

文章编号: 1001-9014(2006)03-0213-04

基于 PWC 方法的折衍混合红外物镜设计

曾吉勇^{1,2}, 金国藩¹, 王民强¹, 严瑛白¹

(1. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084;

2. 清华大学 清华-富士康纳米科技研究中心, 北京 100084)

摘要:折衍混合设计为选用廉价材料设计像质优良的红外物镜提供了新的途径. 基于衍射结构的高折射率模型和传统的 PWC 方法, 分析了折衍混合红外单透镜的光焦度分配和二级光谱; 在 8~12 μm 波段, 采用 GASIR2 和 AMTIR1 红外玻璃, 分别设计了可模压生产的折衍混合单片型和 Petzval 型红外物镜. 结果表明: 采用新型红外玻璃的折衍混合设计可以代替锗材料设计出具有大相对孔径, 且像质优良而廉价的红外物镜.

关键词:光学设计; 红外物镜; 折-衍混合系统; PWC 方法

中图分类号: O435.2 **文献标识码:** A

DESIGN OF HYBRID DIFFRACTIVE-REFRACTIVE INFRARED OBJECTIVES BASED ON PWC METHOD

ZENG Ji-Yong^{1,2}, JIN Guo-Fan¹, WANG Min-Qiang¹, YAN Ying-Bai¹

(1. Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Tsinghua-Foxconn Nanotechnology Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Hybrid diffractive-refractive (HDR) design offers a new approach to design infrared objectives having excellent image quality and low cost. Based on the ultra-high index model of diffractive structure and the conventional PWC method, the power assigning and the secondary spectrum in the HDR infrared singlet were analyzed, and the HDR singlet-type and Petzval-type infrared objectives that could be molded were designed by using GASIR2 and AMTIR1 infrared glass in 8~12 μm waveband, respectively. The result shows that the low cost far-infrared objectives having large relative aperture and excellent image quality can be obtained by using new infrared glass to replace of Germanium and HDR design.

Key words: optical design; infrared objective; hybrid refractive-diffractive system; PWC method

引言

具有良好光学性能和机械性能的红外材料较少, 给红外物镜的设计带来了一定的困难. 而随着非致冷红外相机的广泛应用, 又提出了具有大相对孔径廉价的 8~12 μm 波段红外物镜的要求. 锗为 8~12 μm 波段内广泛采用的材料^[1], 由于该材料色散较小, 折射率很高, 吸收很小, 可以采用较为简单的结构形式达到优良的成像质量. 但锗的价格昂贵, 对温度较敏感, 且不能模压生产, 很难应用于诸如非致冷红外相机等低价位的相机中. 目前新型红外玻璃 (AMTIR 和 GASIR 系列) 的光学性能和机械性能都得到了很大改善, 与锗材料相比较, 这类玻璃材料价格低廉, 对温度较不敏感, 透镜可模压生产, 因此较

适合于低价位的非致冷相机应用. 虽然这类红外玻璃材料色散较大, 折射率较低, 但采用折衍混合设计^[2,3], 仍可以设计出具有优良像质的红外物镜^[4].

本文采用 PWC 表示的折衍混合光学系统初级像差理论和衍射透镜高折射率设计方法, 研究了折衍混合红外单透镜的光焦度分配和二级光谱; 在 8~12 μm 波段, 采用 GASIR2 和 AMTIR1 红外玻璃, 分别设计了折衍混合单片型和 Petzval 型红外物镜.

1 基本理论

衍射结构可以视为折射率无限大的薄透镜 (衍射透镜)^[5], 因此可以建立折衍混合单透镜的衍射透镜与折射透镜的双胶合模型^[6].

1.1 含衍射透镜的薄透镜系统的初级像差^[6]

收稿日期: 2005-12-20, 修回日期: 2006-03-20

Received date: 2005-12-20, revised date: 2006-03-20

作者简介: 曾吉勇 (1964-), 男, 江西永丰人, 副教授, 清华大学精密测量技术与仪器国家重点实验室博士后, 研究方向为折衍混合光学系统和体全息存储物镜.

