

高温器件冷屏部件热辐射对芯片性能的影响

曾昌行, 陈 军*, 甘游宇, 孙鸿生, 黄一彬, 陈正超, 张志宇

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘 要: 随着高工作温度红外光电子器件的发展, 更高的工作温度下, 冷屏部件的热辐射会带来背景辐射噪声, 对红外探测器的成像造成干扰。为研究高温器件冷屏部件热辐射对芯片性能的影响, 基于蒙特卡洛原理, 采用 3D Studio Max 建立冷屏模型, 提取模型信息编写程序, 计算冷屏部件各部分对芯片的辐射传递因子, 进而得到冷屏部件热辐射在芯片上产生的噪声信号。在给定的参数和条件下, 对某高温器件冷屏进行计算分析, 表明该高温器件冷屏部件的温度需低于 196 K。为抑制高温器件冷屏部件的热辐射, 研究了整体降低冷屏发射率和局部降低冷屏发射率这两种方案。整体降低冷屏发射率可降低冷屏自身热辐射产生的噪声信号, 但会造成外部辐射中经冷屏反射间接到达芯片的杂散辐射噪声信号迅速增加。局部降低冷屏发射率可降低冷屏自身热辐射产生的噪声信号并使外部辐射中经冷屏反射间接到达芯片的杂散辐射噪声信号缓慢增加。采用局部降低冷屏发射率的方案, 对总的杂散辐射的抑制效果与温度有关, 当冷屏部件温度小于 203 K 时, 会引起总的杂散辐射噪声信号增加; 当冷屏部件温度大于 203 K 时, 可以降低总的杂散辐射噪声信号。

关键词: 高温器件; 冷屏; 热辐射; 噪声信号

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240403

引用格式: ZENG Changhang, CHEN Jun, GAN Youyu, et al. Influence of thermal radiation from high operation temperature cold shield component on the performance of IRFPA[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(1): 20240403.

曾昌行, 陈军, 甘游宇, 等. 高温器件冷屏部件热辐射对芯片性能的影响[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(1): 20240403.

0 引 言

红外探测器广泛应用于监视、预警、制导、气象、遥感等领域。制冷型红外探测器采用杜瓦封装形式, 其窗座及冷屏位于光学路径上, 冷屏、滤光片、探测器芯片等位于冷头上, 窗片与滤光片分别位于窗口及冷屏开口处^[1]。其中, 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部件, 可以降低器件背景噪声, 提高信噪比^[2]。

随着半导体材料和芯片技术的不断进步, 2000 年以来, 国际上开始了第三代红外光电探测器的研究。2010 年左右, 业内提出了小尺寸、轻重量、低能耗、低价格、高性能的概念, 相应地红外探测器步入了以大规格、小型化、双色/多色化、智能化和高温工作等为技术特征的时代^[3]。陈军等对碲镉汞高温红外探测

器组件进展进行了综述。1985 年, ELLIOTT C T 等首次提出采用非平衡模式提高光子探测器工作温度的概念, 即高工作温度红外光子器件。1999 年, ELLIOTT C T 等探讨了将光子探测器噪声降低到背景水平所需的条件, 认为移除制冷机并没有理论障碍, 只是因为工艺水平难以实现。同年, DONALD 等提出第三代红外焦平面探测器应具有高性能和低成本等特点, 器件工作温度需提高到 180 K。进入 21 世纪, 欧美从事红外光子探测器研发的企业团体陆续推出高工作温度红外探测器组件^[4]。红外光电探测器一般需要在低温下工作以维持较低的暗电流, 因此, 提高探测器的工作温度是红外光电探测器实现低成本泛在化发展的重要途径。工作温度的升高, 使得冷屏部件热辐射造成的芯片背景噪声迅速增加, 特别是对长波红外探测

收稿日期: 2024-10-26; 修订日期: 2024-11-27

作者简介: 曾昌行, 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事杜瓦热设计等方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 陈军, 男, 研究员级高工, 主要从事微型低温制冷、杜瓦封装及高性能红外探测器制冷组件技术等方面的研究。

器的成像造成严重干扰。因此,需要对冷屏进行特殊设计,以减小因工作温度提升带来的背景噪声^[3]。

1 高温器件冷屏部件热辐射对探测器芯片性能影响的基本原理

为探究高温器件冷屏部件热辐射对探测器芯片性能的影响,首先,计算冷屏部件各部分对芯片的辐射传递因子,得到冷屏部件各部分经系统中各个表面的吸收、反射后达到芯片的光子通量,再计算在芯片上产生的噪声信号。

1.1 蒙特卡洛法计算高温器件冷屏部件对探测器芯片的辐射传递因子

蒙特卡洛法是辐射热传输数值计算中非常重要的方法之一,也称之为统计模拟方法或者随机抽样技术,是一种通过随机变量的统计实验来求解数学物理或工程技术问题的数值方法。该方法是一种射线追踪法,其原理简单,可通过简单的重复运算替代复杂的数学问题求解,一旦使用了足够多的样本,无论问题多么复杂,该方法都能在统计精度的范围内求解,是辐射问题最通用的求解技术^[5]。昆明物理研究所的孙鸿生等^[6]人采用角系数法研究冷光阑热辐射对变 F/λ 数红外探测器芯片性能的影响。然而,在冷屏部件中,由于挡板的存在,冷屏部件各部分存在互相遮挡,特别是当冷屏发射率降低后,大量的能量会通过冷屏自身反射到达芯片,角系数法仅能计算未经反射直接到达芯片的能量,因此需引入辐射传递因子。辐射传递因子的定义为:由单元 i (面元或者体元)发出的辐射经系统中各个单元多次散射(反射、折射和衍射)后,最后到达并被单元 j 吸收的份额。经过随机概率模拟,并且记录下由单元 i 发射且被单元 j 吸收的能束数,即可求出辐射传递因子^[7]。表面 i 发出的能束数为 m ,被表面 j 吸收的能束为 n ,则表面 i 对表面 j 的辐射传递因子为:

