

的器件，其暗电流的增大比较小。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。由于不同器件由于自身的差异，所以同一剂量下的辐照对不同器件的影响有大有小。

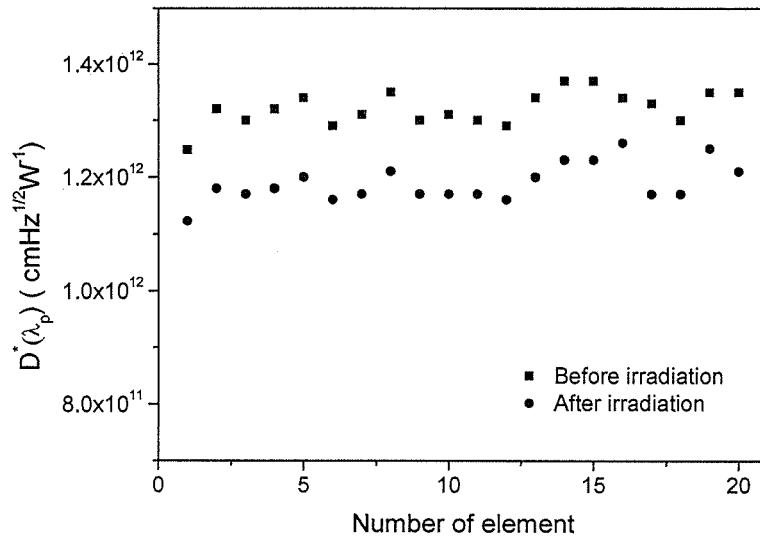


图 6.13 InGaAs 探测器辐照前后探测率
Fig.6.13 Detectivity of InGaAs detectors before and after irradiation

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，计算出 InGaAs 探测器辐照前后探测率的变化如图 6.13，表明经过大剂量电子辐照后，探测率都减小，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。

6.5 小结

本章利用 LBIC 测试 InGaAs 台面线列探测器相邻元的串音和光敏感区扩大问题，测试结果表明，InGaAs 台面探测器相邻探测器间没有光串音，发现有效光敏感区扩大，与平面结 InGaAs 探测器光串音和光敏感区扩大相比较小。研究了偏压和温度对 InGaAs 探测器低频噪声的影响，结果表明硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化器件噪声小，拐点低，主要是因为我们采用的外延材料对 InGaAs 层掺杂，

并且加强表面钝化,使器件的表面漏电流明显减小,极大的降低器件的低频噪声。研究了 InGaAs 探测器的电子辐照特性,通过辐照后响应光谱、暗电流和探测率的变化,分析了因辐照引起的器件内部的损伤。

参考文献

- [1] Redfern D A, Fang W, Musca C A, et al. Towards a laser-beam-induced-current test structure for the nondestructive determination of junction depth in HgCdTe photodiodes. Conf on Optoelectron and Microelectron Mat and Dev IEEE Proc., 2000: 169-172.
- [2] Bajaj J, Tennant W E, Remote contact LBIC imaging of defects in semiconductors, Journal of Crystal Growth, 1990, 103:170-178.
- [3] John B, Properties of indium phosphide, Indpec, London, 1991.
- [4] 黄杨程, 短波红外探测器低频噪声及抗辐照性能研究, 中国科学院上海技术物理研究所博士学位论文, 2005.
- [5] Sze S M, Physics of Semiconductor Devices, Willey, New York, 1981.
- [6] R. KAhrenkiel, R. Ellingson, S. Johnson, et al, Recombination lifetime of InGaAs as a function of doping density, Appl. Phys. Lett., 1998, 72: 3470-3472.
- [7] X.Y. Chen, M. R. Leys, Study of 1/f noise in InP grown by CBE, Solid-State Electronics, 1996, 39: 1149-1153.
- [8] M. Tacano, K. Oigawa, Y. Sugiyama, 1/f noise in ion-implanted indium phosphide layers, Solid-State Electronics, 1988, 31: 1243-1245.
- [9] O. Amore, J. P. Bonifaci, G. Giannini, et al, InGaAs SWIR imaging detectors hardening against proton irradiation, SPIE, 2003, 4820: 436-445.
- [10] G. J. Shaw, R. J. Walters, S. R. Messenger, et al, Time dependence of radiation-induced generation currents in irradiated InGaAs photodiodes, J. Appl. Phys., 1993, 74: 1629-1635.
- [11] H. Ohyama, J. Vanhellefont, Y. Takami, et al, Radiation damage in InGaAs photodiodes by 1MeV fast neutrons, Radiation Physics Chemistry, 1998, 53: 597-602.
- [12] Yanqiu L, Nili W, Chunquan Z, et al, The uniformity of InGaAs in InP/InGaAs/InP by microwave photoconductivity decay (μ -PCD) carrier lifetime measurement. Semicond. Sci. Technol., 2006, 21: 771-774.
- [13] M. Tacano, T. Kanayama, Y. Sugiyama, 1/f noise in quarter-micron filaments of GaAs and InP made by focused ion-beam implantation, Solid-State Electronics, 1991, 34: 193-196.
- [14] L. Ren, M. R. Leys, 1/f noise at room temperature in n-type GaAs grown by molecular beam epitaxy, Physica B, 1991, 172: 319-323.
- [15] A. M. Joshi, G. H. Oslen, V. S. Ban, et al, Reduction of 1/f noise in multiplexed linear InGaAs detector arrays via epitaxial doping, IEEE. Transactionson Electron Devices, 1993, 40: 303-307.

