

(2)

180元 HgCdTe 线列器件的
冷屏效应与背景限性能

TN215

龚海梅 李言谨¹ 胡晓宁 徐国森 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所传感技术国家重点实验室, 上海, 200083)

A

摘要 从理论上分析了180元 HgCdTe 线列器件的冷屏效应, 计算了180元 HgCdTe 线列探测器每个光敏元所对应的平面视场角(FOV)及其在300K背景辐射下的背景限探测率, 并将实际的180元 HgCdTe 线列探测器每个光敏元的性能同理论进行了比较, 结果表明180元长波红外 HgCdTe 线列探测器的性能已经接近室温背景的理论极限。

关键词 HgCdTe 线列器件, 冷屏效应, 背景限性能。

汞碲碲 红外

引言

对于达到背景限(BLLP)性能的红外探测器, 在芯片上加上冷屏可以减少光敏元受到的背景辐射通量, 从而提高器件的峰值探测率^[1~4]。通常碲碲汞(HgCdTe)线列探测器采用的是矩形冷屏孔, 则对每个光敏元来说, 平面视场角(FOV)随方位角不同而不同, 而且随该光敏元相对矩形孔的位置而异。由于矩形孔冷屏的效应, 线列中位于不同位置的光敏元所受到的背景辐射通量不同, 从而导致每个光敏元的背景限探测率也不同。我们计算了矩形冷屏孔180元 HgCdTe 线列探测器中每个光敏元所受到的总背景辐射通量, 再换算成对应的等效平面视场角 FOV, 从而得到180元 HgCdTe 线列探测器每个光敏元在300K背景辐射下的背景限性能, 并将实际的180元 HgCdTe 线列探测器每个光敏元的性能同理论进行比较, 结果表明我们研制的180元长波红外 HgCdTe 线列探测器的性能已经接近室温背景限的理论极限。

1 理论

对于线列探测器, FOV 是每个光敏元相对于冷屏孔位置的函数, 对于工作在 BLIP 下的红外探测器, 其峰值探测率与 FOV 的关系如下^[5]:

$$\frac{D^*(2\phi)}{D^*(\pi)} = \sqrt{\frac{\Phi_B(\pi)}{\Phi_B(2\phi)}} = \frac{1}{\sin\phi}, \quad (1)$$

式(1)中 $FOV = 2\phi$, $\Phi_B(\pi)$ 和 $\Phi_B(2\phi)$ 分别为 $FOV = \pi$ (无冷屏时) 和 2ϕ 时探测器受到的背景辐射通量(单位为 $\text{photon}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)。

矩形冷屏孔 ABCD 相对于探测器光敏元的位置如图 1 所示. 线列器件的长度为 $2l$, 矩形冷屏孔的长和宽分别为 $2a$ 和 $2b$, 冷屏相对于器件的高度为 h (l, a, b 和 h 的单位均为 mm).

为了计算线列器件中每个光敏元所受到的背景辐射通量, 我们将整个线列的长度分成 N 等分 (N 为线列器件的元数), 计算每一部分中心所受到的背景辐射通量, 再将矩形孔分成 6 个三角形, 对应于第 1 个光敏元分别为 ΔKM_1B 、 ΔBM_1C 、 ΔCM_1J 、 ΔJM_1D 、 ΔDM_1A 和 ΔAM_1K (见图 1). 因此第 I 个光敏元所受到的背景辐射通量为:

$$\Phi_I = \Phi_{KM_1B} + \Phi_{BM_1C} + \Phi_{CM_1J} + \Phi_{JM_1D} + \Phi_{DM_1A} + \Phi_{AM_1K}$$

由于几何对称性, 通过 ΔKM_1B 、 ΔBM_1C 和 ΔCM_1J 的背景辐射通量与通过 ΔJM_1D 、 ΔDM_1A 和 ΔAM_1K 的背景辐射通量分别相同, 因此有:

$$\Phi_I = 2(\Phi_{KM_1B} + \Phi_{BM_1C} + \Phi_{CM_1J}), \tag{2}$$

第 I 个光敏元受到的通过每个部分的背景辐射通量的计算如下:

1.1 Φ_{KM_1B} 的计算

由以光子数表示的 Plank 定律, 可得温度为 T 的黑体在波长 λ 处的光谱辐射度 $M_\lambda(T)$ 为^[6]:

