

文章编号:1001-9014(2012)01-0011-05

基于 N-on-P 结构的背照射延伸波长 640 × 1 线列 InGaAs 探测器

朱耀明^{1,2,4}, 李永富^{1,2,4}, 李雪^{1,2}, 唐恒敬^{1,2}, 邵秀梅^{1,2}, 陈郁^{1,2},
邓洪海^{1,2,4}, 魏鹏^{1,2,4}, 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, 上海 200050; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:在 N-on-P 型 $\text{In}_{0.78}\text{Al}_{0.22}\text{As}/\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ 外延材料上, 采用感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀技术制备了背照射 640 × 1 线列 InGaAs 探测器芯片, 研究了探测器光电性能. 结果表明, 室温下单元器件响应截止波长和峰值波长分别为 2.36 μm 和 1.92 μm , 平均优值因子 (R_0A) 为 $16.0 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 峰值量子效率达到了 37.5%; 在 1 ms 积分时间下焦平面探测器平均峰值探测率达到了 $2.01 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 响应非均匀性为 8.77%, 盲元率约为 0.6%.

关键词: ICP 刻蚀; N-on-P 结构; 线列探测器; 光电性能

中图分类号: TN21 文献标识码: A

Extended-wavelength 640 × 1 linear InGaAs detector arrays using N-on-P configuration for back illumination

ZHU Yao-Ming^{1,2,3}, LI Yong-Fu^{1,2,3}, LI Xue^{1,2}, TANG Heng-Jing^{1,2}, SHAO Xiu-Mei^{1,2},
CHEN Yu^{1,2}, DENG Hong-Hai^{1,2,3}, WEI Peng^{1,2,3}, ZHANG Yong-Gang⁴, GONG Hai-Mei^{1,2*}

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

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

3. Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

4. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Back-illuminated 640 × 1 linear InGaAs detector arrays were fabricated on the $\text{In}_{0.78}\text{Al}_{0.22}\text{As}/\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ material of N-on-P configuration by the inductively coupled plasma (ICP) etching. The photoelectric characteristics of the detector were investigated. The results indicated that the cutoff-wavelength and peak-wavelength are 2.36 μm and 1.92 μm , respectively, at room temperature. The average value of R_0A is $16.0 \Omega \cdot \text{cm}^2$ and the quantum efficiency of the peak wavelength reaches to 37.5%. Otherwise, the average peak detectivity of linear detector array reaches to $2.01 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, the response nonuniformity is about 8.77% and the defective pixel ratio is 0.6% for 1 ms of integrate time.

Key words: N-on-P configuration; ICP etching; linear detector array; photoelectric characteristics

PACS: 95.55. Aq

引言

短波红外 1.7 ~ 2.6 μm 波段包含了 O-H、C-H、

C-O、C = O 和 N-H 等功能键的许多特征吸收光谱^[1], 在农业监测、对地观测、空间遥感等领域有着广泛的应用前景, 如 1.9 ~ 2.5 μm 波段资源卫星中

收稿日期: 2010-12-05, 修回日期: 2011-01-10

Received date: 2010-12-05, revised date: 2011-01-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50632060); 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿前瞻项目资助 (Q-ZY-9, C2-32)

Foundation item: Supported by the national natural science foundation in key projects (No. 50632060); The knowledge innovation frontier projects in young talents field of Chinese Academy of Sciences (Q-ZY-9, C2-32)

作者简介: 朱耀明 (1985-), 男, 湖北孝感人, 博士研究生, 主要从事短波红外探测器的研究. E-mail: yaoming85@hotmail.com.

* 通讯作者: E-mail: hmgong@mail.sitp.ac.cn.

高分辨率多光谱成像,可用于农作物水分探测等方面,因此能够响应该波段的半导体材料引起了人们的广泛关注.

