

引用格式: Yang Ding, Pang Ruiguo, Lu Zuofeng, et al. Optimization and Analysis of an Ultra-Low Narcissus in Mid-Infrared Refraction-Diffraction Hybrid Systems[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0722001

杨鼎, 庞睿国, 卢作锋, 等. 中红外折衍混合系统超低冷反射设计和分析[J]. 光子学报, 2026, 55(7):0722001

中红外折衍混合系统超低冷反射设计和分析

杨鼎^{1,2}, 庞睿国^{1,2}, 卢作锋^{1,2}, 王娴雅^{1,2}, 高双燕^{1,2}, 李旭阳^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所空间光学技术研究室, 西安 710100)

(2 中国科学院大学光电学院, 北京 101400)

摘 要:随着红外探测器的不断发展,包括像素尺寸的减小和灵敏度的提高,光学系统对信噪比和分辨率的要求也随之增加,本文讨论了红外波段的折衍混合系统的超低冷反射分析和优化问题,并给出了设计得到的具有超低冷反射的仿真结果。本文采用了定性和定量的分析方法,对传统的 YNI 和 I/IBAR 评估指标在对具有超低冷反射结果分析的局限性,指出了 NITD(等效温差)在相关系统中的可行性。研究表明,通过综合指标分析系统各部分对像面的冷反射贡献并针对性优化,从衍射面到达像面的冷光线在像面的辐照度降低约 40.5%,NITD 最大值降至 0.049 K,表明在针对性优化后能够设计出超低冷反射的系统,能够提高图像质量和温度测量的准确性。

关键词:折衍混合系统;中波红外;冷反射;超低冷反射;高分辨能力

中图分类号:O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20265507.0722001

0 引言

近年来,国内红外探测器领域取得了显著进展。随着冷却型红外焦平面阵列像素尺寸的不断减小,以及灵敏度的持续提升,对前端成像系统的信噪比提出了更高的要求。例如,近年来高德红外推出的商业化汞镉碲(HgCdTe)探测器和 II 类超晶格探测器,分别拥有 7.5 μm 和 10 μm 的最小像素尺寸,其中汞镉碲探测器的典型噪声等效温差(NETD)可低于 10 mK,而 II 类超晶格探测器的 NETD 则可低于 20 mK。随着像素尺寸的减小和噪声等效温差的降低,光学系统的分辨率和信噪比需求也随之增高。

在红外波段光学系统的设计中,提高分辨率往往依赖于减小 F 数。然而,小 F 数和低 Narcissus 要求在设计中存在矛盾,尤其是在中远距离探测的光学系统中,这一矛盾尤为突出。对于大相对孔径的中远焦距红外光学系统,传统的球面或非球面镜面在材料有限和透过率低的情况下,难以在有限的镜头数量和紧凑的外形中实现良好的成像效果。因此,衍射光学元件(Diffractive Optical Element, DOE)在红外系统中的应用逐渐得到了广泛的关注。衍射光学元件具有负色散、高设计自由度和轻量化等特点,能够有效缓解传统光学元件在设计中的一些瓶颈^[1-6]。

然而,虽然衍射光学元件在红外光学系统中得到了显著的发展,并广泛应用于红外系统中,但利用衍射光学元件优化超低 Narcissus 的研究仍较为稀缺。Narcissus 效应会导致探测器上出现虚假的冷点,从而严重影响图像的均匀性和温度测量精度。为了解决这一问题,本文将分析和优化衍射光学元件在红外系统中的 Narcissus 效应,旨在通过优化 DOE 结构设计,降低 Narcissus 效应,提升图像质量和测量精度。

本文使用包括 YNI、I/IBAR 指标等定性分析指标以及 NITD(等效温差)定量分析方法,对系统的 Narcissus 性能进行评估和优化。结果表明,尽管超低冷反射目标在设计中面临挑战,但通过优化设计仍能实现

基金项目:国家重点研发计划(No.2021YFC2202100)Foundation item: National Key Research and Development Program of China,空间目标感知全国重点实验室基金项目(STA2025ZCB0202)National Key Laboratory of Space Target Awareness

第一作者:杨鼎(2002—),男,硕士,主要研究方向为光学系统设计。Email: yangding24@mails.uas.ac.cn

通讯作者:李旭阳(1981—),男,研究员,博士,主要研究方向为高分辨率相机设计、成像质量评价等。Email: lixuyang2004@126.com

收稿日期:2026-01-27; **录用日期:**2026-04-17

<http://www.photon.ac.cn>

该目标,从而有效提高图像质量和测量精度。

1 分析方法

在中波红外成像系统中,冷反射问题是难以完全消除的难题,冷反射通过在像面形成虚假的冷斑,严重破坏图像均匀性与测温精度,是红外系统特有的噪声影响因素。在制冷型中波红外系统的实际设计过程中,冷反射的分析、仿真和抑制往往使用 YNI 和 $I/IBAR$ 标准进行评价,二者分别用于评估冷反射对探测器中心区域响应的影响程度和冷反射随着观测视场角度变化特性,该标准自 1982 年提出以来已被学界广泛接受并使用^[7],定义如式(1)、式(2)所示:

$$YNI = yni, \quad (1)$$

$$I/IBR = \theta/\theta', \quad (2)$$

式中, θ 为近轴边缘光线在某个面的入射角, θ' 表示主光线在对应面的入射角。

YNI 和 $I/IBAR$ 标准基于折射原理推导得到,但当系统非完全基于折射原理时 YNI 值会面临相当的失真,刘涛等人针对衍射器件对该标准进行推导并提出增加衍射修正值后的 YNI_{diff} 标准^{[8][10]},定义式如式(3)所示:

$$\begin{aligned} YNI_{diff} &= YNI + \left(2 - \frac{m'_{max}}{m}\right) (a_1 y^2 + 2a_2 y^4 + 3a_3 y^6 + \dots) \\ &= YNI + N_d, \end{aligned} \quad (3)$$

式中, m 为衍射表面的设计衍射级次, m'_{max} 指具有最大衍射效率的级次, a_1 、 a_2 、 a_3 为衍射表面的调制位相系数,光学系统中衍射表面的冷反射光线示意如图 1。

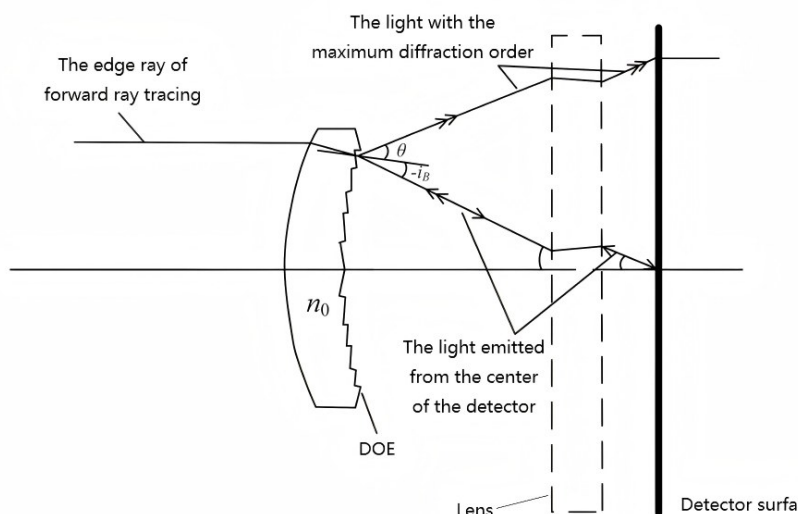


图 1 光学系统中衍射表面的冷反射光线示意

Fig 1 Schematic diagram of Narcissus light from diffraction surfaces in optical systems

在 YNI 和 $I/IBAR$ 评价体系,两评价标准具有相当的局限性。两标准针对单个镜片的冷反射特性进行计算和评估,在设计时能对系统的各子镜的冷反射性能做出良好的评估,但该评估相对于系统是孤立的,在系统简单和抑制不困难时在相当程度上能够反映系统的冷反射性能,在系统复杂和抑制困难时将具有相当程度的失真; YNI_{diff} 标准尽管针对衍射器件做了补充和拓展,但并未进行改进,这也是本文在后续仿真中指出的问题之一。

在复杂的系统中,使用实际光线追迹的仿真是最贴近实际情况的方式,且衍射光学元件实际可以通过光线追迹理论进行分析。Sweatt 最早提出了使用高折射率模型(High Refractive Index model, HRI)来使用几何光学模型代替衍射光学模型^[11],进而使用光线追迹理论来对衍射光学元件进行分析和计算,根据计算当模型的折射率 $n > 105$,等效模型与真实衍射模型间误差小于 0.01% ^[12]。因此为了实现对红外系统冷反射

效应的定量分析,这里可以使用逆向光线追迹的思想,仍然使用冷反射等效温差(NITD)来表征系统的冷反射效应^{[7][13]-[14]},它可表示为式(4):

$$NITD_{ij} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{N(\lambda, T_H) - N(\lambda, T_D)\} R_d(\lambda) t_j(\lambda)^2 R_j(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial N(\lambda, T_{MS})}{\partial T} A(\lambda) R_d(\lambda) t_0(\lambda) d\lambda} \sigma_{ij}, \quad (4)$$

