

背照射波长延伸 InGaAs 面阵焦平面探测器

魏鹏^{1,2}, 黄松垒^{1,2}, 李雪^{1,2}, 邓洪海^{1,2}, 朱耀明^{1,2}, 张永刚³, 龚海梅^{1,2*}

(1. 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;

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;

3. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

摘要:在 MBE 外延生长的 $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 材料上,采用台面成型方法制备了背照射 32×32 元 InGaAs 探测器,其中心距为 $30 \mu\text{m}$,并详细分析了探测器及其焦平面光电性能.结果表明,温度高于 220 K 时吸收层材料热激活能为 0.443 eV ,300 K 时在所考虑的偏压范围内,暗电流主要由扩散电流、产生复合电流及其欧姆漏电流构成.对组件焦平面特性也进行了研究,并通过读出电路的变积分电容测试结构测试结果提取出积分电容上的寄生电容,在测试温度范围内约为 10 fF 左右.

关键词:InGaAs;暗电流; R_0A ;寄生电容

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Back illuminated InGaAs detector arrays with extended-wavelength to $2.4 \mu\text{m}$

WEI Peng^{1,2}, HUANG Song-Lei^{1,2}, LI Xue^{1,2}, DENG Hong-Hai^{1,2},
ZHU Yao-Ming^{1,2}, ZHANG Yong-Gang³, GONG Hai-Mei^{1,2*}

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

3. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute
of Microsystem and Information Technology, Shanghai 200050, China)

Abstract: 32×32 element mesa-type back-illuminated InGaAs detector arrays were fabricated on the MBE-grown $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ epitaxial materials by ICP etching. The characteristics of I - V curves, signal and noise were measured and analyzed. The results indicated that the thermal activation energy is 0.443 eV at $210 \sim 300 \text{ K}$. By fitting with experimental data, R_0A and I - V at different temperature were calculated theoretically. Mechanism of dark current was analyzed and some methods of reducing dark current were put forward. The detector arrays were In-bonded to readout integrated circuits (ROICs) and the characteristics of the FPA was measured. The result of the tested structure with different integrate capacitance indicates that the parasitical capacitance is about 10 fF .

Key words: InGaAs; dark current; R_0A ; parasitical capacitance

PACS: 85.30.-z

引言

由于 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 短波红外波段包含很多有用的光谱特征信息,因此在遥感、天文观测、大气监测、光

谱成像等领域引起了广泛关注.尤其在 $1.7 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 短波红外波段包含 O-H、C-H、C-O、C=O 和 N-H 等功能键的大量特征吸收^[1],这些光谱信息占整个 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 短波红外波段的一半以上.在众多短波红

收稿日期:2012-02-03,修回日期:2012-11-08

Received date: 2012-02-03, revised date: 2012-11-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助 973 项目(2012CB619200)

Foundation items: National Basic Research Program of China(2012CB619200)

作者简介 (Biography): 魏鹏(1987),男,山西怀仁人,博士研究生,主要从事短波红外探测器的研究. E-mail: pengwei_sitp@gmail.com.

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: hmgong@mail.sitp.ac.cn.

外波段的探测器中, InGaAs 探测器具有可在相对较高温度下仍有较好的性能、迁移率高、可靠性好等特点, 有较大的优势^[2], 长线列和面阵 InGaAs 焦平面探测器逐渐应用于空间遥感与夜视、侦察与监视、红外光谱成像等众多领域. 2001 年 ESA 新一代环境卫星 ENVISAT 上大气分布扫描成像吸收光谱仪 (SCI-AMACHY) 采用 1024 元 InGaAs 线列探测器用于延伸短波红外的探测 ($\sim 2.4 \mu\text{m}$)^[3]. 随着 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中 In 组分的增大, 其响应波长范围向长波方向延伸, 当 In 组分增大到 0.8 时, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料响应截止波长延伸到 $2.4 \mu\text{m}$, 波长延伸的 InGaAs 探测器需求前景更为广泛, 如 $1.9 \mu\text{m}$ 的农作物水分探测、 $1.9 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 波段资源卫星中高分辨率多光谱成像等. 因此发展延伸波长 InGaAs 面阵焦平面探测器对航天遥感应具有十分重要的意义. 随着 In 组分增大, 材料的缺陷增多, 器件的性能也会下降, 因此研究影响器件性能的各种因素对于提高器件性能具有指导意义.

