

## 短波红外 InGaAs 焦平面噪声特性

于春蕾<sup>1,2,3</sup>, 李雪<sup>1,2</sup>, 邵秀梅<sup>1,2</sup>, 黄松垒<sup>1,2</sup>, 龚海梅<sup>1,2\*</sup>

1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件国家重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为研究铟镓砷焦平面的噪声特性,设计了两种不同吸收层掺杂浓度的 InGaAs 外延材料,采用标准工艺制备了平面型  $160 \times 128$  元光敏芯片,并与相同结构的读出电路倒焊耦合形成  $160 \times 128$  元焦平面,采用改变积分时间和改变器件温度的方法,测试焦平面的信号与噪声.通过研究不同材料参数、器件性能与焦平面噪声的关系,定量分析了短波红外 InGaAs 焦平面的噪声特性.结果表明,焦平面噪声主要来源于焦平面耦合噪声和探测器噪声,降低 InGaAs 外延材料吸收层的掺杂浓度,可以有效降低探测器电容,从而降低焦平面的耦合噪声;而探测器噪声由探测器暗电流和工作温度影响,该噪声在长积分时间下决定了焦平面的总噪声水平.实现低暗电流、低电容特性的光敏芯片是降低焦平面噪声的有效途径.

**关键词:**铟镓砷;焦平面;噪声特性

**中图分类号:**TN21 **文献标识码:**A

## Noise characteristics of short wave infrared InGaAs focal plane arrays

YU Chun-Lei<sup>1,2,3</sup>, LI Xue<sup>1,2</sup>, SHAO Xiu-Mei<sup>1,2</sup>, HUANG Song-Lei<sup>1,2</sup>, GONG Hai-Mei<sup>1,2\*</sup>

1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. State Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to study the noise characteristics of InGaAs focal plane arrays (FPAs), the  $160 \times 128$  FPAs with different absorption layer doping concentration coupled with the same read-out circuit structures were designed and prepared. The noise characteristics at different temperature and integral time were measured. By studying the relationship between different material parameters, device performance and focal plane noise, the noise characteristics of short-wave infrared InGaAs FPAs are analyzed quantitatively. The results show that the noise mainly comes from the coupling noise of the focal plane and the noise of the detector. The detector noise is influenced by the dark current and operating temperature of the detector, which determines the total noise level of the focal plane in the long integral time. To manufacture photodetectors with low dark current and low capacitance is an effective way to reduce the focal plane noise.

**Key words:** InGaAs, focal plane arrays, noise characteristics

**PACS:** 85.60.Gz

## 引言

短波红外探测在天文观测、海洋监控、环境监测分析、医学成像诊断病情、农作物分析、工业多光谱成像分析、红外夜视成像等众多领域有着广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>。常见的用于制造红外焦平面探测器的材料主要集中在 II-VI 族和 III-V 族材料体系中,包括 HgCdTe、PbSe、InGaAs、InAs、InSb 等。随着材料工艺和集成电路研究不断深入,采用 HgCdTe、InGaAs 等材料制造的短波红外焦平面探测器已经商品化并已广泛应用于多种领域。相对于 HgCdTe 材料来说,InGaAs 材料有对应的大直径和高质量晶格匹配的 InP 衬底,且 InGaAs 探测器在较高的工作温度下具有较好的探测率,因此 InGaAs 焦平面探测器在短波红外的应用具有广阔的前景<sup>[5-7]</sup>。

信噪比是短波红外 InGaAs 焦平面的重要性能指标,降低噪声、提高信噪比对提高红外焦平面组件成像质量至关重要。随着短波红外探测技术的发展,对焦平面的信噪比提出了更高的要求。国内外的研究机构为降低 InGaAs 焦平面噪声做了很多努力,例如 III-V 实验室开发的低噪声的中心距为 15  $\mu\text{m}$  的、规模为 640  $\times$  512 的 InGaAs 焦平面,探测器在室温下的暗电流可以低至 20  $\text{nA}/\text{cm}^2$  @ -0.1 V,读出电路采用电容跨导放大器 (CTIA) 输入级以及相关双采样 (CDS) 电路来降低输出噪声,积分时间为 8.3 ms 时暗电流噪声为 80 电子,焦平面噪声为 130  $e^-$ ,对应的噪声电压为 2.29  $\text{mV}$ <sup>[8]</sup>。FLIR 公司研制的 15  $\mu\text{m}$  中心距的 InGaAs 焦平面,探测器在 293 K 下暗电流密度可以低至 2.95  $\text{nA}/\text{cm}^2$  @ -0.1 V,读出电路有三种模式,在高增益模式下读出噪声小于 30  $e^-$ ,中增益模式读出噪声小于 70  $e^-$ ,低增益模式读出噪声小于 200  $e^-$ <sup>[9]</sup>。SOFRADIR 公司开发的 15  $\mu\text{m}$  中心距的 640  $\times$  512 的 InGaAs 焦平面,室温下暗电流密度低至 4.8  $\text{nA}/\text{cm}^2$  @ -0.1 V,对应的暗电流噪声为 33  $e^-$ ,读出噪声为 40  $e^-$ <sup>[10]</sup>。上海技术物理研究所研发的 512  $\times$  128 元 InGaAs 焦平面,中心距为 30  $\mu\text{m}$ ,室温下探测器的暗电流密度为 30  $\text{nA}/\text{cm}^2$  @ -0.1 V,读出电路采用 CTIA 输入级,在 3 ms 积分时间下,焦平面的噪声约为 250  $e^-$ <sup>[11]</sup>。本文为发展大规模、低噪声、高性能的短波红外 InGaAs 焦平面探测器,设计并制备了 160  $\times$  128 元焦平面探测器测试结构,通过研究不同材料参数、器件性能与焦平面噪声的关系,确定焦平面噪声的主要来源,寻求降低短波红外 InGaAs 焦平面探测器噪声的有效途径。

