

冷屏结构与冷屏效率

尹 爽, 徐世春*, 高 玲, 徐思轶, 邓 蔚, 任 海, 杨秀华

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 红外探测器中, 冷屏结构设计直接影响其杂散辐射抑制能力。为进一步提高冷屏效率, 针对冷屏高度、外壳结构对冷屏杂散辐射抑制的影响进行分析。分析采用数学建模的方式, 对计算结果与探测器组件测试结果进行比较, 总结规律。当冷屏高度为 25 mm, 探测器组件测试结果为 5.46%, 当冷屏高度增高到 29 mm, 冷屏的非有效抑制杂散辐射结构和有效抑制杂散辐射结构组件测试结果分别为 6.11% 和 4.87%。提出了一种冷屏结构设计的新思路, 仅增加冷屏高度, 不一定可以提高冷屏效率; 挡光环有效抑制杂散辐射时, 随着冷屏高度增高, 杂散辐射抑制能力变强, 冷屏效率随之增高, 红外探测器性能有所改善, 此时调整冷屏外壳结构不会影响冷屏效率。

关键词: 红外探测器冷屏; 冷屏结构; 冷屏效率; 有效抑制

中图分类号: O435 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200223

Structure and efficiency of cold shield

Yin Shuang, Xu Shichun*, Gao Ling, Xu Siyi, Deng Wei, Ren Hai, Yang Xiuhua

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The cold shield structure has direct effects on stray lights suppressing in infrared detector. In order to further improve the cold shield efficiency, the cold shield height and containment structure influence on stray radiation suppressed were offered based on the analysis. Building mathematical models, DF20 cold shield was chosen as an instance to be calculated by the program. Compared with the test results of the infrared detector, when the cold shield height is 25 mm, the test result is 5.46%. When the cold shield height is 29 mm, the test result of cold shield which restraining the stray radiation effectively 4.87%, the test result of cold shield which restraining the stray radiation ineffectively 6.11%. A creative idea of cold shield structure design was proposed. Just increasing the cold shield height, may not increase the cold shield efficiency. When the baffles restrained the stray radiation effectively, with the cold shield hight increased, the stray radiation suppression capability became stronger, the cold shield efficiency increased, the infrared detector performance was improved. At the same time, changing the cold field structure will not influence the efficiency of the cold shield.

Key words: cold shield of infrared detector; structure of cold shield; cold shield efficiency; restrain effectively

0 引言

在制冷型红外成像系统中,冷屏是阻止视场外部杂散能量到达探测器像面、提高系统对目标响应温度灵敏度的重要组件^[1]。冷屏可以降低器件背景噪声,提高信噪比。目前国内外针对冷屏结构参数变化的研究有少量报道,主要针对冷屏挡光环和开口进行分析与研究^[2-5]。通常认为冷屏高度越高,冷屏效率越好。但实际测试结果不全如此。为查找原因,需要对冷屏结构进行分析,主要从冷屏高度和冷屏外壳两个方面进行讨论。