本文采用 ICP 刻蚀台面成型, 在 MBE 外延 $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 材料上制备了背照射 32×32 元面阵探测器, 测试并分析了探测器光电性能, 并研究了探测器芯片与读出电路互连后焦平面的性能.

1 光敏芯片制备

材料由上海微系统所提供, 采用 GSMBE 技术在 InP 半绝缘衬底上依次外延生长 $n^+ - \text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 渐变缓冲层 (Si 掺杂)、 $n - \text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 吸收层 (Si 轻掺杂 $n \approx 3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)、 $p - \text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 帽层 (Be 掺杂 $n = 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$). 采用 ICP 刻蚀技术进行台面成型, 并用 $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ 水溶液进行湿法腐蚀以减小刻蚀损伤. 采用 PECVD 生长 SiN_x 进行表面及其侧面的钝化, 钝化前使用 BHF 去氧化层. P 电极采用 Ti/Pt/Au 金属膜系, 退火条件为 $420^\circ\text{C} \& 40\text{s}$, n 电极采用 Cr/Au 金属膜系, 电极制备完成后对芯片背面进行抛光减薄, 低温生长 $2800 \text{\AA} \text{ZnS}$ 增透膜. 芯片为 32×32 的面阵, 其中心距为 $30 \mu\text{m}$, 光敏元大小为 $25 \times 25 \mu\text{m}^2$. 探测器芯片与读出电路通过 In 柱进行倒焊互连, 焦平面组件实物如图 1 所示.

器件的零偏电阻 (R_0) 和 $I-V$ 特性采用 Keithely 6430 进行测量.

2 芯片特性分析

2.1 器件的 R_0-T 关系

器件的 R_0 对数与 $1000/T$ 的关系图及其拟合结

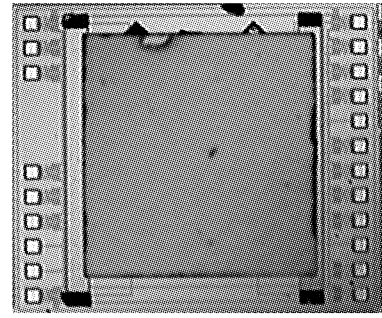


图 1 32×32 元 InGaAs 面阵焦平面探测器组件实物图
Fig. 1 Module of 32×32 InGaAs FPAs

果如图 2 所示. 扩散电流和产生复合电流是热电流机制, 对于所研究的 p-i-n 结构器件, 扩散主要考虑空穴扩散电流, 对于有限厚度的外延层 p-i-n 结构来说, 假设从耗尽区边为 0, 吸收层边为 H , 则少数浓度连续性方程:

$$\frac{d^2 \Delta p(x)}{dx^2} - \frac{\Delta p(x)}{L_p^2} = 0 \quad (1)$$

边界条件为:

$$\Delta p(0) = p_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1), -qD_p \frac{d\Delta p(x)}{dx} \Big|_{x=H} = S\Delta p(x) \Big|_{x=H}.$$

由此可得扩散电流如下所示:

$$I_{\text{diff}} = \frac{AqD_p n_i^2}{N_D L_p} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \frac{\sin h\left(\frac{H}{L_p}\right) + \alpha \cos h\left(\frac{H}{L_p}\right)}{\cos h\left(\frac{H}{L_p}\right) + \alpha \sin h\left(\frac{H}{L_p}\right)} \quad (2)$$

其中, S 为界面复合速度, A 为光敏元面积, $\alpha = \frac{SL_p}{D_p}$.