光栏与透镜组非密接的情况,含非球面衍射透镜的初级像差和数为

$$\text{球差 } S_1 = \sum h(P + \Delta P), \quad (1)$$

$$\text{慧差 } S_2 = \sum h_z(P + \Delta P) - J \sum W, \quad (2)$$

$$\text{像散 } S_3 = \sum \frac{h_z^2}{h}(P + \Delta P) - 2J \sum \frac{h_z}{h}W + J^2 \sum \varphi, \quad (3)$$

$$\text{弧矢场曲 } S_4 = J^2 \sum \mu_r \varphi_r, \quad (4)$$

$$\text{畸变 } S_5 = \sum \frac{h_z^3}{h^2}(P + \Delta P) - 3J \sum \frac{h_z^2}{h^2}W + J^2 \sum \frac{h_z}{h}(3\varphi + \mu_r \varphi_r), \quad (5)$$

$$\text{轴向色差 } S_{1c} = \sum h^2 C, \quad (6)$$

$$\text{垂轴色差 } S_{2c} = \sum h h_z C, \quad (7)$$

其中 P 、 W 为光学系统内部参数. h 为轴上点发出经过孔径边缘的第一辅助光线在各透镜组上的投射高, h_z 为视场边缘发出经过孔径光阑中心的第二辅助光线在各透镜组上的投射高. φ 为各透镜组的光焦度, J 为拉格朗日不变量. 在本文中下标为 r 对应于折射透镜的量, 下标为 d 对应于衍射透镜的量. $\Delta P = (n-1)(c^3 k + 8A_4)h^3$ 为衍射透镜非球面项附加光程差产生的 Seidel 和数增量.

1.2 折衍混合单透镜的光焦度分配和二级光谱

衍射透镜的等效折射率可以写为^[6] $n(\lambda) = \lambda \times 10^5 + 1$, 设 λ_c 、 λ_s 和 λ_L 分别为设计的闪耀波长、光谱区的短波长和长波长, 对应的折射率分别为 n_c 、 n_s 和 n_L , 则阿贝数和相对部分色散分别为

$$v = \frac{n_c - 1}{n_s - n_L} = \frac{\lambda_c}{\lambda_s - \lambda_L}, \quad P = \frac{n_s - n_c}{n_s - n_L} = \frac{\lambda_s - \lambda_c}{\lambda_s - \lambda_L}. \quad (8)$$

令 $S=7$, 在 ZEMAX 软件的玻璃库中建立了名为 DOE 的材料, 在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 光谱区内, 对应的 $n_c = 100001$ 、 $n_s = 80001$ 、 $n_L = 120001$, 阿贝数 $v_d = -2.5$, 相对部分色散为 $P_d = 0.5$.

设折衍混合单透镜中折射透镜的光焦度为 φ_r 、阿贝数为 v_r 、相对部分色散为 P_r , 衍射透镜的光焦度为 φ_d 、阿贝数为 v_d 、相对部分色散为 P_d . 折衍混合单透镜的焦距规一化, 在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段内, 折射透镜和衍射透镜的消色差光焦度分配和二级光谱详见表 1. 计算二级光谱时, 物在无穷远, 折衍混合透镜的焦距为 f .

1.3 \bar{P}_∞ 、 \bar{W}_∞ 与折衍混合单透镜结构参量的函数关系

折衍混合单透镜结构参量包括衍射透镜和折射透镜的折射率 n_d 和 n_r , 透镜曲率半径 r_1 、 r_2 和 r_3 . 令 $C_2 = 1/r_2$, 则透镜弯曲系数 $Q = C_2 - \varphi_1$, 已知 n_d 、 n_r 、 φ_1 、 Q , 就能计算 r_1 、 r_2 、 r_3 .