$$F_{i,j} = \frac{n}{m} \quad (1)$$

蒙特卡洛法计算辐射传递因子的过程包括模型的建立、能束发射点和发射方向的生成、能束的追踪统计。文献[8]对模型的建立、能束发射点和发射方向的生成进行了详细的介绍,文中只简要介绍这些过程,重点介绍能束的追踪。

1.1.1 模型的建立

高温器件冷屏部件的计算模型包括冷屏、滤光片、基板和探测器芯片等四部分,如图1所示。

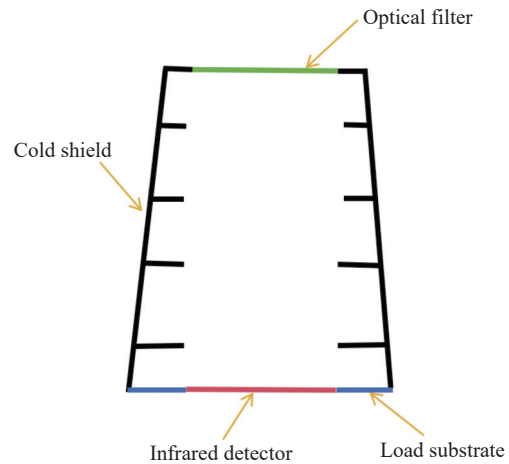


图1 冷屏部件

Fig.1 Cold shield component

提取高温器件冷屏部件参与辐射的表面用3D Studio Max进行建模并完成三角剖分,如图2所示,利用数量众多的小三角形近似模拟真实的辐射发射表面和辐射接收表面,将复杂的辐射计算模型转化为众多小三角形面之间的计算,从而简化对复杂表面热辐射的计算。

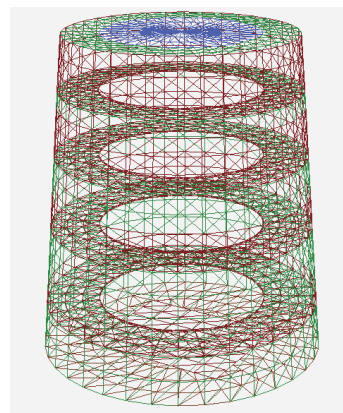


图2 高温器件冷屏部件计算模型

Fig.2 Computational model of HOT cold shield component

1.1.2 能束发射点和方向的生成

冷屏部件上的温度梯度较小,辐射能量在各部件上可认为是均匀的,因此能束发射点需均匀分布。将模型三角剖分后,发射点在三角形内生成,三角形的三个顶点为 A 、 B 和 C , P 为三角形内的一点,如

图3所示。

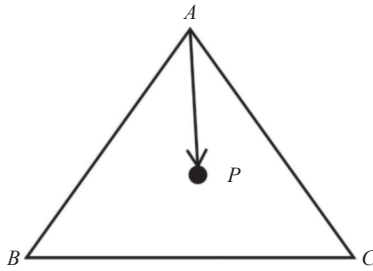


图3 三角形及发射点

Fig.3 Triangle and emission point

在三角形内随机布置均匀的发射点,则点 P 需满足:

$$\vec{AP} = \sqrt{R_x} \cdot \vec{AB} + \sqrt{R_y} \cdot \vec{BC} \quad (2)$$

式中: $\vec{AP}$ 为向量,其余相同表示均为向量; R_x 和 R_y 为 0~1 之间均匀分布的随机数。

工程应用领域中的热辐射传输问题通常十分复杂,如复杂的几何条件,辐射界面条件,随波长和方向变化的辐射特性等,一般假定材料是漫射体,因此能束发射方向需受到兰贝特定律的约束,可由天顶角 θ 和周向角 φ 控制,需满足公式 (3) 和公式 (4)^[9]:

$$\cos\theta = \sqrt{R_\theta} \quad (3)$$

$$\varphi = 2\pi R_\varphi \quad (4)$$

式中: R_θ 和 R_φ 为 0~1 之间均匀分布的随机数; θ 为天顶角; φ 为周向角。

1.1.3 基于路径长度法的能束追踪

能束的追踪方式有碰撞法和路径长度法两种。碰撞的算法背后的基本思想是:能束在整个射线跟踪过程中被视为一个整体,它们不会被分割成更小的部分。基于路径长度的算法却并非如碰撞法,该方法中能束的能量在穿过系统时分布到所遇到的表面和体积单元上,在某种程度上,形成能束的光子是分开作用的,其中一些光子被沿程的介质或遇到的表面所吸收,而其余的光子在介质中继续传播或碰到表面而被反射。基于路径长度的算法从能束的发射开始,能束的能量率表示能束在任何时刻的能量与其发射能量之比,在发射时设为 1.0,能束携带的能量在传播过程中沿程减少,直至减小到一个很小的值^[5]。已开发的程序表明碰撞法并不适用于冷屏模型,当表面发射率

