

文章编号: 1672-8785(2020)12-0012-06

## 制冷型红外探测器的冷屏 优化设计方法

张杨文 沈 星 王立保 洪晓麦 程海玲

张丽芳 刘道进 曾 勇 黄 立\*

(武汉高德红外股份有限公司, 湖北 武汉 430205)

**摘 要:** 制冷型红外探测器的冷屏通常采用直角结构挡光环。经过挡光环侧壁反射的杂散光可以直接到达焦平面, 导致探测器的成像质量大幅下降。通过对冷屏挡光环结构进行理论分析, 提出了一种可抑制杂散光的挡光环侧壁优化结构。利用 LightTools 软件对优化前后的冷屏进行了模拟分析。结果显示, 杂散光的总功率减少了 71.6%。通过实验验证发现, 探测器的平均响应非均匀性减少了 27.1%, 成像效果明显改善。结果表明, 这种挡光环侧壁优化结构对于抑制杂散光非常有效。

**关键词:** 红外探测器; 杂散光; 冷屏; 挡光环

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.12.002

## Optimized Design Method of Cold Shield in Cooled Infrared Detector

ZHANG Yang-wen, SHEN Xing, WANG Li-bao, HONG Xiao-mai, CHENG Hai-ling,

ZHANG Li-fang, LIU Dao-jin, ZENG Yong, HUANG Li\*

(Wuhan Guide Infrared Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

**Abstract:** The cold shield in the cooled infrared detector usually adopts vanes of right angle structure. The stray light reflected by the sidewall of the vanes can reach the focal plane directly, resulting in a significant decrease in the imaging quality of the detector. Based on the theoretical analysis of the vane structure, an optimized structure of the vane sidewall which suppresses stray light is proposed. The LightTools software is used to simulate and analyze the cold shield before and after optimization. The analysis results show that the total power of stray light decreases by 71.6%. Through experimental verification, it is found that the average response non-uniformity of the detectors decreases by 27.1%, and the imaging effect is significantly improved. The results show that this optimized structure is very effective in suppressing stray light.

**Key words:** infrared detector; stray light; cold shield; vane

收稿日期: 2020-09-07

作者简介: 张杨文(1992-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 主要从事制冷红外探测器的封装技术研究。

\*通讯作者: E-mail: 312094306@qq.com

## 0 引言

除了探测目标的光线以外, 其他被红外芯片接收到的光线均为杂散光<sup>[1]</sup>。在制冷型红外探测器中, 芯片一般在较低的温度(低于 100 K)下工作<sup>[2-3]</sup>。然而系统中直接暴露在外界环境里的结构件的表面温度远高于红外芯片的工作温度。它所产生的红外杂散光以及探测器系统外部的通过非正常光路被芯片接收到的杂散光会形成背景辐射噪声。其中的一次反射杂散光由于传播过程中能量损失不大, 到达焦平面后会严重影响探测器的响应均匀性以及成像质量<sup>[3-6]</sup>。

目前, 国内外红外探测器的冷屏一般采用挡光环来挡住其内壁反射的杂散光。挡光环的侧壁一般为直角结构(见图 1)。经过挡光环侧壁的一次反射, 杂散光有可能直接到达焦平面, 从而对探测器的信噪比和响应均匀性造成不良影响。本文主要研究如何通过优化冷屏挡光环结构来抑制并消除一次反射杂散光。

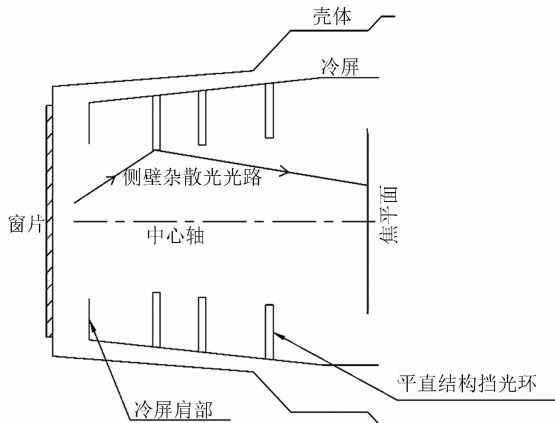


图 1 挡光环侧壁杂散光的示意图

## 1 冷屏挡光环的理论优化设计

侧壁为直角结构的挡光环容易导致一次反射杂散光。因此, 本文通过对侧壁进行结构优化来抑制杂散光。首先, 将挡光环侧壁朝同一个方向并成  $45^\circ$  倒角(见图 2)。其中,  $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$  分别是挡光环侧壁上的任意一点。