## 1 实验

### 1.1 焦平面制备

选取了两种 MOCVD 生长的不同吸收层浓度的 InGaAs/InP 外延材料,标记为 F98 和 F245。材料结构由下至上依次为  $\text{N}^+$ -InP 衬底,  $\text{N}^+$ -InP 缓冲层,  $\text{N}^-$ -InGaAs 吸收层(吸收层有效掺杂浓度分别为  $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  和  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ),  $\text{N}^-$ -InP 帽层。探测器阵列分别制备在 F98 和 F245 材料上,采用了相同的平面结器件制备工艺,经历扩散工艺、表面钝化、N 槽刻蚀、电极制备、钢柱生长等多个标准工序,制备了 160  $\times$  128 元探测器阵列,中心距为 25  $\mu\text{m}$ ,材料结构和探测器剖面结构如图 1 所示。

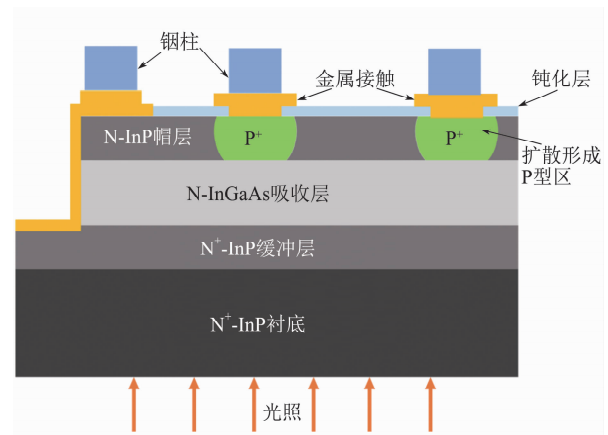


图 1 外延材料结和光敏芯片剖面图

Fig. 1 Scheme illustration of the epitaxial material junction and the cross-section profile of the detectors

通过测试 160  $\times$  128 元探测器阵列的电学性能,提取和焦平面噪声密切相关的暗电流和结电容。将 160  $\times$  128 元探测器阵列通过 In 柱倒焊互连工艺,与匹配的 CMOS 读出电路进行耦合。读出电路采用 CTIA 输入级,相关双采样结构,有效抑制读出电路开关的 KTC 噪声。两种材料制备的探测器阵列参数和读出电路的电学参数见表 1。

表 1 InGaAs 焦平面参数

Table 1 Parameters of the InGaAs FPAs

编号	吸收层浓度 / $\text{cm}^{-3}$	中心距 / $\mu\text{m}$	负载电容 / $\text{fF}$	采样电容 / $\text{fF}$	积分电容 / $\text{fF}$
F98	$5 \times 10^{16}$	25	80	80	10
F245	$5 \times 10^{15}$	25			

### 1.2 焦平面性能测试

采用如图 2 所示的测试系统对焦平面的性能进行测试。

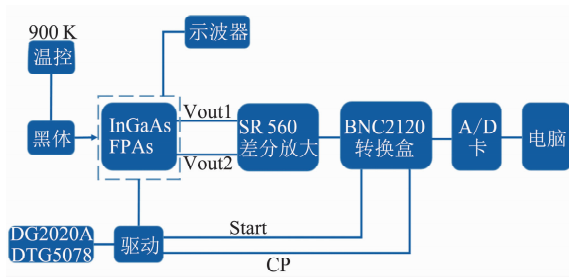


图2 红外焦平面测试系统

Fig. 2 The schematic of the FPAs measurement system

通过测试系统获取面阵焦平面第  $i$  行、第  $j$  列的像元响应电压  $V_s(i, j)$ 、暗信号  $V_d(i, j)$  和噪声电压  $V_n(i, j)$ . 对焦平面所有像元的响应电压进行多帧连续采样, 当连续采样的帧数为  $F$  (常用  $F = 100$ ), 测试系统的电压增益为  $K$  时, 采用统计方法求得所有像元的平均响应电压  $\overline{V_s(i, j)}$ 、平均暗信号  $\overline{V_d(i, j)}$  和平均噪声电压  $\overline{V_n(i, j)}$  分别为:

