

红外光学系统中衍射面冷反射的分析与评价

刘涛, 崔庆丰*, 杨亮亮, 薛常喜

长春理工大学光电工程学院, 长春 130022

* 联系人, E-mail: cuiqf@yahoo.com.cn

2011-08-27 收稿, 2011-10-12 接受

国家自然科学基金(60878030)和吉林省科技发展计划(201105052)资助

摘要 研究了含有衍射面的红外光学系统中冷反射产生的原理, 并指出了衍射表面与折射表面的冷反射的差别. 光线在经过衍射表面后会发发生多级衍射, 本文在考虑衍射效率的基础上定量分析了衍射表面的冷反射, 采用对衍射光线进行近轴光线追迹的方法, 给出了针对衍射表面冷反射的新评价标准. 结合一个折衍射混合中波红外光学系统实例, 具体分析了光学系统中衍射表面对冷反射的影响. 研究结果为红外光学系统中衍射表面的冷反射的分析与评价提供了一种全新的方法.

关键词

光学设计
冷反射
衍射光学
红外光学系统
设计
YNI

在设计致冷型红外光学系统时, 必须要考虑 Narcissus, 即冷反射现象, 这是由于致冷红外探测器与环境温度存在很大的温差. 冷反射像在图像上看起来为一个冷斑, 影响光学系统的成像质量^[1,2]. 由于放置于杜瓦瓶里的致冷红外探测器一般都工作在 77 K 的低温液氮中, 而光学系统和被测目标的温度都为常温, 约为 300 K 左右, Narcissus 现象可以理解为从杜瓦瓶中发出的冷光线穿过冷窗, 被光学系统的表面反射后又返回到杜瓦瓶中, 到达探测器上, 从而形成冷像. Howard 和 Abel^[1]采用对探测器中心发出的冷光进行逆向近轴光线追迹的方式, 计算出返回探测器的冷光形成的冷斑半径, 进而得出使用 YNI 作为评价光学系统中各表面冷反射强度的标准. 不过在实际光学系统中, 光学系统的透镜尺寸和冷窗会拦掉部分反射回来的冷光线. 为了克服这一局限, Rayces 等人^[3]和 Lu 等人^[4]使用实际光线追迹的方式分析冷反射. 这种方法一般是追迹从探测器上发出的一束充满冷窗的光线, 通过计算其被反射回杜瓦瓶的比率和冷光线在探测器上成的冷斑的尺寸, 进而可以计算冷反射效应引起的等效温差. 根据以上理论, 很多文献针对扫描式和凝视型致冷红外热像仪折射表面的冷反射进行了分析和研究^[5-11].

红外光学系统常常利用衍射表面独特的色散效应^[12,13]来提高像质, 减少光学系统的透镜数量和消热差, 并可应用于双波段红外光学系统中^[14]. 文献[15]最早分析了衍射表面与折射表面冷反射的不同以及衍射对冷反射强度的影响, 文献[16]从衍射效率的角度计算了冷反射与不同衍射级次的关系.

本文采用追迹从致冷探测器射出的冷辐射的方法, 分析了致冷红外系统中衍射面的冷反射的产生原理. 结合冷光线经过衍射表面后的不同衍射级次的衍射效率和传播方向, 进一步研究了衍射对冷反射的影响, 给出了针对致冷红外光学系统衍射冷反射的新评价标准. 最后, 使用光学设计软件给出了具体的中波红外光学系统设计实例, 对光学系统的衍射面进行了冷反射分析, 评价了衍射表面对冷反射的影响.

1 光学系统的冷反射

1.1 光学系统折射表面的冷反射

冷反射多被应用于评价致冷红外光学系统的成像质量. 对于轴上视场的冷反射, 其形成原因可以参照图 1. 将致冷红外光学系统的探测器视为冷光源,

从冷光源发出的光线视为冷光线. 追迹从探测器中心发出的边缘冷光线. 当冷光线正入射到透镜表面(如图 1(a)中面 2)或者冷光线聚焦在透镜表面(如图 1(b)中面 4)时, 根据光路可逆的原理, 冷光线将会经光学系统而重新聚焦到焦平面上, 进而在图像的中心形成一个冷斑. 这其实就是探测器经光学系统的表面而观察到的自身形成的冷像. 从图 1(a)可以看出, 当边缘冷光线在光学表面上的入射角为 0° 时, 冷反射现象最强. 从图 1(b)可以看出, 当边缘冷光线在光学表面上的入射高度为 0 时, 产生的冷反射现象最强. 可以计算出, 轴上视场冷反射的强度与近轴边缘光学在光学表面上的入射高度 Y 、入射介质的折射率 N 和入射角 I 的乘积 YNI 有关. 当 YNI 的数值接近 0 时, 系统表面产生的冷反射最严重. 根据这个理论, 光学设计人员可以在光学设计软件中, 通过约束 YNI 来对冷反射进行分析和控制.