1 相关原理

1.1 有效辐射与杂散辐射

辐射源分为有效辐射与杂散辐射两部分,从光源直接到达探测器光敏面的辐射为有效辐射,如图 1 所示。

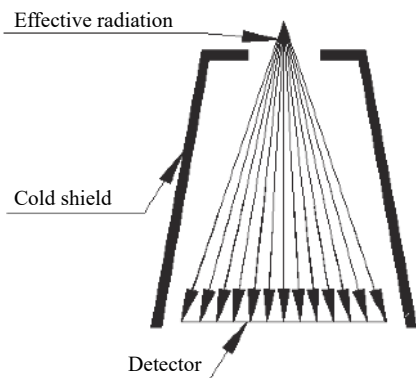


图 1 有效辐射

Fig.1 Effective radiation

其余经过折射、反射或者散射到达探测器光敏面的辐射为杂散辐射,如图 2 所示。

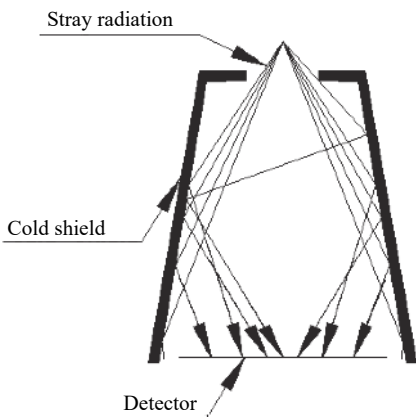


图 2 杂散辐射

Fig.2 Stray radiation

1.2 有效抑制杂散辐射

冷屏不添加挡光环时,随着冷屏高度增加,增高的部分会增大到达光敏面的杂散辐射能量,反而导致冷屏杂散辐射抑制能力降低,如图 3 所示,因此有必要通过添加挡光环来抑制杂散辐射,提高冷屏效率。根据光路传播规律,结合仿真分析设计出的挡光环结构可以有效抑制杂散辐射,起到提高冷屏效率的作用。

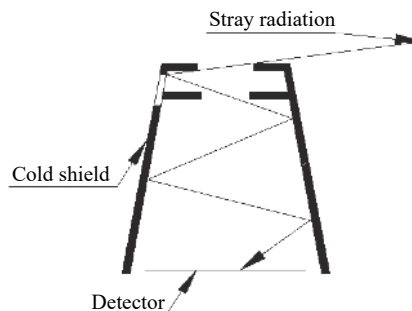


图 3 增加冷屏高度

Fig.3 Increase the cold shield height

2 冷屏结构与冷屏效率的分析与讨论

红外系统应用于匹配制冷型探测器时必须要考虑出瞳与红外探测器冷屏的匹配方式。文中在红外光学系统出瞳与冷屏完全匹配的前提下,从冷屏高度和冷屏外壳两方面对冷屏效率进行讨论。

冷屏效率的讨论采用试验与仿真相结合的方式,试验中以探测器非均匀性测试结果作为对比参数,仿真分析中以杂散辐射能量和有效辐射能量的变化幅度、分布情况的综合结果作为对比参数。

2.1 冷屏高度对冷屏效率的影响分析

采用视场角的计算方法,参照公式(1)^[6]以 640×512 探测器为例, F 数不变时,对冷屏内表面经过黑化处理后,对不同高度的冷屏结构进行非均匀性计算(如图 4 所示):

$$\omega' = \arctan L/h \quad (1)$$

冷屏高度分别为 23、25、29 mm,芯片尺寸为 19 mm×16 mm,对应的探测器非均匀性理论值分别为 7.85%、6.72% 和 5.09%。冷屏高度越高,非均匀性越小。根据以上计算数据,采用相同探测器组件、相同芯片进行对比测试。

测试数据见表 1。

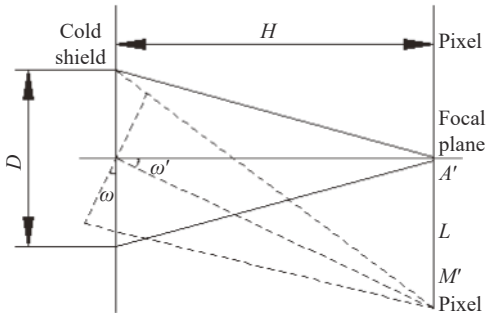


图 4 像元视场角关系示意图

Fig.4 Schematic diagram of pixel FOV

表 1 测试数据

Tab.1 Test data

	No.1	No.2	No.3
Cold shield height/mm	25	29	23
Non-uniformity	5.46%	6.11%	6.95%

表 1 中冷屏高度增高, 探测器组件的非均匀性没有变小, 有的反而变大, 2 号冷屏比 1 号冷屏高 4 mm, 非均匀性反而升高 0.65%。测试数据与理论计算不一致, 就此问题需对冷屏高度与冷屏效率的关系进一步仿真, 查找原因。仿真分析前, 对比试验用冷屏结构发现: 1 号和 3 号冷屏添加了挡光环, 挡光环是按照光路传播路径进行设计的, 各自添加了三片挡光环来有效抑制杂散辐射; 2 号是直筒冷屏, 未添加挡光环; 根据试验结果推测 2 号冷屏有可能因为没有有效抑制杂散辐射而导致冷屏效率降低, 非均匀性变差。因此冷屏结构仿真需要分为有效抑制杂散辐射和未有效抑制杂散辐射两种结构。

