的结构优化, 给出了优化方法。设计出佩茨瓦尔型红外双波段双层谐衍射光学系统, 其在  $3.4\sim4.2\text{ }\mu\text{m}$  和  $8\sim11\text{ }\mu\text{m}$  两个工作波段的衍射效率均达到 90% 以上, 相比含有单层谐衍射面的光学系统衍射效率有了很大提升, 提高了像面衬比度, 完善了系统成像质量。

**关键词:** 光学设计; 双层衍射; 谐衍射元件; 红外光学系统

中图分类号: TH74; O435.2 文献标识码: A

## The Design of Infrared Dual-Band Double-Layer Harmonic Diffractive Optical System

Fan Changjiang Wang Zhaoqi Wu Huanbao Zhang Mei

(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

**Abstract:** A new infrared dual-band Petzval objective with single-layer harmonic diffractive element (HDE) is designed, which can work in the  $3.4\sim4.2\text{ }\mu\text{m}$  and  $8\sim11\text{ }\mu\text{m}$  bands. However, it is only at the designed center wavelength that the single-layer harmonic diffractive element possesses the maximum diffraction efficiency, and the diffraction efficiency at the master diffraction order gradually decreases with the deviation of the wavelength from the center to both sides. To improve the diffraction efficiency, the double-layer harmonic diffractive element (HDE) structure is investigated and the optimization procedure is given based on the equation of diffraction efficiency of the double-layer diffractive element. Then the infrared dual-band Petzval objective with double-layer harmonic diffractive element is designed. The diffraction efficiency of the system at each wavelength in the designed  $3.4\sim4.2\text{ }\mu\text{m}$  and  $8\sim11\text{ }\mu\text{m}$  bands is larger than 90%, which improves the image contrast and the imaging quality significantly.

**Key words:** optical design; double-layer diffraction; harmonic diffractive element; infrared optical system

## 1 引言

军用或者空间红外探测器通常工作在  $3\sim5\text{ }\mu\text{m}$  或者  $8\sim14\text{ }\mu\text{m}$  单波段大气窗口。但单一波段的红外成像光谱技术已不能满足探测准确度的需求<sup>[1,2]</sup>, 根据目标和背景的辐射和反射特性, 能对此两波段的光谱辐射进行同时探测的双波段成像系统成为研究热点。Sweeney 等<sup>[3]</sup>提出的谐衍射透镜(HDE)能在一系列分离波长处获得相同的光焦度, 可应用在红外折射光学系统中实现红外双波段探

测<sup>[4]</sup>。但单层衍射元件只在设计中心波长处衍射效率最高, 理论上衍射效率能达到 100%, 随着波长相对于设计中心波长向两侧偏离, 主衍射级次的衍射效率逐渐下降(且随着位相调制厚度的增加其衍射效率随波长的下降更甚), 次衍射级次的衍射能量弥散在主衍射级次的像面上, 影响了像面的衬比度, 降低了系统的成像质量。Yoel Arieli 等<sup>[5]</sup>提出可利用两种不同色散材料的基底材料构建两个不同相位高度的单层表面微结构, 层叠后得到的双层衍射光学

\* 国家自然科学基金(60577015)资助课题。

作者简介: 范长江(1975—), 山东费县人, 博士研究生, 主要从事投影头盔、二元光学、光学设计方面的研究。  
E-mail: fanchangjiang28@126.com

导师简介: 王肇圻(1942—), 男, 山东青岛人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学设计方面的研究。  
E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

收稿日期: 2006-10-19; 收到修改稿日期: 2006-12-26

元件可提高整个设计波段的衍射效率。

佩茨瓦尔(Petzval)摄像物镜具有大的相对孔径,适应现代光电摄像在红外单波段对光学系统的要求,在红外光学系统的设计中得到了广泛的应用<sup>[6]</sup>。设计了红外双波段单层谐衍射光学系统,将传统红外单波段佩茨瓦尔物镜的工作波段扩展到3.4~4.2 μm和8~11 μm两个波段。为在全波段内改善含有单层谐衍射元件光学系统的衍射效率,基于双层衍射元件衍射效率的表达公式研究了双层谐衍射元件的结构优化,给出了优化方法。作为实际应用,设计出红外双波段双层谐衍射光学系统,以满足现代空间和军事对红外双波段探测的高精度要求<sup>[7]</sup>。