1.2 光学系统衍射表面的冷反射

近些年随着衍射光学技术的发展和普及, 衍射元件在红外光学系统中得到了越来越多的应用. 对于如图 2 所示的一个光学系统, 在其中一个透镜的后表面使用了衍射表面校正像差. 追迹从致冷的探测器发出的冷光线, 其被衍射表面反射后又折回探测器, 进而形成冷像. i_B 和 θ 分别为冷光线在衍射面上

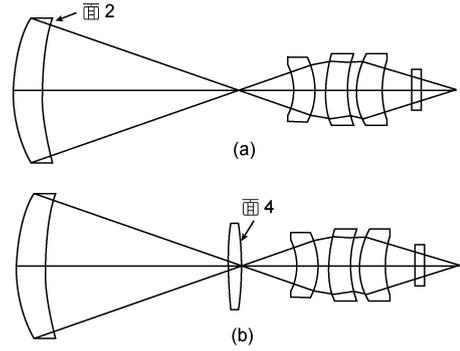


图 1 红外光学系统中的冷反射现象

的入射角和反射角, 并且由于衍射的作用, $-i_B \neq \theta$. 需要指出的是, 图 2 中冷光线被衍射面反射后, 只画出了各衍射级次中衍射效率最大的冷光线的光路走向.

当光线经衍射表面反射后, 衍射表面会对入射的光波进行相位调制, 使光线发生多级衍射, 其第 m' 衍射级的衍射效率由下式决定:

$$\eta_{m'}^\infty = \text{sinc}^2[m' - \phi_0], \quad (1)$$

其中 ϕ_0 以波长为单位, 表示波长为 λ_0 的光线经过图 3 所示的表面微结构周期 T 后产生的位相差. 对于正向追迹的光线, 当光线透过衍射表面时, 其 ϕ_0 值为

$$\phi_0 = \frac{d}{\lambda_0}(n_0 - 1) = m, \quad (2)$$

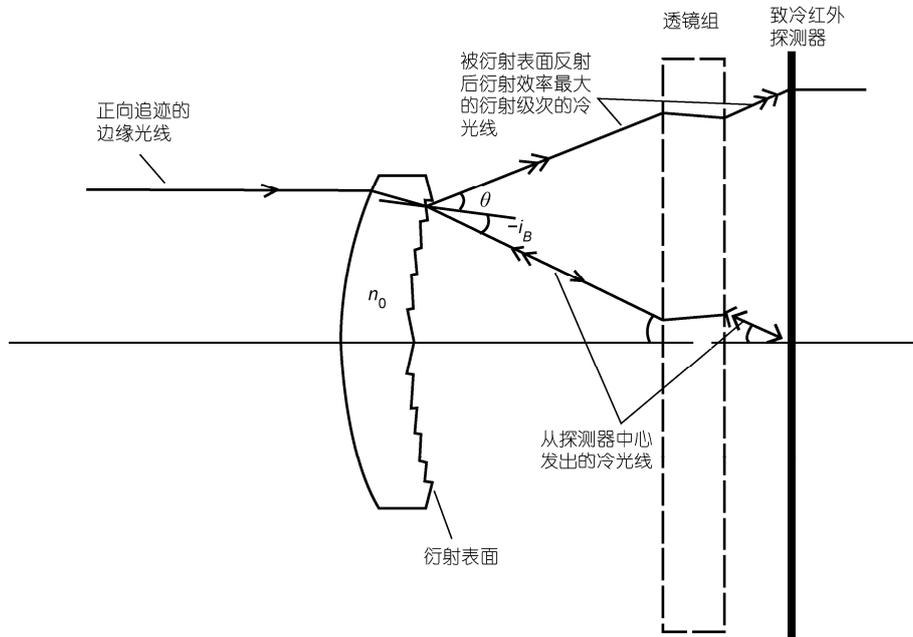


图 2 光学系统中衍射表面的冷反射

其中 m 为衍射表面的设计衍射级次, 对于常用的衍射光学元件一般 $m=1$, n_0 为透镜材料在波长 λ_0 处的折射率, d 为表面微结构周期 T 上的最大结构高度(图3).

