

文章编号:1001-5078(2024)10-1579-07

· 红外材料与器件 ·

# 长波碲镉汞红外探测器低光通量下的性能研究

魏佳欣<sup>1,2</sup>, 林春<sup>2</sup>, 王溪<sup>2</sup>, 林加木<sup>2</sup>, 周松敏<sup>2</sup>, 李珣<sup>2</sup>

(1. 上海大学微电子学院, 上海 201800; 2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083)

**摘要:**为了评价 n-on-p 长波碲镉汞红外焦平面探测器在低光通量下的性能参数, 搭建了低光通量测试平台。首先, 介绍了低光通量测试平台相关情况, 并对器件的暗电流测试结果进行了分析。然后, 在低光通量测试平台上对长波碲镉汞红外探测器在低光通量下的黑体响应性能。最后, 对比分析不同光通量下性能参数如响应率、波段探测率性能参数的变化, 并给出了器件工作温度改变对器件性能影响的结果。测试结果表明, 对于  $10.8 \mu\text{m}@50 \text{K}$  的碲镉汞焦平面探测器, 在器件工作温度  $50 \text{K}$ , 光通量密度为  $5.8 \times 10^{14} \text{ph} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$  条件下, 器件波段探测率达到峰值  $1.5 \times 10^{12} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ , 此时探测率不再随积分时间的增加而提高。实验计算结果及相关参数可为探测器应用提供参考。

**关键词:**长波; 碲镉汞; n-on-p; 低光通量

**中图分类号:** TN215; TP274 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.011

## Performance study of long-wave HgCdTe infrared detector in low luminous flux

WEI Jia-xin<sup>1,2</sup>, LIN Chun<sup>2</sup>, WANG Xi<sup>2</sup>, LIN Jia-mu<sup>2</sup>, ZHOU Song-min<sup>2</sup>, LIN Xun<sup>2</sup>

(1. School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** To evaluate the performance parameters of n-on-p long-wave HgCdTe infrared focal plane array (IRFPA) detector at low luminous flux, a low-luminous test platform is set up in this paper. Firstly, the low luminous flux test platform is introduced and the dark current test results of the devices are analyzed. Then, the blackbody response performance of long-wave HgCdTe infrared detector in a low luminous flux is investigated on the low-luminous flux test platform. At last, the changes of performance parameters such as responsivity and band detectivity under different luminous fluxes are compared and analyzed, and the results of the influence of device operating temperature on device performance are given. The test results show that for the  $10.8 \mu\text{m}@50 \text{K}$  MCT focal plane detector, the device band detectivity reaches a peak value of  $1.5 \times 10^{12} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  under the conditions of device operating temperature of  $50 \text{K}$  and a luminous flux density of  $5.8 \times 10^{14} \text{ph} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ , when the detectivity is no longer increased with the increase of integration time. The experimental calculation results and related parameters can provide a reference for the application of the detector.

**Keywords:** long-wave; MCT; n-on-p; low luminous flux

**作者简介:** 魏佳欣 (1999 -), 男, 硕士研究生, 主要从事碲镉汞红外探测器低光通量的研究。E-mail: weijiaxin9909@123.com

**通讯作者:** 林春 (1972 -), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事碲镉汞 p-on-n 红外焦平面探测器低频噪声, 天文红外焦平面的制备与表征等方面的研究。E-mail: chun\_lin@mailsitp.ac.cn

**收稿日期:** 2023-12-26; **修订日期:** 2024-02-02

## 1 引言

碲镉汞( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ , MCT) 作为长波红外探测器的主要可选材料之一,其凭借可调的带隙宽度、高的量子效率、快速的响应速度、较高的载流子迁移率等优势成为高性能长波红外探测器的首选材料。地球静止轨道气象卫星的探测器承担着对地表、云层等目标的探测任务,而绝大部分目标的光谱辐射谱段集中在长波红外波段( $8 \sim 12 \mu\text{m}$ ),此波段拥有较高的大气透过率,使其在低光通量探测方面具有比较优势。