冷屏仿真采用朗伯散射模型^[7], 冷屏内表面吸收率设定为 96%, 冷屏仿真数据无量纲。光线传播能量变化关系为: 对于每一个单位辐射面元其产生的辐射模型如图 5 所示, dA_C 为单位辐射面元的面积, 辐射亮

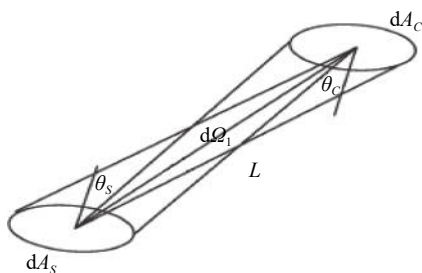


图 5 面元辐照度

Fig.5 Surface element irradiation

度为 L , 由于单位辐射面元的面积很小, 可以把单位辐射面元近似看作点源辐射。

dA_C 在其法线方向的辐射强度 I 的计算公式为:

$$I = L \cdot dA_C \cdot \cos \theta_C \quad (2)$$

式中: θ_C 表示辐射源面的法线方向和辐射方向矢量的夹角。

dA_S 为单位红外探测器光敏面面元的面积, θ_S 表示光敏面的法线方向和辐射方向矢量的夹角, r 表示辐射源面和光敏面的中心距离, 则 dA_C 在 dA_S 上产生辐照度为:

$$E_S = \frac{I \cos \theta_S}{r^2} = L \cdot dA_C \frac{\cos \theta_C \cdot \cos \theta_S}{r^2} \quad (3)$$

当 r 值和 dA_C 面积大小一定时, dA_C 在 dA_S 上产生的辐射照度与 dA_C 的形状无关。根据这一方法, 可以简化复杂表面的辐射产生的辐照度的计算。

将黑体视为朗伯体, 所以公式 (3) 为:

$$E_S = \frac{I \cos \theta_S}{r^2} = \frac{M}{\pi} \cdot dA_C \frac{\cos \theta_C \cdot \cos \theta_S}{r^2} \quad (4)$$

黑体辐射功率计算公式为:

$$P = \frac{M_{(\lambda_1 \rightarrow \lambda_2)}}{\pi} \iint_{A_C} dA_C \frac{\cos \theta_C \cdot \cos \theta_S}{r^2} \quad (5)$$

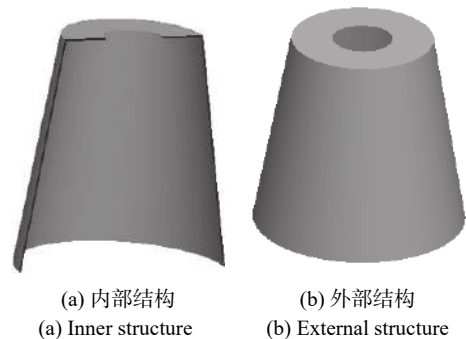
仿真模型如图 6 所示。

仿真计算模型如图 7 所示。

首先针对试验中使用的冷屏结构进行仿真, 分析数据见表 2。

因计算冷屏非均匀性仅考虑有效辐射, 表 2 中非有效抑制的冷屏结构, 冷屏高度增高, 有效辐射随之增大, 符合理论计算冷屏高度与非均匀性变化规律。

1 号冷屏高度 25 mm, 2 号冷屏高度 29 mm, 2 号比 1 号冷屏高度增高 4 mm, 有效辐射增大 37, 杂散辐



(a) 内部结构 (a) Inner structure
(b) 外部结构 (b) External structure

图 6 非有效抑制杂散辐射

Fig.6 Restrain the stray radiation ineffectively

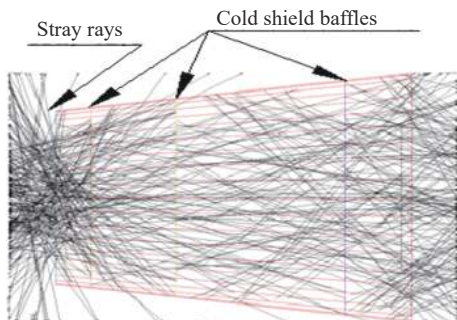


图 7 仿真计算模型

Fig.7 Dynamically simulation model

表 2 仿真分析数据

Tab.2 Simulation analysis data

	No.1	No.2	No.3
Cold shield height/mm	25	29	23
Effective radiation (dimensionless)	281	318	265
Stray radiation (dimensionless)	63.2	329	62