从致冷探测器中心发出的冷光线经过反向追迹到衍射表面, 被衍射表面反射后, 在一个表面微结构周期上面产生的相位延迟为

$$\phi_0 = \begin{cases} -\frac{2}{n_0-1}m, & \text{衍射表面在透镜的后表面上,} \\ \frac{2n_0}{n_0-1}m, & \text{衍射表面在透镜的前表面上.} \end{cases} \quad (3)$$

从图3可以看出, 被衍射表面反射的光线发生了多级衍射. 结合(1)和(3)式即可计算出经过表面反射后, 冷光线各级次的衍射效率, 进而确定衍射效率最大的级次 m'_{\max} . m'_{\max} 为整数, 并且其一般出现在 ϕ_0 附近. 当 ϕ_0 恰好为整数时, η_m° 可以达到 100%, 此时 $m'_{\max} = \phi_0$. 图3中实线反射为冷光线被衍射面反射后各衍射级次中衍射效率最大的冷光线的光路走向.

在文献[17]中, Sweatt 提出了高折射率模型的概念来分析衍射表面. 基于高折射率模型, 可以把衍射元件等效为一个折射率无限大的薄透镜, 衍射表面的位相方程为

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda_0}(a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6 + \dots), \quad (4)$$

其中 $a_1, a_2, a_3 \dots$ 为衍射表面的位相系数, r 为光学元件的口径.

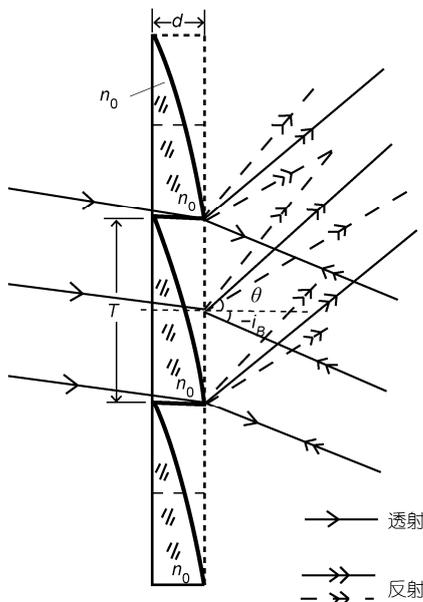


图3 衍射表面微结构对光线的透射和反射

经过推导计算, 针对衍射表面冷反射的评价标准为

$$YNI_{\text{diff}} = YNI + \left(2 - \frac{m'_{\max}}{m}\right)(a_1y^2 + 2a_2y^4 + 3a_3y^6 + \dots) = YNI + N_D, \quad (5)$$

其中 y 在此指的是近轴边缘光线在光学表面上的入射高度, N_D 为冷反射修正项:

$$N_D = \left(2 - \frac{m'_{\max}}{m}\right)(a_1y^2 + 2a_2y^4 + 3a_3y^6 + \dots). \quad (6)$$

由(6)式可知, 衍射引起的冷反射不仅与衍射级次 m 和衍射效率最大的级次 m'_{\max} 有关, 而且还与衍射表面的位相系数和近轴边缘光线在光学表面上的入射高度有关.

2 含有衍射表面的红外光学系统

使用光学设计软件 CODEV^[18]设计了一个致冷式中波红外光学系统, 其光学系统的设计参数为: $f'=100$ mm, 入瞳直径=100 mm, $F/\#=1$, 工作波段为 3.7~4.8 μm , 视场为 $2\omega=5.6^\circ$. 使用的致冷式红外致冷探测器在杜瓦瓶中, 探测器有效像元数为 320×240, 每个像元尺寸为 25 $\mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$, 光敏面大小为 8 mm × 6 mm.