长波碲镉汞红外焦平面探测器在天文、空间探测方面的广泛应用<sup>[1-3]</sup>,探测器的截止波长向甚长波方向拓展,探测目标如地表温度的起伏、海洋水文环境的变化、云层温度的高低要求探测器在低光通量下仍有较高的探测能力。风云 4 号气象卫星所使用的长波碲镉汞探测器为光伏型阵列焦平面器件<sup>[4]</sup>。其中的多通道扫描辐射计作为风云卫星的有效载荷,其长波红外(LWIR)通道所使用的碲镉汞焦平面探测器在低光通量下的性能影响着探测仪器的成像质量。

伴随探测器接受的光通量减少,光电流占比降低,器件暗电流特性对器件性能的影响更加显著。而红外探测器的关键性能参数之一探测率相比常温黑体背景条件下性能参数结果有约 20 倍提升<sup>[5]</sup>。因此鉴于对长波红外探测器在低辐射通量背景下焦平面性能测试需求,搭建了低光通量测试平台。利用该测试平台探究了 n-on-p 长波碲镉汞焦平面探测器的响应率、探测率在低光通量下的变化,主要分析了探测器在 50 K 下光通量变化对探测器性能参数的影响,并给出了不同工作温度下探测率实测数值。

## 2 器件信息与器件测试

### 2.1 器件信息

使用液相外延(Liquid Phase Epitaxy, LPE)方法进行材料生长,长波材料的 Cd 组分  $x$  约为 0.209。长波阵列碲镉汞器件单元结构为 n-on-p 平面结,结构示意图如图 1 所示。其规格为 320 元,像元中心距为  $56 \mu\text{m}$ ,像元面积为  $56 \times 56 \mu\text{m}^2$ 。

实验中利用傅里叶变换的方法对器件的光谱进行了测量。在器件工作温度分别为 50 K、60 K、70 K、80 K 下通过傅里叶红外光谱仪与致冷设备对

探测器的光谱响应特性进行测试。分别测量器件光谱和背景光谱,通过软件对数据进行归一化处理,图 2 是焦平面器件分别在各工作温度下的光谱响应曲线。

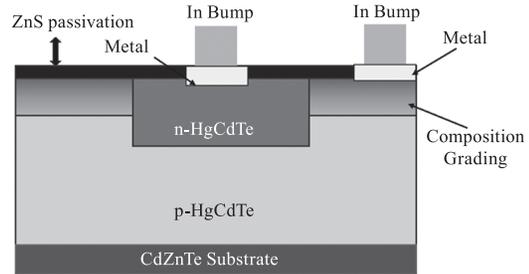


图 1 n-on-p 型 HgCdTe 器件单元结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cell structure of the n-on-p type HgCdTe device

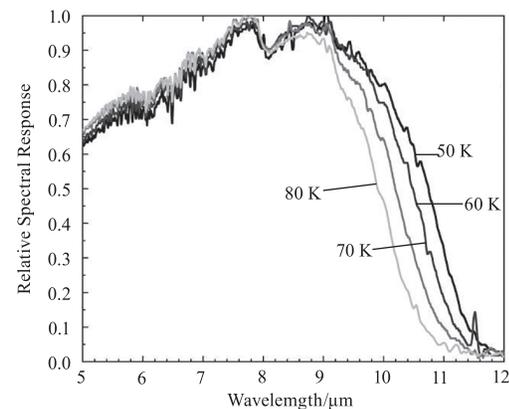


图 2 长波 HgCdTe 焦平面探测器(50 ~ 80 K)相对光谱响应曲线

Fig. 2 Relative spectral response curve of long-wave HgCdTe FPAs (from 50 to 80 K)

该器件在工作温度 80 K 的 50% 后截止波长约为  $9.9 \mu\text{m}$ ,在 50 K 工作温度下的后截止波长约为  $10.8 \mu\text{m}$ 。