III-V 族化合物 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 是Ⅱ-Ⅴ系直接带隙半导体材料,具有高电子迁移率、良好抗辐照特性等特点^[2]. 该种材料制备的短波红外探测器灵敏度高,在较高工作温度下仍具有较好的性能,而且工艺简单、成本低,在实现系统的小型化、低功耗和低成本方面具有较强竞争力. 随着 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 化合物组成的变化,其可响应波段为 $0.87 \sim 3.5 \mu\text{m}$,是制备 $1.7 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 波段探测器的理想材料. 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 (SCIAMACHY) 采用的 1024 元延伸波长 InGaAs 线列探测器,在 150 K、 -2 mV 的偏压下暗电流达到 50 fA 的水平^[3]; Judson 公司 J23 系列截止波长 $2.4 \mu\text{m}$ 的延伸波长 InGaAs 探测器在 1 级热电致冷 (TEC1, -20°C) 的工作条件下,探测率达到 $3 \sim 5 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$. 中科院上海微系统与信息技术研究所张永刚^[4]等人采用气源分子束外延 (GSMBE) 技术生长 N-on-P 型截止波长 $2.4 \mu\text{m}$ 的外延薄膜材料,并制备出了单元延伸波长 InGaAs 探测器,在室温下峰值探测率达到了 $1.3 \times 10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$.

随着空间遥感领域的发展,我国对航天遥感用短波红外长线列焦平面探测器需求越来越迫切,因此,发展长线列探测器对航天遥感应具有十分重要的意义. 本文采用 ICP 刻蚀和湿法去损伤技术,在新型 N-on-P 结构的外延材料上制备背照射延伸波长 640×1 长线列 InGaAs 探测器,测量分析光敏芯片以及焦平面探测器的光电性能.

1 器件制备

实验用外延材料由中科院上海微系统与信息技术研究所提供,采用 GSMBE 技术在 InP 半绝缘衬底上依次外延生长 $\text{p}^+ - \text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 渐变缓冲层 (Be 掺杂 $p > 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)、 $\text{n}^- - \text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ 吸收层 (Si 轻掺杂)、 $\text{n}^+ - \text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ 帽层 (Si 掺杂 $n > 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$),如图 1(a)所示.

采用感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀技术制作台面,并采用酒石酸腐蚀刻蚀后的表面及侧壁,表面和侧壁均采用 SiN_x 薄膜进行钝化,p 电极采用 Ti/Pt/Au 金属膜系,n 电极采用 Cr/Au 金属膜系,电极制作完成后对芯片背面进行抛光减薄,低温生长 280 nm 的 ZnS 增透膜,探测器单元器件剖面结构如图 1(b)所示. 光敏芯片与读出电路采用 In 柱通过基板

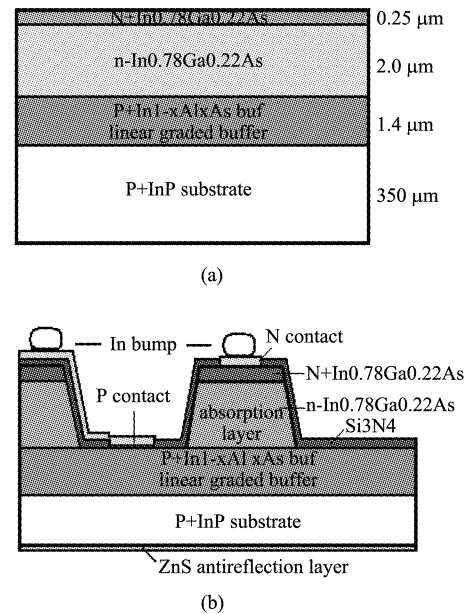


图 1 N-on-P 外延材料结构和背照器件剖面示意图
Fig. 1 Schemes of (a) N-on-P epitaxial material and (b) back-illuminated detectors

间接倒焊互连,在焦平面测试系统上测量焦平面探测器的性能.

2 器件光电性能

2.1 I-V 特性及串联电阻

将 640×1 光敏芯片封装于真空杜瓦中,在 Keithley 236 上测量器件的 I-V 特性. 如图 2(a) 所示,300 K、 -10 mV 条件下器件的优值因子 (R_0A) $15.8 \sim 17.4 \Omega \cdot \text{cm}^2$,暗电流密度 $358 \sim 406 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,与目前先进水平相比存在一定的差距. 当正向外加偏压趋近 pn 结势垒大小时 (大约 0.5 V),流过 pn 结的电流会显著增大,串联电阻上的压降相对 pn 结区的压降变得不可忽略,从而使得 I-V 特性偏离了理想状态. 在考虑串联电阻影响的情况下,pn 结压降修正为 $V_j = V - IR_s$ (R_s 为串联电阻),因此修正后的电流为 $I = I_0 e^{\frac{q(V-IR_s)}{nkT}}$. 将 I-V 特性产生偏离之前的曲线外延 (如图 2(a) 中小图所示),在相同电流下它们的电压差就是串联电阻上的压降 $\Delta V = V - V_j = IR_s$ ^[5],因此利用 ΔV 与 I 的关系,可以得到串联电阻,如图 2(b) 所示,直线斜率即为串联电阻 $R_s = 184 \Omega$.