优化过程中, 在保证成像质量的同时, 还需要保证光学系统有较好的冷光阑效率. 设计时考虑将杜瓦瓶的窗口设为冷光阑, 保证了 100%的冷光阑效率. 光学系统分为前后两个部分. 外界的景物经过前部光学系统即系统的第一个透镜时, 首先会产生一个中间像面, 中间像再经过后半部的光学系统成像到探测器上. 这样也保证了光阑能够被光学系统的后半部分成像到系统的第一个透镜上, 进而减小了整个系统的尺寸. 由于存在二次成像, 就需要对光学系统的前后两个部分分别校正色差. 因为中波红外波段, 可选的材料不多, 同时考虑减少透镜数量和简化系统, 设计时在前后两个部分各使用了一个衍射表面. 对于衍射光学元件, 当入射波长偏离设计波长时, 衍射效率随波长偏离量的增加而下降. 适当选择设计波长 λ_0 可以减轻这种现象. 针对 3.7~4.8 μm 的设计波段, 有

$$\lambda_0 = \frac{2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad (7)$$

式中 $\lambda_1=3.7 \mu\text{m}$, $\lambda_2=4.8 \mu\text{m}$. 由(7)式计算表明, 当设计波长 λ_0 取 4.18 μm 时, 光学系统整个谱段的积分衍

射效率最大. 衍射效率计算表明, 光学系统针对波长 4.18 μm 的衍射效率为 100%, 针对波长 3.7 μm 的衍射效率为 89.2%, 针对波长 4.8 μm 的衍射效率为 89.3%.

经过优化后得到的光学系统的结构图如图 4, 其中光学系统中透镜 1 的后表面和透镜 2 的前表面, 即表面 2 和表面 3 为衍射表面, 且衍射表面的基底面型为高次非球面. 光学系统的第 6 个表面也为高次非球面.

所设计光学系统的调制传递函数(MTF)曲线如图 5 所示, 在探测器奈奎斯特频率 20 lp/mm 处, 光学系统 0 视场的 MTF 大于 0.845, 0.7 视场和全视场的子午和弧矢 MTF 均大于 0.778, 有很高的成像质量.

光学系统两个衍射表面的位相系数如表 1 所示. 结合 Znse 和 Ge 材料在波长为 4.18 μm 时的折射率 n_0 分别为 2.433 和 4.023, 代入(3)式可得从致冷红外探测器中心发出的冷光线被衍射表面反射后, 在一个表面微结构周期 T 上面产生的相位延迟为

$$\text{表面 2: } \phi_{0\text{Znse}} = -1.38567, \quad (8)$$

$$\text{表面 3: } \phi_{0\text{Ge}} = 2.66116. \quad (9)$$

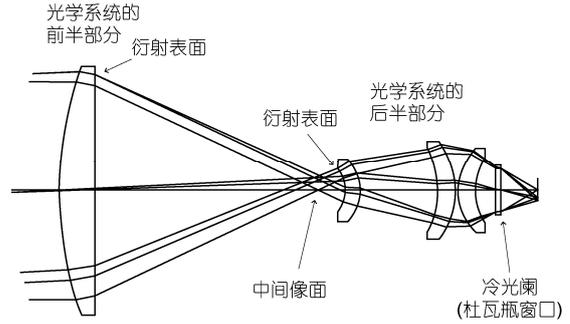


图 4 3~5 μm 致冷式中波红外光学系统结构图

表 1 中波红外光学系统衍射表面的位相系数

| 表面 | 二次项位相系数 a_1 |
|-------|---------------------------|
| 第 2 面 | -6.41688×10^{-5} |
| 第 3 面 | -8.27635×10^{-4} |

利用(1)式, 可以计算出针对不同的衍射级次 m' 其衍射效率 $\eta_{m'}$, 如表 2 所示. 从表 2 可以看出, 冷光线被表面 2 反射后, 其衍射效率最大的衍射级次为 $m'_{\text{max Znse}} = -1$, 对于表面 3, $m'_{\text{max Ge}} = 3$. 在 CODEV 软件