极限光路  $AN_1$  与  $N_1B$ 、 $AN_2$  与  $N_2B$ 、 $AN_3$  与  $N_3B$  分别为从冷屏外部通过冷屏挡光环侧壁

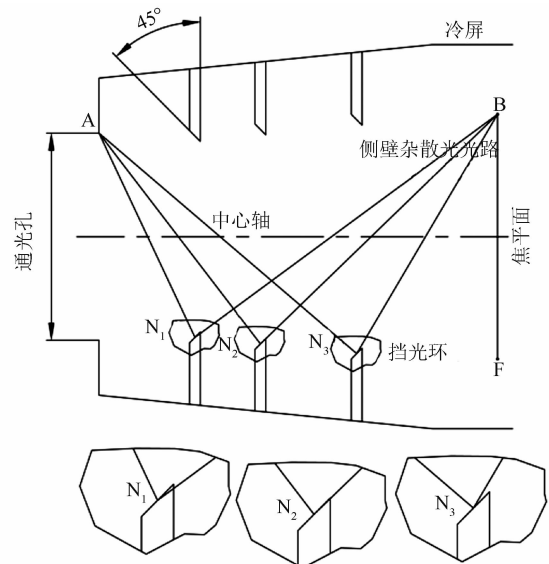


图 2  $45^\circ$  倒角挡光环侧壁的一次反射杂散光示意图  
一次反射到达焦平面的杂散光的光路图。

从图 2 中可以看出, 由于结构本身的阻挡, 经点  $N_1$  和  $N_2$  一次反射的光线不可能直接到达焦平面。而经点  $N_3$  一次反射的光线仍有可能直接到达焦平面。

当挡光环侧壁的倒角  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  和  $\alpha_3$  为锐角时, 过点  $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$  作平行于挡光环侧壁的辅助线(见图 3)。其中, 前两条与焦平面不相交, 第三条可以到达焦平面。

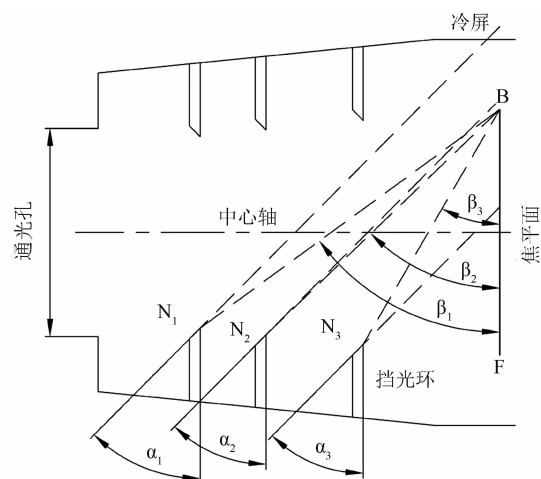


图 3 挡光环侧壁倒角为锐角时的示意图

广义地看, 由于挡光环个数为任意的正整数, 定义  $\alpha_i$  (满足  $0^\circ < \alpha_i < 90^\circ$ ) 和  $N_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ )。倒角尖端顶点与焦平面端点  $B$  的连线与焦平面的夹角为  $\beta_i$ 。

当  $\alpha_i$  足够小时, 过点  $N_i$  作平行于挡光环侧壁的辅助线。如果它不与焦平面 BF 相交, 那么由于本身结构的阻挡, 外部光线经过挡光环侧壁一次反射后就不能直接到达焦平面。

因此, 只需要控制  $\alpha_i$  并使其小于  $\beta_i$ , 就可以在挡光环侧壁上完全屏蔽冷屏外部的一次反射杂散光。

当  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  和  $\alpha_3$  为钝角时, 分别过点  $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$  作平行于挡光环侧壁的辅助线(见图 4)。其中, 前两条可与通光孔相交, 第三条无法到达通光孔。