### 2.2 测试平台

为了获得低光通量的测试条件,搭建了如图 3 所示的低光通量测试平台,测试中采用斯特林制冷机驱动的低温黑体,通过其配套的交流电控箱进行温度调节。为了将红外辐射限制在较低光通量下,采用斯特林制冷机对低温黑体进行制冷以获得不同黑体温度下的辐射光通量。致冷设备可以提供的器件工作温度范围可以覆盖  $40 \sim 80 \text{ K}$ ,低温黑体温度可实现从  $120 \sim 200 \text{ K}$  的调节。

器件安装位置应与低温面源黑体处于同一水平高度处。通过在探测器外加装两个开孔冷屏,且将黑体置于两冷屏中间处,以达到减少探测器接收到

视场外的腔体热背景噪声并减少背景光子通量的目的。测试时需提供一个低光通量的稳定黑体辐射源给予探测器以红外辐射。滤光片选用带通滤光片,将其与适当圆形孔径大小的滤光片支架固定于冷屏中心处并在冷屏窗口上加装工作谱段为 9.1~9.4  $\mu\text{m}$  的滤光片进一步限制光通量,光通量数值范围覆盖  $3 \times 10^{14}$  ( $\text{photon} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) 到  $3 \times 10^{15}$  ( $\text{photon} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ),冷屏 F#为 3.2,光路示意图如图 4 所示。

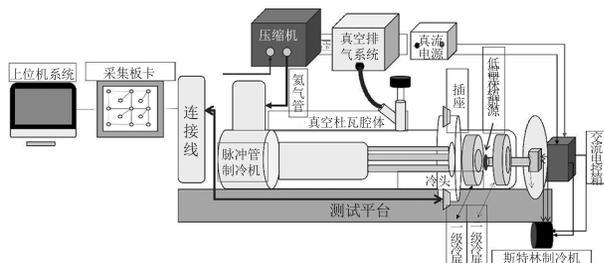


图 3 低光通量测试平台示意图

Fig. 3 Schematic diagram of low luminous flux testing platform

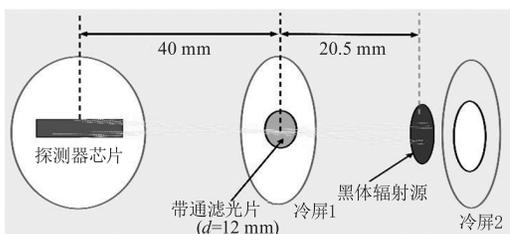


图 4 光路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the optical path

### 2.3 光通量计算

由普朗克辐射定律的光子流表现形式,计算得到特定温度下黑体辐射的光子通量密度,在两个不同黑体辐射背景下对探测器输出信号电压进行数据采集。通过计算两个不同黑体温度的光通量差值,结合探测器光敏元面积大小、积分时间以及光学系统的 F#计算辐射到探测器光敏元上的光子数大小。根据以下公式计算理论上到达探测器表面的光子数数值。

$\lambda_1$  到  $\lambda_2$  的波段温度为  $T$  的黑体光子辐出度公式:

$$N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1} d\lambda \quad (1)$$

不同黑体温度的光子辐出度差值:

$$\Delta N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_1}} - 1} d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4} \times$$

$$\frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T_0}} - 1} d\lambda \quad (2)$$

光子数公式为:

$$Photons = \Delta N \times A_d \times \tau_{int} \times (4 F^2 + 1)^{-1} \quad (3)$$

电子电荷总量:

$$Q = Photons \times \eta \times q \quad (4)$$

式中,  $c$  为光速;  $\lambda$  为波长;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为滤光片的工作谱段;  $k_B$  为尔兹曼常数;  $T$  为黑体热力学温度,单位为 K;  $T_1$  为高黑体温度;  $T_0$  为低黑体温度;  $q$  为电子电荷量;  $N$  为黑体光子辐出度;  $\eta$  为量子效率;  $F$  为探测器光学系统的 F#;  $Photons$  为光子数;  $A_d$  为光敏元面积;  $\tau_{int}$  为积分时间。表 1 为不同黑体温度的光子数计算结果。