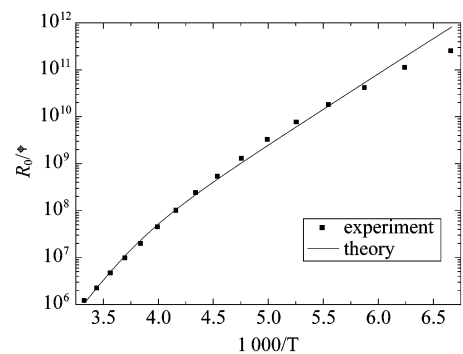


图 2 器件的零偏动态阻抗 R_0 与温度 T 的实验曲线和拟合结果

Fig. 2 The dependence of the measured zero-bias differential resistance R_0 on temperature and the fitting results

对于产生复合电流^[4]:

$$I_{gr} = \frac{qn_i A W_{dep}}{2\tau_{gr}} \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得到扩散电流和产生复合电流的零偏动态阻抗分别为:

$$R_{odiff} = \frac{N_D L_p k T \cos h\left(\frac{H}{L_p}\right) + \alpha \sin h\left(\frac{H}{L_p}\right)}{A q^2 D_p n_i^2 \sin h\left(\frac{H}{L_p}\right) + \alpha \cos h\left(\frac{H}{L_p}\right)}, \quad (4)$$

$$R_{0gr} = \frac{4\tau_{gr} k T}{q^2 n_i A W_{dep}}. \quad (5)$$

在测试的温度范围内,采用如下公式 $\frac{1}{(R_0)_{thermal}} =$

$\frac{1}{(R_0)_{diff}} + \frac{1}{(R_0)_{gr}}$, 与实验数据进行拟合,得到吸收层少数寿命 τ_p 及其空间电荷区的产生复合寿命 τ_{gr} 分别为 $\tau_p = 3 \times 10^{-7} \text{ s}$, $\tau_{gr} = 1 \times 10^{-7} \text{ s}$, 所得结果与由文献^[5,6]中分析所得结果较为吻合. 在拟合时,由于较高温度下漏电流引起的并联电阻相对较大,因此暂不考虑. 取界面复合速度 $S = 5 \times 10^5 \text{ cm/s}$, 并使用公式^[7]来计算材料的禁带宽度 E_g 和本征载流子浓度 n_i , 而空穴迁移率 D_p 则采用低场迁移率模型^[8]进行计算,扩散长度为 $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$. 在测试的温度范围内,主要以热电流机制为主,而隧穿电流则几乎可以忽略, R_0 随温度的增大基本呈指数减小.

2.2 器件的 I - V 特性及其暗电流分析

器件的变温 I - V 曲线如图3所示. 分别对 300 K 和 220 K 时的 I - V 实验曲线进行各种暗电流的拟合计算,在拟合过程中,调整材料参数和器件的一些不确定量,使 I_{th} (theoretical value) 和 I_{exp} (experiment value) 在不同的偏压下尽量接近,即使 $I_{exp} = I_{th} = I_{diff} + I_{gr} + I_{bbt} + I_{tat} + I_{ohmic}$. 分扩散电流和产生复合电流分别采用式(2)和式(3),带间隧穿电流采用下面的公式^[4]:

$$\frac{I_{bbt}}{A} = \frac{q^3 F_m V_{bias}}{h^2} \sqrt{\frac{2m^*}{E_g}} \exp\left[\frac{-8\pi}{3qF_m h} \sqrt{2m^* E_g^3}\right]. \quad (6)$$

因为 pn 结内电场不为常量,此处的 F_m 取为常量即结内电场的平均值.

$$F_m = \sqrt{\frac{q(V_{bi} - V_{bias})N_D N_A (\varepsilon_1 N_D + \varepsilon_2 N_A)}{2\varepsilon_1 \varepsilon_2 (N_D + N_A)^2}},$$

m^* 为载流子的平均有效质量: $m^* \approx \frac{m_e^* m_h^*}{m_e^* + m_h^*}$, 对

于 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, $m_e^* = 0.031m_0$, $m_h^* = 0.037m_0$, $m^* = 0.017m_0$. 器件的陷阱辅助隧穿电流采用如下的公式^[6]:

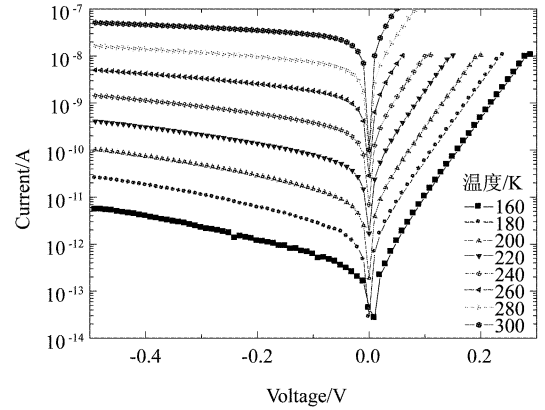


图3 器件的 I - V 实验曲线(160 K-300 K)