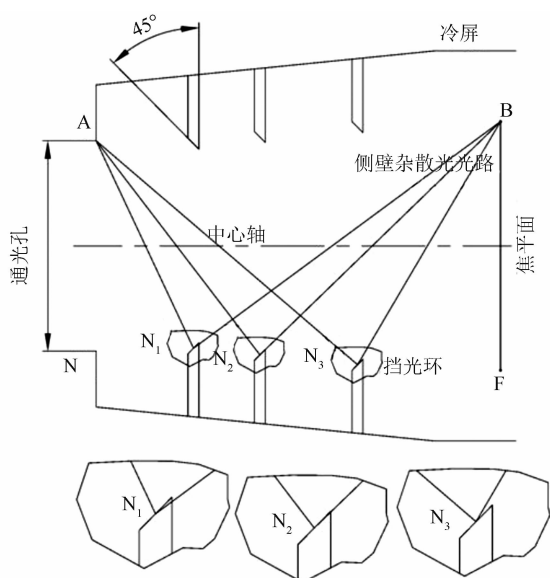


图 4 挡光环侧壁倒角为钝角时的示意图

广义地看, 定义  $N_i$  以及倒角尖端顶点与通光孔端点 A 的连线和肩部 AN 之间的夹角  $\gamma_i$  ( $i=1,2,3,\dots$ )。

当  $\alpha_i > \gamma_i$  时, 过点  $N_i$  作平行于挡光环侧壁的辅助线。它与通光孔 AC 不相交, 即冷屏外部的光线不能直接到达挡光环侧壁, 达到了屏蔽侧壁一次反射杂散光的效果。

综上所述, 当  $\alpha_i$  为锐角且  $\alpha_i < \beta_i$  时, 或当  $\alpha_i$  为钝角且  $\alpha_i > \gamma_i$  时, 挡光环侧壁一次反射的杂散辐射全部都被屏蔽。它们在理论上的屏蔽效果相同。

## 2 基于 LightTools 软件的建模分析

### 2.1 建模过程

冷屏挡光环的优化设计在理论上可以有效抑制一次反射杂散辐射。以此为基础, 本文设计了 A、B、C、D 四款冷屏。在建模中, 其他结构均相同, 具体区别如下: 冷屏 A 的挡光环是直角结构; 冷屏 B 的挡光环采用了图 2 中的全部同向  $45^\circ$  倒角设计; 冷屏 C 的挡光环倒角  $\alpha_i$  为锐角, 且  $\alpha_i < \beta_i$ ; 冷屏 D 的挡光环倒角  $\alpha_i$  为钝角, 且  $\alpha_i > \gamma_i$ 。

模型设置的辐射波段为  $3\sim 5\ \mu\text{m}$ , 规定追迹光线数为 5000 万, 模拟光源辐射功率为 24674 W。定义像元数为  $320\times 256$ , 像元大小为  $30\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$ , 芯片为光线接收器, 窗片与滤光片的透过率和反射率分别为 95% 和 5%。冷屏内壁的热辐射吸收率为 97%, 内壁光线为朗伯散射。基于 LightTools 软件, 采用蒙特卡洛法进行建模(见图 5), 然后分析系统杂散辐射。

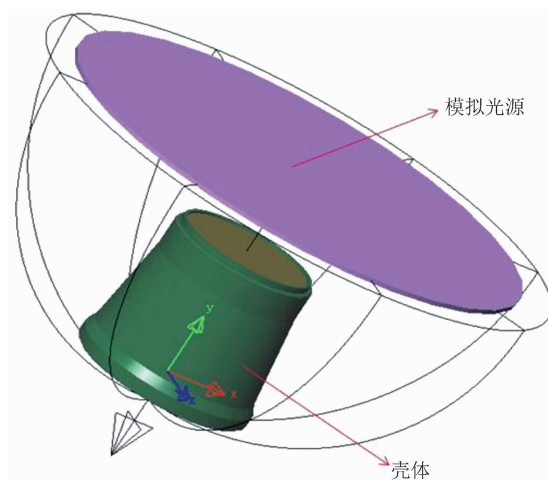


图 5 LightTools 建模的示意图

### 2.2 模拟结果分析

图 6 为利用 LightTools 软件模拟出的光线追迹图像。表 1 列出了不同光线的追迹结果。可以看出, 冷屏 A、B、C、D 模型中的追迹光线数都为 5000 万, 芯片接收到的光线总功率分别为 11.202 W、11.198 W、11.197 W、11.197 W。由于冷屏 B、C、D 设计了倒角结构, 芯片接收到的总功率有所减小。