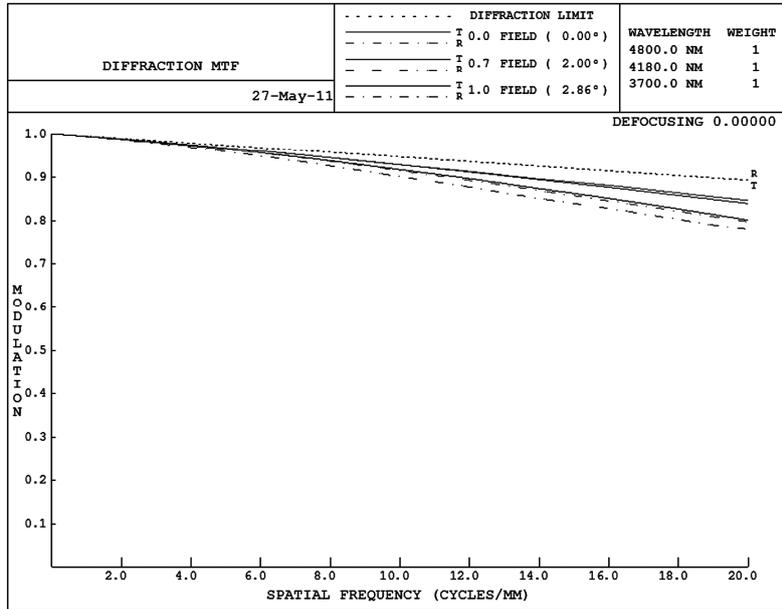


图 5 3.7~4.8 μm 致冷式中波红外光学系统 MTF 图

表 2 两个衍射表面针对不同衍射级次的衍射效率 $\eta_{m'}$

| 衍射效率 | 冷光线被表面 2 反射后的衍射级次 | | | | 冷光线被表面 3 反射后的衍射级次 | | | |
|-------------|-------------------|--------|--------|--------|-------------------|--------|--------|--------|
| | -2 | -1 | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| $\eta_{m'}$ | 0.2487 | 0.5801 | 0.0466 | 0.0158 | 0.0282 | 0.1777 | 0.6752 | 0.0432 |

中可以对光学系统进行 Narcissus 冷反射分析, 得到各光学表面的 YNI , 并且可以追迹出近轴边缘光学在光学表面上入射高度 y . 表 3 给出了软件中得到的 YNI 和 y 值.

将表 3 中面 2 和 3 两个衍射表面的 YNI 值和 y 值代入(5)和(6)式, 并且结合表 2 中两个衍射表面的 $m'_{\max Z_{nsc}} = -1$ 和 $m'_{\max Ge} = 3$, 则可以计算出两个衍射表面的冷反射修正项 N_D 和评价标准 YNI_{diff} , 如表 4.

表 3 光学系统各表面的 YNI 和 y

| 表面 | YNI | y (mm) |
|----|----------|----------|
| 1 | 15.6195 | 50.0000 |
| 2 | -21.3128 | 47.0565 |
| 3 | 0.8427 | -5.1454 |
| 4 | -1.1243 | -7.3966 |
| 5 | -2.2097 | -14.7498 |
| 6 | -9.3110 | -17.2574 |
| 7 | 9.6704 | -17.1546 |
| 8 | -0.6127 | -13.4134 |
| 9 | -4.4071 | -8.8141 |
| 10 | -4.2517 | -8.5033 |

表 4 衍射表面对冷反射评价标准的影响

| 表面 | 面型类型 | YNI_{diff} | N_D |
|----|----------|--------------|---------|
| 2 | 高次非球面/衍射 | -21.3128 | -0.4263 |
| 3 | 高次非球面/衍射 | 0.8427 | 0.0219 |

从表 4 可以看出, 修正后的冷反射评价标准发生了改变, 衍射表面 2 对系统冷反射的衍射影响 N_D 要大于衍射表面 3. 这是由于近轴边缘光学在表面 2 上的入射高度 y 为 47.0565 mm, 远大于在表面 3 上的入射高度, 并且由(6)式可知, 衍射表面的二次项位相系数引起的冷反射修正项 N_D 与 y 的平方成正比.

为了抑制冷反射, 致冷红外光学系统的 YNI 一般要求绝对值大于 1.0. 表面 2 的冷反射修正项 N_D 其数值为 -0.4263, 相比 1.0 来说不能忽略, 说明在进行冷反射的分析时需要考虑衍射的影响. 而表面 3 的冷反射修正项 N_D 数值为 0.0219, 数值较小, 说明在进行冷反射的分析时可以忽略表面 3 的衍射影响.