$$\overline{V_s(i, j)} = 1/(F \times K) \times \sum_{f=1}^F V_s(i, j, f), \quad (1)$$

$$\overline{V_d(i, j)} = 1/(F \times K) \times \sum_{f=1}^F V_d(i, j, f), \quad (2)$$

$$\overline{V_n(i, j)} = 1/K \times \sqrt{1/K \times \sum_{f=1}^F [V_s(i, j, f) - \overline{V_s(i, j)}]^2}. \quad (3)$$

## 2 结果讨论与分析

### 2.1 光敏芯片性能

#### 2.1.1 光敏芯片的电容

在不同温度下测试光敏芯片的  $C$ - $V$  曲线, 提取与焦平面耦合噪声密切相关的电容特性. 室温下, F98 的零偏电容为 450 fF, F245 的零偏电容为 220 fF. 降低吸收层的浓度有效降低了探测器的电容. 探测器电容随着温度降低略有降低, 变化基本成线性. 两种探测器电容与温度的关系如图 3 所示:

#### 2.1.2 光敏芯片的暗电流

在不同温度下测试不同积分时间的焦平面各元的暗信号, 通过对暗信号的拟合计算出各元暗电流, 暗信号与暗电流的关系见式(4):

$$I_d(i, j) = C_{im} \times \nabla V_d(i, j) / \nabla T_{im}, \quad (4)$$

其中  $C_{im}$  是读出电路的积分电容,  $T_{im}$  是积分时间. 通过拟合计算, 室温下 F98 的暗电流为  $1.4 \times 10^{-14}$  A、F245 为  $3.0 \times 10^{-14}$  A. 降低了吸收层浓度使得探测器的暗电流升高, 是因为探测器的暗电流主要来自于扩散电流、产生复合电流、表面漏电流等成分. 扩散电流的表达式见式(5):

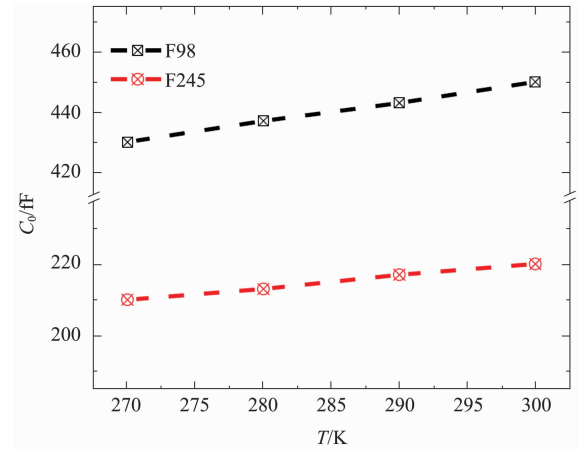


图3 不同温度下的探测器电容

Fig. 3 The detectors' capacitance at different temperatures

$$I_{diff} = \frac{Aqn_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} (\exp(\frac{qV}{kT}) - 1) = I_0 (\exp(\frac{qV}{kT}) - 1), \quad (5)$$

其中  $A$  是光敏元的面积,  $n_i$  是本征载流子浓度,  $N_D$  是掺杂浓度,  $\tau_p$  是少数载流子寿命,  $D_p$  是空穴扩散系数,  $\epsilon$  是材料的介电常数. 可以看出扩散电流与吸收层的浓度成反比, 与少子寿命成反比. 产生复合电流的表达式见式(6):

$$I_{gr} = \frac{Aq n_i W}{2\tau_p} (\exp(\frac{qV}{2kT}) - 1), \quad (6)$$

其中  $W$  是耗尽区宽度, 耗尽区宽度随吸收层浓度降低而增大, 从而增大产生复合电流, 产生复合电流同样与少子寿命成反比. 可以看出, 降低吸收层浓度会增大扩散电流、产生复合电流. 但同时扩散电流和产生复合电流都与少子寿命成反比, 因此可以通过提高材料质量, 增大少子寿命的方式来降低低掺杂浓度材料的暗电流. 目前的研究已经采用这种高质量低浓度的材料制备出低暗电流的单元器件和测试结构, 后期将会在焦平面中应用.