射增大 265.8, 杂散辐射增大幅度高于有效辐射增大幅度, 杂散辐射能量高于有效辐射能量, 严重影响冷屏效率。

根据仿真结果推测, 不添加挡光环, 未有效抑制杂散辐射的冷屏结构, 是由于杂散辐射影响非常大, 导致冷屏高度越高, 冷屏效率反而降低, 探测器组件非均匀性变差的主要原因。

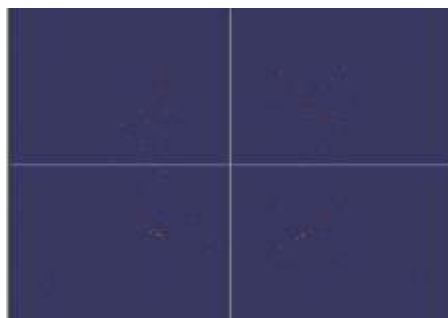
根据以上推测, 按光路传播规律^[8], 重新设计 2 号冷屏结构, 新设计的冷屏结构为 4 号结构。仿真分析数据见表 3。

表 3 仿真分析数据

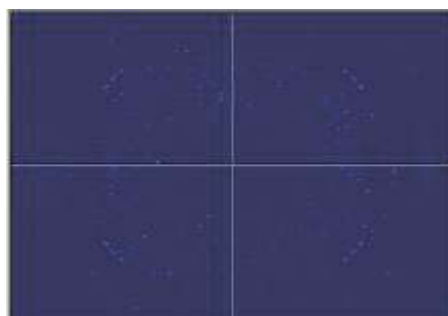
Tab.3 Simulation analysis data

	No.4
Cold shield height/mm	29
Effective radiation(dimensionless)	3.18E+02
Stray radiation(dimensionless)	7.20E+01

冷屏有效抑制杂散辐射时, 有效辐射能量与非有效抑制冷屏结构相同。表 2 与表 3 中 1 号、3 号和 4 号冷屏仿真结果相比较, 随着冷屏高度增高, 杂散辐射的增幅为 1.2 和 8.8, 有效辐射的增幅为 16 和 37, 有效辐射的增幅远大于杂散辐射的增幅, 对冷屏效率的提高利大于弊。2 号和 4 号的杂散辐射能量分布仿真结果如图 8 所示。



(a) 2号冷屏
(a) No.2 cold shield



(b) 4号冷屏
(b) No.4 cold shield

图 8 杂散辐射能量图

Fig.8 Stray radiation energy diagram

能量分布仿真图中显示, 2 号的杂散辐射分布非常不均匀, 并且个别位置能量呈红色, 能量很高。4 号冷屏整个像面的杂散辐射分布较均匀, 能量差别小, 与 4 号冷屏测试的非均匀性优于 2 号冷屏的测试结果一致。

选取 4 号冷屏进行探测器组件对比测试, 测试数据见表 4。

表 4 测试数据

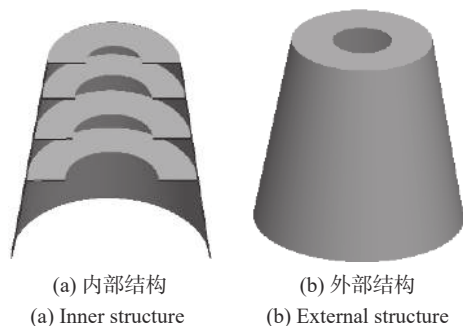
Tab.4 Test data

	No.4	No.2
Cold shield structure	Restrained effectively	Restrained ineffectively
Non-uniformity	4.87%	6.11%