## 2 理论分析

谐衍射透镜区别于模2π衍射透镜主要在中心厚度,谐衍射透镜的中心厚度是相应模2π透镜的p倍(p为正整数)厚度为pλ/(n-1)。如图1(a)所示,p表示光通过谐衍射透镜时所产生的最大相位差不再是2π,而是2pπ。谐衍射透镜的焦距特性可表示为<sup>[8]</sup>

$$f_{m\lambda} = \frac{p\lambda_0}{m\lambda} f_0, \quad (1)$$

$m$ 是波长 $\lambda$ 对应的谐振级次, $\lambda_0$ 是设计波长, $f_0$ 是设计波长对应的焦距。当 $\lambda m = p\lambda_0$ 时, $f_{m\lambda} = f_0$ ,即不同波长 $\lambda$ 其 $m$ 级谐振光波均汇聚到共同的焦点 $f_0$ 处。不考虑物质色散时,谐衍射元件谐振波长 $\lambda$ 不仅和设计中心波长 $\lambda_0$ 具有相同焦距,而且其 $m$ 级衍射效率和设计波长 $f_0$ 具有相同衍射效率。本文利用这一特性在设计波长和谐振波长处实现双波段探测。

谐衍射元件的第 $m$ 级衍射的衍射效率公式为

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

设计中心波长处衍射效率达到100%时,衍射元件

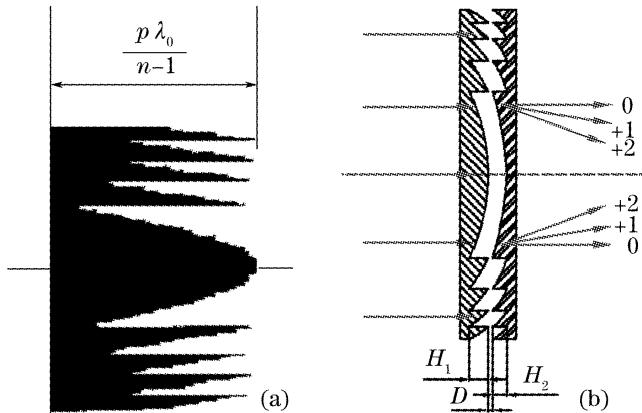


图1 谐衍射透镜(a), 双层衍射透镜(b)

Fig. 1 Harmonic diffractive element (a), double-layer diffractive optical element (b)

的厚度 $H_0$ 为

$$H_0 = \frac{p\lambda_0}{n(\lambda_0) - 1}, \quad (3)$$

由(2)式、(3)式谐衍射元件的第 $m$ 级衍射的衍射效率公式可表示为

$$\begin{aligned} \eta_m &= \text{sinc}^2 \left\{ \frac{H_0 [n(\lambda) - 1]}{\lambda} - m \right\} = \\ &\quad \text{sinc}^2 \left[ \frac{\Delta_{\text{OPD}}(\lambda)}{\lambda} - m \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

双层衍射元件结构如图1(b)所示,这两个衍射元件具有相同的环带周期,沿着光轴方向顶部对顶部,底部对底部紧密结合在一起。双层衍射光学元件的相位分布函数需要满足下列条件才可实现多个设计波长衍射效率达到100%<sup>[5]</sup>:

$$\varphi(\lambda_{0i}) = k_{0i} [n_1(\lambda_{0i}) - 1] H_1 - k_{0i} [n_2(\lambda_{0i}) - 1] H_2 = M \cdot 2\pi, \quad (5)$$