较低时其计算效率很低,很难得到有统计意义的结果,文中采用路径长度法。

1.2 高温器件冷屏部件热辐射在探测器芯片上产生的噪声信号及芯片的目标响应信号

模型建立、能束发射点和能束发射方向生成、能束的追踪统计完成后便可计算得到辐射传递因子,可进一步计算冷屏部件热辐射对芯片性能的影响。文献 [6] 对热辐射对芯片性能的影响进行了详细的推导计算,冷屏部件的热辐射会对芯片各方面的性能产生综合影响,可以从噪声信号的角度进行研究。以冷屏部件中冷屏热辐射对探测器芯片性能的影响计算为例,从冷屏表面发射大量的能束并进行追踪,统计到达芯片的能束数量,得到冷屏对芯片的辐射传递因子 $F_{1,2}$ 。根据辐射传递因子的定义, $F_{1,2}$ 也可以表示为:

$$F_{1,2} = \frac{\Phi_{1,2}}{\Phi_1} \quad (5)$$

式中: $\Phi_{1,2}$ 为由冷屏发出落到芯片像元上的光子通量; Φ_1 为冷屏发出的总光子通量,二者单位均为光子数/s。 Φ_1 的计算公式如下:

$$\Phi_1 = \varepsilon_1 A_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda,T} d\lambda \quad (6)$$

式中: ε_1 为冷屏发射率; A_1 为冷屏表面积; $M_{\lambda,T}$ 为黑体的光谱光子辐出度; λ_1 、 λ_2 为波长。 $M_{\lambda,T}$ 的表达式如下:

$$M_{\lambda,T} = \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (7)$$

式中: h 为普朗克常量; c 为真空中光速; k 为玻尔兹曼常数; T 为冷屏温度。

冷屏的热辐射会被芯片吸收并转换为电信号, $\Phi_{1,2}$ 在像元上产生的噪声电流为:

$$I_n = \Phi_{1,2} \times \eta \times q \quad (8)$$

式中: η 为量子效率; q 为电子电荷量。

产生的噪声电压为:

$$V_n = \frac{I_n \times t_{int}}{C_F} \quad (9)$$

式中: t_{int} 为积分时间; C_F 为积分电容。

目标温度为 T_T , 背景温度为 T_B , 目标在 2π 视场内的光子辐射出射度为 N_T , 背景在 2π 视场内的光子辐射出度为 N_B , 单位均为光子数/s·m²。

$$N_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_T}} - 1} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, TT} d\lambda \quad (10)$$

$$N_B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_B}} - 1} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda, TB} d\lambda \quad (11)$$

式中: $M_{\lambda, TT}$ 为黑体在目标温度 T_T 下的光谱光子辐出度; $M_{\lambda, TB}$ 为黑体在背景温度 T_B 下的光谱光子辐出度。

考虑到视场角的存在, 因此, 焦平面中心像元接收到的目标光子辐射出射度为 N_T^{optics} , 接收到的背景光子辐射出射度为 N_B^{optics} , 有:

$$N_T^{\text{optics}} = \frac{N_T}{4 \times (F\#)^2 + 1} \quad (12)$$

$$N_B^{\text{optics}} = \frac{N_B}{4 \times (F\#)^2 + 1} \quad (13)$$

式中: $F\#$ 为冷屏的 F 数。

目标辐射产生的光电流为 I_T , 背景辐射产生的光电流为 I_B , 信号电流 I_S 为二者差值, 有:

$$I_S = I_T - I_B = (N_T^{\text{optics}} - N_B^{\text{optics}}) \times A_2 \times \eta \times q \quad (14)$$

式中: A_2 为像元面积。

产生的信号电压 V_S 为:

$$V_S = \frac{I_S \times t_{\text{int}}}{C_F} \quad (15)$$

噪声电压 V_n 与信号电压 V_S 的比值为:

$$NSR = \frac{V_n}{V_S} \quad (16)$$

为保证探测器的工作性能, 文中假设噪声电压 V_n 与信号电压 V_S 的比值 NSR 需小于 10%。

2 高温器件冷屏部件热辐射对探测器芯片性能影响的实例计算

随着冷屏部件温度的升高, 其自身辐射会对探测器芯片的性能产生影响。冷屏部件的杂散辐射包括三部分: 冷屏自身辐射、滤光片自身辐射、外部辐射中经冷屏反射间接到达芯片的部分 (后简称外部杂散辐射)。外部辐射中直接到达芯片的部分为有效辐射。某高温器件冷屏部件及探测器芯片的主要参数如表 1 所示。

根据表 1 参数, 冷屏自身辐射波段、芯片响应波段和滤光片截止波段并不相同, 需分波段进行计算,

表 1 高温器件冷屏部件及探测器芯片的主要参数

Tab.1 Main parameters of HOT cold shield component and detector

Parameters	Value
The radiation band of cold shield/ μm	>0
Response band of detector/ μm	1-4.8
The front cutoff wavelength of optical filter $\lambda_1/\mu\text{m}$	3.7
The back cutoff wavelength of $\lambda_2/\mu\text{m}$	4.8
Detector array	640 pixel×512 pixel
Pixel size $a/\mu\text{m}$	15
Quantum efficiency η	0.5
Integral capacitor C_F/pF	0.4
Integral time t_{int}/ms	6
Background temperature T_B/K	293
Target temperature T_T/K	308
F -number of cold shield	2
Height of cold shield/mm	20
Number of baffles	4