表 4 中, 2 号与 4 号冷屏高度相同, 4 号冷屏有效抑制杂散辐射, 非均匀性相较 2 号降低 1.24%, 冷屏效率提高。

1 号、3 号和 4 号有效抑制杂散辐射的冷屏结构对比如图 9 所示^[9]。

图 10 显示冷屏有效抑制杂散辐射时, 冷屏高度增高, 冷屏效率提高, 探测器组件非均匀性变小。



(a) 内部结构 (b) 外部结构
(a) Inner structure (b) External structure

图 9 有效抑制杂散辐射

Fig.9 Restrain the stray radiation effectively

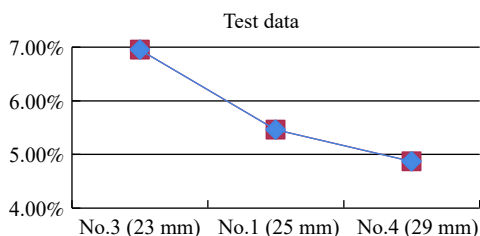
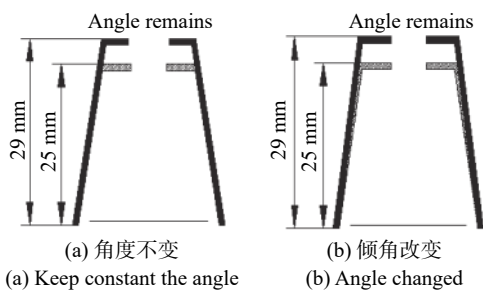


图 10 测试数据

Fig.10 Test data

2.2 冷屏外壳

为提高冷屏效率, F 数不变, 采取加高冷屏高度的方法; 冷屏高度增高时, 冷屏底端不变, 冷屏外壳结构有改变倾角和改变顶端外径两种方式, 如图 11 所示。选取的变换方式不同, 冷屏杂散辐射抑制能力也不同, 为进一步优化冷屏结构^[10], 提高冷屏效率, 需要对两种变换方式进行对比分析。



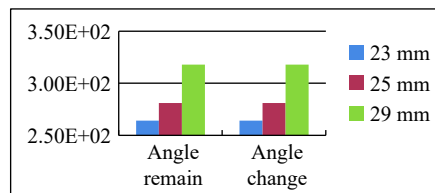
(a) 角度不变 (b) 倾角改变
(a) Keep constant the angle (b) Angle changed

图 11 冷屏结构改变

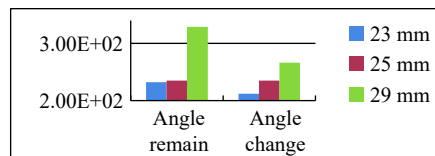
Fig.11 Cold shield structure changed

冷屏改变倾角和改变顶端外径包含有效抑制杂散辐射和非有效抑制杂散辐射两种结构。首先仿真非有效抑制杂散辐射结构, 仿真对比数据如图 12 所示。

图 12 中, 非有效抑制杂散辐射冷屏结构, 顶端和倾角的变化对有效辐射都没有影响, 杂散辐射受影



(a) 有效辐射
(a) Effective radiation



(b) 杂散辐射
(b) Stray radiation

图 12 非有效抑制

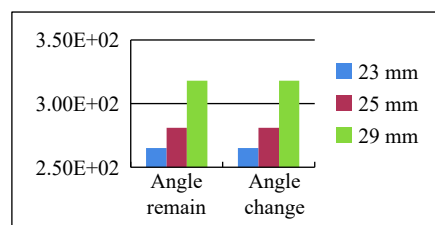
Fig.12 Restrain ineffectively

响较大, 增高 4 mm 时, 倾角变化与顶端变化相差尤其明显。

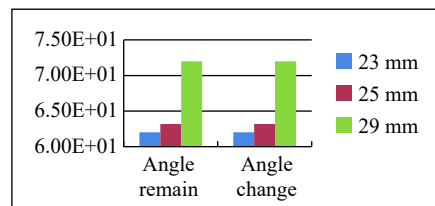
然后仿真有效抑制杂散辐射结构, 仿真对比数据如图 13 所示, 能量分布图如图 14 所示。