式中 $k_{0i}$ 为波数, $M$ 为衍射级次, $n_1(\lambda_{0i})$ 与 $n_2(\lambda_{0i})$ 为两种材料的折射率, $H_1$ 与 $H_2$ 为两层微结构的深度。当确定两种具有不同色散系数的基底材料之后,取设计波段内两个边缘波长值分别代入(3)式,由这两个方程组成方程组

$$\begin{cases} k_{01} [n_1(\lambda_{01}) - 1] H_1 - k_{01} [n_2(\lambda_{01}) - 1] H_2 = M \cdot 2\pi, \\ k_{02} [n_1(\lambda_{02}) - 1] H_1 - k_{02} [n_2(\lambda_{02}) - 1] H_2 = M \cdot 2\pi, \end{cases} \quad (6)$$

即可求解出 $H_1$ 、 $H_2$ 。由(4)式可得到双层衍射元件的衍射效率为

$$\eta(\lambda) = \text{sinc}^2 \left\{ \frac{[n_1(\lambda) - 1] - \alpha [n_2(\lambda) - 1]}{\lambda} H_1 - m \right\}, \quad (7)$$

其中 $\alpha = H_2/H_1$ 。

## 3 红外双波段单层谐衍射光学系统设计

传统的Si-Ge四片式佩茨瓦尔物镜具有f数为

1.5,视场角5°<sup>[9]</sup>,工作波段为红外3.2~4.2 μm。保持其f数、视场角不变,将最后一个面改为谐衍射面。谐衍射透镜设计波长 $\lambda_0 = 10 \mu\text{m}$ , $p = 2$ ,在3.4~4.2 μm波段和8~11 μm波段对应的谐振波

长和諧振級次分別為  $\lambda_1 = 4 \mu\text{m}$ ,  $m=5$ ;  $\lambda_2 = 10 \mu\text{m}$ ,  $m=2$ , 考慮到諧振級次和衍射效率的影響, 双波段系統以  $8\sim11 \mu\text{m}$  为主设计波段, 此段中心波長為  $10 \mu\text{m}$ ;  $3.4\sim4.2 \mu\text{m}$  为从设计波段, 此段中心波長為  $4 \mu\text{m}$ 。利用 Zemax 做结构优化得到第一个光学系统如图 2。

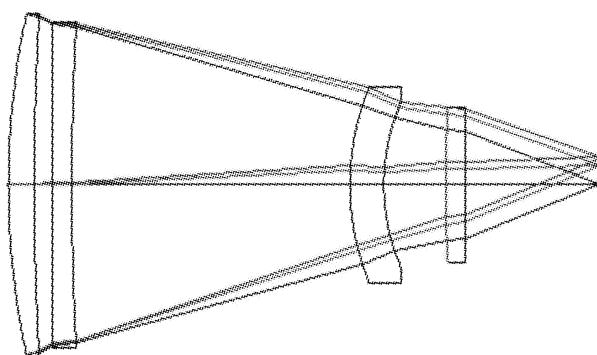


图 2 红外双波段单层谐衍射光学系统结构

Fig. 2 Layout of infrared dual-band single-layer harmonic diffractive element optical system

此系統模量传递函数(MTF)曲线在两个波段分别如图 3(a)、图 3(b)所示, 在  $18 \text{ lp/mm}$  处, 中心視场模量传递函数数值  $3.4\sim4.2 \mu\text{m}$  波段大于 0.8,  $8\sim11 \mu\text{m}$  波段大于 0.6; 最大視场模量传递函数数值  $3.4\sim4.2 \mu\text{m}$  波段大于 0.7,  $8\sim11 \mu\text{m}$  波段