芯片接收到的非正常光路传输的杂散光总功率分别为  $7.97\times 10^{-3}\ \text{W}$ 、 $3.10\times 10^{-3}\ \text{W}$  (比 A 减少 61.1%)、 $2.26\times 10^{-3}\ \text{W}$  (比 A 减少

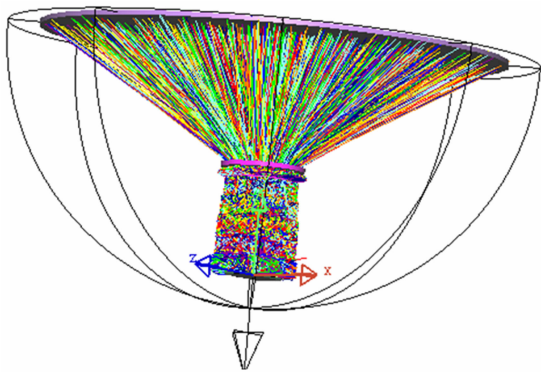


图 6 光线追迹结果图

71.6%, 比 B 减少 27.1%) 和  $2.29 \times 10^{-3}$  W。虽然冷屏 C 和 D 都屏蔽了挡光环侧壁的一次反射杂散光, 但多次反射杂散光的影响导致了两者模拟结果中杂散光总功率的差别。又由于多次反射杂散光在传播中被吸收的能量较多, 因此杂散光模拟结果中冷屏 C 与 D 的杂散光总功率差值只有  $0.03 \times 10^{-3}$  W, 可以忽略不计。

结果表明, 冷屏挡光环侧壁设计的优化对抑制杂散光有十分显著的效果。基于锐角和钝角设计的冷屏挡光环的杂散光抑制效果一致。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验流程

采用冷屏 A 封装 8 支探测器, 并对其响应非均匀性进行测试; 然后将烧红的  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  烙铁放置在探测器镜头前 5 cm 处, 使其分别从上下左右四个方位进入画面; 接着观察探测器图像。完成上述操作后将原探测器拆分, 并更换冷屏 B 进行封装; 同时耦合原制冷机, 再重复上述实验。最后采用冷屏 C 重复该实验。

#### 3.2 实验结果

##### 3.2.1 响应非均匀性验证

表 1 冷屏 A、B、C、D 模型的杂散光模拟结果

冷屏编号	追迹光线数 /万	芯片接收到的 光线总功率/W	杂散光 总功率/W	杂散光 占比/%
A	5000	11.202	$7.97 \times 10^{-3}$	0.071
B	5000	11.198	$3.10 \times 10^{-3}$	0.028
C	5000	11.197	$2.26 \times 10^{-3}$	0.020
D	5000	11.197	$2.29 \times 10^{-3}$	0.020

图 7 所示为采用不同冷屏封装的 8 支探测器的响应非均匀性。表 2 列出了响应非均匀性指标变化的详细数据。其中, 采用冷屏 A 封装的探测器的平均响应非均匀性为 4.02%。换成冷屏 B 后, 平均响应非均匀性为 3.2%, 比冷屏 A 时减少了 20.23%。再换成冷屏 C 后, 平均响应非均匀性为 2.93%, 比冷屏 A 时减少了 27.1%。单个探测器的响应非均匀指标最多减少了 31.7%。