Fig. 3 I - V curves of the photodiode(160 K- 300 K)

$$I_{tat} = A[\pi^2 q^2 m^* M^2 N_t |V_{bi} - V| / h^3 (E_g - E_t)] \times \exp[-8\pi(2m^*)^{1/2}(E_g - E_t)^{3/2}/3qhF_m], \quad (7)$$

其中 N_t 为陷阱浓度, M 为陷阱势垒矩阵元, m^* 为有效质量, F_m 为结内电场的平均值, E_t 为陷阱能级.

欧姆漏电流 I_{ohmic} 采用以下公式^[9]:

$$I_{ohmic} = V/R_{sh} \quad (8)$$

其中 R_{sh} 为器件并联电阻.

计算中,假设 $E_t = E_g/2$ ^[10], M^2 取为 $1 \times 10^{-20} \text{ eV}^2 \text{ cm}^3$. 300 K 时的 I - V 曲线拟合结果如图4所示,其中少数寿命与产生复合寿命采用 2.1 中所得结果,拟合得并联电阻为 $R_{sh} = 1.9 \times 10^7 \Omega$. 拟合结果表明在 300 K 时,在所考虑的偏压范围内,暗电流主要由扩散电流、产生复合电流及其欧姆漏电流构成,而带间隧穿电流和陷阱辅助隧穿电流都可以忽略. $T = 220 \text{ K}$ 时,其 I - V 曲线拟合结果如图5所示,小偏压下暗电流主要由产生复合电流和欧姆漏电流组成,反偏压增大时,陷阱辅助隧穿电流开始占主导作用,产生复合寿命、并联电阻及陷阱浓度的拟合结果分别为, $\tau_{gr} = 6 \times 10^{-8} \text{ s}$, $R_{sh} = 1.7 \times 10^9 \Omega$, $N_t = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

由拟合结果可以明显的看出,在室温时,扩散电流远大于产生复合电流,由式(2)可以看出扩散电流主要由半导体的材料参数及其结构如吸收层厚度及掺杂浓度等决定,通过优化材料结构,改善材料性能,可以较大幅度的降低扩散电流. 随着温度的降低,扩散电流和产生复合电流都快速的减小,且扩散电流下降幅度远大于产生复合电流,这是因为当温度到达 200 K 左右,隧穿电流已不可忽略,尤其在大的偏压下. 另外 220 K 和 300 K 时的 I - V 拟合结果都表明欧姆漏电流贡献较大,且欧姆漏电流随温度的降低没有产生复合电流和扩散电流减小的幅度大. 欧姆漏电流

主要由漏电通道所致,在本文所研究的器件中,可能的漏电通道有以下两个可能:ICP 刻蚀台面成型时损伤导致的光敏元侧面漏电通道;外延材料内部缺陷形成的漏电通道.结果表明目前的 ICP 刻蚀条件所引入的损伤较大.有研究^[11]表明,通过热退火和湿法腐蚀可以极大的修复刻蚀台面所形成的损伤,而且 S 钝化与低温生长 SiN_x 钝化技术^[12]相结合可以有效的中和表面及其侧面的悬挂键,减小复合中心浓度,从而降低欧姆漏电流.因此将对低损伤 ICP 刻蚀以及有效的钝化作进一步的研究.

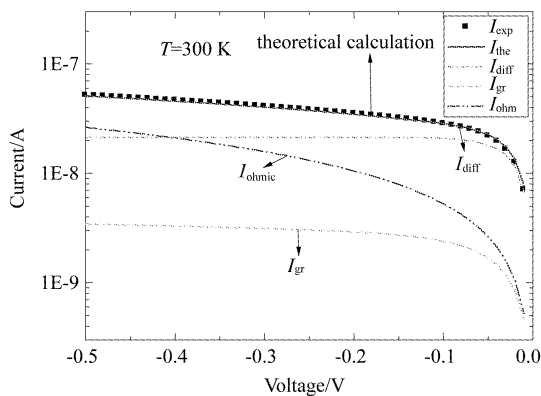


图 4 $T=300\text{ K}$ 时, I - V 实验曲线和各种暗电流机理的理论拟合结果

Fig. 4 The I - V characteristics of experiment and theoretical fitting with different dark current mechanism at 300 K