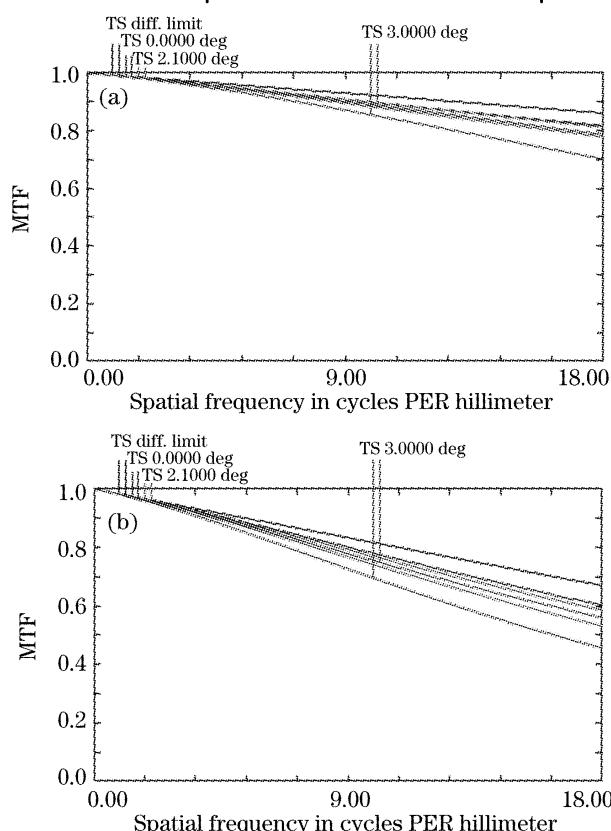


图 3 红外双波段单层谐衍射光学系统模量传递函数曲线

Fig. 3 Modulus transfer function of infrared dual-band single-layer harmonic elemtn optical system

大于 0.4。探测阵列为  $144\times144$  像元, 像元尺寸  $25 \mu\text{m}\times28 \mu\text{m}$ , 像元中心间距  $56 \mu\text{m}$  的红外双波段凝视型探测器要求的像面尺寸为 8 mm, 空间频率为  $9 \text{ lp/mm}$ 。由此可见, 设计的光学系统完全满足此类探测器对光学系统最低分辨力要求。

单层谐衍射二元面在  $3.4\sim4.2 \mu\text{m}$  波段和  $8\sim11 \mu\text{m}$  波段衍射效率如图 4 中的曲线 II 所示。可以看出: 单层谐衍射元件虽然在两个波段的中心波長上有高衍射效率, 但是在  $3.4\sim3.8 \mu\text{m}$ 、 $8\sim9 \mu\text{m}$  之间的衍射效率低于 80%, 意味着在主衍射級次的衍射光強降低, 而弥散在系統像面上, 作为背景光的次衍射級次的衍射光強增强, 影响了像面的衬比度, 使得成像质量下降。为克服此困难, 可以利用双层衍射元件来改善系統在两个波段的衍射效率。