3 结论

本文分析了致冷红外光学系统中冷反射的成因. 针对衍射表面, 在基于衍射效率分析的基础上, 通过逆光路追迹冷光线的方式, 对经过衍射元件反射后衍射效率最大的级次进行了计算分析, 给出了适用于衍射表面冷反射的评价标准. 本文设计了一个中波致冷红外光学系统, 针对系统中使用的两个衍射表面分析了其各衍射级次的衍射效率, 找出了衍射效率最大的级次, 并计算出两个衍射光学表面的冷反射. 分析表明, 在设计含有衍射元件的致冷红外光学系统时, 应充分考虑光学表面衍射效应对冷反射的影响, 以正确分析评价致冷式红外光学系统的冷反射.

参考文献

- Howard J W, Abel I R. Narcissus: Reflections on retroreflections in thermal imaging systems. *Appl Opt*, 1982, 21: 3393-3397
- Lloyd J M. *Thermal Imaging Systems*. New York: Plenum Press, 1975. 275-281
- Rayces J L, Lebich L. Exact ray tracing computation of narcissus equivalent temperature difference in scanning thermal imagers. *Proc SPIE*, 1992, 1752: 325-332
- Lu K, Dobson S J. Accurate calculation of narcissus signatures by using finite ray tracing. *Appl Opt*, 1997, 36: 6393-6398
- 王涌天, 崔桂华. 红外扫描成像系统中冷像的分析和控制. *光学学报*, 1994, 14: 650-655
- 焦明印. 红外扫描成像系统中 Narcissus 等效温差的修正计算. *光学学报*, 1997, 17: 126-127
- 金宁. 对红外热成像系统中冷反射现象的分析. *红外技术*, 1998, 20: 10-14
- 白剑, 孙婷, 沈亦兵, 等. 红外折射-衍射混合光学系统的热差分析. *光学学报*, 1999, 19: 997-1002
- 栾亚东. 红外扫描成像系统中冷反射的光学抑制. *红外与激光工程*, 2006, 35(z2): 26-30
- 杨正, 屈恩世, 曹剑中, 等. 对凝视红外热成像冷反射现象的研究. *激光与红外*, 2008, 38: 35-38
- 顿雄, 陶玉, 孟军合. 双视场红外扫描成像系统冷反射抑制. *红外与激光工程*, 2010, 39: 732-735
- Swanson G J. *Binary optics technology: Theoretical limits on the diffraction efficiency of multilevel diffractive optical elements*. Technical Report. MIT Lincoln Laboratory, 1991
- 崔庆丰. 折衍射混合光学系统的研究. 博士学位论文. 长春: 中国科学院长春光学精密机械研究所, 1996. 33-34

- 14 孙强, 王肇圻, 李凤有, 等. 含有谐衍射元件的红外双波段减热差系统设计. 科学通报, 2003, 48: 557–561
- 15 Cohen J B. Narcissus of diffractive optical surfaces. Proc SPIE, 1995, 2426: 380–385
- 16 Liu T, Cui Q, Xue C, et al. Calculation and evaluation of narcissus for diffractive surfaces in infrared systems. Appl Opt, 2011, 50: 2484–2492
- 17 Sweatt W C. Mathematical equivalence between a holographic optical element and an ultra-high index lens. J Opt Soc Am, 1979, 69: 486–487
- 18 Optical Research Associates (ORA) Inc. CODE V Transition Guide for Current Users Version 9.5. California: Optical Research Associates, 2004

Evaluation and control of narcissus for diffractive surfaces in IR systems

LIU Tao, CUI QingFeng, YANG LiangLiang & XUE ChangXi

Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China

The narcissus influence for cooled IR imaging systems is well known and should be considered in the process of optical design. We gave a comprehensive introduction and analysis of the cause of narcissus for IR optical system and pointed the difference between diffractive surface and refractive surface for narcissus intensity evaluation. There will be multi-order diffraction after rays passing through diffractive surface. Considering the diffraction efficiency, we analyzed the narcissus influence for diffractive surface and modified the narcissus evaluation criterion *YNI*. A MWIR optical system with two diffractive surfaces has been given as a practical example and the narcissus effect for the two diffractive surfaces has been evaluated. The conclusion can be used to calculate and control the narcissus intensity in infrared optical systems with diffractive surfaces.

optical design, narcissus, diffractive optics, IR optical system, *YNI*

doi: 10.1360/972011-1106