表 1 消色差折衍混合单透镜的光焦度分配和二级光谱
Table 1 The power assigning and secondary spectrum of HDR achromatic infrared singlet

$v_d = -2.5 \quad P_d = 0.5$						
Material	n_c	v_r	P_r	ϕ_d	ϕ_r	Δ_L
AMTIR1	2.49749	113.58	0.461	0.022	0.978	0.00033 f
GASIR2	2.58416	100.51	0.448	0.024	0.976	0.00051 f
GE	4.00438	783.21	0.618	0.003	0.997	-0.00015 f
ZNSE	2.40644	57.47	0.443	0.042	0.958	0.00095 f
ZNS	2.19991	22.76	0.432	0.099	0.901	0.00270 f

$$\bar{P}_\infty = a(Q - Q_0)^2 + P_0, \quad (9)$$

$$\bar{W}_\infty = -\frac{a+1}{2}(Q - Q_0) + W_0, \quad (10)$$

其中 $Q_0 = -\frac{b}{2a}$, $P_0 = c - \frac{b^2}{4a}$, $W_0 = \frac{1-\varphi_1}{3} - \frac{3-a}{6}Q_0$. 当

衍射面在透镜的前表面时, $a = 1 + 2\frac{\varphi_r}{n_r}$, $b = -\frac{3}{n_r - 1}$

$$\varphi_r^2 - 2\varphi_r, c = \frac{n_r}{(n_r - 1)^2}\varphi_r^3 + \frac{n_r}{n_r - 1}\varphi_r^2.$$

2 折衍混合单片型红外物镜设计

设计要求为焦距 $f = 80\text{mm}$, 相对孔径为 $F/2$, 视场角为 $\pm 2^\circ$.

2.1 初始结构确定

由于相对孔径和视场均较小, 采用折射混合单透镜结构, 可以校正球差、慧差和色差以满足设计要求. 由 1.1 节的初级像差公式得到校正初级球差、慧差和色差的条件分别为 $P + \Delta P = 0$, $\bar{W}_\infty = 0$, $\bar{C} = 0$. 设计以 GASIR2 玻璃材料为基底, 衍射结构置于透镜前表面. 由 1.3 节的公式计算得到 $a = 1.7552$, $P_0 = 0.5019$, $Q_0 = -1.0695$, $W_0 = 0.1033$, $\varphi_d = 0.9757$.

由式(10)得到透镜弯曲系数, 由此计算透镜的曲率半径. 由式(9)得到 $\bar{P}_\infty = 0.5118$, 衍射透镜的非球面系数 $A_4 = \frac{-\bar{P}_\infty (h\varphi)^3}{8(n-1)h^3}$. 表 2 为折衍混合单片

型物镜的初始结构, 初级像差和数为 $S_1 = 0.000252$ 、 $S_2 = -0.000055$ 、 $S_{1c} = 0.000067$ 、 $S_{2c} =$

表 2 折衍混合单片型物镜的初始结构
Table 2 Original design of HDR singlet-type objective

Surf	$r(\text{mm})$	$d(\text{mm})$	Glass
1STOP*	67.44710456	0	DOE
2	68.4471188	0.1	GASIR2
3	144.6980	79.86	

* Coefficients of EVENASPH: $A_4 = -1.2494 \times 10^{-12}$

-0.000001,可见初始结构的初级球差、慧差、色差均已良好校正。

2.2 与常规单片型锗红外物镜像质比较

图1为优化设计的折衍混合单片型玻璃物镜的传递函数曲线。图2为常规单片型锗物镜的传递函数曲线,该物镜结构取自文献[1],做了进一步非球面优化。可见在0.75视场内折衍混合设计达到了衍射受限成像质量,而常规设计接近衍射受限成像质量。常规设计较折衍混合设计成像质量差的原因在于前者色差没有校正,而后者色差已良好校正。

3 折衍混合 Petzval 红外物镜设计

光学特性要求焦距 $f=25\text{mm}$,相对孔径为 $F/1$,视场角为 $\pm 5^\circ$ 。Petzval物镜要求校正球差、慧差、像散和色差。在常规设计中,Petzval物镜由间隔一定距离的前后二透镜组组成(图3),每一透镜组至少由二片透镜组成以实现每一透镜组单独消色差。本文设计中前后透镜组均采用单片折衍混合玻璃透镜。