芯片的响应波段为 1~4.8 μm , 因此文中仅研究该波段内的辐射能量。为简化问题, 做如下假设: 冷屏部件中的冷屏和基板视为灰体, 其对辐射的吸收和反射与波长无关。由于滤光片对波长的透过具有选择性, 不能视为灰体。为了实现红外滤光片辐射特性的量化分析, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的刘俊池等人研究了一种红外滤光片截止波段等效发射率的反演方法, 研究认为, 在透过波段, 红外滤光片对红外辐射具有高透过率, 其发射率与反射率之和必定接近于 0; 在截止波段, 红外滤光片对红外辐射具有低透过率, 其发射率与反射率之和必定接近于 1。通过反演实验可得, 中波红外滤光片截止波段的等效发射率约为 0.42, 等效反射率约为 0.58^[10]。文中对滤光片做如下假设: 在 1~3.7 μm 时, 滤光片的透射率为 0, 吸收率 (发射率) 设为 0.4, 反射率设为 0.6; 在 3.7~4.8 μm 时, 滤光片的透射率为 1, 吸收率 (发射率) 设为 0, 反射率设为 0。

冷屏内部黑化处理, 发射率 (吸收率) 为 0.95, 由于挡板的遮挡和吸收作用, 外部杂散辐射可忽略, 仅需考虑冷屏和滤光片的自身辐射。从冷屏和滤光片发射出大量能束, 对每一条能束进行持续追踪, 直至能束数量衰减为初始能量的 1% 时追踪结束, 统计到达芯片能束数量, 便可计算得到辐射传递因子, 可进

一步计算得到冷屏和滤光片热辐射在该探测器上产生的噪声信号 V_n 。蒙特卡洛法是一种统计模拟方法,当能束数量达到一定量级就可得到有统计意义的结果。根据冷屏和滤光片的辐射能和表面积分配能束数量,现探究能束总数对计算结果 V_n 的影响,绘制了 150 K 时冷屏和滤光片热辐射在该探测器上产生的噪声信号 V_n 随能束总数的变化情况,如图 4 所示。

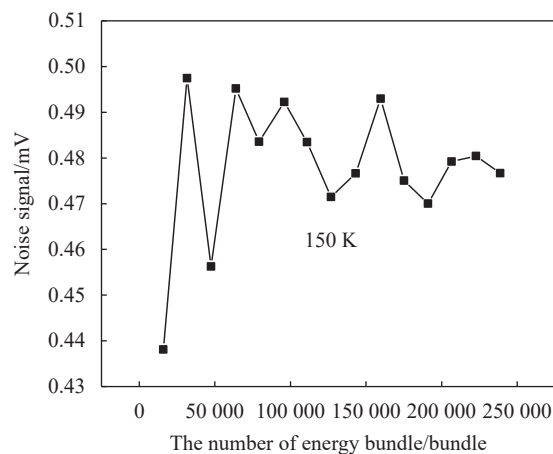


图 4 150 K 时冷屏和滤光片热辐射产生的噪声信号

Fig.4 Noise signal generated by thermal radiation of cold shield and optical filter at 150 K

从图 4 中可以看出,当能束数量大于 100000 时,多次模拟结果的数值比较接近,平均值为 0.48 mV,最大值与最小值相差 0.023 mV,当能束数量大于 200000 时,三次模拟结果的平均值为 0.48 mV,最大值与最小值仅相差 0.004 mV,因此文中选择多次模拟中的最大能束数量 (238 764 条) 进行最终模拟,辐射传递因子的计算结果见表 2。

表 2 辐射传递因子

Tab.2 Radiative exchange factor		
Radiative exchange factor	1-3.7 μm	3.7-4.8 μm
Optical filter to detector	0.0507	-
Cold shield to detector	0.0374	0.0338

3.7~4.8 μm 为滤光片的透射波段,滤光片在该波段不辐射能量,因此不计算该波段内滤光片对探测器芯片的辐射传递因子。在获得辐射传递因子后,分别计算滤光片在 1~3.7 μm 间的光子数和冷屏在 1~3.7 μm 和 3.7~4.8 μm 间的光子数,后乘以响应的辐射传递因

子得到到达芯片的光子数,便可得到探测器的噪声信号。根据表 1 参数计算可得该高温器件的目标响应信号为 774 mV。随着温度从 150 K 升高至 250 K,冷屏和滤光片热辐射在该探测器上产生的噪声信号如图 5 所示。

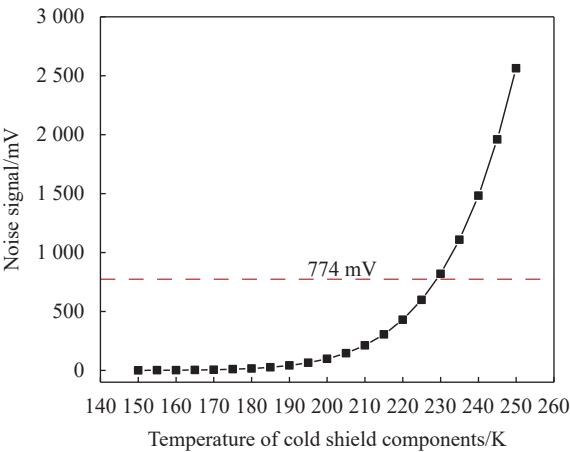


图 5 不同温度下冷屏和滤光片热辐射产生的噪声信号

Fig.5 Noise signal generated by thermal radiation of cold shield and optical filter at different temperatures