图 4 是通过不同温度的焦平面暗信号拟合出的两种光敏芯片的暗电流分布特性, 从图中可见, 室温下光敏芯片的暗电流分布比较离散, 随着温度降低, 暗电流分布趋于集中, 且暗电流值也有所降低, F245-160  $\times$  128 元的暗电流分布比 F98-160  $\times$  128 元的离散. 焦平面暗信号受到探测器的偏置电压和暗电流的不均匀性影响. 焦平面电路为探测器提供偏置电压, 理想状态下探测器工作在零偏电压, 然而由于电路设计和制备的不均匀性, 导致偏置电压不为零, 探测器偏置电压的不均匀引入了焦平面暗信号的不均匀. 由于两种材料制备的器件、电路和焦平面

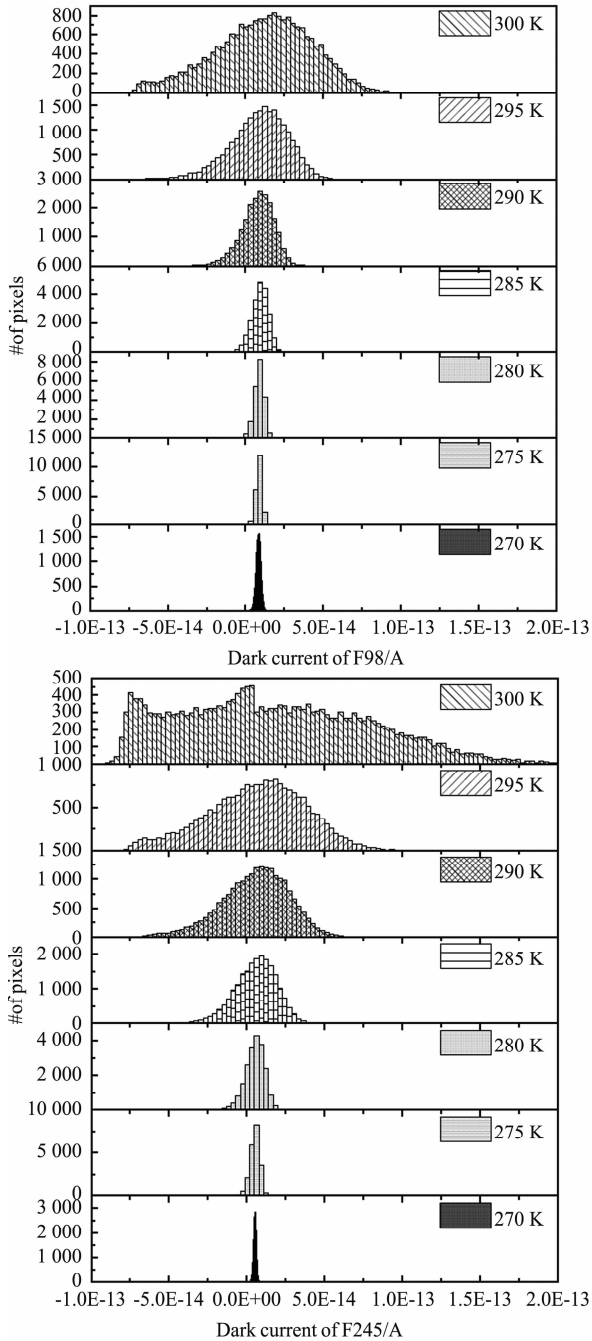


图4 不同温度下两种焦平面的暗电流分布  
Fig. 4 Dark current histogram distribution of the InGaAs FPAs at different temperature

均在同一批次,而 F245-160 × 128 元的暗电流分布比 F98-160 × 128 元离散的现象,主要是源于探测器自身也存在暗电流分布不均匀.随着温度降低,探测器暗电流明显降低,受偏压影响较弱,暗电流分布趋于集中.

## 2.2 焦平面噪声特性

### 2.2.1 焦平面噪声分布特性

测试了不同温度、不同积分时间下的两种焦平

面的噪声.积分时间指的是在行周期或帧周期内,探测器累计接受辐射的有效时间.积分时间越长,探测器接受辐射时间越长,信号越大,在非饱和情况下,灵敏度月高.F98-160 × 128 元焦平面的噪声在不同温度不同积分时间下的统计分布特性如图 5 所示.焦平面噪声分布比较集中,基本呈正态分布.

F245-160 × 128 元焦平面噪声分布特性如图 6 所示,可以看出 F245-160 × 128 元焦平面噪声分布的比较离散,尤其是在较高温度较大积分时间的情况下,降低温度后 F245-160 × 128 元焦平面噪声分布与暗电流分布特性一样,也变得集中.

从 F98-160 × 128 和 F245-160 × 128 焦平面噪声分布特性中可以看出,在较高工作温度下,焦平面噪声均随积分时间延长而明显增加,而随着温度的降低,焦平面噪声随积分时间的变化变得不明显了.