表 1 不同黑体温度的光子数计算结果

Tab. 1 Calculation results of the number of photons at different blackbody temperatures

| Blackbody temperature/K | photons flux density/<br>( $\text{ph} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) | Photons            |
|-------------------------|---|--------------------|
| 193                     | $2.47 \times 10^{15}$   | $11.5 \times 10^5$ |
| 175                     | $1.07 \times 10^{15}$   | $4.99 \times 10^5$ |
| 161                     | $4.94 \times 10^{14}$   | $2.30 \times 10^5$ |
| 150                     | $2.47 \times 10^{14}$   | $1.15 \times 10^5$ |

### 2.4 测试方案

探测器性能采用低温面源黑体差分法进行测试,不同于常温条件下黑体温度分别为 293 K 和 308 K,低光通量探测的目标温度一般低于 300 K。探测器的正常工作对其工作温度有着严苛的要求。器件的工作温度高低直接影响探测器工作时暗电流的大小,而大的暗电流制约探测器在低光通量应用下的探测能力。因此,选择适当大小的工作温度对于最大限度发挥器件探测能力相当关键。

首先通过对器件在不同工作温度下的暗电流进行测试,根据不同工作温度下暗电流量级,根据探测器所要探测目标的红外辐射谱段,确定合适的器件工作温度,再利用低温黑体辐射源获得低光通的测试条件,以对器件在不同光通量下的黑体响应性能进行测试。结合器件的同组分中测条的低温光谱响应测试和液氮杜瓦暗电流测试结果,与器件变温暗电流相比较是否一致。最后用公式计算器件性能参数结果并对其变化进行分析。

采取在冷屏上加装适当谱段的滤光片与调整探测器工作温度的措施使得输出信号达到半阱状

态<sup>[6]</sup>。带通滤光片使得特定波段的红外辐射到达探测器表面,同时进一步限制不同黑体温度下光通量的变化的范围,器件工作温度的选择决定了探测器工作时的暗电流大小。根据器件的暗电流测试结果与理论计算黑体辐射源辐射通量产生的光电流大小,在确保器件测试信号的信噪比足够的条件下,对器件在低光通量下的性能参数进行测试。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 长波线列器件暗电流

对于在低光通量工作的探测器,器件暗电流的大小直接影响其在低光通量下的性能参数。因为长波碲镉汞红外探测器暗电流大小受其工作温度影响,需要制冷以使器件工作正常。当探测器接受的红外辐射通量处于较低水平,此时要求器件暗电流远小于信号产生的光电流。这表明器件暗电流水平的高低影响探测器在工作谱段的探测性能。

在盲冷屏下,对器件在 40~80 K 不同工作温度下的暗电流进行了测试<sup>[7]</sup>。

其中暗电流计算由公式(2)给出:

$$V_{\text{out}} = \frac{(I_{\text{op}} + I_{\text{dark}}) \times \tau_{\text{int}}}{C_{\text{int}}} \quad (5)$$

式中, $V_{\text{out}}$ 为探测器信号输出电压值, $I_{\text{op}}$ 为光电流, $I_{\text{dark}}$ 为暗电流, $\tau_{\text{int}}$ 为积分时间, $C_{\text{int}}$ 为积分电容。

在视场为 $0^\circ$ 时:

$$I_{\text{dark}} = C_{\text{int}} \times \frac{\Delta V}{\Delta \tau_{\text{int}}} \quad (6)$$

式中, $I_{\text{dark}}$ 为暗电流; $\Delta V$ 为两不同积分时间下像元输出电平的差值; $\Delta \tau_{\text{int}}$ 为不同积分时间的差值。

