

# 红外折射-衍射混合光学系统的热差分析\*

白 剑 孙 婷 沈亦兵 侯西云 杨国光  
(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘 要** 分析了衍射光学元件在红外折射-衍射混合光学系统中的消热差特性, 指出衍射光学元件本身对热差的贡献是微小的, 但它的特殊色散特性却在红外折射-衍射混合光学系统设计中间接地起到了消热差的作用。设计了适用于 3~ 5  $\mu\text{m}$  波段的红外折射-衍射混合光学系统并进行了分析。

**关键词** 衍射光学元件, 消热差, 红外混合光学系统。

## 1 引 言

衍射光学元件(DOE)与传统光学元件组成的混合光学系统具有像质优、体积小、重量轻等特点, 是红外光学系统的发展方向<sup>[1~4]</sup>。实际的红外光学系统除对体积和重量有严格要求外, 其热性能也是一个重要的方面。虽然红外光学系统的消热差可采用机械结构的被动或主动消热差来实现, 但这必然增加结构的复杂度, 导致系统体积增大、重量增加和可靠性下降, 所以必须实现红外光学系统本身消热差。采用纯反射式红外光学系统可完全克服热差问题, 但反射式红外光学系统具有要用中心遮栏、冷光栏效率低等缺点, 而采用传统的红外折射光学系统, 要实现消热差是非常困难的。因此对红外折射-衍射混合光学系统的消热差进行研究具有重要意义。

## 2 衍射光学元件的消热差特性

红外折射-衍射混合光学系统大多为轴对称, 故这里只考虑圆对称相位分布的衍射光学元件, 其位相表达式为

$$\Phi(r) = \sum_{i=1}^N A_i r^{2i} \quad (1)$$

式中,  $A_i$  为二元极坐标展开系数。当温度由加工温度  $T_0$  变为工作温度  $T$  时, 原来某一相位值对应的径向坐标  $r$  将由于热膨胀变为  $r(T)$ ,

$$r(T) = r(1 + \alpha_g \Delta T), \quad (\Delta T = T - T_0) \quad (2)$$

上式中  $\alpha_g$  是基底材料的热膨胀系数。由(2)式得

\* 国家科委 863 高科技项目和国防预研跨行业基金资助。

收稿日期: 1998-01-31; 收到修改稿日期: 1998-04-27

$$\frac{r(T) - r}{\Delta T} = \alpha_g r \quad (3)$$

当  $\Delta T \rightarrow 0$  时有

$$\frac{\partial r}{\partial T} = \alpha_g r \quad (4)$$

对衍射透镜, 其光焦度可表示为  $\varphi = 2m\lambda/r_m^2$ ,  $r_m$  为第  $m$  个环带的半径, 其光焦度随温度的变化为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = 2m\lambda r_m^{-3} (-2) \frac{\partial r_m}{\partial T} \quad (5)$$

将(4)式代入上式可得

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = \frac{2m\lambda}{r_m^2} (-2\alpha_g) = \varphi - 2\alpha_g \quad (6)$$

上式括弧内的部分称为衍射光学元件的衍射热常数  $\gamma_{gd}$ , 它表示在单位温度变化下, 衍射光学元件单位光焦度的变化量。可见, 衍射光学元件光焦度随温度的变化只与基底材料的热膨胀系数有关。

而传统的折射光学元件的光焦度随温度的变化可表示为

$$\frac{\partial \varphi}{\partial T} = \varphi \left[ \frac{\partial n / \partial T}{n - 1} - \alpha \right] \quad (7)$$

式中  $\partial n / \partial T$  表示折射光学元件材料的折射率随温度的变化,  $\alpha$  为其材料的热膨胀系数, 方括弧内的部分称为材料的热常数  $\gamma$ 。

比较(6)式与(7)式可知, 对大多数红外材料, 如 Ge, Si 等, 其  $\partial n / \partial T > 0$ , 且其值远远大于热膨胀系数  $\alpha$ , 故材料热常数  $\gamma$  大于 0, 具有正的热差特性; 而衍射光学元件热常数  $\gamma_{gd}$  恒为负值, 故衍射光学元件具有负的热差特性。