### 2.2.2 焦平面噪声与积分时间和温度的关系

焦平面噪声主要由探测器噪声、读出电路噪声、二者耦合过程中产生的热噪声以及固定图形噪声和 1/f 噪声构成<sup>[12]</sup>.通过对焦平面的  $\log V_{\text{total}} - \log \tau_{\text{int}}$  曲线进行线性拟合,定性的判断噪声来源,线性拟合的斜率接近于 0,说明焦平面噪声由耦合噪声和电路噪声主导;线性拟合斜率逐渐接近 0.5,说明焦平面噪声由探测器噪声主导;线性拟合斜率接近 1,说明焦平面噪声由固定图形噪声和 1/f 噪声主导<sup>[13]</sup>.

室温下,对两种焦平面的  $\log V_{\text{total}} - \log \tau_{\text{int}}$  曲线进行线性拟合,拟合结果如图 7 所示.积分时间较短时,两种焦平面拟合斜率相当,均接近于 0,此时焦平面噪声由耦合噪声和电路噪声主导.而二者采用了相同结构的电路,表明二者噪声的差异来自于探测器电容决定的耦合噪声.在短积分时间下,F245-160 × 128 焦平面噪声明显降低,说明降低吸收层浓度有效降低了焦平面的耦合噪声,从而降低焦平面总噪声.随着积分时间增大,斜率逐渐接近 0.5,焦平面噪声由探测器噪声主导.向更长积分时间过渡的过程中,F245-160 × 128 焦平面噪声表现出较快的增长趋势,这和 F245-160 × 128 光敏芯片的暗电流水平较高有直接关系.

本文进一步定量分析了 F245-160 × 128 和 F98-160 × 128 焦平面噪声特性.焦平面噪声成分中,探测器噪声主要由探测器的暗电流  $I_d$  产生的散粒噪声和探测器电阻  $R_d$  产生的热噪声组成.探测器噪声的噪声电压平方  $V_{\text{pd}}^2$  表达式见式(7):

$$\bar{V}_{\text{pd}}^2 = \bar{V}_{\text{shot}}^2 + \bar{V}_{\text{thermal}}^2 = \frac{q(I_d)}{C_{\text{int}}^2} \tau_{\text{int}} + \frac{2k_B T}{R_d C_{\text{int}}^2} \tau_{\text{int}} \quad (7)$$

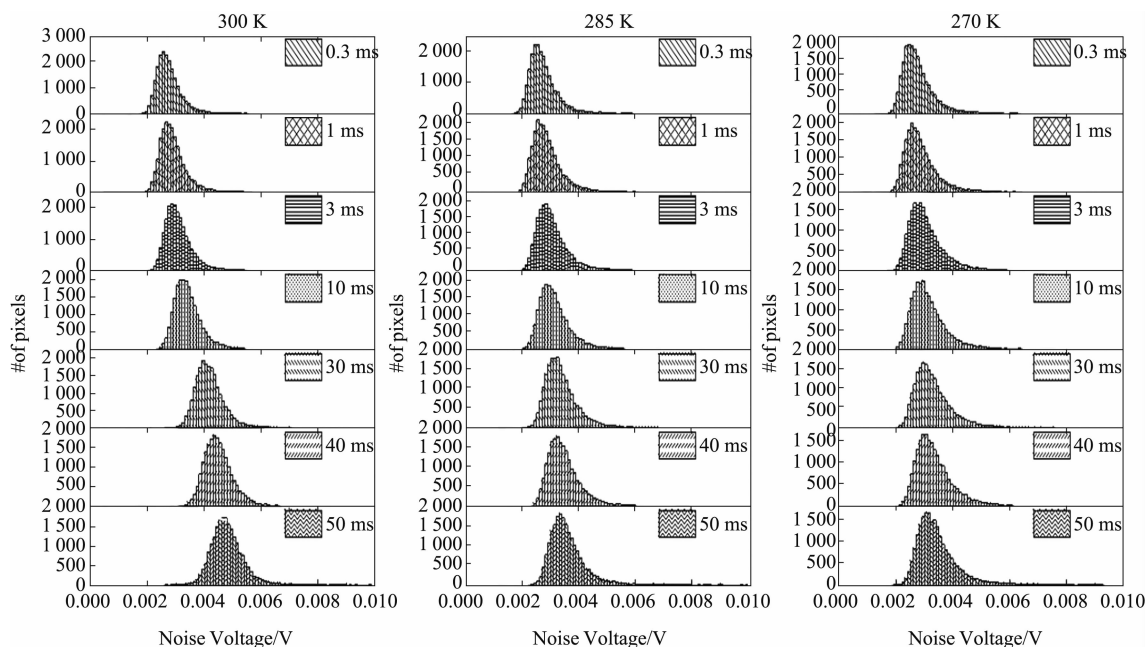


图5 F98-160 × 128 元焦平面噪声分布特性  
Fig. 5 Noise histogram distribution of the F98-160 × 128 FPA