不同偏压(0~300 mV)下的器件变温暗电流测试结果如图5所示。

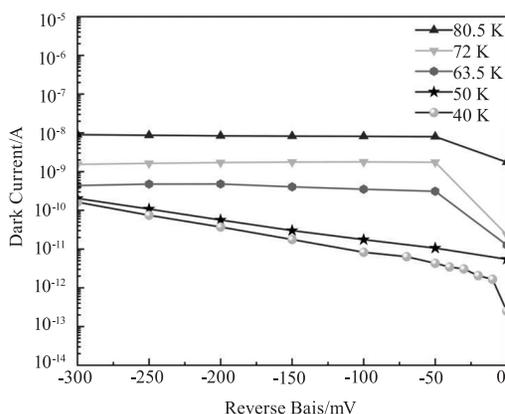


图5 40~80 K下偏压变化对暗电流的影响

Fig. 5 Influence of different reverse bias on the dark current at 40~80 K

由图中可得在偏压 -50 mV 时,在工作温度 50 K 时,器件暗电流较高工作温度较小;而在温度 40 K 时,暗电流数值相比 50 K 时减小幅度小,因此选择 50 K 作为器件测试的工作温度。

从不同工作温度下的暗电流与偏压的变化中可知,当器件工作温度低于 50 K 时,电流-电压曲线( $I-V$ )表现为随反向偏压增加,暗电流逐渐增大。此时暗电流的组成成分中扩散电流不再是主要成分,产生-复合电流和辅助隧穿电流占主导地位<sup>[8]</sup>。在 63.5 K 工作温度以上,反向偏压从 -50 mV 到 -300 mV 这段曲线呈相平状态,这表明器件的暗电流受偏压变化影响较小,此时扩散电流为暗电流的主要成分。

#### 3.2 长波线列器件性能

##### 3.2.1 响应率

黑体响应率随光通量变化关系如图6所示。低光通量下器件黑体响应率随光通量的降低而减小。短积分时间下响应率与光通量线性度较好,而在长积分时间下响应率与光通量不再呈线性变化。在光通量降低到  $3 \times 10^{14}$  ( $\text{photon} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) 时,器件响应率降低,此时积分时间的增加对于器件探测性能提升效果不显著。当积分时间从 25 ms 增加到 70 ms 时,响应率从  $1.62 \times 10^8$  (V/W) 增加到  $4.50 \times 10^8$  (V/W),响应率提高了约 2 倍。因此在低光通量下,拉长积分时间可以使响应率提高。

在较低光通量条件下,由于探测目标的信号微弱,即使拉长探测器读出电路的积分时间以增加探测器接收辐射的时间,探测器的响应率也将呈降低趋势。

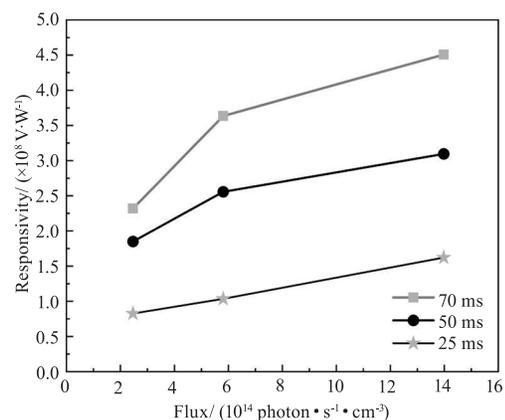


图6 50 K下黑体响应率与光通量的变化关系

Fig. 6 The relationship between the blackbody responsivity and the photon flux density at 50 K

### 3.2.2 探测率

探测率表征了红外焦平面探测器探测目标能力的高低,探测率越大,表明其探测目标的能力越强,器件的性能越好。低光通量下器件的平均黑体响应随黑体温度的降低而减小。当探测器视场内的光通量降低,增加积分时间,因探测器的探测率与积分时间的平方根成正比,理论上积分时间的增加可以提高探测率  $D^*$ [9]。

表2为截止波长达10.8 μm的长波红外线列焦平面探测器的性能参数。

表2 碲镉汞红外探测器主要性能  
Tab.2 The main properties of HgCdTe infrared detector

| 技术参数  | 参数                   |
|---|----------------------|
| 规格  | 320                  |
| 截止波长/μm   | 10.8                 |
| 电荷容量/Me <sup>-</sup>  | 22.5                 |
| 黑体温度 $T_l/T_0$ /K   | 175/160              |
| 波段探测率 ( $\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ) | $1.5 \times 10^{12}$ |
| 噪声等效温差/mK   | 22.7                 |
| 黑体响应/ ( $\text{mV} \cdot \text{K}^{-1}$ )                       | 15.94                |
| 积分时间/ms   | 35                   |
| 工作温度/K  | 50                   |