虽然衍射光学元件具有负的热差特性, 但由于大多数材料的热常数  $\gamma$  都远远小于  $\partial n / \partial T$ , 衍射光学元件负的热差特性与传统折射光学元件正的热差特性相比, 其绝对值是很小的, 因此很难利用衍射光学元件的负热差特性来实现红外折射-衍射混合光学系统的消热差。

然而可利用衍射光学元件的特殊色散特性来实现具有热稳定的红外折射-衍射混合光学系统。热稳定的红外光学系统必须满足

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^j h_i \varphi_i &= \varphi \\ \sum_{i=1}^j h_i^2 \frac{\varphi_i}{v_i} &= 0 \\ \sum_{i=1}^j h_i \frac{\partial \varphi_i}{\partial T} + \alpha_{H1} \varphi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中  $h_i$  为第一近轴光线在各镜组的高度,  $\varphi_i$ 、 $v_i$  分别为各镜组的光焦度及阿贝常数,  $\alpha_{H1}$  为镜筒支架的线膨胀系数。对传统折射光学系统而言, 要使(8)式中的各式成立, 必须精心选择红外材料, 使材料的阿贝常数及热常数同时满足该式中的第二、三式, 这具有较大的困难。而对红外折射-衍射混合光学系统而言, 由于衍射光学元件的阿贝常数恒为负值<sup>[1]</sup>, 且其热特性与传统元件相比可忽略不计, 故只要合理分配衍射光学元件的光焦度, 使其满足式(8)中的第二式即可, 降低了热稳红外光学系统的设计难度。因此利用衍射光学元件的特殊色散特性即负的阿贝常数, 不仅可消色差, 而且也可消热差。

### 3 设计实例与分析

利用Focus Software公司的ZEMAX-EE光学设计软件实现了具有较好热稳效应的混合光学系统。该系统适用于中红外波段,视场为 $3^\circ \times 3^\circ$ ,口径为60 mm,总长为140 mm,焦距为147 mm,因经过两次成像使系统的出瞳与位于探测器前的冷屏重合,实现冷光拦效率为100%。图1为系统光路图,该系统共由四片元件组成,主物镜材料为硫化锌(ZnS),中继物镜1的材料为锗(Ge),中继物镜2的材料为硅(Si),场镜材料为硫化锌(ZnS),第五片为杜瓦瓶窗口,其中主物镜及场镜的后表面为二元面。图2、图3、图4分别为 $-30^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$ 时系统的调制传递函数(MTF)曲线。图2中横坐标表示空间频率数。纵坐标为经归化后的调制传递函数值,在达到衍射极限且空间频率为0时对应的调制传递函数值被归化为1.0。图2中左上方标注着TS DIFF. LIMIT的曲线是达到衍射极限时图1所示的光学系统在子午面和弧矢面上的调制传递函数曲线(此时,子午面与弧矢面的调制传递函数曲线重合),其在图3右部的纵坐标上对应的是上方第一条曲线。标注着TS 0.0000 DEG的曲线是0视场时子午面和弧矢面的调制传递函数曲线(0视场时,子午面的调制传递函数曲线与弧矢面的调制传递函数曲线也重合在一起),其在图3右部的纵坐标上对应的是上方第二条曲线。标注着TS 1.0000 DEG的曲线是0.7视场时子午面和弧矢面的调制传递函数曲线,随着空间频率的增加,这两条曲线分离,其在图3右部的纵坐标上对应的是自上而下第三、四条曲线。标注着TS 1.5000 DEG的曲线是全视场时子午面和弧矢面的调制传递函数曲线,随着空间频率的增加,这两条曲线分离,其在图3右部的纵坐标上对应的是自上而下第五、六条曲线。图3、图4的读图方法与图2类似。