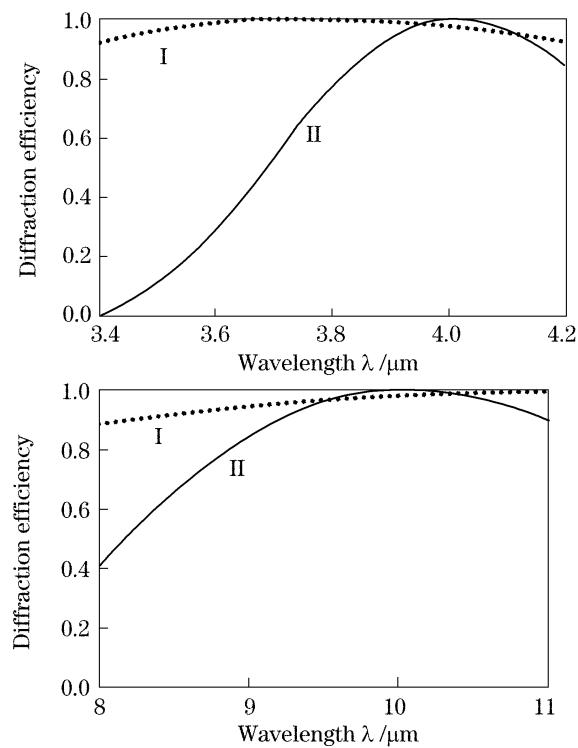


图 4 衍射效率

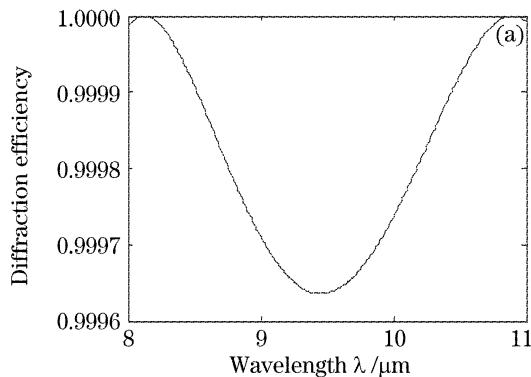
Fig. 4 Diffraction efficiency

#### 4 红外双波段双层谐衍射光学系统设计

双层谐衍射光学系统衍射面的设计波長、諧振級次、工作波段与单层谐衍射面相同。双层谐衍射光学系统的基底材料第一层为 ZnSe, 第二层为 SRF 2。将主设计波段  $8\sim11 \mu\text{m}$  波段的兩边缘波長  $8 \mu\text{m}$ ,  $11 \mu\text{m}$  代入(6)式可解得  $H_1 = 31.3 \mu\text{m}$ ,  $H_2 = 80 \mu\text{m}$ ,  $\alpha = 2.56$ 。若依据此理论值设计衍射元件, 两波段衍射效率如图 5 所示。在主设计波段衍射效率达到 99% 以上, 但在  $3\sim5 \mu\text{m}$  波段的衍射效率极低, 不超过 40%。为提高  $3\sim5 \mu\text{m}$  波段的衍射

效率,使得两个波段成像质量均好,需要针对比率 $\alpha$ 做结构优化,合理的调整衍射元件的厚度。优化方法为:

1) 将波长和第一层衍射元件的厚度做为变量,



在 Matlab 中做出(7)式的三维立体图像。

2) 对比  $3.4\sim4.2 \mu\text{m}$  波段和  $8\sim11 \mu\text{m}$  波段的衍射极大处的厚度,合理的调整比率 $\alpha$ 使得两波段在某一相同厚度处的衍射效率达到设计要求。

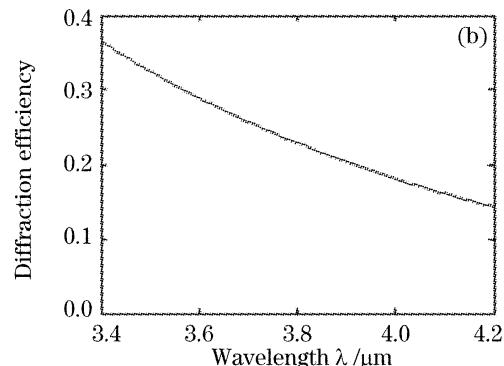


图 5 未优化的双层谐衍射元件衍射效率图

Fig. 5 Diffraction efficiency of double-layer HDE without optimization

优化后衍射透镜的厚度定为  $H_1 = 25 \mu\text{m}$ ,  $\alpha = 1.64$ 。此时主设计波段内衍射效率有所下降但仍在 90% 以上,  $3\sim5 \mu\text{m}$  波段亦达到了 90% 以上。如图 4 中的曲线 I 所示。

双层谐衍射光学系统是将单层谐衍射光学系统最后一个透镜材料改为 ZnSe, 增加一层谐衍射面基底材料为 SRF2, 经 Zemax 优化结果如图 6。

双层谐衍射光学系统模量传递函数曲线在两个波段分别如图 7(a)、图 7(b) 所示。在  $18 \text{ lp/mm}$  处, 中心视场模量传递函数数值在  $3.4\sim4.2 \mu\text{m}$  波段大于 0.8, 在  $8\sim11 \mu\text{m}$  波段大于 0.6; 最大视场模量传递函数数值在  $3.4\sim4.2 \mu\text{m}$  波段大于 0.6, 在  $8\sim11 \mu\text{m}$  波段大于 0.3。亦能满足前面所述探测器分辨力的要求, 成像质量良好, 能满足现代空间和军事双光谱探测的高精度要求。双波段双层谐衍射光学系统在两个波段内的衍射效率均大于 90%, 可使得像面衬比度高, 成像质量得到提升。

