

文章编号: 1001 - 9014(2008)01 - 0007 - 05

256 元 InGaAs 线列红外焦平面及扫描成像

吕衍秋^{1,3}, 韩冰^{1,3}, 白云^{1,3}, 徐萌^{1,3}, 唐恒敬^{1,3},
孔令才¹, 李雪¹, 张永刚², 龚海梅¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050;
3 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:报道了用分子束外延 (MBE) 方法生长掺杂 InGaAs 的 PN InP/InGaAs/InP 外延材料, 通过台面制作、硫化处理、ZnS 聚酰亚胺双层钝化、电极生长等工艺, 制备了 256 元正照射台面 InGaAs 线列探测器, 278 K 时平均峰值探测率为 $1.33 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。测试了不同钝化方式探测器典型 FV 曲线和探测率, 硫化可以减小探测器暗电流, ZnS 聚酰亚胺双层钝化效果最好。并对 ZnS 聚酰亚胺双层钝化 InGaAs 探测器进行了电子辐照研究。256 元 InGaAs 探测器阵列与两个 CTA 结构 128 读出电路互连并封装, 在室温时, 焦平面响应率不均匀性为 19.3%。成功实现了室温扫描成像, 图像比较清晰。

关键词:探测器; 焦平面; InGaAs; 钝化; 扫描成像

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A

256 ELEMENT InGaAs LINEAR IR FOCAL PLANE ARRAY AND SCANNING IMAGE

LV Yan-Qiu^{1,3}, HAN Bing^{1,3}, BAI Yun^{1,3}, XU Meng^{1,3}, TANG Heng-Jing^{1,3},
KONG Ling-Cai¹, LI Xue¹, ZHANG Yong-Gang², GONG Hai-Mei¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;
3. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on doped-InGaAs MBE-grown PN InP/InGaAs/InP epitaxial materials, 256 element front-illuminated mesa InGaAs linear detectors was made by using the technics of mesafabrication, sulfidation treatment, passivation with ZnS/polyimide double layers, and growth of electrode. The mean peak detectivity of the detectors is $1.33 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ at 278K. The typical FV curves and detectivity of detectors with different passivation layers were measured. Sulfidation can reduce the dark current of detectors. The effect of passivation with ZnS/polyimide double layers is best. InGaAs detectors passivated with ZnS/polyimide double layers after electron radiation were also studied. 256 element InGaAs detector array was connected with two CTA-structure L128 read out integrate circuits and packaged. The mean nonuniformity of responsivity is 19.3% at room temperature. Better image is achieved successfully by scanning technology at room temperature.

Key words: detector; focal plane array; InGaAs; passivation; scanning image

引言

由于 InGaAs 探测器在短波红外波段可以室温工作, 并且探测率高于 HgCdTe, 在国外已经用于卫星遥感^[1], 如法国的 SPOT4 和 SPOT5 卫星上采用了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面; 欧洲空间局 (ESA) 新一代的环境卫星 (ENVISAT) 上采用了

1024 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面。美国 NASA 新千年计划 (NMP) 地球观测 1 号卫星 (EO-1) 中, 采用 256 × 256 InGaAs 红外探测器焦平面组件。目前, 美国传感器有限公司 (Sensors Unlimited) 在 InGaAs 探测器的研究方面处于世界领先地位, 该公司的 256 元、512 元、1024 元、320 × 240、320 × 256、640 × 512、128 × 128 等红外焦平面近红外微型相机已进

收稿日期: 2007 - 03 - 13, 修回日期: 2007 - 12 - 18

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50632060)

作者简介: 吕衍秋 (1978-), 男, 山东汶上人, 博士生, 主要从事短波红外探测器的研究。

Received date: 2007 - 03 - 13, revised date: 2007 - 12 - 18

入产业化,响应波长为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$,平均探测率达 $6 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$,量子效率大于 70%,并研制成功了 1024×1024 和 1280×1024 InGaAs短波凝视焦平面.另外日本的滨松、美国的 Indigo、比利时的 Xenic 等公司也生产 InGaAs焦平面产品.西方国家对我国能用于航天领域的 InGaAs线列及面阵焦平面还处于封锁状态,因此独立自主地发展 InGaAs短波红外焦平面有着重要的战略意义.但是 InGaAs探测器有效探测波段都在 HgCdTe探测器的探测范围内,所以国内目前在近红外波段仍以 HgCdTe探测器为主.随着系统灵敏度的提高,对红外探测器的性能要求越来越高,国内开始注意并发展 InGaAs红外焦平面^[2],但目前还处于起步阶段.