器件 I-V 特性随温度的变化如图 3(a) 所示,随着温度的降低暗电流明显降低. 当温度降低到 220 K 以下,器件 I-V 曲线出现明显的扰动和零点漂移,这是因为在此温度下暗电流已经降低到很低的水平 (零偏附近大约 10^{-11} 量级),导致此时器件

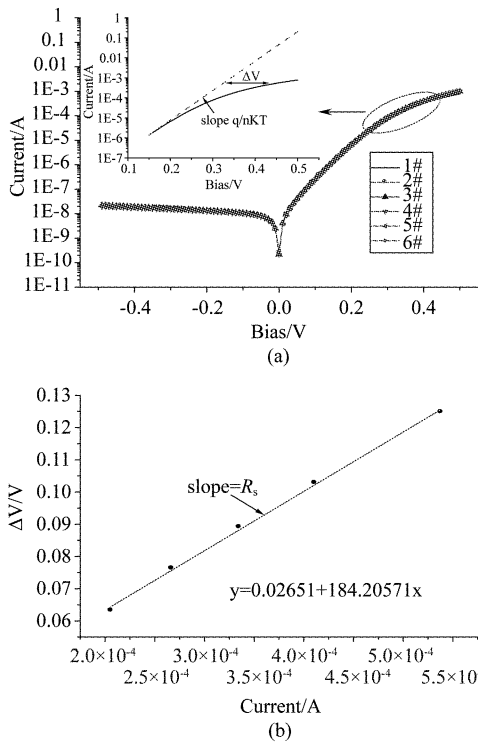


图2 器件室温 I-V 特性及串联电阻
Fig. 2 I-V characteristics and series resistance of measured detectors at room temperature

的噪声相对于暗电流而言不再是可以忽略的,从而使得暗电流产生了扰动和零点漂移. 并且温度越低时,由于噪声所引起的暗电流的扰动和零点漂移越大. Howard W. Yoon^[6]等人提出器件的并联电阻满足 $\Omega(T) = \Omega_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$ (Ω_0 为常数, E_a 为热激活能), 那么零偏电阻 R_0 也近似满足 $R_0(T) = R_c \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right)$ (R_c 为常数). 因为禁带宽度随温度的变化比较微弱 ($\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ 禁带宽度在 300 K 时为 0.51 eV, 而在 220 K 时为 0.49 eV^[7]), 所以可以近似认为热激活能 E_a 不随温度变化, 而 $\log R_0(T) \sim T^{-1}$ 近似呈线性关系. 如图 3(b) 所示, 当温度大于 220 K 时, $R_0 \sim T$ 满足上述关系, 通过计算得到热激活能 $E_a = 0.193$ eV, 这与 Howard W. Yoon 等人得到的 0.174 eV 的结果相接近; 当温度低于 220 K 时, $\log R_0(T) \sim T^{-1}$ 开始偏离线性关系, 这是因为随着温度继续降低, 器件暗电流受器件噪声的限制而趋近一个极限.