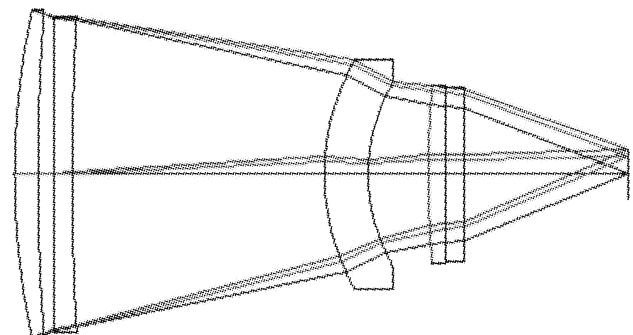
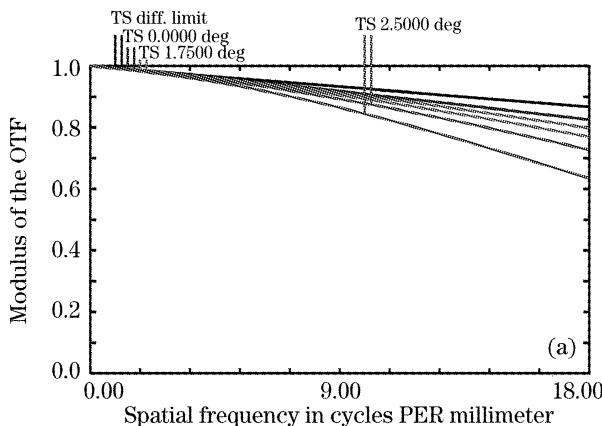


图 6 红外双波段双层谐衍射光学系统结构

Fig. 6 Layout of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive element

此两个系统二元衍射面的特征参量曲线如图 8(a)、图 8(b) 所示, 图中曲线 I 表示二元面上的相位随径向坐标  $r$  的变化, 以周期数(periods)表示; 曲线 II 表示二元面的线频率随实际径向坐标的变化。由曲线 II 可知, 随着径向坐标的增加, 二元面的线频率增大。在镜头边缘处, 单层衍射面、双层衍射面的线频

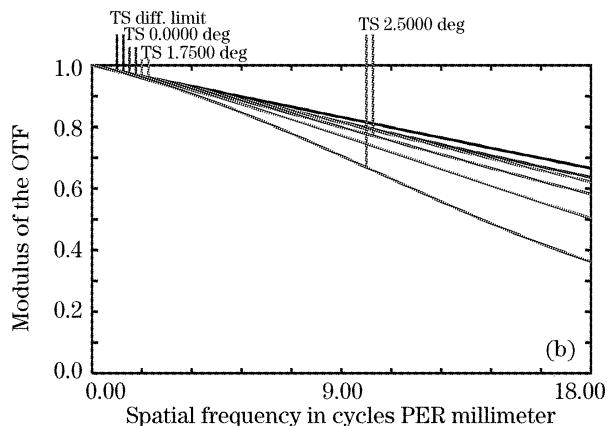


图 7 红外双波段双层谐衍射光学系统模量传递函数曲线

Fig. 7 Modulus transfor function of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive element optical system

率最大分别为 0.57 Periods/mm、0.93 Periods/mm，对应最小周期线宽分别为 1.74 mm、1.07 mm。若每周期刻蚀 8 个台阶，此时对应的最小特征尺寸分别为