温度低于 200 K 时,冷屏和滤光片热辐射产生的噪声信号随着温度升高缓慢增加,当温度高于 200 K 时,噪声信号随温度升高而迅速增加。部分温度下,冷屏和滤光片热辐射在该探测器上产生的噪声信号 V_n 及其与目标响应信号 V_s 的比值见表 3。

假设冷屏和滤光片热辐射产生的噪声信号与目标热辐射产生的响应信号的比值 NSR 需小于 10%,则表 3 部分温度下,冷屏和滤光片热辐射产生的噪声信号及其与目标响应信号的比值

Tab.3 The noise signal generated by the thermal radiation of the cold shield and optical filte and the ratio to the target response signal at some temperatures

Temperature/K	V_n/mV	V_s/mV	$NSR (V_n/V_s)$
150	0.48	774	0.06%
160	1.82	774	0.24%
170	5.82	774	0.75%
180	16.57	774	2.14%
190	42.32	774	5.47%
200	98.71	774	12.75%
210	213.12	774	27.53%

该高温探测器冷屏部件的温度不得高于 196 K。

3 高温器件冷屏部件热辐射的抑制

在冷屏部件温度升高的条件下,降低热辐射可采用负发光冷屏材料和降低冷屏发射率等方法。

当与周围环境之间辐射的平衡条件被打破时,若物体对辐射能量的吸收高于自身的辐射,则该物体将处于负发光状态,工作于制冷条件下的冷屏即处于负发光状态。然而,冷屏表面近似漫灰表面,非平衡辐射条件下基尔霍夫定律依然成立^[11],于是,随着冷屏工作温度的升高,其自身热辐射增大。施加电场或磁场使材料处于非平衡辐射条件同样可获得负发光状态^[12]。此时,材料的热辐射将不再遵循基尔霍夫定律^[13],即发射率不再等于吸收率。将该类材料用于冷屏表面涂层材料时,无需制冷或者深度制冷,冷屏的热辐射即可受到抑制,降低对器件的杂散辐射。半导体材料是常用的负发光材料^[12],通过施加电场耗尽载流子浓度,半导体 PN 结中的载流子浓度可远低于平衡态,从而抑制辐射复合,使其发射率远低于吸收率^[14]。对于中波红外辐射的抑制,常用的材料包括碲镉汞和碲化铟等窄带隙半导体材料。受工艺条件的限制,半导体负发光材料的制备技术复杂和成本高,难以实现大规模和定制化的应用。

为抑制冷屏部件的热辐射,初步探索通过优化设计冷屏结构,抑制冷屏内壁发射、反射的杂散光,以减小因工作温度提升带来的背景噪声。内部黑化的冷屏、整体降低发射率的冷屏和局部降低发射率的冷屏,蒙特卡罗模拟的过程是相似的,当发射率变化时需重新进行蒙特卡罗模拟,为避免重复,文中仅展示最终计算结果。

3.1 整体降低冷屏发射率

降低冷屏发射率可降低冷屏的自身辐射,从而降低对芯片性能的影响,但是发射率的降低导致反射率增加,由冷屏反射引入杂散光便不可忽略。此时杂散辐射包括:冷屏自身辐射、滤光片自身辐射、外部杂散辐射。为简化问题,对外部辐射做如下假设:假设窗片处有一温度为 300 K 的黑体,且窗片对滤光片的角系数为 0.5,经过窗片和滤光片的滤波作用,外部辐射集中在 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 。

冷屏部件温度为 200 K,随着冷屏的发射率从 0.95 降低至 0.05,冷屏自身热辐射产生的噪声信号如图 6 所示。

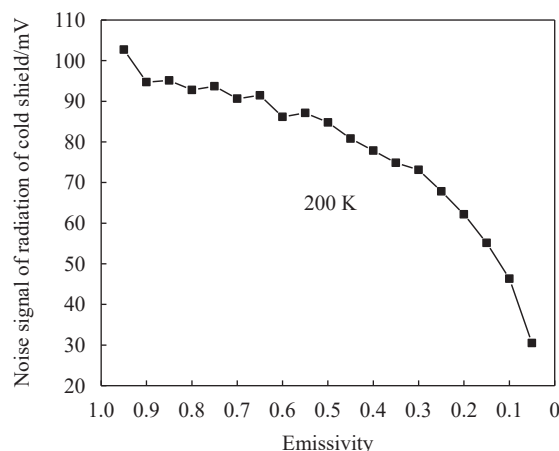


图 6 200 K 时冷屏热辐射的噪声信号 (整体降低发射率)

Fig.6 Noise signal generated by thermal radiation of cold shield at 200 K (total reduction of emissivity)

随着冷屏发射率的降低,冷屏自身辐射产生的噪声信号逐渐下降。进一步研究冷屏发射率整体降低时滤光片自身辐射、外部杂散辐射和总的杂散辐射产生的噪声信号,如图 7 所示。

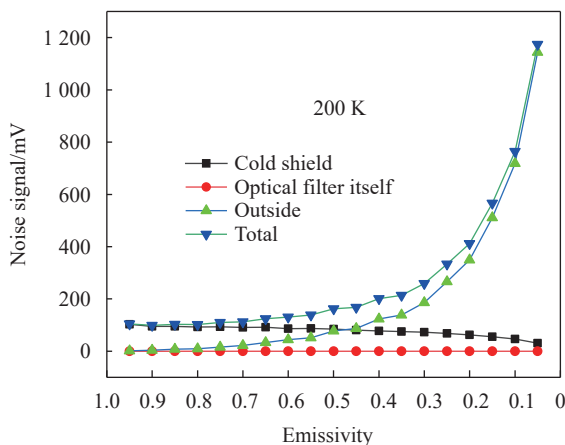


图 7 200 K 时各种杂散辐射的噪声信号 (整体降低冷屏发射率)