2.2 信号及噪声的温度特性

黑体信号测试条件: 黑体温度 900 K, 黑体孔径 5 mm, 孔径距探测器距离 15.2 cm, 测试环境温度

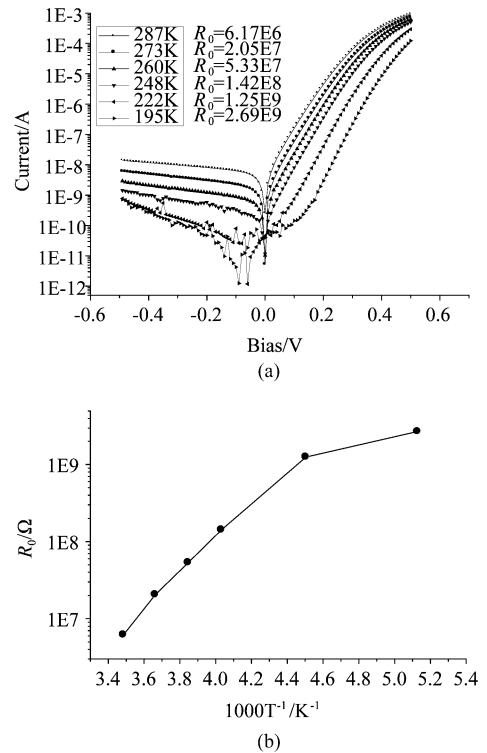


图3 不同温度 I-V 特性及 R_0 与温度的关系
Fig. 3 I-V characteristics and R_0 versus temperature

300 K, 测试频率带宽 80 Hz. 如图 4 所示, 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, 而噪声因为受到测量系统的限制, 先是快速减小, 当温度低于 240K 后逐渐趋于平稳. 随温度的降低, 载流子复合几率降低从而使得信号增大, 而禁带宽度随温度的变化很微弱, 所以这两个因素都不是信号随温度降低而均匀减小的主要原因. E. Zielinski^[8]等人研究发现 InGaAs 材料的吸收系数随温度降低较均匀的减小, 这与信号随温度的变化是一致的.

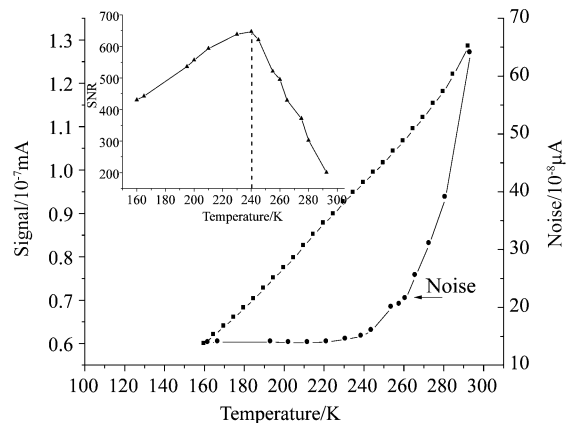


图4 信号及噪声与温度的关系
Fig. 4 Signal and noise versus temperature

2.3 响应光谱特性

响应光谱随温度的变化曲线如图 5 所示,随着温度的降低,器件的截止波长向短波方向移动,测量得到的截止波长与通过禁带宽度计算得到的结果是一致的^[8],如表 1 所示. 在 287 K 温度下,器件峰值波长为 1.92 μm ,峰值响应率为 0.712 A/W,计算量子效率达到了 37.5%.

表 1 不同温度下截止波长测量值和计算值

Table 1 the measured and calculated cutoff wavelength of different temperature

温度/K	截止波长测量值/ μm	截止波长计算值/ μm
287	2.36	2.41
273	2.34	2.39
250	2.30	2.35
220	2.27	2.31
185	2.21	2.27
157	2.19	2.24

3 640 × 1 线列焦平面

将线列光敏芯片与 640 × 1 元的 CTIA 读出电路芯片通过 In 柱倒装到过渡电极板上,焦平面模块如图 6 所示. 焦平面模块封装在真空杜瓦瓶中,采用液氮控制焦平面温度,利用焦平面测试系统对焦平面模块性能进行测试,测试条件:测试环境温度 300 K,黑体温度 900 K,黑体孔径 10 mm,孔径距焦平面探测器距离 30 cm,时钟频率 20 KHz.

如图 7 所示,随着温度的降低,焦平面探测器平均噪声和信号都是减小的,这与抽测器件测量结果保持一致. 在 1 ms 积分时间下,250 K 和 232 K 平均峰值探测率分别为 $1.55 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 和 $2.16 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$,说明通过降低工作温