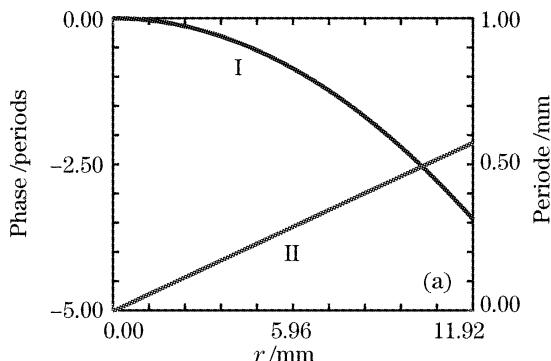


图 8 二元衍射面特征曲线。(a)单层衍射面,

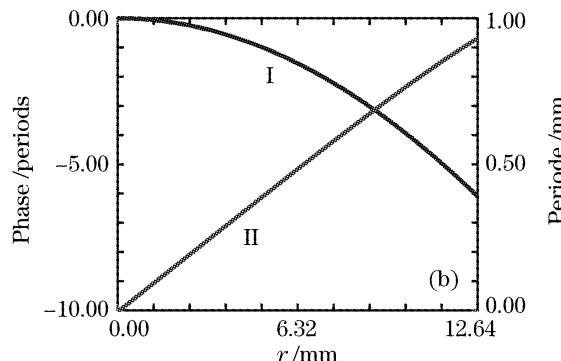
Fig. 8 Characteristic curve of the binary diffraction plane of (a) singl-layer, (b) double-layer

## 5 结 论

利用谐衍射元件改进传统红外单波段佩茨瓦尔物镜，设计出红外双波段单层谐衍射光学系统，工作波段扩展到  $3.4\sim4.2\mu\text{m}$  和  $8\sim11\mu\text{m}$ 。为克服单层衍射元件衍射效率方面的问题，基于双层衍射效率表达式研究了双层谐衍射元件结构的优化，给出了优化方法。设计了红外双波段双层谐衍射光学系统，其衍射效率得到极大改善，在  $3.4\sim4.2\mu\text{m}$  和  $8\sim11\mu\text{m}$  两个波段各个波长上均超过了 90%，增加了成像衬比度，提高了成像质量，能适应目前空间和军事双波段探测的高精度要求。佩茨瓦尔型红外双波段单层谐衍射光学系统和红外双波段双层谐衍射光学系统二元面的最小特征尺寸分别为  $217.5\mu\text{m}$ 、 $133\mu\text{m}$ ，便于实际加工成型。

## 参 考 文 献

$217.5\mu\text{m}$ 、 $133\mu\text{m}$ ，这样的尺寸，用金刚石切割工艺很容易加工出来。这使得加工和装配变得比较容易。



*Sinica*, 2004, 24(6): 830~833 (in Chinese)

孙强, 卢振武, 王肇圻. 谐衍射/折射双波段光学系统设计[J]. 光学学报, 2004, 24(6): 830~833

3 Dean Faklis, G. Michael Morris. Spectral properties of multiorder diffractive lenses[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(14): 100~103

4 Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Liu Hongli et al.. Optical system of harmonic diffractive/refractive for infrared dual-color detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(3): 317~321 (in Chinese)

孙强, 王肇圻, 刘宏力等. 应用于双色探测器的谐衍射/折射光学系统[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(3): 317~321

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

6 Yi-Nan Zhang, Zhao-Qi Wang. Passively athermalised hybrid Petzval objective for high resolution MWIR detector arrays[J]. *Optik*, 2004, 115(4): 169~172

7 Cai Yi, Hu Xu. The state and future trend of infrared imaging detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 7~11 (in Chinese)

蔡毅, 胡旭. 红外成像寻的用红外探测器现状和发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(1): 7~11

8 Lou Di, Bai Jian, Hou Xiyun et al.. Design and application of binary hybrid optical system used in the visible spectra[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, 17(1): 45~49 (in Chinese)

娄迪, 白剑, 侯西云等. 用于可见光波段的二元光学混合光学系统的设计与应用[J]. 光电子·激光, 2006, 17(1): 45~49

9 Milton Laikin. *Lens Design* [M]. Third edition, Revised and Expanded, New York, Basel: Marcel Dekker, Inc., 2001. 211~220

1 Du Chunlei, Lin Xiangdi, Zhou Lishu et al.. Method for improving performance of infrared detector by micro-optical lens array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(2): 246~249 (in Chinese)

杜春雷, 林祥棣, 周礼书等. 微透镜阵列提高红外探测器探测能力的方法研究[J]. 光学学报, 2001, 21(2): 246~249

2 Sun Qiang, Lu Zhenwu, Wang Zhaoqi. The dual band design of harmonic diffractive/refractive optics system[J]. *Acta Optica*