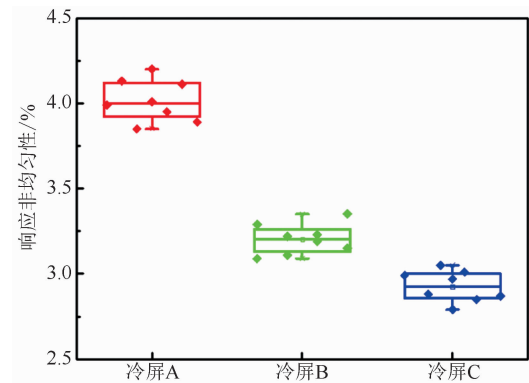


图 7 探测器的响应非均匀性

杂散光会使探测器的响应非均匀性增大<sup>[6]</sup>。由以上数据分析可知, 通过优化冷屏挡光环侧壁结构可以降低这部分杂散光带来的响应非均匀性。

##### 3.2.2 成像验证

表 3 列出了随机选取的单支探测器的烙铁成像结果。在采用冷屏 A 的实验过程中, 当烙铁从上、左、右三个方位进入时, 都明显产生了至少两条杂散光束。在采用冷屏 B 的实验过程中, 只有当烙铁从右边进入时, 才产生了一条模糊的光束。而采用冷屏 C 的实验结果中则无明显光束。

以上分析表明, 由于冷屏 A 采用的平直

表 2 探测器的响应非均匀性数据

探测器编号	探测器的响应非均匀性/%		
	冷屏 A	冷屏 B	冷屏 C
1	4.01	3.23	3.01
2	4.13	3.22	2.97
3	3.95	3.35	2.88
4	3.85	3.19	2.79
5	3.89	3.11	2.85
6	3.99	3.15	2.99
7	4.11	3.29	3.05
8	4.20	3.09	2.87
均值	4.02	3.20	2.93

表 3 采用冷屏 A、B、C 封装的探测器的烙铁成像结果

烙铁进画面的方位	冷屏 A	冷屏 B	冷屏 C
上			
左			
下			
右			

结构挡光环的侧壁反射杂散光严重，因此产生了杂散光束。冷屏 B 采用了基于  $45^\circ$  倒角优化结构的挡光环，使杂散光束明显减少。只有当烙铁从右侧进入画面时，才产生了一条不明显的光束。冷屏 C 采用的挡光环优化设计对探测器侧壁的反射杂散光的抑制效果十分明显，因此在成像实验中，烙铁从四个方向进入时均未产生明显的杂散光束。

#### 4 结论

本文从理论上分析了冷屏挡光环侧壁的优化设计方法。当  $\alpha_i$  为锐角且  $\alpha_i < \beta_i$  时，或当  $\alpha_i$  为钝角且  $\alpha_i > \gamma_i$  时，理论上可以完全屏蔽通过

挡光环侧壁一次反射到达焦平面的杂散光。由 LightTools 软件建模分析可知，这种结构可以将探测器的抗杂散光性能提高 71.6%。通过 8 支样本探测器更换冷屏后的对比实验可知，冷屏结构已优化的探测器的平均响应非均匀性减少了 27.1%。单个探测器的响应非均匀性指标减少了 31.7%。烙铁成像结果也证明了这种冷屏挡光环侧壁设计方法在抑制探测器杂散光中的积极作用。目前，抑制杂散光的理论研究主要局限于对一次反射杂散光的屏蔽。而抑制多次反射杂散光对于进一步提升探测器成像性能的意义不容忽视。接下来，还需要做更多

的研究来填补这方面的空缺。

### 参考文献

- [1] 汪洋. 红外探测器组件杂散光分析及抑制研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
- [2] 刘洋, 安晓强, 王茜, 等. 基于光学离焦量的致冷型长波变焦红外成像系统冷反射效应的分析与控制 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0422003.
- [3] 黄强, 钮新华, 沈学民. 红外光学系统内部热辐射引起的杂散辐射分析 [J]. *红外技术*, 2006, **28**(6): 348-352.
- [4] 牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测器自身热辐射杂散光的分析 [J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2267-2271.
- [5] 张燕, 方家熊. 不同响应波长的 HgCdTe 光导器件噪声分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1369-1373.
- [6] 李召龙, 史浩然, 娄树理. 红外成像传感器系统非均匀性成因研究 [J]. *红外*, 2006, **37**(7): 29-42.