Fig.7 Noise signal generated by all kinds of stray radiation at 200 K (total reduction of emissivity)

整体降低冷屏发射率,冷屏自身辐射产生的噪声信号有所降低,但是滤光片自身辐射和外部杂散辐射产生的噪声信号却增加了,特别当发射率较小时,外部杂散辐射产生的噪声信号随着发射率的降低迅速增加导致总的杂散辐射噪声信号也迅速增加。

3.2 局部降低冷屏发射率与整体降低冷屏发射率的对比分析

整体降低冷屏发射率导致外部杂散辐射产生的噪声信号迅速增加,可以通过局部降低冷屏发射率减少对外部辐射的反射,从而降低外部杂散辐射产生的噪声信号。局部降低冷屏发射率的设计如图8所示,外部辐射和滤光片自身辐射不可直接到达的冷屏部分设置为低发射率区(绿色部分),同时低发射率区也是冷屏自身辐射能量可直接到达芯片的区域,降低发射率,从而降低对芯片的热辐射。外部辐射和滤光片自身辐射可直接到达的冷屏部分设置为黑化区(黑色部分),最大程度吸收杂散辐射,同时黑化区也是自身辐射能量不可直接到达芯片的区域。

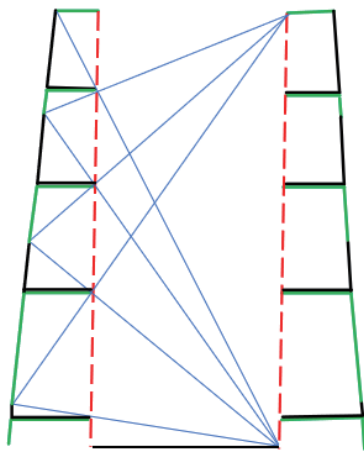


图8 局部降低发射率的冷屏

Fig.8 Cold shield of part reduction of emissivity

冷屏部件温度为 200 K,随着冷屏的发射率从 0.95 降低至 0.05,局部降低冷屏发射率与整体降低冷屏发射率,冷屏热辐射产生的噪声信号的对比如图9所示。外部杂散辐射产生的噪声信号的对比如图10所示。

从图中可以看出,随着发射率的降低,针对冷屏热辐射产生的噪声信号,局部降低发射率方案与整体降低发射率方案相差较小;针对外部杂散辐射产生的噪声信号,局部降低发射率方案低于整体降低发射率方案,特别是当冷屏发射率比较小时,局部降低发射率方案远低于整体降低发射率方案。

3.3 局部降低冷屏发射率

冷屏部件温度为 200 K,局部降低冷屏发射率,随

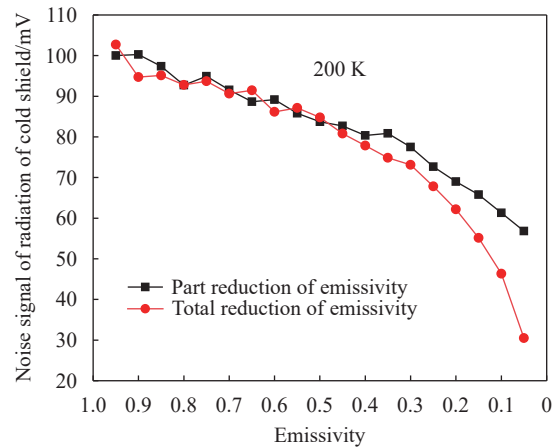


图9 冷屏热辐射产生的噪声信号的对比

Fig.9 The contrast of noise signal generated by thermal radiation of cold shield

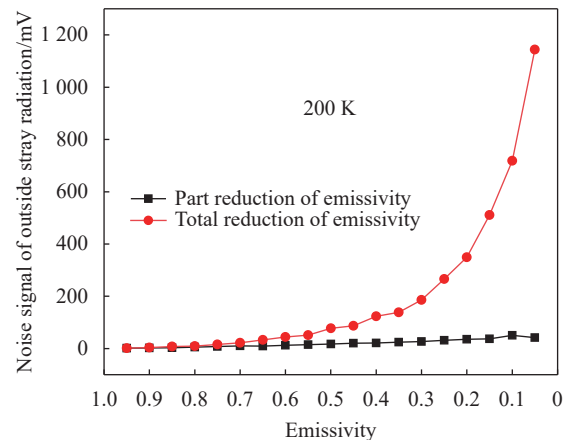


图10 外部杂散辐射产生的噪声信号的对比

Fig.10 The contrast of noise signal generated by outside stray radiation

随着冷屏的发射率从 0.95 降低至 0.05,各种杂散辐射产生的噪声信号如图11所示。

200 K 时局部降低冷屏发射率,可降低冷屏自身辐射的噪声信号,并能一定程度抑制外部杂散辐射,但是外部杂散辐射的噪声信号仍然增加,并导致总的杂散辐射噪声信号增加。

进一步研究不同的冷屏温度下,局部降低冷屏发射率时对总的杂散辐射的抑制情况。冷屏温度为 180 K 时,局部降低冷屏发射率,总的杂散辐射产生的噪声信号如图12所示。