式中, $t_0(\lambda)$ 为从第一透镜表面到探测器的平均透射率。 $t_j(\lambda)$ 为从探测器到关注的表面 j 的平均透射率, $N(\lambda, T_H)$ 为室温的光谱辐射强度, $N(\lambda, T_D)$ 为探测器光谱辐射强度, $R_j(\lambda)$ 表示表面光谱反射率, $R_d(\lambda)$ 表示标准探测器光谱响应, $A(\lambda)$ 表示大气透过率。如图 2 为示意图。

$$\sigma_{ij} = \frac{\Omega_{Rij}}{\Omega_{CSI}}, \quad (5)$$

σ_{ij} 为从表面 j 落在冷却型探测器表面的反射辐射的立体角与探测器像元的冷屏蔽立体角的比值。

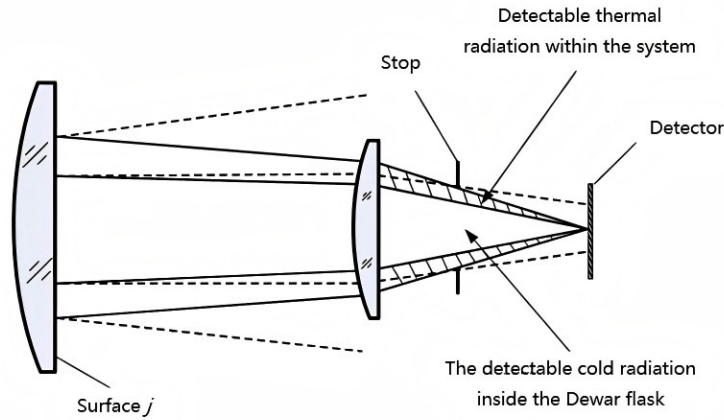


图 2 噪声等效温差光线追迹过程示意

Fig 2 Illustration of the NITD light tracing process

在上述公式的计算中,需要提前进行一些假设,如:

- (1) 假设探测器的归一化光谱响应在工作波长上是恒定的。
- (2) 大气透射率假设为 1,这意味着 NITD 参考的是镜头前面的环境温度。
- (3) 假设应用在透镜表面的所有镀膜的性能在工作波长上是恒定的。
- (4) 假设壳体和探测器温度恒定,即壳体和探测器不存在温度梯度。

根据计算公式,需要逐面计算冷光线的传播路径并计算最终到达像面的能量强度,将上述计算结果叠加即可得到系统的总和 NITD。根据计算结果,可以找到具体的光线传播路径并对具有较大 NITD 贡献值的面进行优化,从而得到具有超冷反射的设计结果。

另外需要注意的是,本文未考虑机械件对光线的反射,这一点主要考虑镜片边缘和内部机械件的黑漆在红外波段已具有较高的吸收率。根据调研^[15],主流的黑漆在 3-5 μm 的吸收率可以轻易达到 95% 以上,一些特种黑漆甚至可以高于 99% (如中科院宁波材料所先进涂层与增材制造研究团队研制的特种吸光涂层 HD-CB99A),冷反射光线在一次反射后强度将低于原来的 1/100,二次反射将小于 1/10000,因此论文仅考虑经过低吸收率的透镜到达像面的光线。

2 设计仿真与分析

在上一节的分析中,本文给出了两种冷反射评价的理论模型,前者可以比较快速的得到具有较低 NITD 的设计结果,但在设计时很难进一步的降低探测器上的冷斑,后者可以最客观真实的反映像面的冷反射噪声,但需要进行大量计算;但如果在基于 YNI 和 I/IBAR 指标已经达到低于干扰噪声的结果基础上,仅需要对

少数带来较大冷反射贡献的面进行分析和处理,这一节将给出根据这一思路得到具有超低冷反射的设计结果。给出本次设计的部分指标如表1所示。

表1 主要设计参数
Table 1 Main design parameters

Project	Value
Spectral (μm)	3—5
Focal length (mm)	165
F#	1.65
2ω ($^{\circ}$)	6
Operating temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$-40 \sim 60$
Volume (mm)	$\leq 110 \times 180$
Transmittance	$> 70\%$
Detector specifications	1024×1024
Pixel (μm)	12
Back focal length (mm)	44.35

2.1 低冷反射系统仿真

按照表1的设计要求,使用ZEMAX光学设计软件设计了含有单层DOE的中波红外系统,设计结果2D图如图3所示,同时给出设计参数如表2、表3、表4所示。

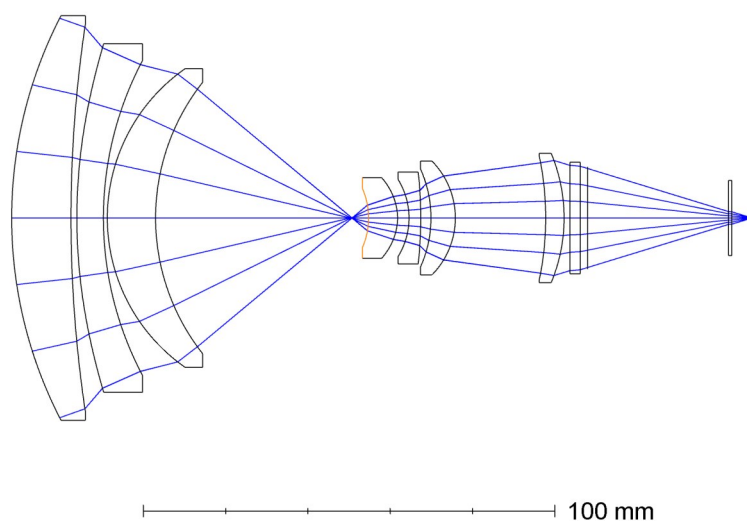


图3 设计结果2D图
Fig 3 Design result 2D diagram

上述设计在 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 内像质的一致性良好,同时可在较宽松的公差下保持良好像质,MTF如图4、图5和图6所示。

根据第2节的分析,首先给出上述设计的YNI和I/BAR数值,如表5、表6所示。根据YNI和I/BAR标准,当二者应当至少有一个绝对值大于1时,该面的冷反射是不严重的,但实际上该数值只能比较孤立的反映该面对于冷光线反射的趋势,在复杂的系统中可能是不准确的,将以上述设计结果为例进行说明。

在ZEMAX非序列模式中使用点光源阵列追迹5500万条光线进行冷反射分析得到的像面照度分布如图7所示。注意由于非序列模式中由于集成了严格耦合波分析(Rigorous Coupled-wave Analysis, RCWA)算法,因此对衍射光线的模拟是较准确的,可在后续的分析中进行参考。

2.1.1 衍射面杂光分析

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

表 2 设计结果基本参数
Table 2 Basic parameters of the design outcome

Surface	Type	Radius (mm)	Thickness (mm)	Material
1	Standard	106.6145	14.4174	Si
2	Standard	318.4318	1.4359	
3	Binary2	133.0200	6.4509	
4	Standard	81.6478	0.9497	ZNSE
5	Standard	44.2296	11.7351	
6	Standard	53.1783	51.7726	
7	Standard	−17.9485	7.1483	Si
8	Even Asphere	−13.3802	2.6471	
9	Standard	−17.8342	2.8460	
10	Standard	−101.6392	2.2205	IRG209
11	Standard	−28.9845	5.9350	
12	Standard	−19.6434	22.1818	
13	Even Asphere	−75.3242	4.4843	Si
14	Standard	−40.8071	1.4049	

表 3 非球面/二元面非球面系数
Table 3 Aspheric/Binary Aspheric Coefficient

Surface	k	4th Term	6th Term	8th Term	10th Term	12th Term
3	−2.026	6.32E−10	2.84E−11	−8.17E−14	8.44E−17	−4.92E−20
8	0.371	6.04E−05	−2.22E−07	1.65E−08	−3.51E−10	4.81E−12
13	3.579	−8.17E−07	2.29E−08	−2.54E−10	1.71E−12	−7.03E−15

表 4 二元面设计参数
Table 4 Binary surface design parameters

Surface	Norm radius	ρ^2	ρ^4	ρ^6
3	42.4	−94.9047	2.6893	−24.5655

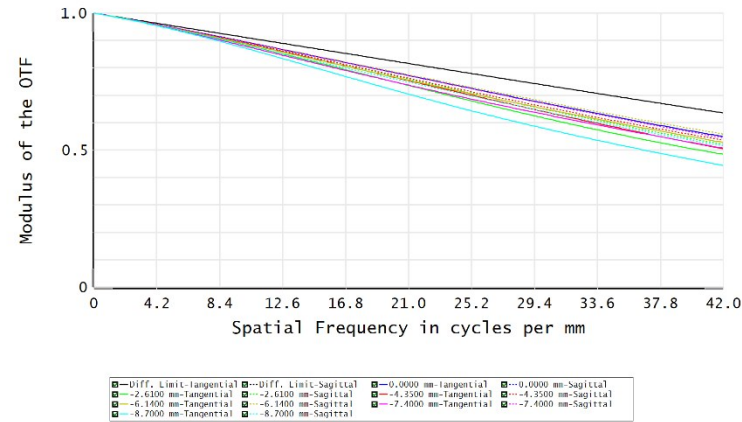


图 4 20℃环境温度下的 MTF 曲线
Fig 4 MTF curve at an ambient temperature of 20℃

级的衍射效率计算公式^[8]如式(6):