将黑体温度依次调节到193 K、175 K、161 K、150 K,依次设置不同积分时间,在偏置电压-50 mV下对线列探测器数据进行采集,计算黑体响应、探测率、NETD、噪声等器件性能参数。在偏压为-50 mV时,平均峰值探测率随积分时间的变化如图所示。从图可得,在低光通量条件下,提高积分时间可以提高探测器的探测率。在积分时间25~35 ms这一区间内,器件性能参数探测率的提升幅度比更长积分时间下(50~70 ms)的更高。在积分时间50 ms时,图中较低光通量下探测率出现下降,其源于测试误差导致器件噪声偏大。

图8为消除测试误差后器件探测率与积分时间的变化关系。测试中将模拟电源和数值脉冲转板共地,并且将设备、仪器等接地以减小其他因素的影响。同时,将制冷机降温时间延长,在器件上电后,待工作温度稳定后再进行数据采集。以此达到减弱测试条件的不稳定性对器件像元输出信号的影响。相比未消除误差前探测率与积分时间的变化关系,探测率在低光通量下的测试精度得到提高,探测率

随积分时间的增加而提高,探测率仍能达到  $1.0 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

而从探测率的统计分布直方图更易认识焦平面器件整体性能的优劣。图9为黑体温度分别为161 K与175 K时探测率在不同积分时间下的分布直方图。从图中可以看出,在各积分时间下其分布较为集中,基本呈正态分布。随着积分时间的增加,探测率分布图的分展宽,探测率中心值从  $1.0 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$  增长到  $1.75 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ ,此时器件性能处于较好状态。

但当黑体温度进一步降低,探测率随积分时间增加并未提高,平均波段探测率最大值约为  $1.5 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。随着光通量的继续减小,探测器在长积分时间下探测率降低,探测率与光通量的变化趋势如图10所示。光通量的降低使得背景辐射光子噪声减小,受限于测试系统自身噪声(0.26~0.3 mV)较大的影响,器件响应随着辐射通量的降低而减小,信噪比降低,导致探测性能下降。