目前, InGaAs探测器多为平面结构,由于扩散工艺复杂,且探测器间距离较小时容易产生串音,所以我们采用台面结构,但是钝化是该种探测器制备的关键工艺.文献中报道的 InGaAs平面结构钝化膜多为 SiN_x 、 SiO_2 、 Si/SiO_2 、 CdS/SiO_2 等,台面结构钝化膜多为聚酰亚胺、 SiO_2 、 SiN_x 等.虽然无机介质膜与 InP和 InGaAs接触较好,可有效的减小少子表面复合,但是对于台面结构,由于生长等因素,探测器台面的上表面钝化层生长较厚,而侧面钝化层生长较薄,厚度的不均匀性影响最终钝化效果.另外由于台面成型过程中,腐蚀会造成侧面较为粗糙,从而使侧面钝化效果较差,不能有效的减小暗电流,不能保证器件的长时间的稳定性.有机介质膜聚酰亚胺虽然有耐腐蚀、抗辐照、耐高温、黏附性好等优点,但是钝化效果较差.我们采用 ZnS/聚酰亚胺双层钝化结构,可以减小表面和侧面的复合,进而减小暗电流,提高探测器的探测率^[3].该工艺适用于均匀性要求较高的大线列或面阵台面 InGaAs焦平面探测器的研制.

1 实验

ZnS/聚酰亚胺双层钝化 InGaAs台面探测器的结构如图 1 所示,PN InP/InGaAs/InP结构是用分子束外延技术在 2英寸 InP半绝缘衬底上依次生长厚度为 $1 \mu\text{m}$ 掺 Si的 n-InP缓冲层, $n = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;厚度为 $2.5 \mu\text{m}$ 并且与 InP晶格匹配掺 Si的 $n\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层, $n = 4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$;厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 掺 Be的 p-InP窗口层, $p = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.表面和侧面有 ZnS/聚酰亚胺双层钝化, p型和 n型欧姆接触电极都为 Ti/Pt/Au

外延片经过清洗,结合材料性质及干法刻蚀和

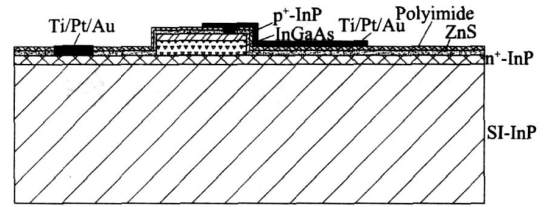


图 1 ZnS/聚酰亚胺双层钝化 InGaAs台面探测器的结构
Fig 1 The mesa InGaAs detector structure with ZnS/polyimide double passivation layers

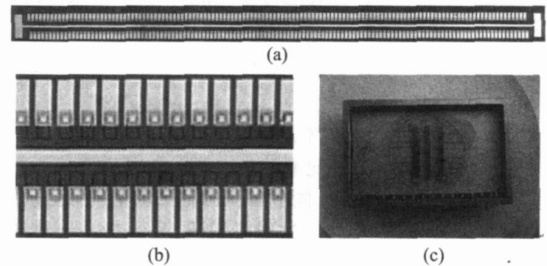


图 2 256元 InGaAs线列探测器及封装后照片
Fig 2 Photographs of 256 element InGaAs linear detector array and after package