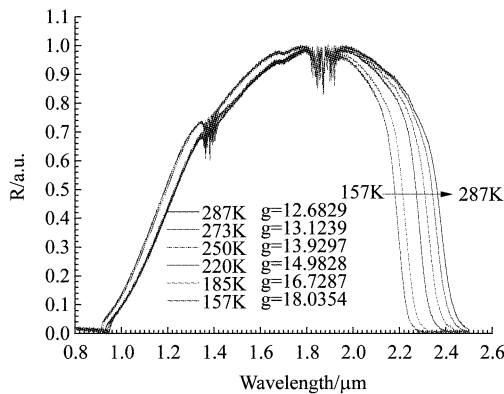


图 5 器件响应光谱及其温度特性
Fig. 5 Responsive spectrum of detectors versus temperature

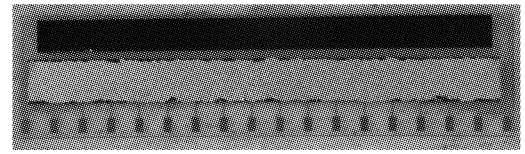


图 6 640 × 1 线列焦平面测试模块
Fig. 6 Testing module of 640 × 1 linear detector array

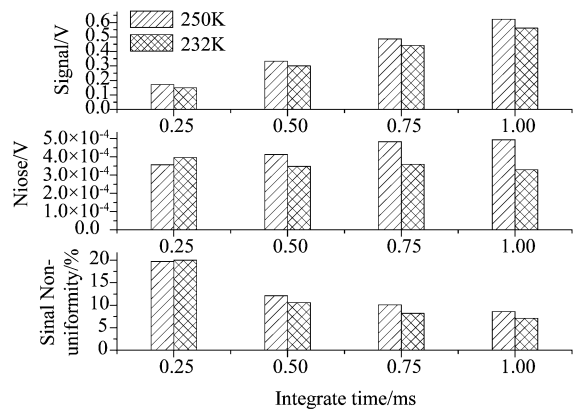


图 7 不同温度、积分时间下焦平面的信号和噪声特性
Fig. 7 Signal and noise of FPA versus temperature and integrate time

度,可以提高焦平面探测率. 另一方面,随着温度的降低和积分时间的增加,焦平面响应非均匀性是降低的.

因此,通过降低工作温度和适当的延长积分时间,焦平面探测器的性能可以得到改善. 图 8 所示为热电致冷 (TEC) 条件下焦平面探测器性能,在 1 ms 积分时间,TE1 (252 K) 条件下焦平面探测器平均峰值探测率达到 $2.01 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$,响应非均匀性为 8.77%,盲元率约为 0.6%.

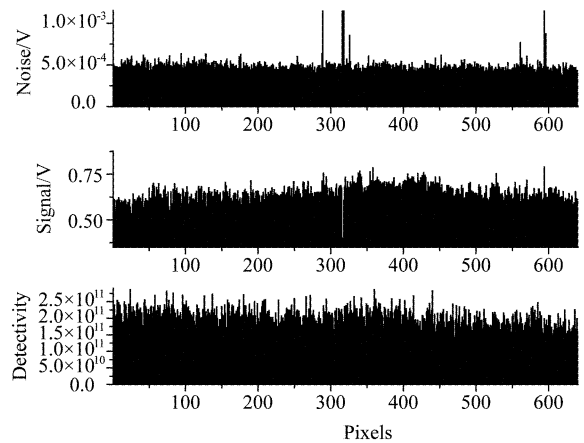


图 8 1 ms 积分时间下 252 K 焦平面探测率
Fig. 8 FPA detectivity under 1 ms of integrate time and 252 K
(下转 90 页)