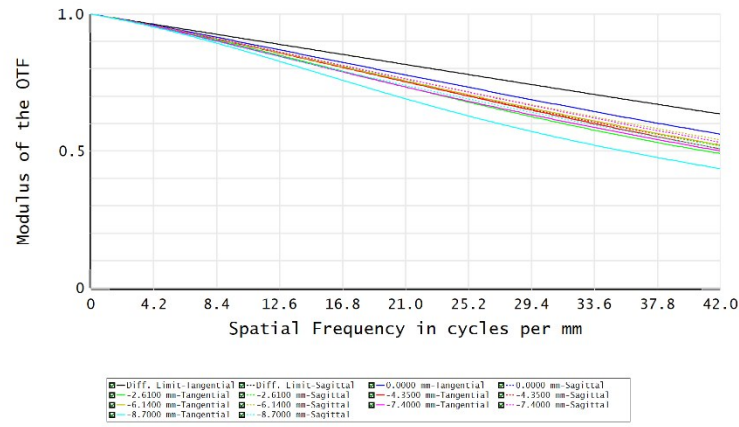


图 5 -40℃环境温度下的 MTF 曲线
Fig 5 MTF curve at an ambient temperature of -40℃

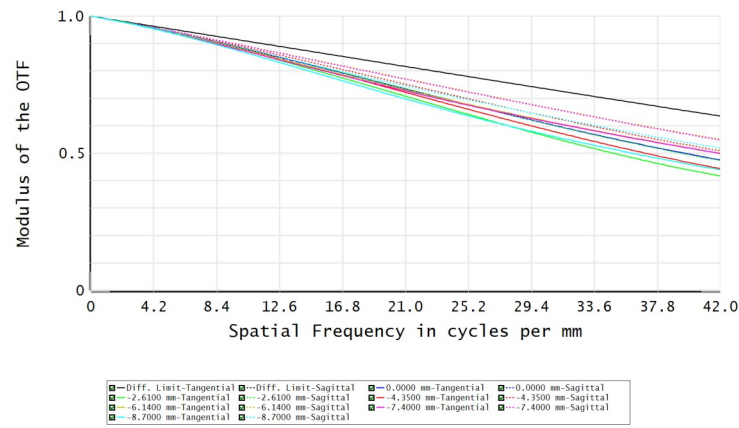


图 6 60℃环境温度下的 MTF 曲线
Fig 6 MTF curve at an ambient temperature of 60℃

表 5 设计结果各面 YNI 和 I/IBAR 计算值

Table 5 The calculated values of YNI and I/IBAR for each aspect of the design result

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
YNI	-24.6342	29.4303	12.28006	-6.99433	-28.57270	-2.22844	-1.79405
I/ IBAR	71.3574	6.0814	5.38989	3.10778	91.99163	0.91698	5.92995
	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
YNI	1.8124	1.23411	-4.58633	-3.54623	5.83808	1.92536	8.98309
I/ IBAR	0.3123	0.28168	9.85529	7.45936	0.88126	0.47445	2.84379

表 6 衍射面 YNI 修正值

Table 6 衍射面 YNI 修正值

Surface	N_d
3	-6.2766

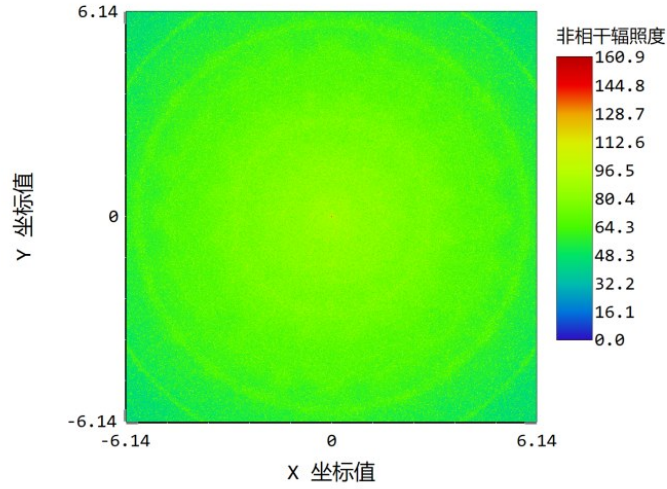


图 7 像面照度分布

Fig 7 The distribution map of incident light illumination

$$\eta_m^N = \left\{ \frac{\sin \left[\pi \left(m - \varphi \right) \right]}{\sin \left[\frac{\pi \left(m - \varphi \right)}{N} \right]} \cdot \frac{\sin \left(\frac{\pi m}{N} \right)}{\pi m} \right\}^2, \quad (6)$$

式中, N 指微结构台阶数, φ 指相位延迟量。

若假设入射光从衍射元件未刻蚀微结构的一面入射,衍射元件产生的最大相位延迟如式(7):

$$\varphi = \frac{\lambda_0}{\lambda} \cdot \frac{n \cos \theta_1 - \sqrt{n'^2 - n^2 \sin^2 \theta_1}}{n - n'}, \quad (7)$$

式中,基底的折射率为 n ,介质折射率为 n' , λ_0 为设计波长, λ 为入射波长, θ 为入射光入射角。

根据公式,可以得到正入射情况下一级衍射效率随量化台阶数变化趋势,1级衍射效率随着量化台阶数增加,但呈现增幅放缓的趋势。量化台阶数由2增加为4,衍射效率增加了40%,而量化台阶数达到8以后,衍射效率随量化台阶数增加的收益不再明显,因此本节可先使用8级台阶设计。

根据公式(6)可以计算得到当 $N=8$ 时不同级次衍射效率随波长变化曲线,如图8所示。从图中可以看到,针对单层衍射元件,只有对应设计级次设计波长附近的波段内,衍射元件的衍射效率大于90%,在 $3\mu\text{m}$ 到 $5\mu\text{m}$ 范围内的衍射效率大于75%。同时非设计级次的衍射效率较低但不为零,非设计级次的衍射能量在像平面上会产生杂散辐射,降低光学系统像面的对比度。

分析可以得到,衍射造成的冷光线主要分为设计级次的非高衍射效率谱段光线和非设计级次的相对高衍射效率的谱段^{[16][18]},这一过程可使用ZEMAX非序列模式中的RCWA算法进行模拟计算,计算得到的来自二元面的冷光线光路如图9所示,探测器照度分布如图10所示,到达探测器的光线带来的非相干辐照度最大值约为270.4。

分析可知,尽管在设计时 $S3$ 面的 YNI_{diff} 和 I/BAR 绝对值已经非常大,但仍然有相当一部分光线在该面发生了指向像面的反射,一部分达到像面,这部分光线尽管数量并不多且强度并不大,但由于达到像面的角度并不大且在各面的高度并不高,因此很难拦截,以此需要通过设计从来源处加以抑制。

2.1.2 折射面杂光分析

在前面的分析中,衍射面和折射面在进行冷反射分析的一个主要差异为 i_B 和 θ 在数值上的不等,该指标会影响 YNI_{diff} 和 I/BAR 的数值,导致近轴解和实际结果间存在差异,但在光线设计软件ZEMAX中,设计系统尤其是复杂系统时,采用光线追迹的方式进行计算,根据文献^[17],在不考虑衍射效率的情况下,使用高折射率模型误差非常小,这里可以使用ZEMAX中的Narcissus宏进行NITD总和的计算。

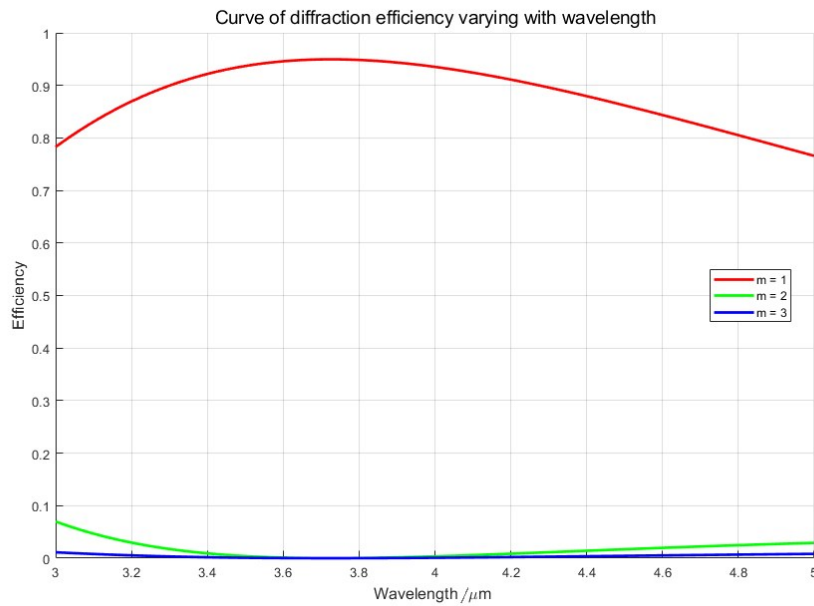


图8 不同级次衍射效率随波长变化曲线

Fig 8 Curves showing the variation of diffraction efficiency at different levels with wavelength

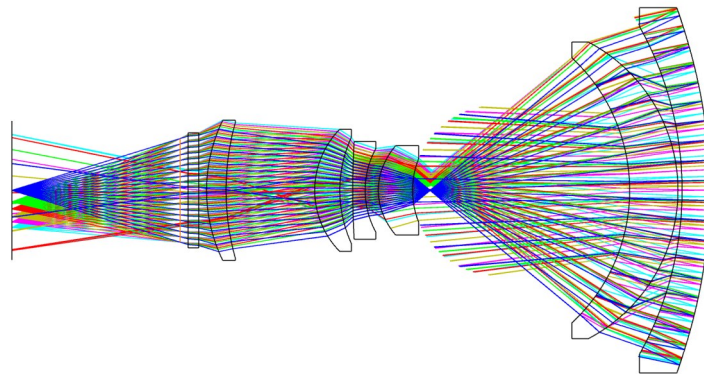


图9 S3面冷反射光线光路图

Fig 9 The Narcissus light ray path diagram of S3 surface

设镜筒和环境温度为 300 K, 杜瓦瓶内温度为 77 K, 各红外透镜表面反射率为 1%, 返回像面的冷光线在探测器上形成冷斑, 图 11 是逐面计算得到的探测器 NITD 总和, NITD 最大值约为 0.2309 K, 已经可以满足绝大部分的探测器的设计要求, 但该指标仍有进一步降低的可能。