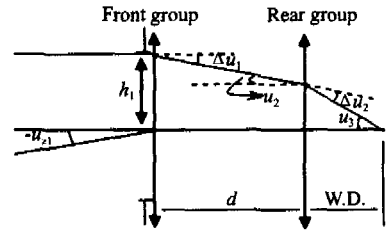


图3 Petzval物镜
Fig.3 Petzval objective

根据设计要求,物镜总偏角 $\Delta u=0.5$,偏角分配为前组0.2,后组0.3。取前后透镜组间距 $d=0.7f$,设光阑与前组密接,表3为物镜的外部参量;前后组偏角分配 Δu ,光焦度 ϕ 和焦距 f ;第一辅助光线的人射高 h 和入射角 u ;第二辅助光线的人射高 h_2 和入射角 u_2 。根据像差校正要求和物镜的外部参量得到初级像差方程

$$\bar{P}_{1\infty i} + 2.43\bar{P}_{2\infty i} + 6.4803\bar{W}_{2\infty} + 2.48434 = 0 \quad (11)$$

$$\bar{P}_{2\infty i} + 0.2858\bar{W}_{2\infty} - 1.0582\bar{W}_{1\infty} - 2.78724 = 0 \quad (12)$$

$$\bar{P}_{2\infty i} - 2.0953\bar{W}_{2\infty} + 1.793 = 0 \quad (13)$$

后组满足方程(13)以校正像散,令 $\bar{W}_{2\infty}=0.6$,则 $\bar{P}_{2\infty i}=-0.5358$ 。由方程(11)、(12),前组提供 $\bar{P}_{1\infty i}=-5.0705$ 、 $\bar{W}_{1\infty}=-2.9782$ 以校正球差和慧差。

前后组均采用AMTIR1玻璃为基底,衍射结构置于透镜前表面,由表1衍射透镜和折射透镜的光焦度分配 $\phi_d=0.022$ 、 $\phi_r=0.978$,由1.3节的公式计算得到透镜参量 $a=1.7836$ 、 $P_0=0.5354$ 、 $Q_0=-1.0863$ 、 $W_0=0.1059$ 。透镜组1、2各参量的计算与上一节中折衍混合单片型红外物镜计算方法相同。表4为物镜的初始结构,其初级像差和数 $S_1=0.003104$ 、 $S_2=0.003629$ 、 $S_3=0.000079$ 、 $S_{1c}=-0.000373$ 、 $S_{2c}=-0.000005$,可见初始结构的初级球差、慧差、像散和色差均已良好校正。图4为优化设计的物镜的传递函数曲线,在0.8视场内达到了衍射受限的成像质量。

4 结论

采用传统PWC表示的折衍混合光学系统初级

表3 外部参量
Table 3 External parameter

	$h\phi(\Delta u)$	ϕ	f	h	u	h_2	u_2
Group1	0.2	0.016	62.5	12.5	0	0	-0.0872
Group2	0.3	0.033	30	9	0.2	1.526	-0.0872