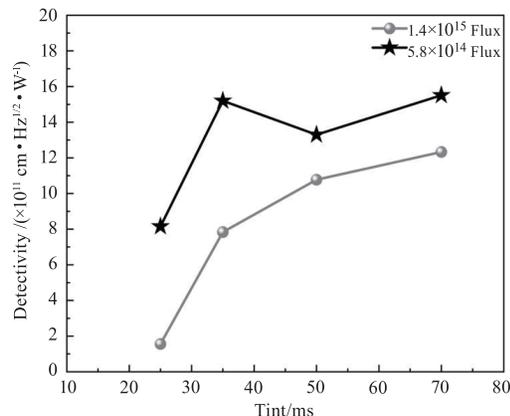


图7 50 K下探测率随积分时间变化

Fig.7 Detectivity varies with the integration time at 50 K

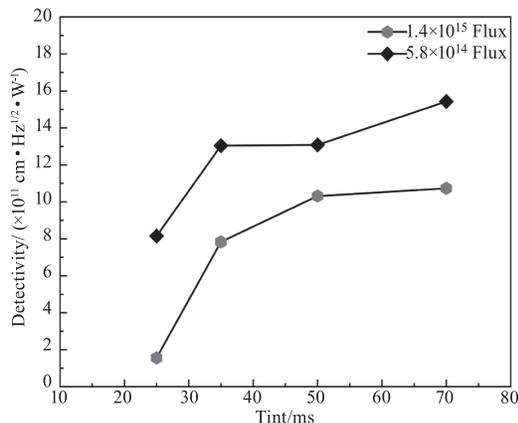


图8 消除误差后50 K下探测率随积分时间变化

Fig.8 Detectivity varies with the integration time at 50 K

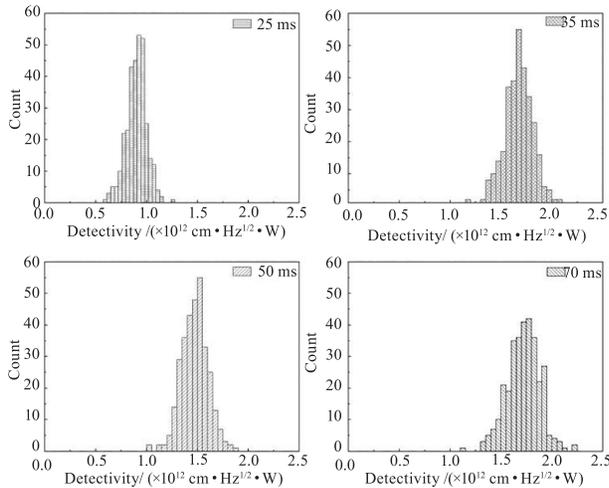


图 9 50 K 下波段探测率统计分布

Fig. 9 Statistical distribution of detectivity at 50 K

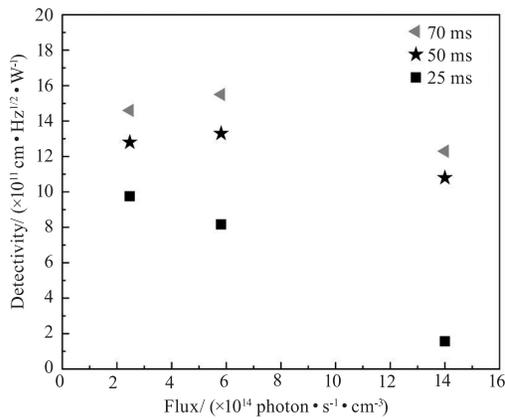


图 10 50 K 不同积分时间下探测率与光通量的关系

Fig. 10 Relationship between detectivity and luminous flux at various integration time at 50 K

### 3.2.3 温度对探测率的影响

对于目标温度小于 300 K 的低光通量测试系统,结合器件工作波段(长波)的背景通量高和长波探测器暗电流较大的特点,选择合适的器件工作温度对于发挥探测器的探测性能十分重要。

在液氮温度下,将面源黑体温度分别调节为 293 K 和 308 K,对杜瓦内器件的响应电平输出信号连续采集 100 帧电平数据<sup>[10]</sup>。器件黑体响应测试结果表明,当积分时间从 100  $\mu\text{s}$  增加至 580  $\mu\text{s}$  时,该器件的波段探测率最大值约为  $1 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

图 11 为工作温度 60 K 时不同积分时间下的探测率统计直方图。其频率分布与 50 K 时结果相比,随器件工作温度的升高,受探测器积分时间的限制与部分像元受增大暗电流的影响,分布图形展宽且探测率降低。在低光通量条件下,在工作温度 50 K 且积分时间为 35 ms 时,器件探测率达到峰值  $1.5 \times 10^{12}$

$\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。当工作温度升高,受器件暗电流逐渐增大的影响,在 60 K 时且积分时间 10 ~ 40 ms 条件下,探测率约为  $7 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。同时,在低辐射通量下,提高探测器读出电路的积分时间仍是提高探测率的有效方法。