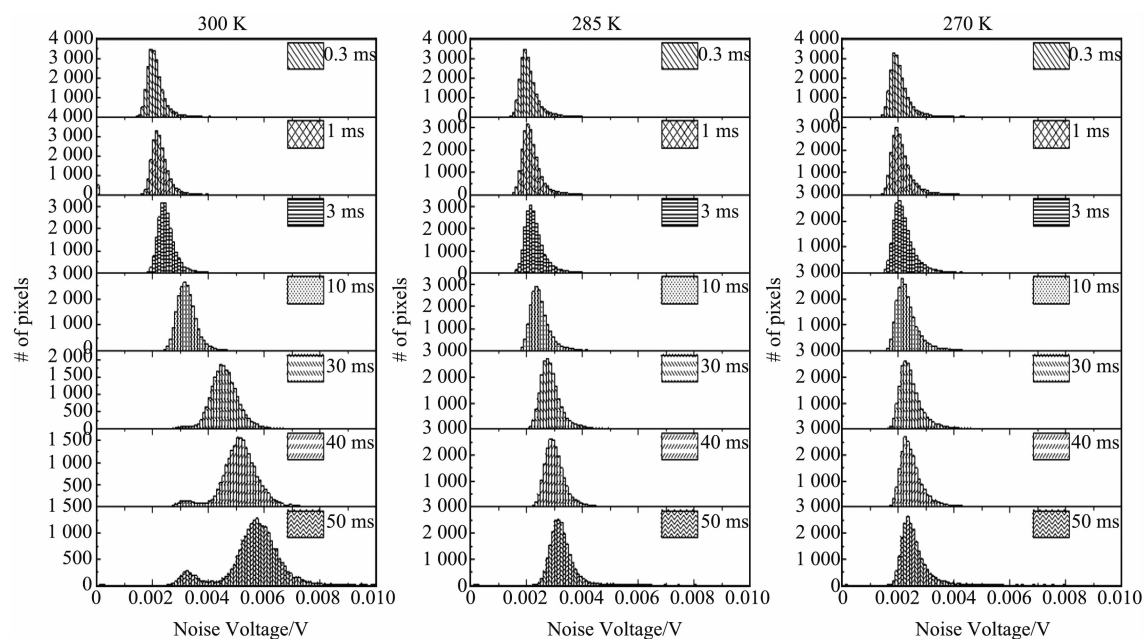


图6 F245-160 × 128 焦平面噪声分布特性  
Fig. 6 Noise histogram distribution of the F245-160 × 128 FPA

其中  $C_{int}$  是读出电路的积分电容。

读出电路噪声主要由读出电路的 KTC 噪声和采样噪声组成, 由于读出电路采用相关双采样模式, KTC 噪声得以消除, 因此读出电路噪声为两次采样形成的采样噪声  $\bar{V}_{sample}^2$ :

$$\bar{V}_{sample}^2 = 2k_B T / C_s \quad , \quad (8)$$

其中  $C_s$  是读出电路的采样电容。

焦平面的耦合噪声是由于探测器芯片与读出电路耦合产生的热噪声, 与电路参数和探测器的电容  $C_d$  有关, 耦合噪声电压平方  $\bar{V}_{coupled}^2$  的表达式为:

$$\bar{V}_{coupled}^2 = \frac{4\alpha k_B T (C_{int} + C_d)^2}{C_{int} (C_L C_{int} + C_L C_d + C_d C_{int})} \quad . \quad (9)$$

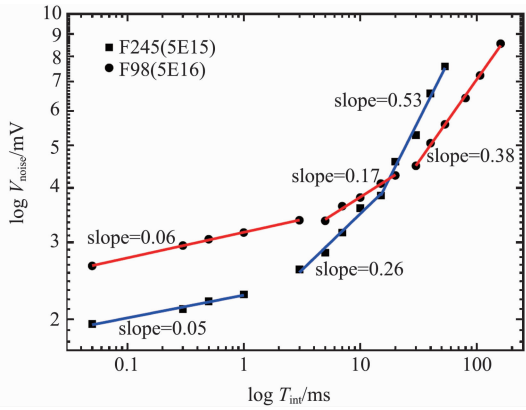


图7 室温下两种焦平面噪声与积分时间的关系  
Fig. 7 The  $\log V_{\text{total}} - \log \tau_{\text{int}}$  curves of InGaAs FPAs at room temperature

采用上述公式以及探测器和电路的性能参数计算不同积分时间下的焦平面的噪声,与测试结果进行对比,如图 8 所示,计算结果与测试结果非常吻合.结果表明,焦平面噪声主要来源于焦平面耦合噪声和探测器噪声,在电路参数确定的情况下,焦平面耦合噪声在短积分时间下决定了焦平面的本底噪声水平,焦平面耦合噪声由探测器电容影响,探测器电容直接受到外延材料吸收层的掺杂浓度的影响;探测器噪声由探测器暗电流影响,该噪声在长积分时间下决定了焦平面的总噪声水平.