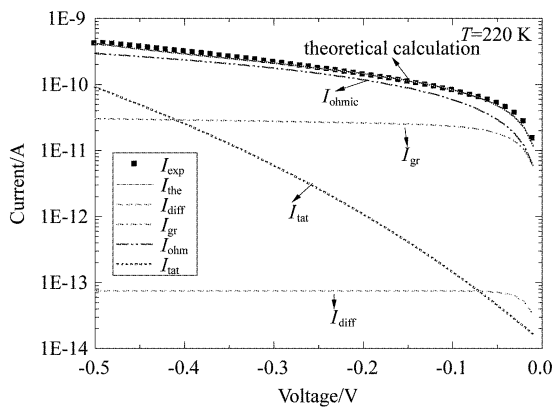


图 5 $T=220\text{ K}$ 时, I - V 实验曲线和各种暗电流机理的理论拟合结果

Fig. 5 The I - V characteristics of experiment and theoretical fitting of different dark current mechanism at 220 K

图 6 所示为 $I_d(V_R = 10\text{ mV})$ 随温度的变化关系,在 220 ~ 300 K 的温度范围内,呈指数关系,为热电流主导,与 2.1 中所得结论吻合,通过拟合可得热激活能 $E_a = 0.443\text{ eV}$,与文献^[13]中所得的 $E_a = 0.4365\text{ eV}$ 基本一致.较大的热激活能表明扩散电

流较大,与 I - V 拟合结果相吻合.

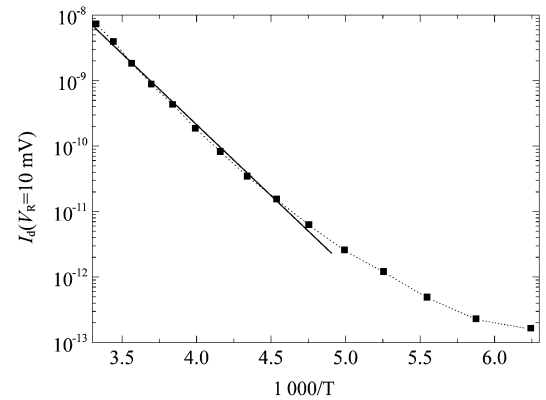


图 6 $I_d(V_R = 10\text{ mV})$ - $1000/T$ 曲线

Fig. 6 The curve of $I_d(V_R = 10\text{ mV})$ versus $1000/T$

2.3 信号和噪声的温度特性

图 7(a)、(b)所示为器件黑体信号和噪声与温度的关系及黑体探测率随温度的关系,测试条件如下:黑体孔径 8 mm、距离 19 cm、黑体温度 900 K.随着温度的降低,信号和噪声的变化规律是不同的,信号随温度降低均匀减小,而噪声则是先快速减小后逐渐趋于平稳.因为受到测量系统的限制,当温度低于 220 K 时噪声趋于平稳,因此温度在 220 K 以下时所得的噪声并不能反映出器件本身的噪声变化趋势.因此图中 150 ~ 220 K 时黑体探测率的变化趋势并不能反映真实的情况.220 K 时,黑体探测率为 $1.24\text{E}10\text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$.

3 焦平面特性

读出电路采用 CTIA 作为输入级并采用相关双采样电路来减小噪声.读出电路前 32×16 是常规结构,积分电容为 0.1 pF;后 32×16 是测试结构,其中包含变积分电容部分,积分电容分别为 5 fF、10 fF、20 fF、30 fF、50 fF.将光敏芯片与读出电路芯片通过 In 柱进行互联,焦平面模块封装在真空杜瓦瓶中,采用液氮控制温度,利用焦平面测试系统对焦平面模块性能进行测试,测试温度分别为 150 ~ 210 K,测试条件:测试环境温度 300 K,黑体温度 900 K,黑体孔径 10 mm,固定测试距离 40 cm,读出频率 100 kHz.对应读出电路前 32×16 元的测试结果,如图 8 所示为 200 K 时积分时间为 1 ms 的响应直方图,盲元率为 1.6%.