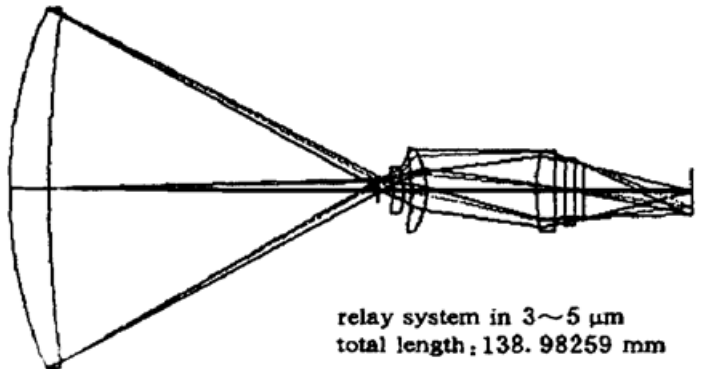


Fig. 1 Optical System Layout

图2、图3、图4分别为 $-30^\circ\text{C}$ 、 $20^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$ 时系统的调制传递函数(MTF)曲线。图2中横坐标表示空间频率数。纵坐标为经归化后的调制传递函数值,在达到衍射极限且空间频率为0时对应的调制传递函数值被归化为1.0。图2中左上方标注着TS DIFF. LIMIT的曲线是达到衍射极限时图1所示的光学系统在子午面和弧矢面上的调制传递函数曲线(此时,子午面与弧矢面的调制传递函数曲线重合),其在图3右部的纵坐标上对应的是上方第一条曲线。标注着TS 0.0000 DEG的曲线是0视场时子午面和弧矢面的调制传递函数曲线(0视场时,子午面的调制传递函数曲线与弧矢面的调制传递函数曲线也重合在一起),其在图3右部的纵坐标上对应的是上方第二条曲线。标注着TS 1.0000 DEG的曲线是0.7视场时子午面和弧矢面的调制传递函数曲线,随着空间频率的增加,这两条曲线分离,其在图3右部的纵坐标上对应的是自上而下第三、四条曲线。标注着TS 1.5000 DEG的曲线是全视场时子午面和弧矢面的调制传递函数曲线,随着空间频率的增加,这两条曲线分离,其在图3右部的纵坐标上对应的是自上而下第五、六条曲线。图3、图4的读图方法与图2类似。

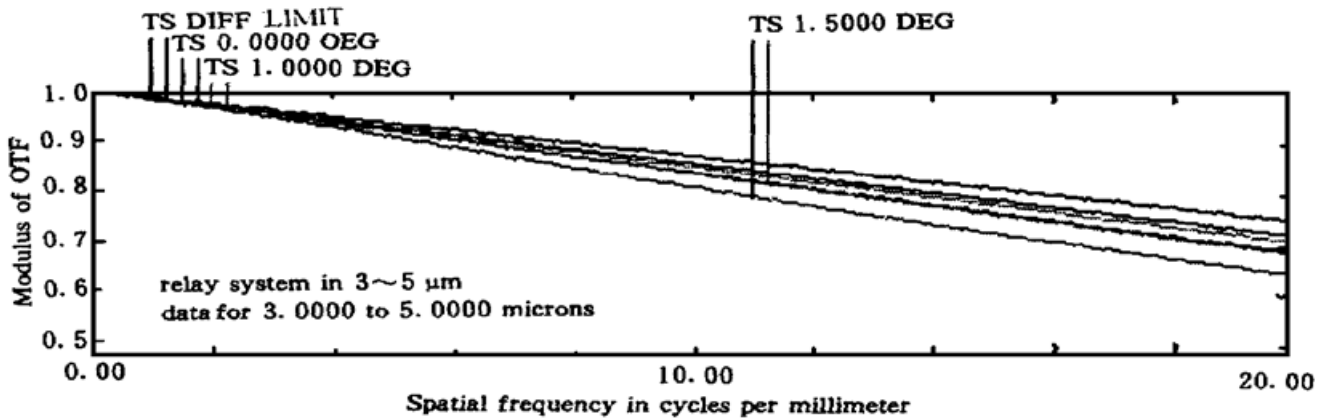


Fig. 2 MTF diagram at  $-30^\circ\text{C}$

由图2、图3、图4可知,在温度变化时( $-30^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ ),0.7视场内的调制传递函数值与设计值之差(TS 1.0000 DEG与TS DIFF. LIMIT之差)为0.05左右,全视场内的调制传递函数值与设计值之差(TS 1.5000 DEG与TS DIFF. LIMIT之差)为0.1左右,设计结果已接近衍射极限。