各面的 NITD 贡献如图 12 所示, 在该图中横轴表示面在 FPA 对角线上的 NITD 贡献, 颜色越深贡献越大, 纵轴表示面数, 从上到下顺序为 S17—S1 以及倒置后的像面。分析图 12, 最大贡献出现在第 7 面, 其 YNI 值为 -1.79405, 对应的 $I/IBAR$ 值为 5.92995, $I/IBAR$ 数值并不小, 如相邻的 S8 面 $I/IBAR$ 值仅为 0.57584, 但对 NITD 的贡献远小于 S7 面的贡献, 可见 YNI 和 $I/IBAR$ 指标并非绝对性指标, 仅能反映趋势而非具体数值。

使用光线追迹的方法对 NITD 贡献最大的 S7、S8、S9 进行冷光线路径的分析, 可以发现尽管 S7 面 YNI 和 $I/IBAR$ 值均达到了低冷反射的标准, 但经过 S7 面反射的光线经后续的弯月正透镜汇聚后仍然对像面贡献了最大的 NITD, 可见传统的 YNI 和 $I/IBAR$ 指标仅能比较孤立的反映分析面反射的光线分散程度, 在指标比较严苛且复杂的系统中, 仍然要通过光线追迹的方式进行准确的冷光线追踪, 对引起冷光线反射和汇聚的面进行调整。

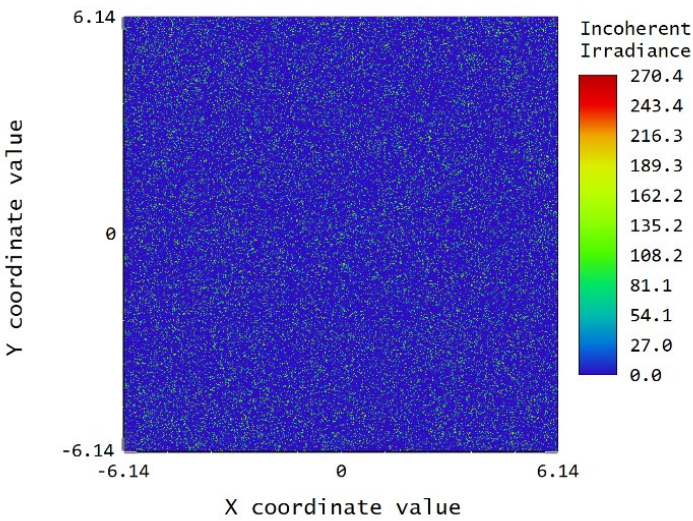


图 10 探测器照度分布图
Fig 10 Detector illumination distribution ma

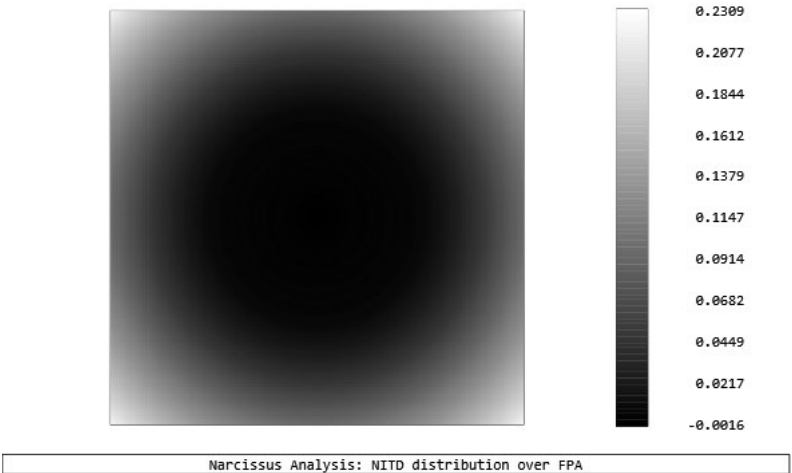


图 11 探测器NITD总和
Fig 11 Detector NITD total sum

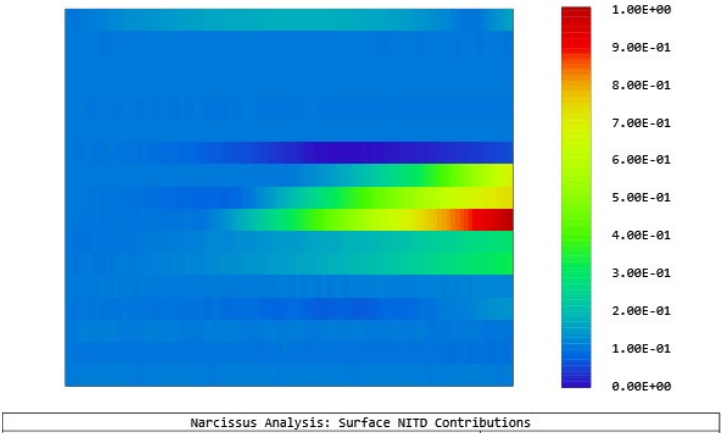


图 12 设计结果各面 NITD 贡献分布
Fig 12 The distribution of NITD contributions in each aspect of the design result

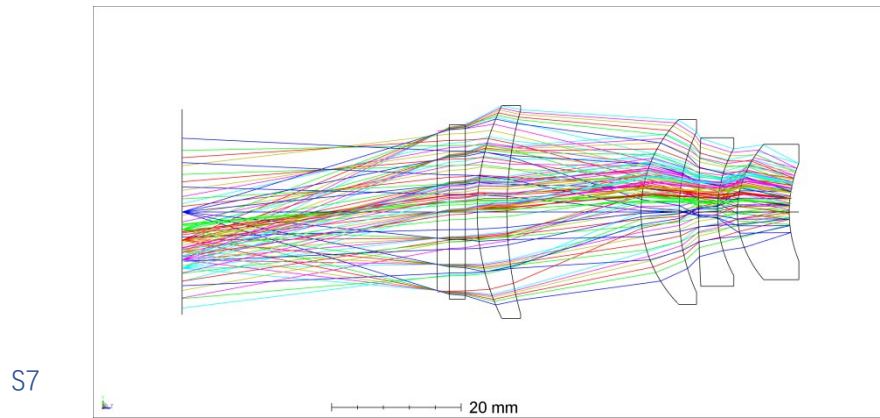


图 13 S7 面反射光线追迹图
Fig 13 S7 surface reflection ray tracing diagram

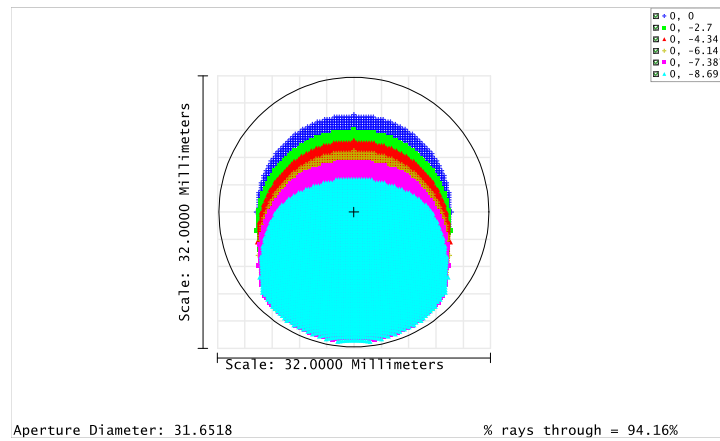


图 14 S7 面反射光线追迹像面光迹图
Fig 14 S7 surface reflection ray tracing image plane ray diagram

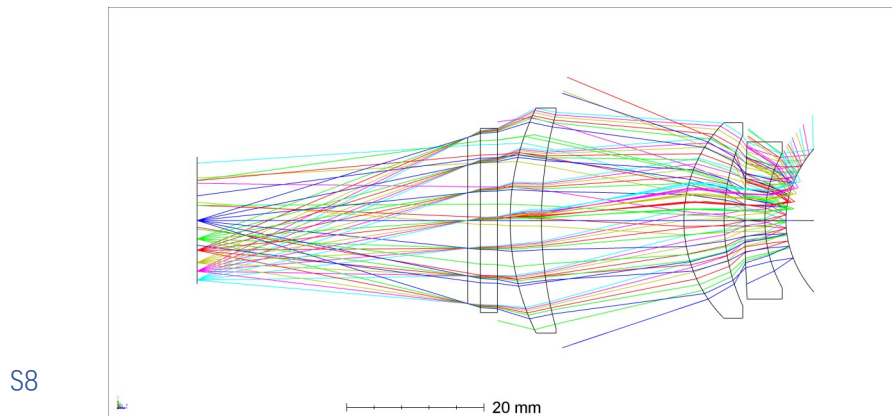


图 15 S8 面反射光线追迹图
Fig 15 S8 surface reflection ray tracing diagram

分析如图 15 所示的光线在 S8 面的光线路径, 可以看到光线在经 S8 面反射后, 经过 S10 面的折射, 光线角度已十分发散, 但经 S11-S12 透镜收集汇聚后相比较集中的达到像面, 光线到达像面的坐标分布如图 16 所示, S9 面同 S8 面类似, 反射光线路径和光迹图如图 17、图 18 所示。