- [2] Hennings I, Herbers D. Radar imaging mechanism of marine sand waves at very low grazing angle illumination caused by unique hydrodynamic interactions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**: 1 - 15.
- [3] LI Xiao-Feng, LI Chun-Yan, XU Qing, *et al.* Sea surface manifestation of along-tidal-channel underwater ridges imaged by SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(8): 2467 - 2477.
- [4] FU Bin. Shallow sea bottom topography mapping by SAR [D]. Qingdao: Ocean University of China (傅斌. SAR 浅海水下地形探测. 青岛: 中国海洋大学), 2005.
- [5] FAN Kai-Guo. Shallow water bathymetry surveys by SAR based on M4S for simulations of microwave imaging oceanic surface[D]. Qingdao: Ocean University of China (范开国. 基于海面微波成像仿真 M4S 软件的 SAR 浅海地形遥感探测. 青岛: 中国海洋大学), 2009.
- [6] LI Xiao-Feng, YANG Xiao-Feng, ZHENG Quan-An, *et al.* Deep-water bathymetric features imaged by spaceborne SAR in the Gulf Stream region[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**: 1 - 6.
- [7] Vachon P W, Dobson F W. Validation of wind vector retrieval from ERS-1 SAR images over the ocean[J]. *Global Atmosphere and Ocean System*, 1996, **5**: 177 - 187.
- [8] FENG Hong-Xiao, HOU Biao, WANG Shuang, *et al.* SAR image despeckling based on adaptive window and shape adaptive discrete wavelet transform[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (凤宏晓, 侯彪, 王爽, 等. 基于自适应窗和形状自适应小波变换的 SAR 图像相干斑抑制. 红外与毫米波学报), 2009, **28**(3): 212 - 217.
- [9] ZHANG Yu-Jin. *Image engineering* [M]. Beijing: Tsinghua University Press (章毓晋. 图象工程. 北京: 清华大学出版社), 1999.
- [10] 中国科学院对地观测与数字地球科学中心. 存档卫星遥感数据 [EB/OL]. (2010-11-16) [2010-11-16]. <http://cs.rsgs.ac.cn/cs%5Fcn/>
- [11] Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariant [J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1962, **8**: 179 - 187.
- [12] KANG Xin, HAN Chong-Zhao, YANG Yi. Structure-driven SAR image registration[J]. *Journal of System Simulation* (康欣, 韩崇昭, 杨艺. 基于结构的 SAR 图像配准. 系统仿真学报), 2006, **18**(5): 1307 - 1310.
- [13] Flusser J. Object matching by means of matching likelihood coefficients[J]. *Pattern Recognition Letters*, 1995, **16**(9): 893 - 900.
- [14] ITT Visual Information Solutions Company. ENVI [EB/OL]. (2010-11-18) [2010-11-18]. <http://www.ittvis.com/language/en-us/productservices/envi.aspx>

(上接 15 页)

4 小结

采用 N-on-P 材料结构制备了 640×1 延伸波长的 InGaAs 焦平面探测器. 器件峰值波长量子效率达到了 37.5%, 通过适当降低工作温度可以有效降低器件的暗电流、提高其信噪比, 在 240 K 温度下器件优值因子达到 $1000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 信噪比达到 650; 将 640×1 元光敏芯片与读出电路耦合制备的焦平面探测器, 在 1 ms 积分时间、TE1 条件下平均峰值探测率达到 $2.01 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 响应非均匀性和盲元率分别约为 8.77% 和 0.6%.

REFERENCES

- [1] Malchow Douglas S, Brubaker Robert M, Hansen Marc P. Development of linear array ROIC for InGaAs detector arrays with wavelength response to $2.5 \mu\text{m}$ microns for NIR spectroscopy and machine vision[C]. *Proc. of SPIE*, 2008, **6940**, 69402V-1 - 11.
- [2] 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.
- [3] Vander A R J, Hoogeveen R W M, Spruijt H J, *et al.* Low-noise InGaAs Infrared ($1.0 \sim 2.4 \mu\text{m}$) focal plane arrays for SCIAMACHY[C]. *Proc. of SPIE*, Vol. **2957**: 54 - 65.
- [4] Zhang Yonggang, Gu Yi, *et al.* Wavelength extended InGaAs/InAlAs/InP photodetectors using n-on-p configuration optimized for back illumination[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009(52): 52 - 56.
- [5] Robert F Pierret. *Semiconductor Device Fundamentals* [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2006, 197 - 198.
- [6] Howard W. Yoon, *et al.* Performance comparisons of InGaAs, extended InGaAs, and short-wave HgCdTe detectors between 1 m and $2.5 \mu\text{m}$ [C]. *Proc. of SPIE*, 2006, Vol. 6297.
- [7] Goetz K-H, Bimberg D, Jurgensen H, *et al.* Optical and crystallographic properties and impurity incorporation of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ ($0.44 < x < 0.49$) grown by liquid phase epitaxy[J]. *J. Appl. Phys.*, 1983, **54**(8): 4543 - 4552.
- [8] Zielinski E, Schweizer H, Streubel K, *et al.* Excitonic transitions and exciton damping processes in InGaAs/InP[J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, **59**(6): 2196 - 2204.