冷屏温度为 197、200、203、206、209 K 时,局部降低冷屏发射率,总的杂散辐射产生的噪声信号如图13所示。

在文中给定的冷屏和参数下,当冷屏温度小于 203 K 时,局部降低冷屏发射率引起总的杂散辐射噪

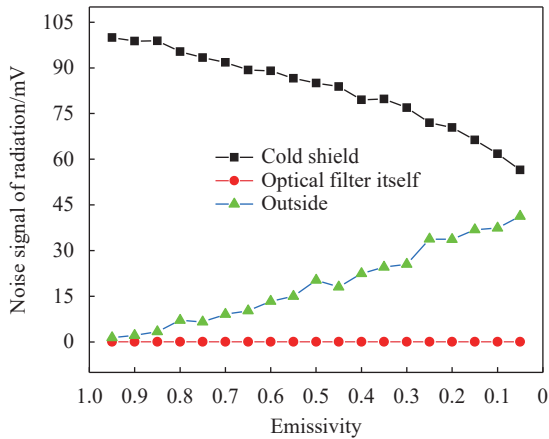


图 11 200 K 时各种杂散辐射的噪声信号 (局部降低发射率)

Fig.11 Noise signal generated by all kinds of strary radiation at 200 K (part reduction of emissivity)

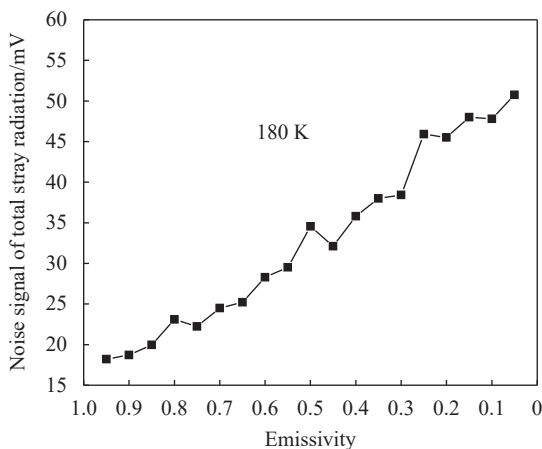


图 12 180 K 时总杂散辐射的噪声信号 (局部降低发射率)

Fig.12 Noise signal generated by total strary radiation at 180 K (part reduction of emissivity)

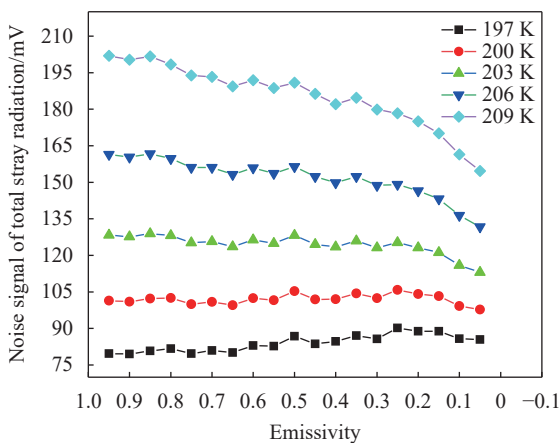


图 13 197、200、203、206、209 K 时总杂散辐射的噪声信号 (局部降低发射率)

Fig.13 Noise signal generated by total radiation at 200, 203, 206, 209 K (part reduction of emissivity)

声信号增加。当冷屏温度大于 203 K 时,局部降低冷屏发射率可以抑制总的杂散辐射噪声信号。220 K 时,局部降低冷屏发射率,总的杂散辐射的噪声信号如图 14 所示。

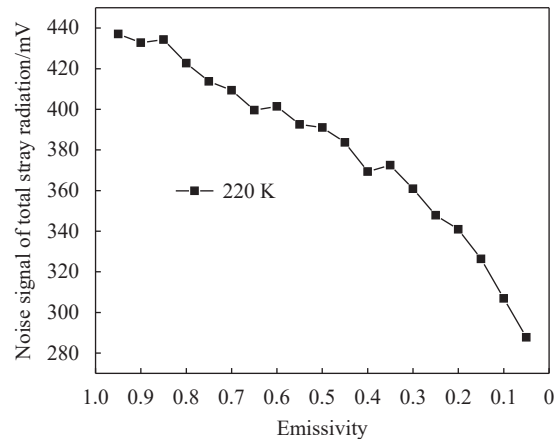


图 14 220 K 时总杂散辐射的噪声信号 (局部降低发射率)

Fig.14 Noise signal generated by total radiation at 220 K (part reduction of emissivity)

220 K 时,局部降低冷屏发射率,发射率由 0.95 降低至 0.5 时,杂散辐射噪声信号降低为 0.95 时的 88%,发射率进一步降低为 0.1 时,杂散辐射降低为 0.95 时的 70%。

4 结 论

对于内部黑化处理的冷屏,在给定的参数下,对某高温器件冷屏部件进行计算分析,若冷屏和滤光片热辐射产生的噪声信号与目标热辐射产生的响应信号的比值需小于 10%,则该高温探测器冷屏部件的温度不得高于 196 K。

整体降低冷屏发射率可降低冷屏热辐射产生的噪声信号,但会造成外部杂散辐射的噪声信号迅速增加。

局部降低冷屏发射率可降低冷屏热辐射产生的噪声信号,并使外部杂散辐射的噪声信号缓慢增加。此外,采用局部降低冷屏发射率的方案,对总的杂散辐射的抑制效果与温度有关,当冷屏部件温度小于 203 K 时,会引起总的杂散辐射噪声信号增加;当冷屏部件温度大于 203 K 时,可以降低总的杂散辐射噪声信号。