2.2 超低冷反射系统仿真

在 3.1 节中, 本文给出了一个达到 YNI 和 I/BAR 标准的低冷反射设计, 并在后续分析中给出了来自衍射

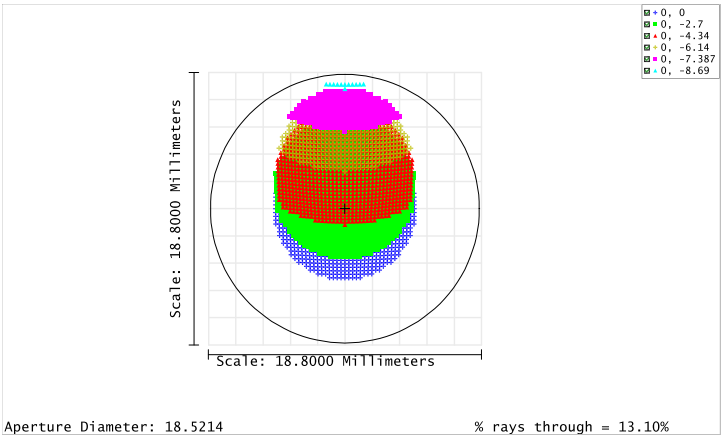


图 16 S8 面反射光线追迹像面光迹图
Fig 16 S8 surface reflection ray tracing image plane ray diagram

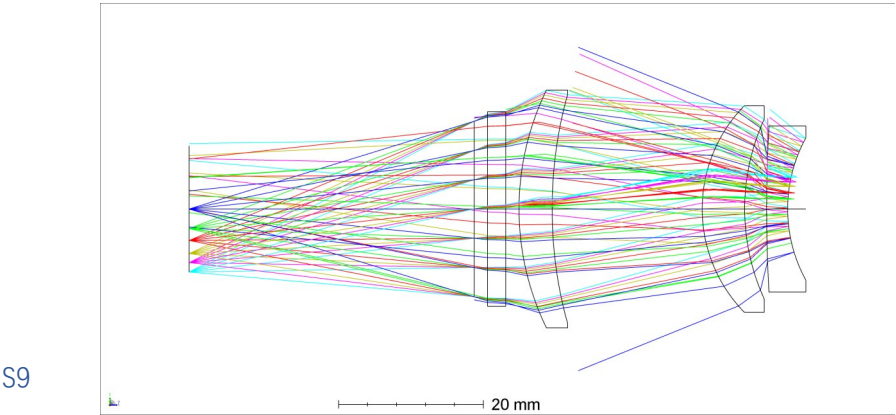


图 17 S9 面反射光线追迹图
Fig 17 S8 surface reflection ray tracing diagram

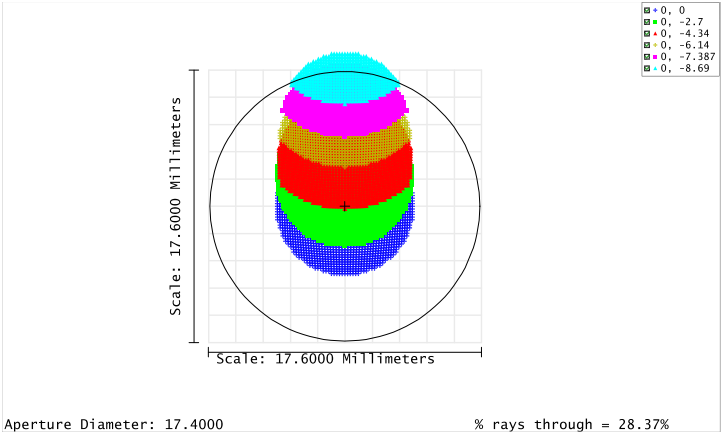


图 18 S9 面反射光线追迹像面光迹图
Fig 18 S8 surface reflection ray tracing image plane ray diagram

面和折射面的冷光线路径分析,这一节将按照上述分析给出一个根据光线追迹进行了冷反射优化的设计结果。

这里可以从公式出发,对优化过程进行说明。

根据衍射表面的位相方程通常用来描述光波在通过该表面时所经历的位相变化。对于一个二维连续且周期性重复的衍射结构(例如光栅),位相方程为式(8):

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6 + \dots), \quad (8)$$

式中,其中 a_1 、 a_2 、 a_3 为衍射表面的位相系数, r 为光学元件的口径。

在ZEMAX中,Binary2面型又被描述为式(9):

$$\phi = A_1 \rho^2 + A_2 \rho^4 + A_3 \rho^6 + \dots, \quad (9)$$

式中, A_1 、 A_2 、 A_3 为衍射表面的调制位相系数, ρ 为归一化半径。

由二式推导计算即可得到式(3),进而计算得到 N_d ,这里可以使用ZEMAX编写宏程序计算得到 YNI_{diff} ,这样可对设计级次的具有像面路径的冷反射光线进行有效的约束。

在3.1节给出的系统中,来自衍射面的冷光线除设计级次的非成像光线外,设计级次的非衍射光线和非设计级次的衍射光线也是冷反射光线的重要来源。由于单层衍射表面的理论限制,无法实现100%的能量利用,不同衍射级别的光焦点情况如图19所示。

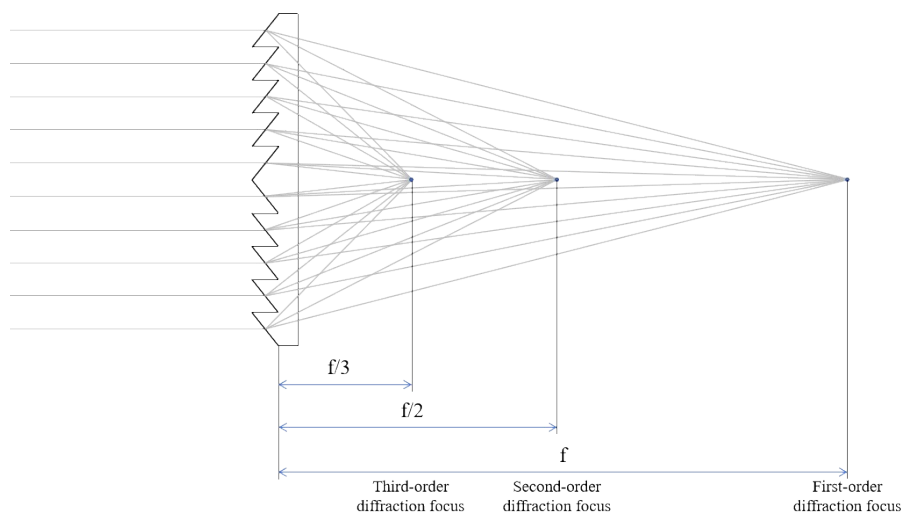


图19 衍射装置各衍射级次焦点的示意图

Fig 19 Schematic diagram of the focal points of each diffraction order of the diffraction device

若考虑减少设计级次的非成像光线和非设计衍射级次衍射带来的到达像面的冷光线,一方面应当考虑减少光线的产生,一方面使产生的光线无法到达像面,这里仍需要参考式(6)一式(9)。在式(3)中,衍射效率显然与台阶数成正比,增加台阶数可以在不改变设计的情况下减少非成像光线的产生;而各衍射级次的焦点位置是由相位系数和面型共同定义的,考虑到一次像面后的透镜直径远小于前组,可以调整衍射面各衍射级次的会聚位置找到使非成像光线最少进入后组的设计,从而得到具有超低冷反射的设计结果。

使用ZEMAX设计得到的结果如表7、表8、表9所示,表10给出了衍射面的 YNI 修正值。

在超低冷反射光系统的设计过程中,由于冷反射光线的抑制需求,系统的设计自由度在之前的基础上是不足的,最直观的体现就是在不增加设计自由度的情况下像质的劣化,因此上述结果较之前的设计在S13增加了非球面,其不同环境温度下的像质如图20、图21、图22所示。

2.2.1 衍射面杂光分析

在3.1.1节中,衍射造成的冷光线主要来自设计级次的非高衍射效率谱段光线和非设计级次的相对高衍射效率的谱段。在后续的分析中发现来自S3面的冷光线需要通过设计从来源处加以抑制,而在选择台阶数时令 $N=8$,使最高衍射效率达到94.96%,衍射效率最低处仅为76%,在将台阶数增加为16阶后得到的不同级次衍射效率随波长变化曲线如图23所示。

在图23中,衍射效率在 $3.75 \mu\text{m}$ 处最高接近100%,同时最低衍射效率大于80%,衍射效率整体上升约5%,同时其他级次的衍射效率略有下降,有利于S3面冷光线的减少。

在调整衍射面相位系数和增加台阶数后,得到的衍射面冷光线路径追迹如图24所示,计算得到的探测器照度分布如图25所示,到达探测器的光线带来的非相干辐照度最大值约为160.9,相比图11中的270.4大

表 7 设计结果基本参数
Table 7 Basic parameters of the design outcome

Surface	Type	Radius (mm)	Thickness (mm)	Material
1	Standard	113.2590	−14.3564	Si
2	Standard	401.4268	1.4041	
3	Binary2	160.9906	6.4774	Ge
4	Standard	95.1713	0.9944	
5	Standard	48.8982	11.5073	ZNSE
6	Standard	60.9374	55.0263	
7	Standard	−16.9588	6.6965	Si
8	Even Asphere	−13.8555	5.4143	
9	Standard	−16.5149	2.8732	IRG209
10	Standard	−47.6464	0.8303	
11	Standard	−49.3868	7.1570	Si
12	Standard	−25.4817	16.8398	
13	Even Asphere	−86.7351	4.1417	Si
14	Standard	−46.8868	1.9559	