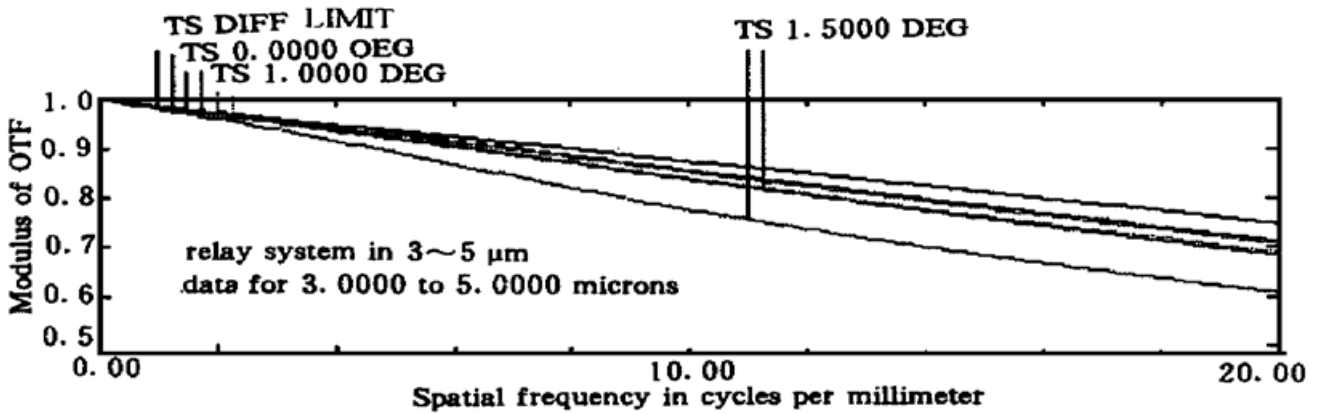


Fig. 3 MTF diagram at 20°C

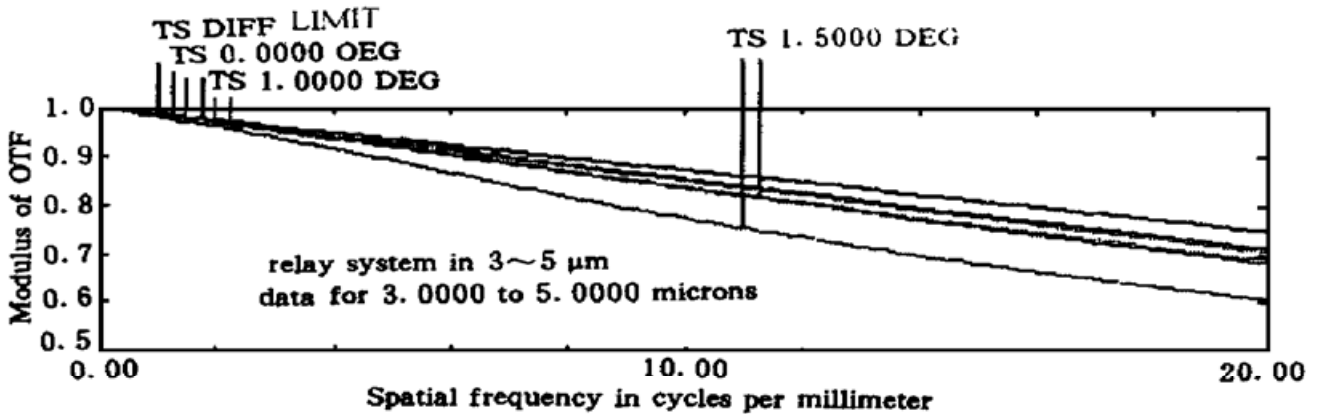


Fig. 4 MTF diagram at 70°C

图 5、图 6、图 7 分别为 - 30°C、20°C、70°C 时系统的点列图。图中右上方的方框内分别是 3 μm、4 μm、5 μm 这三种波长在图中的代表符号。图中左下方的方框内 FIELD 1、2、3 分别代表 0 视场、0.7 视场、全视场。RMS RADIUS 代表弥散斑的均方差半径。GEO RADIUS 代表弥散斑的几何半径。AIRY DISK 代表爱里斑大小。弥散斑的半径大小同样说明图 1 所示光学系统的成像质量较好。