湿法腐蚀的优点,我们先用 Ar^+ 刻蚀 p-InP窗口层,再用酒石酸 $/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀液腐蚀 InGaAs层,这样既提高光敏面的图形保真度,又减小 InGaAs吸收层侧面损伤.然后在 60 的 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 溶液中硫化 30分钟,去掉表面氧化层,热蒸发 1630 \AA 的 ZnS抗反射钝化层,腔体真空度为 $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$,蒸发源为纯度为 99.99%的 ZnS块状晶体.然后覆盖 $2 \mu\text{m}$ 聚酰亚胺第二钝化层.在所开的电极孔处同时生长 n型和 p型电极 Ti/Pt/Au,厚度分别为 20/30/300nm. 256元 InGaAs台面线列探测器(图 2a)光敏面面积为 $50 \times 50 \mu\text{m}^2$,品字型交错排列(图 2b),中间为公用电极.图 2c是 256元 InGaAs线列探测器的两边用金丝与两个 L128读出电路互连,封装在 32引脚的陶瓷管壳中.

2 结果与讨论

2.1 钝化研究

我们制备了 3种不同钝化方式的 InGaAs探测器,其典型 IV曲线如图 3所示,单层聚酰亚胺(PD)钝化器件反偏压暗电流最大,经过硫化后再生聚酰亚胺的器件,暗电流减小,硫化 + ZnS/聚酰亚胺钝化时暗电流最小.因为 InP和 InGaAs表面氧化层作为散射中心和非辐射复合中心,使表面具有较高的表面态密度及表面复合速度,引起器件很大的表

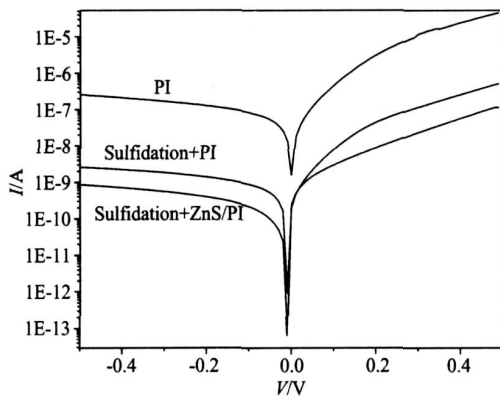


图3 不同钝化 InGaAs 探测器典型 I-V 曲线
Fig 3 Typical I-V curves of InGaAs detectors with different passivation

面漏电,严重影响器件的性能.硫化能有效去除 InP 和 InGaAs 表面氧化层^[4],使表面的 In-O,As-O 键转变成 In-S,As-S, In-S-As 键.在台面成型后引入硫化工艺,可以去除台面暴露于空气中所形成的氧化层,从而减小表面及侧面漏电,进而提高探测器的探测率.因此硫化后再生长聚酰亚胺的器件比直接生长聚酰亚胺的器件暗电流低.另外硫化会在台面结构的表面和侧面产生断裂的 S 键,硫化后生长硫化物无机钝化膜,能更好的与表面及侧面结合.宽带隙 (3.5 eV) ZnS 材料具有高介电常数,低机械应力,在 0.9 ~ 14 μm 吸收率低等优点,是优良的红外抗反射介质膜.硫化后生长 ZnS,使 ZnS 更好的与表面及侧面结合,具有较小的界面复合和层间应力,能作为较好的抗反射钝化层.对于 InGaAs 台面结构,台面高度 3 μm,如果生长较薄无机钝化层,由于侧面钝化膜生长速率较慢,侧面钝化效果较差,而且 p 过渡电极在钝化膜上,焊接时容易击穿;如果生长无机钝化层太厚,应力增大,钝化膜容易开裂,又由于聚酰亚胺有耐腐蚀、抗辐照、耐高温、黏附性好等优点,所以我们采用了硫化 + ZnS/聚酰亚胺双层钝化结构.测试表明,在反偏压 1V 时,暗电流比硫化 + 聚酰亚胺单层钝化 InGaAs 探测器低一个数量级,表明 ZnS/聚酰亚胺双层钝化效果较好,有很大的应用前景.根据 ZnS 薄膜在 InGaAs 探测器中心波段折射率 2.36,计算出生长 ZnS 薄膜厚度为 1630 Å 时抗反射作用较好^[5]. InGaAs 探测器峰值探测率 D_p^* 由以下公式得出:

$$D_p^* = gD_{bb}^* = \frac{2\sqrt{2}g L^2 V_s \sqrt{f}}{V_n (T_B^4 - T_0^4) A_B \sqrt{A}}, \quad (1)$$