表 8 非球面/二元面非球面系数
Table 8 The coefficient of Asphere/Binary

Surface	k	4th Term	6th Term	8th Term	10th Term	12th Term
3	−2.771	1.62E−08	−9.01E−12	−2.73E−14	3.89E−17	−2.52E−20
7	0	−8.54E−05	−7.88E−08	1.00E−08	−5.77E−10	1.01E−11
8	−0.259	−9.26E−06	−2.71E−06	9.07E−09	−1.95E−10	2.21E−12
13	1.651	−5.95E−06	7.81E−06	−9.13E−10	6.49E−12	−2.75E−14

表 9 二元面设计参数
Table 9 Binary surface design parameters

Surface	Norm radius	ρ^2	ρ^4	ρ^6
3	42.8	−92.9081	11.1636	−19.5789

表 10 衍射面 YNI 修正值
Table 10 Diffractive surface YNI correction value

Surface	N_d
3	−5.7288

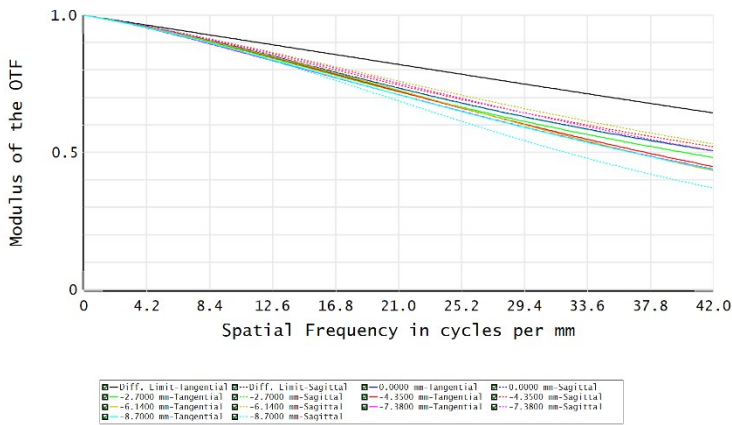


图 20 20℃环境温度下的 MTF 曲线
Fig 20 MTF curve at an ambient temperature of 20℃

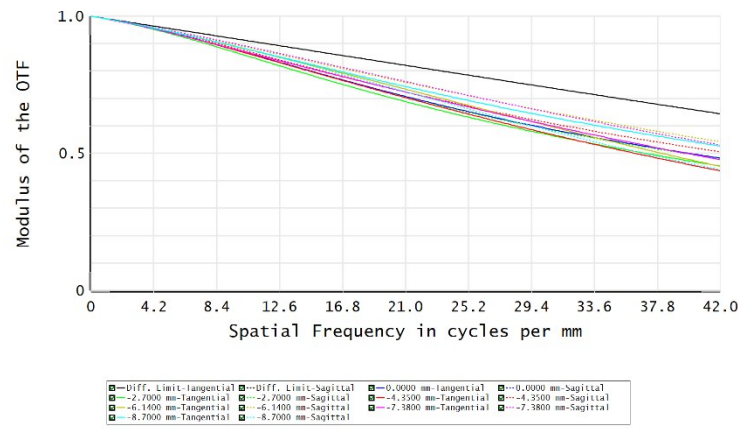


图 21 -40°C环境温度下的MTF 曲线

Fig 21 MTF curve at an ambient temperature of -40°C

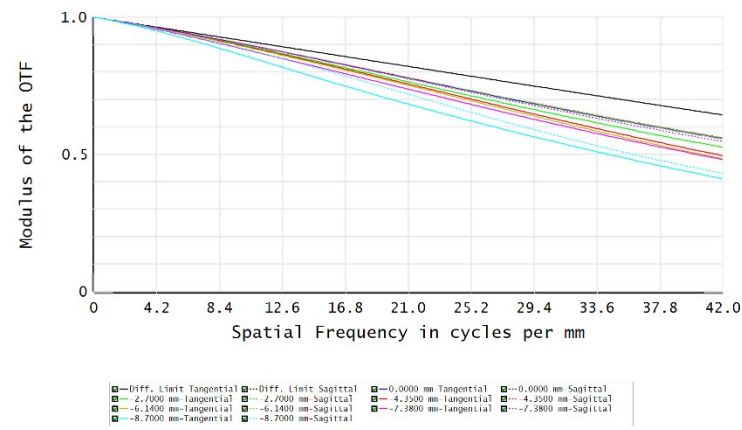


图 22 60°C环境温度下的MTF 曲线

Fig 22 MTF curve at an ambient temperature of 20°C

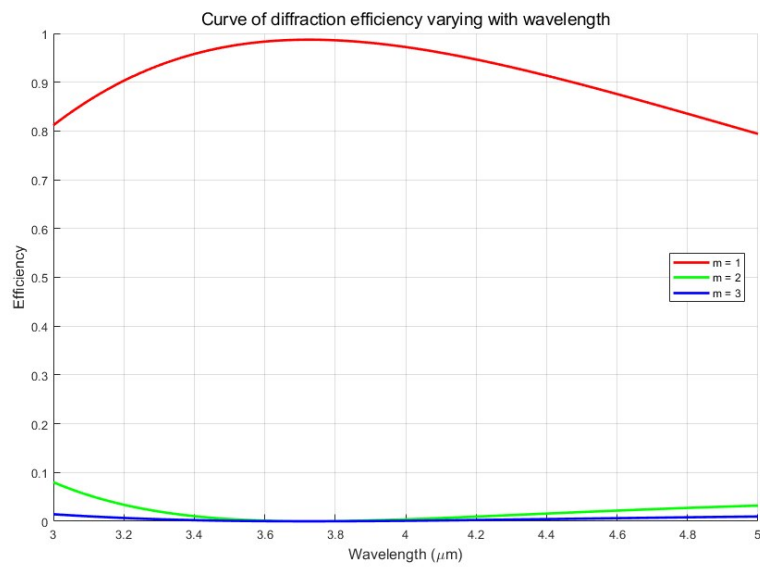


图 23 不同级次衍射效率随波长变化曲线

Fig 23 Curves showing the variation of diffraction efficiency at different levels with wavelength

幅下降,到达像面的光线路径也明显减少。

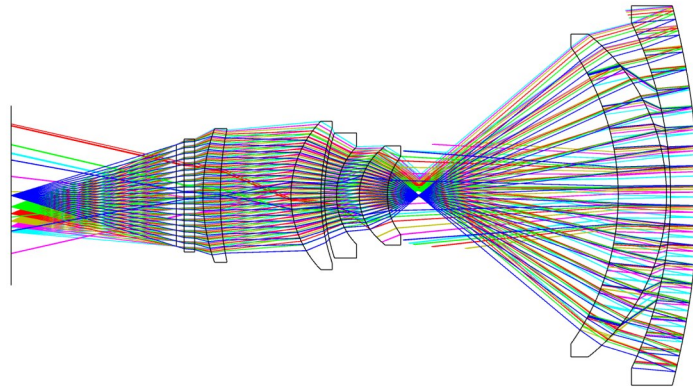


图 24 S3 面冷光线光路图

Fig 24 The Narcissus light ray path diagram of S3 surface

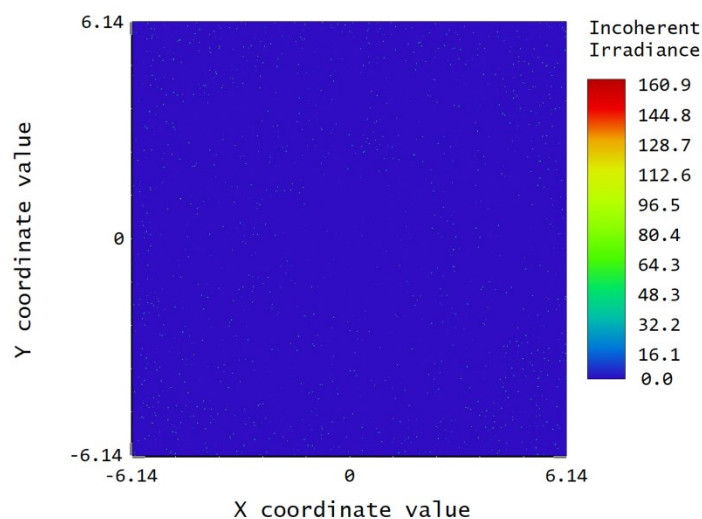


图 25 探测器照度分布图

Fig 25 Detector illumination distribution map

2.2.2 折射面杂光分析

对于上述光学系统,确立了使用光线追迹方法进行冷光线分析和优化的思路,通过调整部分面的曲率和面型达到降低冷反射的目的。如图 26 所示为优化后系统像面的总 NITD,等效噪声温差最大值已降低至 0.0490 K,各面的 NITD 贡献如图 27 所示,在该图中横轴表示面在 FPA 对角线上的 NITD 贡献,颜色越深贡献越大,纵轴表示面数,从上到下顺序为 S17—S1 以及倒置后的像面。NITD 最大贡献面转移到第 10 面,光线经第 10 反射后同样经 S11—S12 透镜收集汇聚部分回到像面,路径追迹如图 28 所示,像面光线落点分布如图 29 所示。

在对之前设计结果的针对性优化后,可以看到冷反射已得到明显的改善,S7、S8、S9 面的冷反射已得到比较好的消除,同时除 S10 面外各面对 NITD 的贡献已经比较均匀。针对 S10 面面的贡献,其实该贡献仍然可以处理,如减小 S11—S12 透镜的正光焦度,仅保留 S12 面的负的像散和慧差贡献,在后方再增加一片具有角大正光焦度透镜,但该做法会导致透过率的进一步下降,而如果不增加自由度继续进行优化会导致像质的明显退化,考虑到现有的 NITD 总和已经比较小因此不再继续优化。