信号和噪声与温度的关系以及信号和噪声与积分时间的关系如图 9 所示.信号和噪声随温度的降

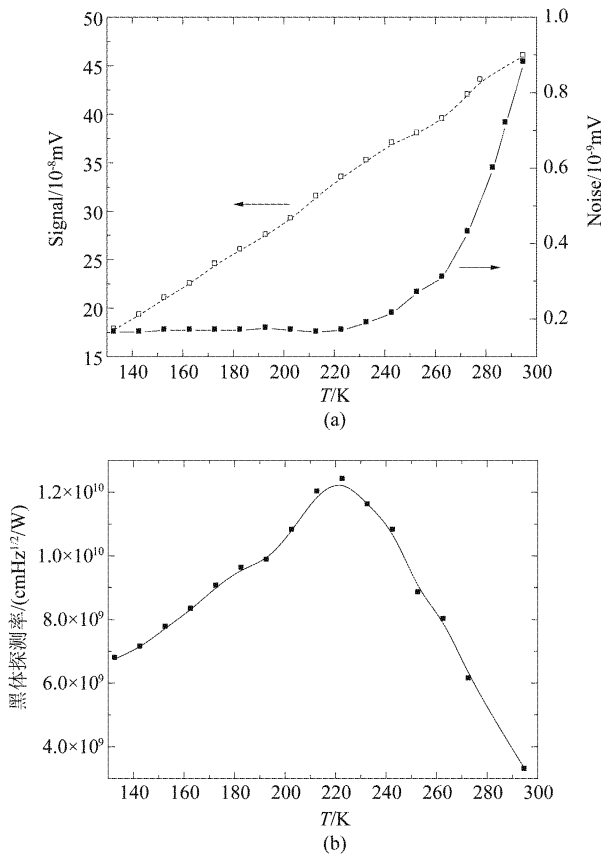


图7 (a) 信号及噪声与温度的关系; (b) 黑体探测率与温度的关系
 Fig. 7 (a) Signal and noise versus temperature; (b) D^* (black body) versus temperature

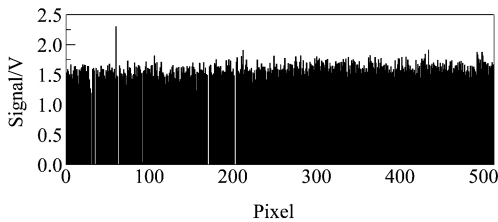


图8 组件 32 × 16 元信号响应直方图
 Fig. 8 Response histogram of 32 × 16 elements

低都是减小的,与芯片测试结果一致,且随着积分时间的增大信号与噪声基本呈线性增大. 平均探测率随积分时间的变化基本保持不变,随温度的降低而增大,如图 10 所示,200 K 时,其黑体探测率达到 $1.0E10 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 150 K 时黑体探测率可达到 $2.40E10 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 比芯片测试所得结果略低,焦平面组件的噪声包括芯片噪声和电路噪声,因此探测率会小一些. 焦平面信号非均匀性随积分时间和温度的变化如表 1 所示,随着温度的降低,信号的非均匀性基本是减小的,在 150 ~ 200 K 时随着积分时

间的增大,信号的非均匀性是减小的,当温度为 210 K 时,反而随着积分时间的增大而增大,说明此时读出电路带来的噪声已比较明显.