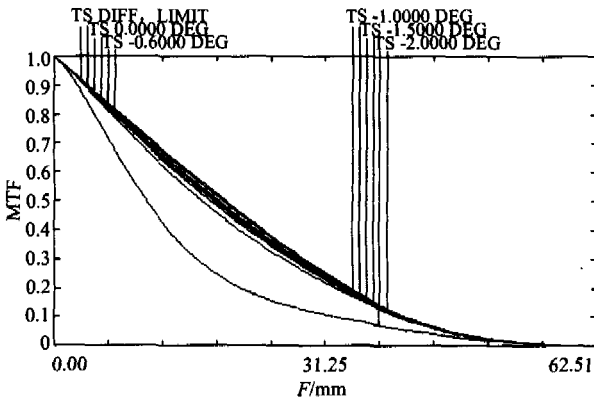


图1 折衍混合单片型物镜的传递函数曲线
Fig.1 MTF curve of HDR singlet-type objective

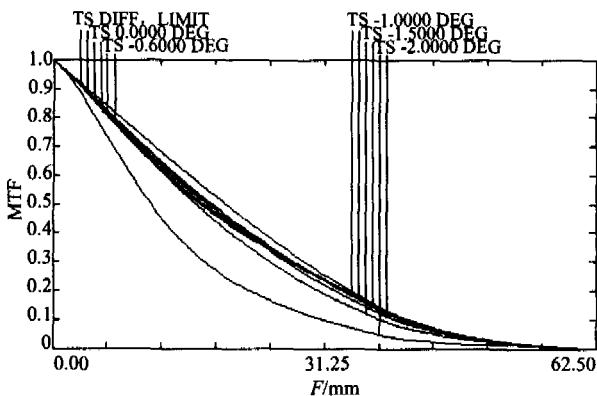


图2 常规锗单片型物镜的传递函数曲线
Fig.2 MTF curve of conventional singlet-type objective

表4 折衍混合 Petzval 红外物镜初始结构
Table 4 Original design of HDR Petzval infrared objective

Surf	Radius	Thickness	Glass	A_4
STOP	18.80433239	0	DOE	-7.35424×10^{-10}
2	18.80434456	0.1	AMTIR1	
3	23.40586	17.5		
4	39.85153179	0	DOE	-6×10^{-10}
5	39.85164561	0.1	AMTIR1	
6	301.923	17.79234		

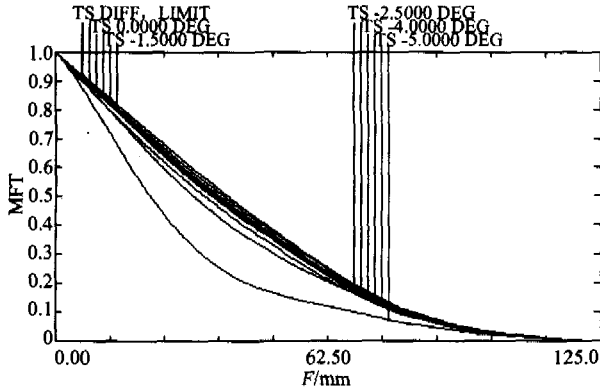


图4 折衍混合 Petzval 红外物镜的传递函数曲线
Fig.4 MTF curve of HDR Petzval infrared objective

像差理论和折衍混合光学系统设计的高折射率方法,研究了折衍混合红外单透镜的光焦度分配和二

级光谱;在 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段,采用 GASIR2 和 AMTIR1 红外玻璃,分别设计了可模压生产的折衍混合单透镜红外物镜和 Petzval 红外物镜.设计结果表明:采用新型红外玻璃和折衍混合设计可以代替锆材料设计出具有优良成像质量的红外物镜,从而为设计具有大相对孔径廉价的红外物镜提供了新的途径.

REFERENCES

- [1] ZANG Xiu-Li. *Design of Infrared Optical System* [M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, (赵秀丽. 红外光学系统设计. 北京:机械工业出版社), 1984.
- [2] Wood A P. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lenses [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(13):2253—2258.
- [3] LIU Li-Ping, WANG Yong-Tian, LI Rong-Gang, et al. Infrared diffractive optical element fabricated on aspheric substrate [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (刘莉萍,王涌天,李荣刚,等. 制作在非球面基底上的红外衍射光学元件. 红外与毫米波学报), 2004, **23**(4):308—312.
- [4] Graham A, LeBlanc R A, Hilton R. Low cost infrared glass for IR imaging applications [J]. *Proc. SPIE*, 2003, **5078**: 216—224.
- [5] Sweat W C. Describing holographic optical elements as lenses [J], *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(6):803—808.
- [6] ZENG Ji-Yong, JIN Guo-Fan, WANG Min-Qiang, et al. PWC primary aberration expression of thin lens system including diffractive optical element [J]. *Optical Acta Sinica*. (曾吉勇,金国藩,王民强,等. 含衍射结构薄透镜系统初级像差的 PWC 表示. 光学学报), 2006, **26**(2):96—100.