从仿真数据和能量分布图分析, 有效抑制杂散辐射冷屏结构, 顶端和倾角的变化对有效辐射和杂散辐射都没有影响。

为验证与实际测试的一致性, 选取顶端和倾角变换方式不同的两组有效抑制杂散辐射冷屏结构进行测试。顶端与倾角变换, 冷屏测试非均匀性分别为



(a) 有效辐射
(a) Effective radiation



(b) 杂散辐射
(b) Stray radiation

图 13 有效抑制

Fig.13 Restrain effectively

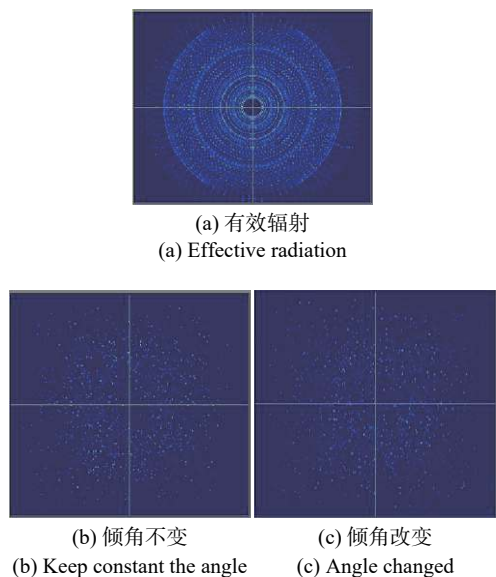


图 14 杂散辐射

Fig.14 Stray radiation

4.44% 和 4%、5.24% 和 5.22%，与仿真结果基本一致。

3 结 论

冷屏结构与冷屏效率的分析为冷屏结构设计提供了一种新思路。冷屏有效抑制杂散辐射时，冷屏高度增高，冷屏效率提高，探测器组件非均匀性减小，性能变好。冷屏不能有效抑制杂散辐射，冷屏高度变化，冷屏效率变化趋势需要仿真分析判断。

有效抑制杂散辐射冷屏结构，顶端和倾角的变化对有效辐射和杂散辐射都没有影响。未有效抑制杂散辐射的冷屏结构，顶端和倾角变化对有效辐射都没有影响，对杂散辐射影响大，冷屏效率变化趋势需要仿真分析判断。冷屏结构与冷屏效率的分析研究对冷屏结构设计有一定的参照意义。

参考文献：

[1] Yang Kaiyu, Jin Ning, Cao Ling, et al. Calculation of energy distribution in image plane for all shapes of cold shields [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1721-1726. (in Chinese)

[2] Yang Kaiyu, Jin Ning, Xu Man, et al. Calculation of photometric inefficiency for all shapes of cold shields with superposition integral method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0311004. (in Chinese)

[3] Li Jianlin, Sun Juan, Zhou Xiaojun. Method of accurate calculation of cold angle cold shield for infrared focal plane

array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1153-1157. (in Chinese)

[4] Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)

[5] Lu Jiatao, Zhang Xinyu, Li Yanhong. Test and analysis of average BRDF in different blackening processes of cold shield [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(2): 196-199. (in Chinese)

[6] Duan Dong, Sha Shengchun, Zhang Shuanglei, et al. Non-uniformity rectification methods of IRFPA detector radiation. [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2621-2624. (in Chinese)

[7] Zhang Zhao, Li Xiansheng, Wan Zhi, et al. Design and measurement of radiometric performance of ultra-large aperture uniform light source [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 44(4): 0410003. (in Chinese)

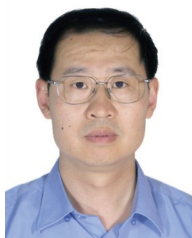
[8] Xia Wang, Sun Wen, Wang Xiaokun, et al. Study on stray light suppression IRFPA Dewar [C]//6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technology, Proceedings of SPIE, 2012, 8417: 211-216.

[9] Jin Ning, Yang Kaiyu, Cao Ling, et al. Optimization design for the shapes of cold shield in infrared systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(1): 0111005. (in Chinese)

[10] Bai Qinglan, Ma Caiwen, Sun Dongyan. The match form between exit pupil and cold shield and the vignetting calculation at a IR optical system [J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(2): 95-97.



第一作者简介：尹爽 (1988—)，女，工程师，硕士，主要从事低温红外探测器杂散光抑制技术研究及冷光学方面的研究。Email: 767839878@qq.com



通讯作者简介：徐世春 (1970—)，男，研究员级高级工程师，主要从事低温红外探测器封装及杜瓦研究工作。发表学术论文十余篇，申请、授权专利十余项，曾荣获兵器工业集团科技进步二等奖，云南省科技进步三等奖等奖项。Email: 13577069530@163.com