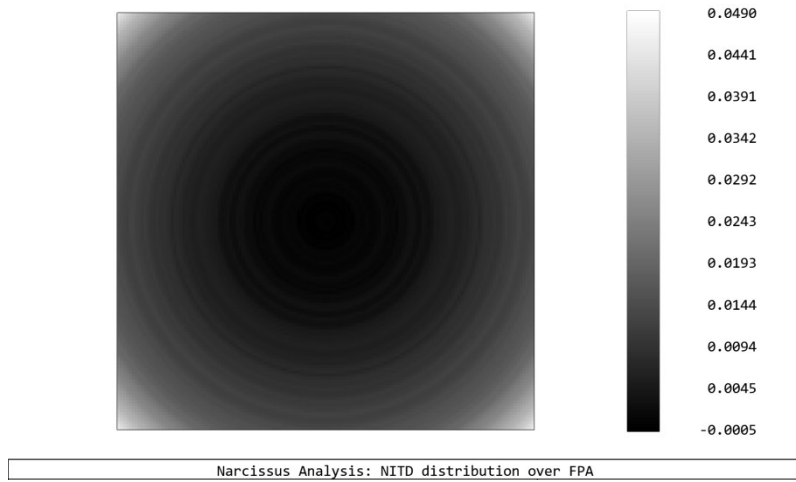


图 26 NITD 探测器分布图
Fig 26 Detector NITD total sum

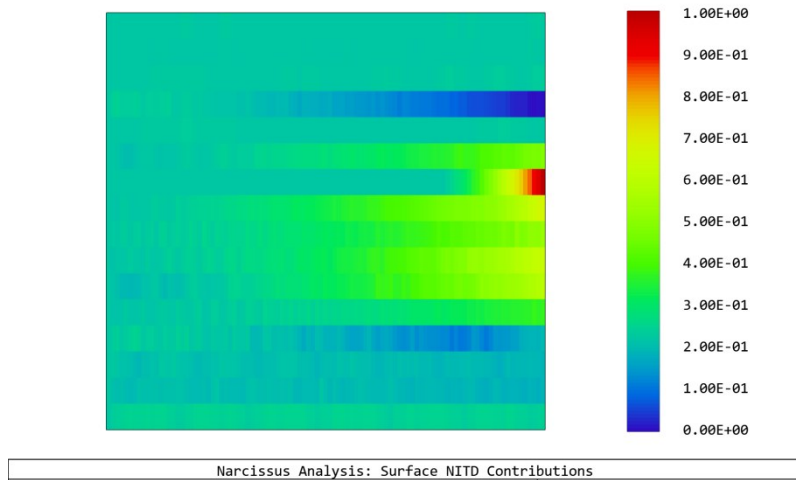


图 27 设计结果各面 NITD 贡献图
Fig 27 The distribution of NITD contributions in each aspect of the design result

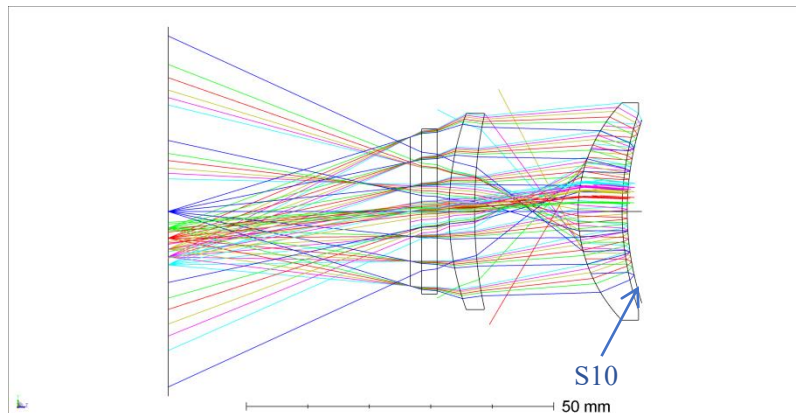


图 28 S10 面反射光线追迹图
Fig 28 S10 surface reflection ray tracing diagram

优化后的后组结构如图 30 所示, 相比之前的设计, 调整了非球面的位置, 将 S7、S8、S13 设置为非球面, 并增大了矢高变化率使冷光线在被反射后尽可能少的到达像面, 增大 S9、S10 面曲率, 使非成像光线经过该

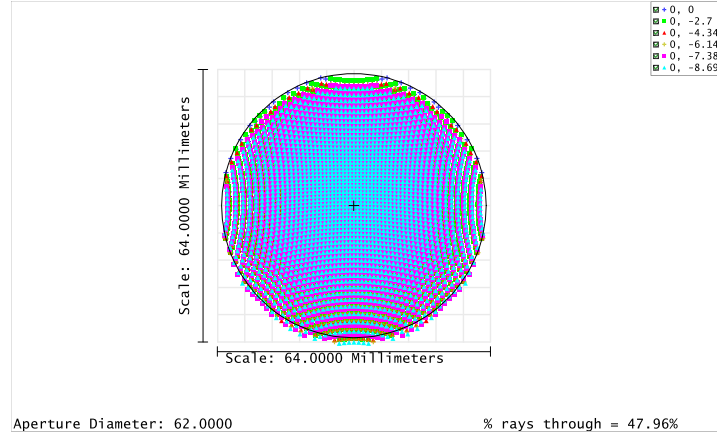


图 29 S10 面反射光线追迹像面光迹图

Fig 29 S7 surface reflection ray tracing image plane ray diagram

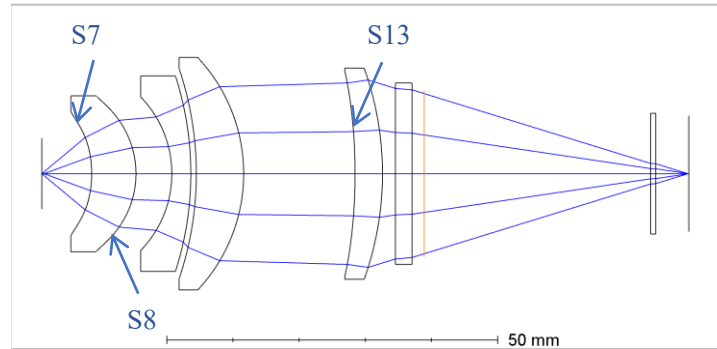


图 30 优化后的后组结构

Fig 30 Optimized post-group structure

面时有更大的概率被发散而非汇聚。

4 总结

本文针对大孔径、中波红外折衍混合成像系统中的超低冷反射设计问题,分析了传统 YNI 和 I/IBAR 评价方法在复杂系统中的适用边界,并结合实际光线追迹与 NITD 计算,对含衍射面的冷反射来源及其优化方法进行了研究。结果表明,优化后由衍射面引起的像面非相干辐照度峰值由 270.4 降至 160.9,降幅约 40.5%;系统像面的最大 NITD 由 0.2309 K 降至 0.0490 K,说明在保证成像性能的前提下,采用面向主导冷光线路径的针对性优化可以实现超低冷反射设计。

本文分析表明,对于大相对孔径且含衍射元件的中波红外系统,YNI 和 I/IBAR 更适合作为设计初期的快速筛选与趋势判断指标,而不能直接等价表征各面实际对像面 NITD 的贡献。某些表面即使其 YNI 或 I/IBAR 数值已满足传统判据,反射光线仍可能在后续透镜组作用下被再次收集并汇聚至像面,从而成为主导冷反射来源。因此,复杂系统中冷反射强弱不仅取决于单个表面的局部反射特性,更取决于反射后光线在系统中的整体传播路径及其是否被后组重新成像到探测器上。对于含衍射面的情况,除设计级次的非成像光线外,非高衍射效率波段的设计级次光线以及非设计级次衍射光线同样可能构成不可忽略的冷反射来源。

基于上述认识,本文认为具有普遍意义的设计策略包括:首先利用 YNI、I/IBAR 及其衍射修正量获得低冷反射初始解;其次结合 NITD 分布和实际光线追迹识别主导贡献面;最后围绕“减少冷光线产生”和“抑制冷光线经后组再次汇聚至像面”两个目标实施针对性优化。当原系统自由度不足以同时兼顾像质与冷反射抑制时,应通过增加非球面等方式引入新的设计自由度。上述流程对同类大孔径中波红外折衍混合系统具有一定参考意义。

对于本文具体镜头,所采取的优化措施具有较强对象相关性,主要包括提高衍射面台阶数并调整其位相系数,以降低非设计衍射级次及非高衍射效率谱段光线的影响;同时调整后组关键面的曲率与面型,并将S7、S8、S13设置为非球面,以削弱反射冷光线被后组再次收集并到达像面的可能性。这些措施与本文镜头的具体结构、孔径分布和冷光线路径密切相关,不能简单推广为通用结构形式,但其所遵循的“先定位主导路径、再围绕路径实施局部结构修正”的思路具有普遍意义。

最后,优化后系统的像面冷反射能量分布呈现更明显的局部化和非连续特征,表明在超低冷反射设计中,冷反射问题已由传统的整体强度压制进一步转化为局部残余能量分布控制问题。后续工作中,仍需结合非均匀性校正以及更适用于复杂非线性约束问题的优化算法,对残余冷反射分布开展进一步研究。