式中 D_{bb}^* 为黑体探测率, $2\sqrt{2}$ 为调制因子, L 为黑体

和探测器距离, f 为频率带宽, 为斯忒藩常数, 为黑体比辐射率, T_B 为黑体温度, T_0 为调制盘温度, A_B 为黑体出射孔面积. 根据信号和噪声计算表明 (如图 5 辐照前): 278K 时, 硫化 + ZnS/聚酰亚胺双层钝化 InGaAs 探测器平均峰值探测率为 $1.33 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 比硫化 + 聚酰亚胺钝化 InGaAs 探测器平均峰值探测率 ($1.03 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$) 高出 29%^[6], 而单层聚酰亚胺钝化平均峰值探测率仅有 $1.08 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$. 目前, 我们制备的台面结 InGaAs 探测器探测率小于报道的平面结 InGaAs 探测器探测率 ($6 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$), 但是已经在短波范围内高于 HgCdTe 探测器, 如何进一步改进钝化效果、减小暗电流和提高探测率, 我们正在努力解决这个问题.

2.2 电子辐照研究

将 256 元 InGaAs 线列探测器封装到杜瓦中, 连续抽取 20 元, 在 278K 测试其 I-V 曲线、探测率和响应光谱. 探测器经过 $2 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2$ 剂量电子辐照后, 在相同条件下测试探测器的 I-V 曲线、探测率和响应光谱. 图 4 为电子辐照前后 InGaAs 探测器的 I-V 曲线, 测试范围为 -1V 到 1V, 辐照后器件的暗电流都会变大, 在实验中我们发现对于某些性能较好的器件, 其受电子辐照的影响较大, 其暗电流的增大可达到 1 个数量级. 但某些性能较差的器件, 其暗电

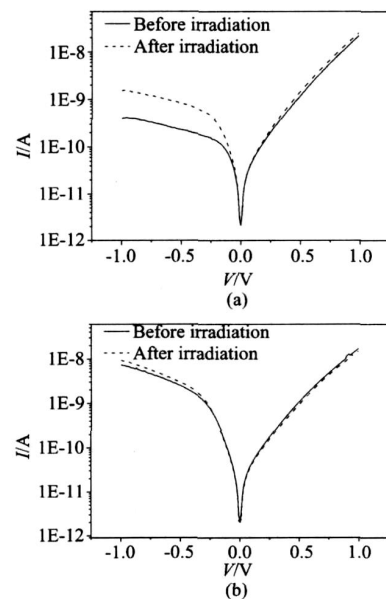


图4 电子辐照前后 InGaAs 探测器典型 I-V 曲线 (a) 小暗电流器件 (b) 大暗电流器件

Fig 4 Typical I-V curves of InGaAs detector before and after electrons irradiation (a) device with small dark current (b) device with big dark current

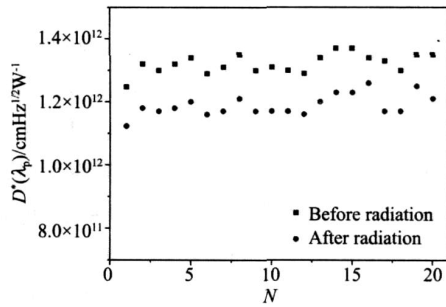


图5 InGaAs探测器辐照前后探测率

Fig 5 Detectivity of InGaAs detectors before and after radiation

流的增大比较小. 这给我们对器件受电子辐照的数据分析带来很大的困难, 难以进行量化处理, 给出统一的表达式或损伤系数. 我们知道, 器件原来就含有多种缺陷, 如果电子辐照所带来的损伤与原有缺陷相比较小时, 器件性能主要还是由原有缺陷所限制, 只有当电子辐照所带来的影响超过原有缺陷或可相比拟时, 电子辐照的影响才能显露出来. 由于不同器件自身的差异, 所以同一剂量下的辐照对不同器件的影响有大有小.