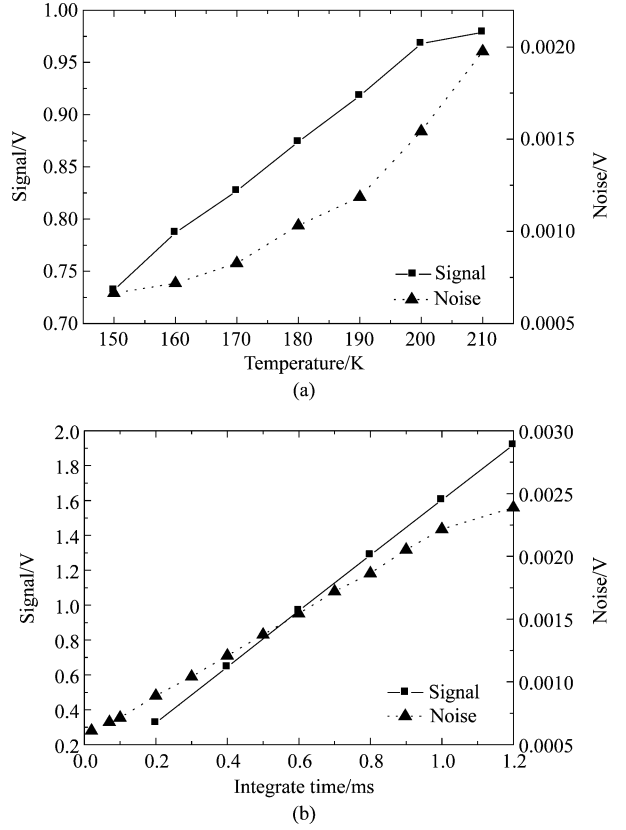


图9 (a) 信号和噪声与温度的关系 ($T_{\text{int}} = 0.6 \text{ ms}$) (b) 信号和噪声与积分时间的关系 ($T = 200 \text{ K}$)
 Fig. 9 (a) Signal and noise versus temperature ($T_{\text{int}} = 0.6 \text{ ms}$) (b) Signal and noise versus integration time ($T = 200 \text{ K}$)

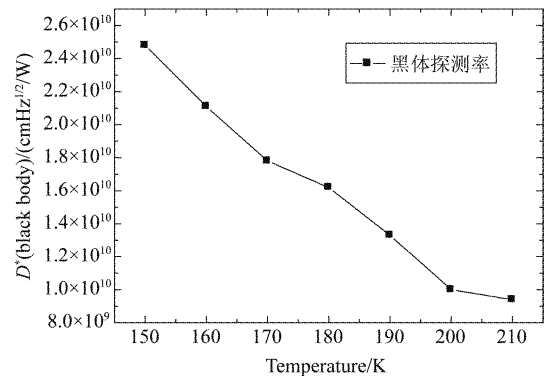


图10 黑体探测率与温度的关系
 Fig10 D^* (black body) versus Temperature

由前 32 × 16 焦平面测试结果可知,通过降低工作温度,以及在一定的温度范围内,通过增加积分时间,可以有效的改善焦平面组件的性能.

通过对读出电路变积分电容 C_{int} 测试结构部分

的焦平面测试结果进行分析,对电路上积分电容的寄生电容 C_p 进行了估算. 计算过程中,假设在一个固定的温度下,每个读出电路上积分电容的寄生电容 C_p 相等. 组件暗信号表达如下:

$$V_{\text{dark}} = \frac{I_{\text{dark}} * T_{\text{int}}}{\eta(C_{\text{int}} + C_p)} + V' \quad (9)$$

其中 V' 为 $T_{\text{int}} = 0$ s 时测得信号, I_{dark} 为不同温度下的暗电流, η 为读出电路增益. 则随积分时就按的变化

$$\text{斜率为 } K = \frac{I_{\text{dark}}}{\eta(C_{\text{int}} + C_p)}, \text{ 即: } \frac{1}{K} = \frac{\eta}{I_{\text{dark}}} C_{\text{int}} + \frac{\eta}{I_{\text{dark}}} C_p,$$

对于不同的积分电容,可以得到 $1/K$ 与 C_{int} 的关系. 作 $1/K \sim C_{\text{int}}$ 曲线,线性拟合,从而积分电容可表示为:

$$C_p = \frac{\text{截距}}{\text{斜率}} \quad (10)$$

分别在 150 K、170 K 和 210 K 温度下,进行拟合计算,如表 2 所示. 通过对不同积分电容 C_{int} 的组件暗信号与积分时间关系进行分析,计算出积分电容上的寄生电容约为 10 fF. 在后续设计小积分电容的读出电路时,考虑减小、校正寄生电容影响,从而提高焦平面组件的性能.