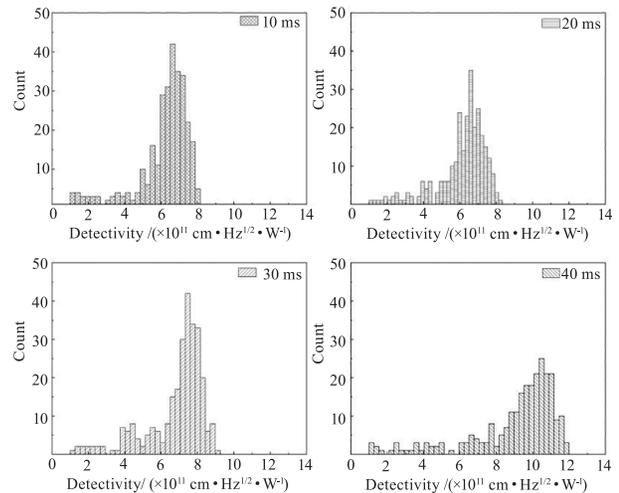


图 11 60 K 下波段探测率统计分布

Fig. 11 Statistical distribution of detectivity at 60 K

## 3 结论

给出了长波线列碲镉汞红外焦平面器件的实测性能参数结果,并进行各温度下的暗电流测试以及光谱响应测试,对焦平面器件在低光通量下性能参数进行测试与分析。对于长波红外探测期间在低光通量下的应用,应综合考虑器件工作温度、探测目标谱段、温度等参数对探测器性能的影响。本文中该探测器低光通量下探测率相比 300 K 黑体背景下有近一个数量级的提升。但在较低光通量条件下,受探测目标辐射通量降低与数据采集系统本身噪声的影响,器件响应下降,此时探测率不再随积分时间的增加而提高,造成探测器探测性能下降。文中的器件测试结果可为甚长波碲镉汞红外焦平面探测器的低光通量的性能评价提供参考。

## 参考文献:

- [1] Sun Qiyang, Chai Ruiqing, Xie Shengwen, et al. Demands and development of spaceborne infrared detectors[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(10): 1469 - 1475. (in Chinese) 孙启扬, 柴瑞青, 谢圣文, 等. 航天遥感红外探测器需求与发展[J]. 激光与红外, 2023, 53(10): 1469 - 1475.
- [2] D'Souza A, Robinson E, Masterjohn S, et al. Detectors and

- focal plane modules for weather instruments[J]. Proceeding of SPIE,2016,9854:98540H.
- [3] D'Souza A,Robinson E,Masterjohn S,et al. Detectors and focal plane modules for weather satellites[J]. Proceeding of SPIE,2016,9881:988115.
- [4] Qiao Hui,Wang Nili,Jia Jia,et al. HgCdTe photoconductive detectors for the Fengyun meteorological satellites [J]. Laser & Infrared,2023,53(10):1534-1544. (in Chinese)  
乔辉,王妮丽,贾嘉,等. 碲镉汞光导器件在风云气象卫星中的应用[J]. 激光与红外,2023,53(10):1534-1544.
- [5] Wang Shitao,Zhang Wei,Wang Qiang. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background[J]. Opt. Precision Eng.,2012,20(3):484-491. (in Chinese)  
王世涛,张伟,王强. 红外探测器件在低温背景下的探测率测试[J]. 光学精密工程,2012,20(3):484-491.
- [6] Mao jingxiang,Guo Jianhua,Li Lihua,et al. Calculation of parameters for long wave infrared FPA detectors applied in low-temperature background[J]. Infrared Technology,2023,45(5):553-558. (in Chinese)  
毛京湘,郭建华,李立华,等. 低温背景应用长波红外焦平面探测器性能参数的计算[J]. 红外技术,2023,45(5):553-558.
- [7] Wang Liang,Xu Changbin. The method of dark currents measurement in infrared long wave HgCdTe detector[J]. Laser & Infrared,2020,50(5):563-566. (in Chinese)  
王亮,徐长彬. 一种碲镉汞长波红外探测器暗电流测试方法[J]. 激光与红外,2020,50(5):563-566.
- [8] Li X,Wang X,Zhou S M,et al. Comparative study on dark current mechanisms of n-on-p and p-on-n long-wavelength HgCdTe infrared detectors [J]. Infrared Physics and Technology,2022,123:104166.
- [9] Xu Lina,Dong Jie,Dai Liqun,et al. Study and analysis of the detectivity of infrared detector[J]. Laser & Infrared,2018,48(4):497-502. (in Chinese)  
徐丽娜,董杰,戴立群,等. 红外探测器探测率的研究与分析[J]. 激光与红外,2018,48(4):497-502.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会. 红外焦平面阵列参数测试方法 GB/T 17444-2013 [S]. 北京:中国标准出版社,2014.