图5为 InGaAs探测器辐照前后探测率的变化图, 表明经过大剂量电子辐照后, 探测率发生了改变, 电子辐照前后, 我们在 278K 温度测试了各个探测器的响应信号电压和噪声, 表明经过大剂量电子辐照后, 探测率减小, 平均值由 $1.32 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 降低到 $1.19 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$. 探测率降低的原因主要是辐照后暗电流增大, 导致优值因子 R_0A 降低. 图6为 InGaAs探测器辐照前后响应光谱图, 辐照前后响应光谱变化较小, 响应光谱短波方向有降低的现象. HgCdTe 器件的电子辐照后也发现类似的现象, HgCdTe 器件响应光谱比 InGaAs 变化明显. 电子辐照后器件响应光谱短波方向的响应降低, 可能有以下原因: (1) 电子辐照对晶格造成损伤, 产生缺陷, 短波方向光的散射有所增强. 虽然我们分析电子辐照主要产生点缺陷, 但在室温下, 这些缺陷大多可以移动, 在迁移过程中, 它们可以互相结合, 也可以与辐照前样品中存在的其它缺陷相结合, 最后可以形成较大的并且相对稳定的缺陷团, 这些缺陷团可能对特定波段的光有较强的散射. (2) 接近表面处的载流子复合速度增大, 使产生的光生过剩载流子来不及扩散到结区便复合掉了, 而光伏器件的光生电子空穴对必须扩散到结区才能对信号有贡献. (3) 辐照过程中在钝化层和 InP 间的界面处产生界

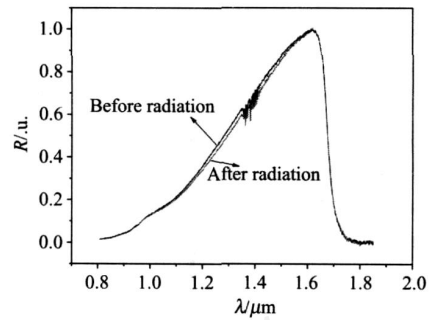


图6 InGaAs探测器辐照前后响应光谱

Fig 6 Response spectra of InGaAs detector before and after radiation

面态, 或在 InP 中产生缺陷能级. 根据 Shockley-Reed-Hall 复合模型, 这些界面态和缺陷能级很容易起到复合中心的作用而使载流子的复合速度增大.

2.3 线列焦平面测试

采用的 L128 读出电路是为实现探测器响应信号的顺序读出而设计制作的, 可提供低噪声前置放大和多路传输. 其原理主要是: 电路在设定的积分时间 (t_{int}) 内对光敏感元产生的光电流信号进行积分并转换成电压信号, 积分电容 (C_{int}) 为 1pF, 开始脉冲起始扫描过程, 并将储存的电荷信号经采样、差分放大和多路传输后顺序输出^[7], 扫描结束时给出 EOS 信号. 由于芯片采用较低的输入偏置 (仅为毫伏量级), 因此本读出电路适用于光伏器件, 要求较小的积分时间. 该芯片主要包括低噪声前置放大器、相关双采样电路、移位寄存器等. 低噪声前置放大器又称为电容反馈互阻抗放大器 (CTIA), 其输入端与线列探测器芯片耦合, 工作于运放积分模式, 将相应的光电流信号积分后输出. 测试短波红外光源是温度为 900K 的黑体, 封装后的管壳放在屏蔽盒中, 用 Pulse Instruments 4000 系统测试焦平面的信号响应, 积分时间 $1000\mu\text{s}$, 每一元读出时间为 $20\mu\text{s}$. 图7为 256元 InGaAs 焦平面在室温无光时噪声直方图, 平均噪声电压为 0.8mV . 256元 InGaAs 焦平面响应直方图如图8所示, 有两个过热像元, 根据公式:

$$U_R = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}, \quad (2)$$

式中 \bar{R} 为平均响应率, N 为探测器个数, R_i 为第 i 个探测器响应率, 计算出响应率不均匀性 (U_R) 为 19.3%, 大于国外应用水平 ($U_R < 10\%$), 所以提高焦平面响应的均匀性是我们下一步的主要任务. 可以通过提高材料的均匀性和改进工艺, 期望达到应用水平.