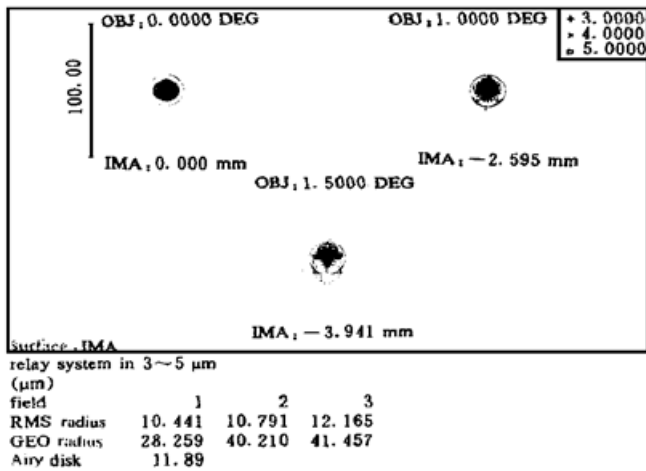


Fig. 5 Spot diagram at - 30°C

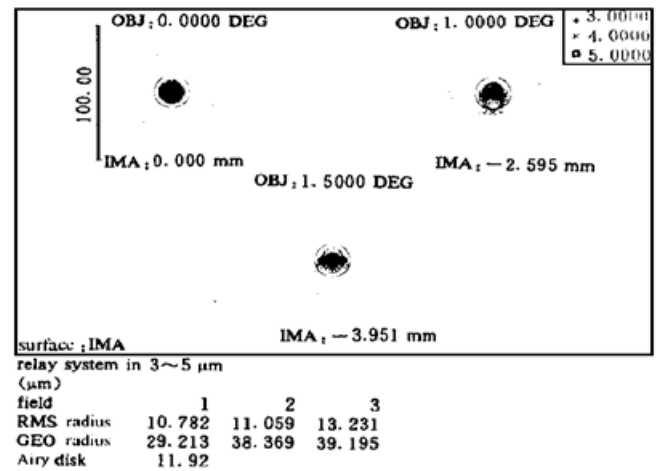


Fig. 6 Spot diagram at 20°C

在该消热差系统中，采用分离的 Ge(承担负光焦度)和 Si(承担正光焦度)实现消热差。因 Ge 和 Si 热常数较大，而 ZnS 及衍射光学元件热常数较小，可不考虑它们对热差的贡献，对零膨胀系数的镜筒材料，满足热差的条件可表示为

$$h_{Ge} Q_{Ge} \gamma_{Ge} + h_{Si} Q_{Si} \gamma_{Si} = 0 \tag{9}$$

其中,  $h_{Ge}$ 、 $h_{Si}$  为第一近轴光线在两块镜面的高度, 即分离的 Ge 和 Si 在满足消热差时其承担的光焦度关系为

$$\varphi_{Ge} = - \frac{h_{Si}\gamma_{Si}}{h_{Ge}\gamma_{Ge}} \varphi_{Si} \quad (10)$$

而此时它们对色差的贡献为

$$C_{GS} = h_{Ge}^2 \frac{\varphi_{Ge}}{\nu_{Ge}} + h_{Si}^2 \frac{\varphi_{Si}}{\nu_{Si}} \quad (11)$$

将(10)式代入(11)式得到

$$C_{GS} = \varphi_{Si} \left( \frac{h_{Si}^2 \nu_{Ge} \gamma_{Ge} - h_{Ge} h_{Si} \nu_{Si} \gamma_{Si}}{\nu_{Ge} \nu_{Si} \gamma_{Si}} \right) \quad (12)$$