参考文献:

- [1] TIAN Ya, FU Zhikai, WANG Guan. A design method of cold shield for infrared detector [J]. *Infrared*, 2022, 43(2): 28-33. (in Chinese)
- [2] YIN Shuang, XU Shichun, GAO Lin, et al. Structure and efficiency of cold shield [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20200223. (in Chinese)
- [3] YE Zhenghua, LI Haohui, WANG Jindong, et al. Recent hotspots and innovative trends of infrared photon detectors [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2022, 41(1): 15-39. (in Chinese)
- [4] CHENG Jun, XI Zhongli, QIN Qiang, et al. Advance in high operating temperature HgCdTe infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(1): 20220462. (in Chinese)
- [5] WANG Dandan. Quantitative evaluation and numerical experiment study on the computational accuracy for monte carlo method of radiative heat transfer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [6] SUN Hongsheng, XIA Ming, CHENG Xiaoping, et al. Influence of thermal radiation of cold diaphragms on the performance of IRFPA with variable F-number [C]//SPIE, 2024, 13154: 1315402.
- [7] WANG Jian. The thermal radiation model building and emulation of optical dome in aerodynamic thermal environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] ZENG Changhang, CHEN Jun, HUANG Yibing, et al. Calculation of the angle factor of the cryogenic infrared detector Dewar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(6): 20240106. (in Chinese)
- [9] 卞伯绘, 李浩. 蒙特卡洛方法在辐射换热计算中的应用 [J]. 自然杂志, 1986(4): 12-16, 84.
- [10] LIU Junchi, LI Hongwen, YIN Limei, et al. Equivalent emissivity inversion method for infrared filters in cutoff band A [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0401002. (in Chinese)
- [11] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 (第 4 版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] HOFFMAN D, GIN A, WEI Y, et al. Negative and positive luminescence in midwavelength infrared InAs-GaSb superlattice photodiodes [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2005, 41(12): 1474-1479.
- [13] LINDLE J R, BEWLEY W W, VURGAFTMAN I, et al. HgCdTe negative luminescence devices for cold shielding and other applications [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35: 1391-1398.
- [14] LINDLE J R, BEWLEY W W, VURGAFTMAN I, et al. HgCdTe negative luminescence devices with high internal and external efficiencies in the midinfrared [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(24): 2748363.

Influence of thermal radiation from high operation temperature cold shield component on the performance of IRFPA

ZENG Changhang, CHEN Jun*, GAN Youyu, SUN Hongsheng, HUANG Yibin,
CHEN Zhengchao, ZHANG Zhiyu

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract:

Objective The cold shield is an important component in the infrared detector assembly to prevent external stray energy from entering the detector focal plane and to improve the system's response temperature sensitivity to targets. High operation temperature infrared detector is one of the research directions for third-generation infrared photon detectors. At higher operation temperature, the stray light from the cold shield component will generate background radiation noise, causing interference with the imaging of the infrared detector. Researching the influence and suppression of thermal radiation from high operation temperature cold shield component has a certain significance for the development of high operation temperature infrared detector assembly.

Methods Based on the Monte Carlo principle, a cold shield model was established using 3D Studio Max (Fig.2).

The model information was extracted to write program to calculate the radiation exchange factors of various parts of the cold shield component to the IRFPA, and the noise signal generated by the thermal radiation of the cold shield component on the IRFPA was obtained. During the internal blackening of the cold shield, the relationship between the noise signal generated by the thermal radiation of the cold shield component on the IRFPA and the temperature was investigated. To suppress the thermal radiation from the cold shield component, two schemes of overall reduction in cold shield emissivity and part reduction in cold shield emissivity were studied and compared.

Results and Discussions When the cold shield is internally blackened, the noise signal generated by the thermal radiation of the cold shield component on the IRFPA at different temperature were calculated (Fig.5, Tab.3). When the temperature is below 200 K, the noise signal slowly increases as the temperature rises; When the temperature is above 200 K, the noise signal rapidly increases as the temperature rises. When the overall emissivity of the cold shield is reduced, the noise signal generated by various stray radiation on the IRFPA at 200 K were calculated (Fig.6-Fig.7). Overall reduction in cold shield emissivity leads to a rapid increase in noise signals from external stray radiation. Similarly, when the part emissivity of the cold shield is reduced, the noise signals generated by various stray radiation on the IRFPA at different temperatures were calculated (Fig.11-Fig.14), and the suppression effect of part reduction in cold shield emissivity on total stray radiation is temperature-dependent.

Conclusions With the given parameters in this study, the calculation and analysis of a certain high operation temperature cold shield component was carried out. If the ratio of the noise signal generated by the thermal radiation from the cold shield and optical filter to the response signals generated by the target thermal radiation is less than 10%, the temperature of the cold shield component must not exceed 196 K. Total reduction in cold shield emissivity can reduce the noise signal generated by the thermal radiation of the cold shield, but it will cause a rapid increase of noise signal from external stray radiation. Part reduction in cold shield emissivity can reduce the noise signals generated by the thermal radiation of the cold shield and slowly increase the noise signal from external stray radiation. The scheme of part reduction in cold shield emissivity has a temperature-dependent effect on the suppression of total stray radiation; When the temperature of the cold shield component is below 203 K, it will increase the noise signal of total stray radiation; When the temperature of the cold shield component is above 203 K, it can reduce the noise signal of total stray radiation.

Key words: high operation temperature infrared detector; cold shield; radiation heat; noise signal