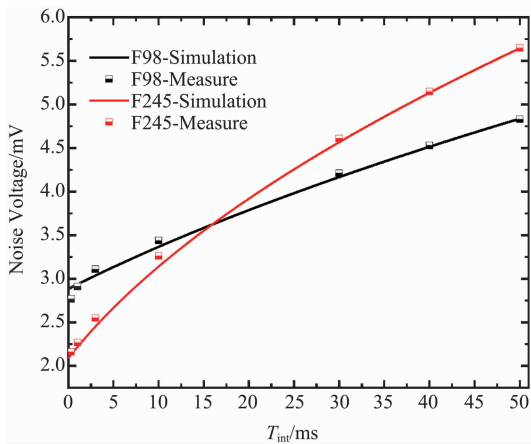


图8 室温下焦平面噪声测试值和计算值  
Fig. 8 The measured and calculated value of the FPAs noise at room temperature

对不同温度的焦平面噪声机制进行拟合分析,结果如图 9 所示.温度降低至 285 K 时,积分时间较短时,两种焦平面噪声都由耦合噪声主导,当积分时间增大时,斜率都有所增加,然而仍没有增大至 0.5,说明降低温度使暗电流降低,零偏电阻增大,探

测器噪声下降明显,探测器噪声在焦平面总噪声中的作用减弱.温度继续降低至 275 K,在整个测试范围内两种焦平面噪声特性拟合曲线的斜率都较小,说明此温度下探测器噪声下降明显,与探测器电容相关的耦合噪声占主要地位.

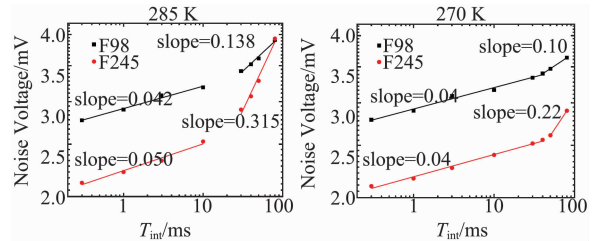


图9 焦平面噪声与积分时间的关系,285 K (左)和 270 K (右)  
Fig. 9 The  $\log V_{\text{total}} - \log \tau_{\text{int}}$  curves of InGaAs FPAs at 285 K (left) and at 270 K (right)

对两种焦平面随积分时间和测试温度的变化小结如图 10 所示,温度较低时,随着积分时间增大,焦平面噪声变化比较缓慢,这表明焦平面总噪声中的探测器噪声较小;当温度升高,随着积分时间增大,焦平面噪声变化明显增大,且 F245-160 × 128 焦平面比 F98-160 × 128 焦平面增加的趋势更明显,这表明焦平面总噪声中的探测器噪声增加.短积分时间下,随着温度的升高,两种焦平面的噪声均没有明显变化,这表明两种焦平面的噪声均以耦合噪声为主;当积分时间增加,随着温度的升高,焦平面的噪声增大的趋势越来越明显,且 F245-160 × 128 焦平面比 F98-160 × 128 焦平面增加的速度更快,这表明焦平面总噪声中的探测器噪声增加.

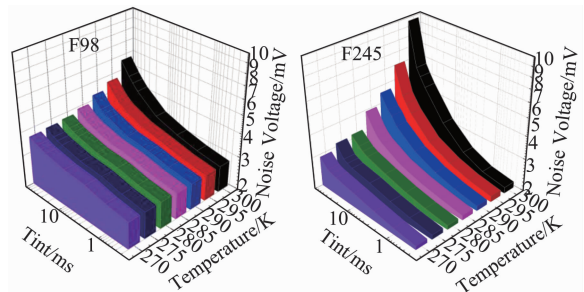


图10 焦平面噪声随温度和积分时间的变化  
Fig. 10 The noises of the FPAs via testing temperature and integral time

### 2.3 焦平面成像照片

为了验证焦平面成像系统,采用制备的焦平面进行了室外成像,图 11 为焦平面成像照片.