在所设计的系统中,  $h_{Ge}$ 、 $h_{Si}$  可分别用通光口径来代替, 故

$$\begin{aligned} h_{Ge} &= 2.85 \text{ mm}, & \gamma_{Ge} &= 85.19, & \nu_{Ge} &= 103.407 \\ h_{Si} &= 6.79 \text{ mm}, & \gamma_{Si} &= 64.10, & \nu_{Si} &= 237.775 \end{aligned} \quad (13)$$

将上述值代入(12)式可得

$$C_{GS} = 0.053 \varphi_{Si} > 0 \quad (14)$$

整个系统满足消色差的条件为

$$C_{GS} + \sum_i h_i^2 \frac{\varphi_i}{\nu_i} = 0 \quad (15)$$

式中,  $h_i$ 、 $\varphi_i$ 、 $\nu_i$  分别为系统中其它各镜组的第一近轴光高度、它们所承担的光焦度及相应的阿贝常数。显然由于在该系统中双分离的 Ge, Si 在实现消热差时对色差的贡献  $C_{GS}$  为正, 而其它镜组都承担正光焦度, 因此要使(15)式成立, 必须采用阿贝常数为负值的衍射光学元件材料才能实现消色差。

**结 论** 衍射光学元件虽然具有负的消热差特性, 但因它仅由基底材料的热膨胀系数决定, 因而它对消热差的贡献是很小的。利用其特殊的色散特性却可通过其校色差的优越性间接地起到消热差的作用, 使设计相对口径较大、总长较短而又具有良好热稳特性的红外折射-衍射光学系统成为可能, 有利于实现体积小、重量轻、像质要求高而温度范围大的红外光学系统。

### 参 考 文 献

[1] Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14) : 2960~ 2971

[2] Czichy R H, Doyle D B, Mayor J M. Hybrid optics for space applications -Design, manufacture and test-. *Proc. SPIE*, 1992, **1780** : 333~ 344

[3] Wood A P. Design of infrared hybrid refractive-diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(13) : 2253~ 2258

[4] Philip J Rogers. Use of hybrid optics in 3~ 5  $\mu\text{m}$  infrared band. *Proc. SPIE*, 1995, **2540** : 13~ 20

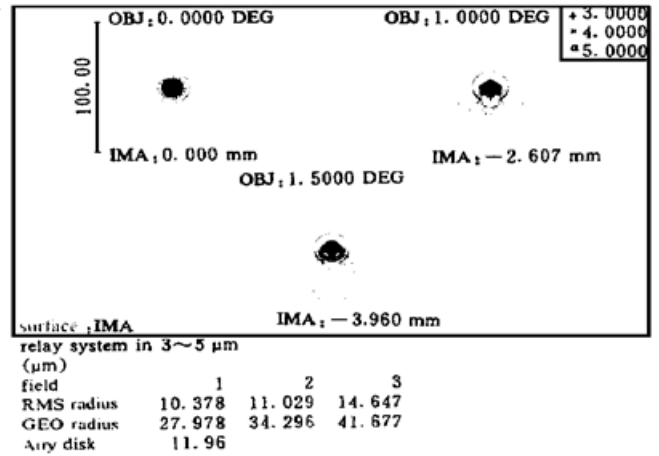


Fig. 7 Spot diagram at 70°C

## Athermalization Analysis of Infrared Hybrid Refractive-Diffractive Optical Systems

Bai Jian    Sun Ting    Sheng Yibin    Hou Xiyun    Yang Guoguang

(*State key laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou 310027*)

(Received 31 January 1998; revised 27 April 1998)

**Abstract** The athermalism of diffractive optical elements in infrared hybrid refractive-diffractive optical systems is analysed. It is shown that diffractive optical elements contribute a little to the thermal effects but their achromatic characteristic plays an important role in athermalization of infrared hybrid refractive-diffractive optical systems. An infrared hybrid refractive-diffractive optical system for 3~ 5  $\mu\text{m}$  band with short total track is designed and discussed.

**Key words** diffractive optical elements, athermalization, infrared hybrid optical systems.