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

则波长在 0 与 λ_0 之间的黑体辐射度为

$$M_{0-\lambda_0}(T) = \int_0^{\lambda_0} M_\lambda(T) d\lambda = \int_0^{\lambda_0} \frac{2\pi C}{\lambda^4} \frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1} = 2\pi K,$$

其中:

$$K = c \int_0^{\lambda_0} \frac{1}{\lambda^4} \frac{d\lambda}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

则在 $2\phi_1$ 视场角内光敏元受到的辐射通量为^[6]: $2\pi K \cdot \sin^2\phi_1$. 通过 $d\theta_1$ 角度的背景辐射通量为:

$$d\Phi_{KM_1B} = K \sin^2\phi_1 d\theta_1,$$

其中: $\phi_1 = \arctg(\frac{M_1 V_1}{h})$, $M_1 V_1 = \frac{M_1 K}{\cos\theta_1}$, $M_1 K = \frac{2(N-1)+1}{N} l + a - l$,

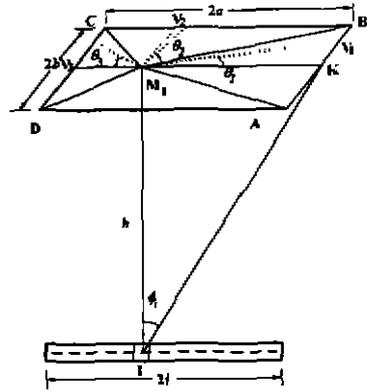


图 1 矩形冷屏孔相对于线列探测器每个光敏元的位置
Fig. 1 Geometry of the rectangular cold aperture with respect to the linear detector array

因此第 I 个光敏元在 ΔKM_1B 中 $d\theta_1$ 角度内受到的背景辐射通量为:

$$d\Phi_{KM_1B} = K \sin^2 \left(\arctg \frac{\frac{2(N-I)+1}{N} \cdot \frac{l}{h} + \frac{a-l}{h}}{\cos\theta_1} \right) d\theta_1, \quad (3)$$

θ_1 的最大值为:

$$\theta_1^{\max} = \arctg \frac{b}{\frac{2(N-I)+1}{N} l + a - l},$$

$$\theta_1 = 0 \rightarrow \theta_1^{\max}.$$

1.2 Φ_{CM_1J} 的计算

同理, 第 I 个光敏元在 ΔCM_1J 中 $d\theta_3$ 角度内受到的背景辐射通量为:

$$d\Phi_{CM_1J} = K \sin^2 \left(\arctg \frac{\frac{2I-1}{N} \cdot \frac{l}{h} + \frac{a-l}{h}}{\cos\theta_3} \right) d\theta_3, \quad (4)$$

$$\theta_3^{\max} = \arctg \frac{b}{\frac{2I-1}{N} l + a - l},$$

$$\theta_3 = 0 \rightarrow \theta_3^{\max}.$$

1.3 Φ_{BM_1C} 的计算

第 I 个光敏元在 ΔBM_1C 中 $d\theta_2$ 角度内受到的背景辐射通量为:

$$d\Phi_{BM_1C} = K \sin^2 \left(\arctg \frac{b/h}{\sin(\theta_2 + \theta_1^{\max})} \right) d\theta_2, \quad (5)$$

$$\theta_2^{\max} = \pi - (\theta_1^{\max} + \theta_3^{\max}),$$

$$\theta_2 = 0 \rightarrow \theta_2^{\max}.$$

将式(3)、(4)和(5)积分后带入式(2), 则可得到第 I 个光敏元受到的总背景辐射通量.

再由式(1)和以下计算得到 N 元线列探测器中每个光敏元所对应的等效平面视场角 FOV 和线列探测器每个光敏元在该背景辐射下峰值探测率的理论极限, 即:

$$\frac{D^*(2\phi_I)}{D^*(\pi)} = \sqrt{\frac{2\pi K}{\Phi_I}} = \frac{1}{\sin\phi_I},$$

$$(FOV)_I = 2\phi_I = 2\arcsin \sqrt{\frac{\Phi_I}{2\pi K}},$$

$$D^*(2\phi_I) = D^*(\pi) \cdot \sqrt{\frac{2\pi K}{\Phi_I}} = \frac{D^*(\pi)}{\sin \frac{(FOV)_I}{2}}.$$