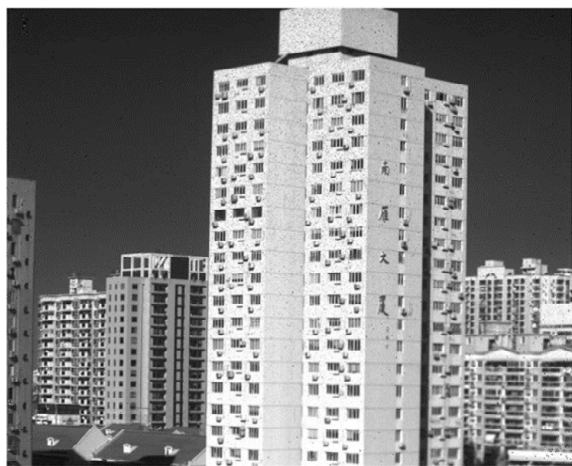


图 11 焦平面成像验证

Fig. 11 Experimental imaging verification of the FPAs

### 3 结论

本文为发展大规模、低噪声短波红外 InGaAs 焦平面探测器,选取了两种不同吸收层掺杂浓度的 InGaAs 外延材料,采用标准工艺设计并制备了平面型  $160 \times 128$  元焦平面测试结构. 采用改变积分时间和改变器件温度的方法,测试焦平面的信号与噪声,提取了探测器的暗电流分布,明确焦平面暗信号分布受到探测器的偏置电压和暗电流的不均匀性影响;通过研究不同材料参数、器件性能与焦平面噪声的关系,定量分析了短波红外 InGaAs 焦平面噪声特性,结果表明,焦平面噪声主要来源于焦平面耦合噪声和探测器噪声,焦平面耦合噪声由探测器电容影响,降低 InGaAs 外延材料吸收层的掺杂浓度,可以有效降低探测器电容,从而降低焦平面的耦合噪声,有效抑制短积分时间下焦平面总噪声,而探测器噪声由探测器暗电流和工作温度影响,该噪声在长积分时间下决定了焦平面的总噪声水平. 由于电容和暗电流对焦平面的噪声分别作用在不同的积分时间下,因此可以根据应用环境选择合适的焦平面,在探测器的暗电流和电容之间进行权衡. 对于快速响应焦平面,焦平面主要工作在短积分时间下,耦合噪声为主导,探测器电容是影响焦平面噪声的主要因素;对于高灵敏度的焦平面,主要工作在长积分时间下,探测器噪声为主导,探测器暗电流是影响焦平面噪声的主要因素. 因此,制备高质量低掺杂浓度的吸收层外延材料将有效降低器件的暗电流和电容,实现

低暗电流、低电容特性的探测器是降低焦平面噪声的有效途径.

### References

- [1] Li X, Gong H M, Fang J X, *et al.* The development of InGaAs Short Wavelength Infrared Focal Plane Arrays with high performance [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **80**:112 - 119.
- [2] SHAO Xiu-Mei, GONG Hai-Mei, LI Xue, *et al.* Developments of high performance short-wave infrared InGaAs focal plane detectors[J]. *Infrared Technology*(邵秀梅,龚海梅,李雪,等,高性能短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展,红外技术), 2016,**38**(8): 629 - 635.
- [3] Andreev D S, Boltar K O, Vlasov P V, *et al.* Investigation of planar photodiodes of a focal plane array based on a heteroepitaxial InGaAs/InP structure[J]. *Journal of Communications Technology & Electronics*, 2016, **61**(10):1220 - 1225.
- [4] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(3): 136 - 154.
- [5] Li C, Wang Y. Introduction and analysis of short-wave InGaAs infrared detectors[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2013,**5**:259 - 263.
- [6] Singh A, Pal R. Performance of InGaAs short wave infrared avalanche photodetector for low flux imaging[J]. *Applied Physics A*, 2017, **123**(11):701.
- [7] Iakovleva N I, Boltar K O, Sednev M V, *et al.* Analysis of characteristics of photodetectors based on InGaAs heteroepitaxial structures for 3D imaging[J]. *Journal of Communications Technology & Electronics*, 2017, **62**(9):1061 - 1065.
- [8] Guellec F, Dubois S, De Borniol E, *et al.* A low-noise  $15 \mu\text{m}$  pixel-pitch  $640 \times 512$  hybrid InGaAs image sensor for night vision[C]//*Sensors, Cameras, and Systems for Industrial and Scientific Applications XIII. International Society for Optics and Photonics*, 2012, **8298**: 82980C.
- [9] Hood A D, MacDougal M H, Manzo J, *et al.* Large-format InGaAs focal plane arrays for SWIR imaging[C]//*Infrared Technology and Applications Xxxviii. International Society for Optics and Photonics*, 2012, **8353**: 83530A.
- [10] Coussement J, Rouvié, A, Oubensaid E H, *et al.* New developments on InGaAs focal plane array[C]// *Infrared Technology & Applications XL. International Society for Optics and Photonics*, 2014.
- [11] Li X, Tang H J, Huang S L, *et al.* Study on  $512 \times 128$  pixels InGaAs near infrared focal plane arrays[C]// *SPIE Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics*, 2014.
- [12] Yu C L, Li X, Yang B, *et al.* Noise characteristics analysis of short wave infrared InGaAs focal plane arrays[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **85**:74 - 80.
- [13] Li X, Huang S L, Chen Y, *et al.* Noise characteristics of short wavelength infrared InGaAs linear focal plane arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **112**(6):013202 - 1.