表 1 信号非均匀性随积分时间及温度的变化

Table.1 Non-uniformity of signal versus integration time and temperature

温度/K	信号非均匀性(%)			
	0.2ms	0.4ms	0.6ms	1.0ms
150	7.0	6.9	6.9	5.4
160	7.5	6.8	6.7	5.3
170	7.6	7.4	7.1	5.8
180	7.6	7.4	7.1	6.0
190	7.8	7.7	7.4	6.3
200	8.0	7.9	7.9	6.9
210	8.2	8.6	9.0	10.8

表 2 寄生电容的拟合计算结果

Table.2 the simulation results of C_p

温度/K	$\frac{\eta}{I_{\text{dark}}}$	$\frac{\eta}{I_{\text{dark}}} C_p$	C_p/fF
150	1.722	11.24	6.5
170	0.3351	3.001	8.9
210	0.0166	0.183	11.0

4 结论

对 32×32 面阵 InGaAs 焦平面探测器的芯片和焦平面特性进行了测试分析. 对芯片的 $I-V$ 及其 R_0 随温度的变化关系进行了理论计算,并与实验数据拟合的较吻合,表明在零偏或反偏压较小时,器件的暗电流主要受扩散电流、产生复合电流和欧姆漏电流的限制. 扩散电流主要由材料参数及其器件结构

决定,因此通过改善材料性能并优化器件结构,可以有效地降低扩散电流;而欧姆漏电流主要是由台面成型时的损伤所引起,因此开展如何减小和修复刻蚀损伤,并提高表面和侧面的钝化质量,对减小器件暗电流提高探测器性能是相当有意义的. 另外,通过适当降低工作温度和延长积分时间,可以有效地改善焦平面的性能. 通过变积分电容的测试结果,得到了积分电容的寄生电容,通过设计电路参数减小寄生电容的影响,可以改善组件的性能.

REFERENCES

- [1] Porod W, Ferry D K. Modification of the virtual-crystal approximation for ternary III-V compounds [J]. *Phys. Rev. B*, 1983, **27**(4):2587-2589.
- [2] Howard W Yoon, Matt C Dopkiss, George P Eppeldauer, Performance Comparisons of InGaAs, extended InGaAs and Short-wave HgCdTe Detectors between 1 μm and 2.5 μm [C]. Proc. of SPIE, 2006, 6297, 629703-1~10.
- [3] Vander R J, Hoogeveen A R W M, Spruijt H J, et al. Low-noise InGaAs Infrared (1.0-2.4 μm) focal plane arrays for SCIAMACHY [C]. Proc. of SPIE, Vol. 2957 54-65.
- [4] Sze S M. *Physics of Semiconductor Devices* [M]. Wiley Interscience, New York, 1981.
- [5] Metzger W K, Wanlass M W. Auger recombination in low-band-gap n-type InGaAs [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2001. **79**(20):3272-3274.
- [6] Gfroerer T H, Priestley L P. Temperature dependence of nonradiative recombination in low-band gap $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ double heterostructures grown on InP substrates [J]. *J. Appl. Phys.* 2003. **94**(3):1738-1743.
- [7] Sajal Paul, Roy J B, Basu R K, Empirical expressions for the alloy composition and temperature dependence of the band gap and intrinsic carrier density in $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ [J]. *J. Appl. Phys.* 1991, **69**(2):827-829.
- [8] Sotoodeh M, Khalid A H, Rezazadeh A A. Empirical low-field mobility model for III-V compounds applicable in device simulation codes [J]. *Journal of applied physics*, 2000, **87**(6):2890-2900.
- [9] Vishnu Gopal, Sudha Gupta. Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride $n^+ - p$ junctions [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, 44: 143-152.
- [10] Rogalski A. *Photovoltaic Detectro in Infrared Photon Detectors* [M]. USA: Washington, SPIE Optical Engineering Press, 1996, chap3.
- [11] Yahong Y H, Qian Serguei An, Ian Betty, et al. Techniques for achieving low leakage current in dry etched InGaAs waveguide PIN detectors [J]. *J. Vac. Sci. Technol.* 2004, **22**(3):2062-2066.
- [12] Zhi Jin, Prost W, Neumann S, et al, Sulfur and low-temperature SiNx passivation of self-aligned graded-base InGaAs/InP heterostructure bipolar transistors [J]., *J. Vac. Sci. Technol. B* **22**(3), 2004, 1060-1066.
- [13] Zhang Yonggang, Yi Gu, Tian, Zhaobing, et al. Wavelength extended 2.4 μm heterojunction InGaAs photodiodes with InAlAs cap and linearly graded buffer layers suitable for both front and back illuminations [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2008, 51:316-321.