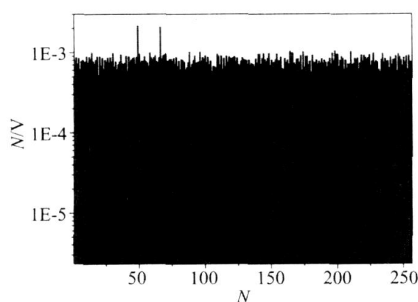


图 7 256元 InGaAs 焦平面噪声直方图

Fig 7 The histogram of the noise of the 256 element InGaAs FPA

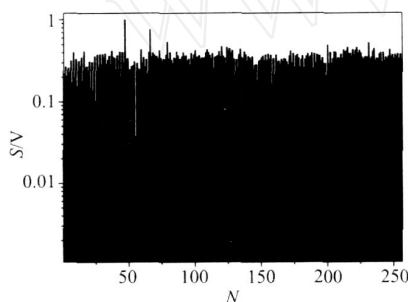


图 8 256元 InGaAs 焦平面响应直方图

Fig 8 The histogram of the response of the 256 element InGaAs FPA

2.4 扫描成像

把封装后的管壳安装在扫描系统上,窗口为宝石片.在室温扫描的白天外景如图 9所示,图像比较清晰.测试时,物距定为无穷远,电路积分时间为 0.5ms 图像经过不均匀性矫正,其中线列探测器有两个盲元,信号分别取其相临两元信号的平均值.



图 9 256元 InGaAs 线列焦平面扫描图像

Fig 9 Scanning image by 256 element InGaAs linear focal plane array

3 结论

我们报道了采用 ZnS 聚酰亚胺双层钝化制备了 256元正照射台面 InGaAs 线列探测器, 278K 时平均峰值探测率为 $1.33 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$. 比较了不同钝化方式的 InGaAs 探测器性能, ZnS 聚酰亚胺双层钝化效果较好. 并对 ZnS 聚酰亚胺双层钝化 InGaAs 探测器进行了电子辐照研究. 256元 InGaAs 探测器阵列与两个 CTA 结构 128 读出电路互连并封装, 室温时焦平面响应率不均匀性为 19.3%. 我们成功获得了比较清晰的扫描图像, 对进一步的大线列或面阵 InGaAs 焦平面探测器的研制有非常重要的意义.

REFERENCES

- [1] Olsen G H, Joshi A M, Ban V S, *et al* Multiplexed 256 element InGaAs detector arrays for 0.8 ~ 1.7 μm room-temperature operation [J]. *SPIE*, 1988, **972**: 279—285.
- [2] ZHANG Yong-Gang, GU Yi, ZHU Cheng, *et al* Fabrication of short wavelength infrared InGaAs/InP photovoltaic detector series [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张永刚, 顾溢, 朱诚, 等. 短波红外 InGaAs/InP 光伏探测器系列的研制. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(1): 6—9.
- [3] Lv Y Q, Wang N L, Zhuang C Q, *et al* The uniformity of InGaAs in InP/InGaAs/InP by microwave photoconductivity decay (μ -PCD) carrier lifetime measurement [J]. *Semicond Sci Technol*, 2006, **21**: 771—774.
- [4] Lyster R, Chang R R, Lile D L. Sulfur as a surface passivation for InP [J]. *Appl Phys Lett*, 1988, **53**(2): 134—136.
- [5] Kozłowski L J, Tennant W E, Zandian M, *et al* SW R staring FPA performance at room temperature [J]. *SPIE*, 1996, **2746**: 93—100.
- [6] LV Yan-Qiu, XU Yun-Hua, HAN Bing, *et al* Study on 128 \times 1 element linear InGaAs short wavelength infrared focal plane array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吕衍秋, 徐运华, 韩冰, 等. 128 \times 1 线列 InGaAs 短波红外焦平面的研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 333—337.
- [7] Fossum E R, Pain B. Infrared readout electronics for space science sensors: state of the art and future directions [J]. *SPIE*, 1993, **2020**: 262—285.