参考文献

- [1] PENG Yuan, WEI Hongda, LIU Yang, et al. Design of Refractive-Diffractive Hybrid Medium Wave Infrared Thermal Suppression Optical System in a Wide Temperature Range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(10): 203-213.
彭远,魏鸿达,刘洋,等.宽温度范围内折衍混合中波红外消热差光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(10): 203-213.
- [2] NIE Huailei, MAO Shan, ZHAO Jianlin. Athermalization Design of Cooled Refractive-Diffractive Hybrid Dual-Band Infrared Optical System[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(08): 383-391.
聂怀乐,毛珊,赵建林.制冷型折衍混合双波段红外光学系统无热化设计[J]. *光学学报*, 2023, 43(08): 383-391.
- [3] ZHOU Zhengping, CHEN Heng, JI Hui, et al. Design of Lightweight Long-Wave Infrared Athermalized Optical System with Hybrid Refractive-Diffractive[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(10): 392-397.
周正平,陈恒,纪辉,等.折衍混合轻量化长波红外消热差光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(10): 392-397.
- [4] XU Huanyao, XU Liang, SHEN Xianchun, et al. Analysis of Influence of Long Back Focal Length on Athermal Design Based on Infrared Multispectral Camera[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(18): 135-143.
徐皖垚,徐亮,沈先春,等.基于红外多光谱相机分析长后焦距对无热化设计的影响[J]. *物理学报*, 2021, 70(18): 135-143.
- [5] LI Jie, LUO Xiao, WU Hanping, et al. Design of Airborne Infrared Optical System Based on Refraction/Diffraction Hybrid[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(02): 215-223.
李杰,罗箫,吴晗平.基于折/衍混合的机载红外光学系统设计[J]. *激光与红外*, 2020, 50(02): 215-223.
- [6] TAO Zhi, WANG Min, XIAO Weijun, et al. Design for Cooled Dual-band Infrared Refractive-Diffractive Hybrid Optical System of Athermalization and Wide FOV[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(11): 195-203.
陶郅,王敏,肖维军,等.折/衍混合大视场消热差红外双波段光学系统设计[J]. *光子学报*, 2017, 46(11): 195-203.
- [7] JAMES W, HOWARD, ABELIRVING R, et al. Narcissus: Reflections on Retroreflections in Thermal Imaging Systems[J]. *Applied. Optics*, 1982, 21(18), 3393-3397.
- [8] LIU Tao. Tth Research of Narcissus for Diffractive Optical Elements[D]. Changchun University of Science and Technology, 2013.
刘涛.衍射光学元件的冷反射特性研究[D]. 长春理工大学, 2013.
- [9] LIU Tao, CUI Qingfeng, YANG Liangliang, et al. Evaluation and Control of Narcissus for Diffractive Surfaces in IR System[J]. *Chin Sci Bul*, 2012, 57: 36-41.
刘涛,崔庆丰,杨亮亮,等.红外光学系统中衍射面冷反射的分析与评价[J]. *科学通报*, 2012, 57(01): 36-41.
- [10] DONG Yiyou. Characterization of Narcissus in Refractive Diffraction-Cooled Infrared Optical Systems[D]. Changchun University of Science and Technology, 2024.
董一优.折衍射致冷红外光学系统的冷反射特性研究[D]. 长春理工大学, 2024.
- [11] SWEATT W C. Mathematical Equivalence Between a Holographic Optical Element and an Ultra-high index lens[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1979, 69(3): 486-487.
- [12] MAO Shan. Design and Application of Imaging Diffractive Optical Elements[M]. Beijing: Science Press, 2024: 37-39.
毛珊.成像衍射光学元件设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2024: 37-39.
- [13] LI Hang. Research on Key Techniques for Medium Wave Infrared Target Detection Device[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
李航.中波红外目标探测装置关键技术研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [14] XIE Hongbo, MENG Qingbin, YANG Lei, et al. Athermalization and Suppression of Narcissus for Medium-Wave Infrared Optical System[J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 038(003): 352-357.
谢洪波,孟庆斌,杨磊,等.中波红外光学系统无热化设计和冷反射抑制[J]. *应用光学*, 2017, 038(003): 352-357.
- [15] WANG Hu, CHEN Qinfang, MA Zhanpeng, et al. Development and Prospect of Stray Light Suppression and Evaluation Technology (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(7): 0751406.

- 王虎,陈钦芳,马占鹏,等.杂散光抑制与评估技术发展展望(特邀)[J].光子学报,2022,51(07):125-180.
- [16] XING Zhenchong. Research on Miniature Telefocal Multiband Common Aperture Optical System[D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- 邢振冲.灵巧型长焦多波段共口径光学系统的研究[D].中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2017.
- [17] LIU Junpeng. Design and Analysis of Membrane Diffractive Image System, 2018.
- 刘骏鹏.薄膜衍射成像系统设计与分析[D].哈尔滨工业大学,2018.
- [18] ZHOU Yan. Study on Design of Infrared Diffractive Imaging Optical System with Large Aperture[D]. The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, 2021.
- 周岩.大口径红外衍射成像光学系统设计研究[D].中国科学院光电技术研究所,2021.

Optimization and Analysis of an Ultra-Low Narcissus in Mid-Infrared Refraction-Diffraction Hybrid Systems

Yang Ding^{1,2}, Pang Ruiguo^{1,2}, Lu Zuofeng^{1,2}, Wang Xianya^{1,2}, Gao Shuangyan^{1,2}, Li Xuyang^{1,2}

(1 *The Space Optical Technology Research Laboratory of the Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710100, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, School of Optoelectronics, Beijing 101400, China*)

Abstract: This paper aims to realize an ultra-low Narcissus design for a cooled MWIR refraction-diffraction hybrid optical system containing a Diffractive Optical Element (DOE), while maintaining high imaging performance under a large relative aperture. The study is focused on three tasks: examining the applicability of conventional Narcissus evaluation criteria in a hybrid optical system, establishing a quantitative analysis route based on actual ray tracing, and obtaining an optical design with significantly suppressed Narcissus irradiance at the focal plane. The objective is to reduce residual Narcissus noise beyond the level achievable by routine low-Narcissus design, so that both image uniformity and temperature-measurement accuracy can be improved in a high-resolution cooled infrared imaging system. A combined qualitative and quantitative procedure was adopted. First, the conventional *YNI* and *I/IBAR* criteria, together with the diffractive correction of *YNI* for the DOE surface, were used to obtain an initial low-Narcissus solution and to evaluate the Narcissus tendency of individual optical surfaces. Second, in view of the limitations of these surface-based criteria in a complex hybrid system, a quantitative evaluation framework based on NITD (Narcissus Induced Equivalent Temperature Difference) and reverse ray tracing was established to characterize the Narcissus effect at the focal plane. In this framework, the propagation paths of Narcissus rays were traced surface by surface, and the contribution of each optical surface to the focal-plane Narcissus irradiance was quantified. For the DOE, the analysis considered not only the design diffraction order, but also non-high-diffraction-efficiency wavelengths in the design order and the contribution of non-design diffraction orders. For the refractive part, the dominant Narcissus sources were identified through NITD contribution analysis and ray-path tracing. Based on these results, targeted optimization was carried out by adjusting the DOE structural parameters, modifying the optical power distribution of the rear group, and introducing additional aspheric degrees of freedom where necessary. The final design was implemented in ZEMAX for a 3 – 5 μm waveband, with a 165 mm focal length, F/1.65, 6° full field of view, 1024 × 1024 detector format, and 12 μm pixel size. The results show that *YNI* and *I/IBAR* can indicate the Narcissus tendency of individual surfaces, but they cannot accurately represent the actual Narcissus level of a complex refraction-diffraction hybrid optical system. Even when the calculated *YNI* or *I/IBAR* values of some surfaces appear favorable, the corresponding surfaces may still produce substantial contributions to the total NITD after full-path ray tracing is considered. For the DOE, the analysis demonstrates that Narcissus is not determined only by the nominal design-order rays; rays at non-high-efficiency wavelengths in the design order and rays generated by non-design diffraction orders also contribute to the focal-plane Narcissus irradiance. In the initial design, the maximum detector NITD reached approximately 0.2309 K, and the dominant contribution originated from the rear group, with surface S7 acting as the principal Narcissus source. After targeted optimization, the irradiance of DOE-related Narcissus rays arriving at the focal plane decreased from about 270.4 to 160.9, corresponding

to a reduction of approximately 40.5%. At the same time, the maximum total NITD was reduced to 0.0490 K. The dominant Narcissus contribution shifted from the original surface to S10, while the contributions of most other surfaces became lower and more balanced. In the optimized system, the Narcissus associated with S7, S8, and S9 was effectively suppressed, and the rear group was reconfigured by using aspheric surfaces at S7, S8, and S13, together with increased curvature of S9 and S10, so that reflected Narcissus rays were less likely to be recollected onto the focal plane. Meanwhile, the system maintained good imaging performance over the operating temperature range. For a cooled MWIR refraction-diffraction hybrid optical system, ultra-low Narcissus design cannot depend solely on conventional surface-based criteria such as *YNI* and *I/IBAR*. A more effective design route is to combine preliminary criterion-based screening with NITD-oriented actual ray tracing, then perform path-oriented optimization aimed at both suppressing Narcissus generation and weakening the recollection of Narcissus rays by the rear group. When the original structural degrees of freedom are insufficient, additional optical-surface freedom, especially the introduction of aspheric surfaces, is necessary to balance imaging performance and Narcissus suppression. The final design verifies that an ultra-low Narcissus level can be achieved in a DOE-containing cooled MWIR imaging system, and indicates that the key issue in further improvement lies in controlling the localized distribution of residual Narcissus irradiance on the focal plane.

Key words: Refraction-diffraction hybrid system; Mid-Infrared; Narcissus; Ultra-Low Narcissus; High resolution

OCIS Codes: 110.3080; 050.1970; 220.3620; 220.2740

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0722001