2 结果与讨论

对于 180 元 HgCdTe 线列探测器, 根据实际情况, 各参数的选取如下: $N=180$, $2l=9\text{mm}$, $2a=12\text{mm}$, $2b=1.74\text{mm}$, $h=4.8\text{mm}$. 180 元每个光敏元所对应的具体等效平面视场角见图 2. 图 3 为我们研制的典型 180 元 HgCdTe 线列探测器的性能(实点)及其同理论背景限(实线)的比较. 黑体探测率 D_{ω}^* 的测试采用 500K 标准黑体(温控精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$), 黑体孔径为 8mm, 恒流源的电流输出精度为 1%, 前置放大器的短路噪声 $< 5 \times 10^{-10} \text{V} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$, 信号的调制频率为 1kHz, 有效噪声带宽为 100Hz. 峰值探测率 D_r^* 应以每个光敏元的黑体探测率 D_{ω}^* 与该光敏元的峰值因子 g 的乘积得到. 光谱峰值因子 g 是在实际测量器件的相对光谱响应曲线上, 由辐射通量为 500K、间隔为 $0.01\mu\text{m}$ 步长计算得到的.

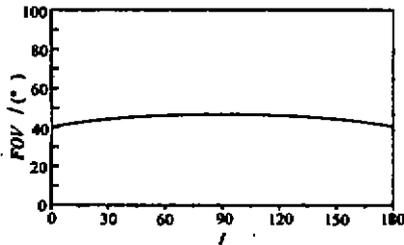


图 2 180 元每个元件对应的具体等效平面视场角
Fig. 2 The actual effective FOV for each element of 180-element linear array detector

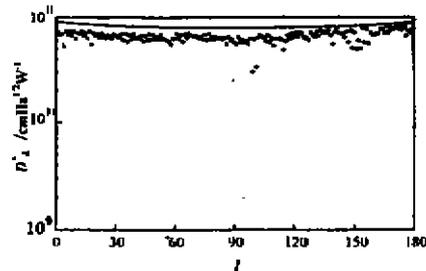


图 3 No. 9407 180 元 HgCdTe 线列探测器探测率同理论背景限性能的比较
Fig. 3 The detectivity of the detector elements in a 180-element linear array (No. 9407) compared with the theoretical background limited properties

从图 3 可以看出, 实际测量得到的每个光敏元对应的峰值探测率因其所对应的等效平面视场角的不同而不同, 并且每个光敏元对应的峰值探测率沿着光敏元序列的分布具有与理论背景限性能相同的趋势, 除了极个别的软损光敏元外, 其它各元的性能均已接近了理论背景限. 从以上分析表明, 我们研制的 180 元长波红外 HgCdTe 线列探测器的性能已经接近室温背景限的理论极限.

参考文献

- 1 Gopal V, Dhar V. *Infrared Phys.*, 1986, **26**:83
- 2 Gopla V, Dhar V. *Infrared Phys.*, 1986, **26**:221
- 3 Dhar V, Gopal V. *Infrared Phys.*, 1986, **26**:343
- 4 Sclar N. *Infrared Phys.*, 1988, **28**:173
- 5 Holter M R, Nudelman S, Sults G H, et al. *Fundamentals of Infrared Technology*, New York, : Macmillan, 1962, Chap. 11
- 6 陈 衡. 红外物理学, 北京: 国防工业出版社, 1985, 5

COLD SHIELD EFFECT IN 180—ELEMENT HgCdTe LINEAR ARRAY DETECTOR AND ITS BACKGROUND LIMITED PERFORMANCE

Gong Haimei Li Yanjin Hu Xiaoning Xu Guosen Fang Jiaxiong

*(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences,
State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai 200083, China)*

Abstract The rectangular cold shield effect in 180-element HgCdTe linear array detector was analyzed. The field of view (FOV) for each element of a 180-element linear array and its background limited performance under 300K background radiation were calculated as well. The actual performances of each element for the 180-element linear array detector were compared with the theoretical calculations. The results show that the performances of the 180-element long wavelength infrared linear array detector developed by the authors have approached the theoretical background limitation at room temperature.

Key words HgCdTe linear array detector, cold shield effect, background limited performance