- [16] A. V. Voitsehovski, V. N. Broudnyi, Y. V. Lilenko, et al, High temperature defects in electron irradiated semiconductors HgCdTe, PbSnTe, Solid-State Communication, 1979, 31: 105-108.
- [17] J. P. Donnelly, A. R. Calawa, T. C. Harman, et al, $Pb_{1-x}Sn_xTe$ photovoltaic diodes and diode lasers produced by proton bombardment, Solid-state Electronics, 1972, 15: 403-407
- [18] R. S. Stapp, D. G. Feller, L. R. Johnson, et al, Anomalous behavior of reverse leakage currents in liquid phase epitaxial HgCdTe photodiodes with 10MeV electron irradiations, Appl. Phys. Lett., 1988, 52: 1614-1616.

第七章 InGaAs 线列探测器焦平面

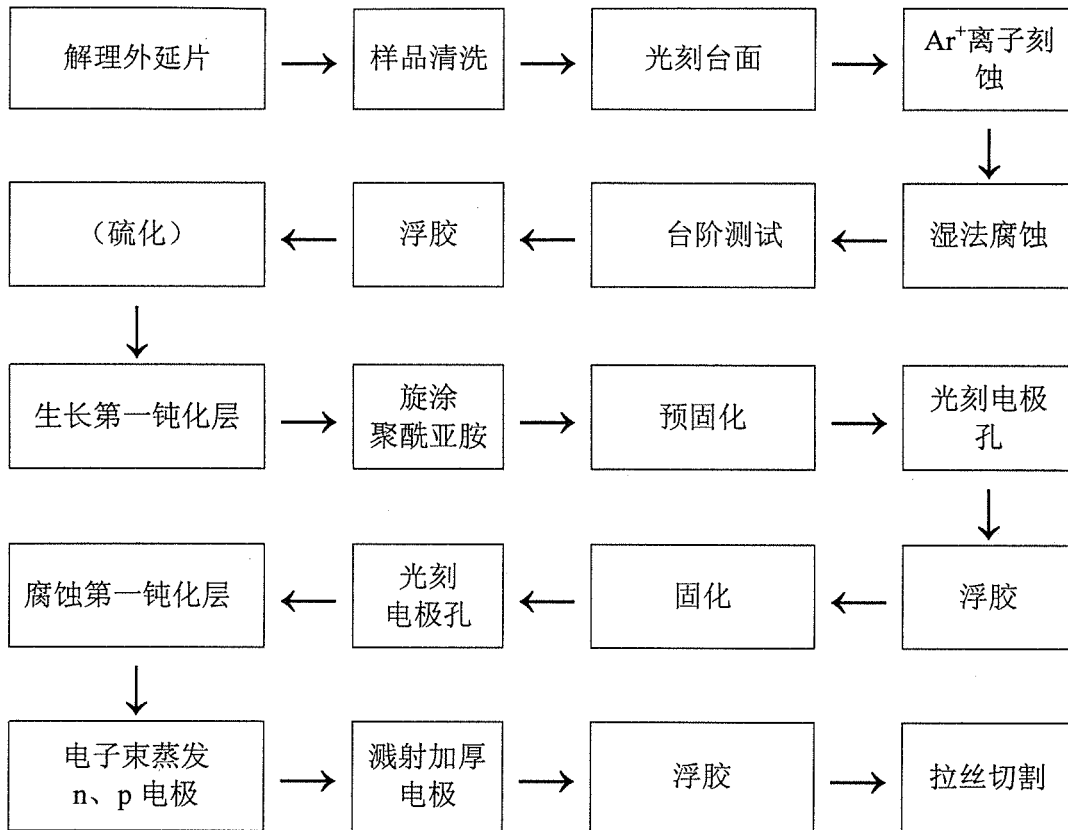
7.1 引言

由于 InGaAs 探测器在短波红外波段可以室温工作, 而且探测率高, 所以在航天遥感领域应用方面有绝对的优势。InGaAs 红外焦平面, 特别是非制冷焦平面技术的突破, 在地球和行星的表面遥感、精确武器制导、红外报警与识别、侦察与监视等领域有广泛的应用前景^[1,2]。目前, 国外用于卫星的多为 InGaAs 线列红外扫描焦平面, 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^[3]; 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^[4]焦平面。由于对卷云探测和海洋观测的需求, 我国对 InGaAs 线列焦平面的需求非常迫切, 根据项目的需求, 我们首先发展 128×1 和 256×1 InGaAs 线列焦平面技术。

国外 InGaAs 线列和面阵焦平面多为背照射 Zn 扩散平面结探测器, 但是存在扩散工艺复杂和光敏面扩大等问题^[5,6], 本章报道了用 MBE 或 MOCVD 方法生长的原位掺杂的 PIN InP/InGaAs/InP 外延材料, 制备了 128×1 和 256×1 正照射台面 InGaAs 探测器阵列, 工艺较为简单和稳定。测试了器件的性能, 包括变温 I-V、响应光谱和平均峰值探测率。测试了 128 元 CTIA 结构读出电路性能, 128×1 和 256×1 InGaAs 探测器阵列分别与电路相连接, 测出了焦平面响应信号, 计算出信号的不均匀性, 实现了 256×1 InGaAs 线列焦平面扫描成像, 并研究了不均匀性与温度和积分时间的关系。

7.2 探测器制备工艺

p-InP/InGaAs/n-InP 结构是用 MBE 在 2 英寸 InP 半绝缘衬底上或者用 MOCVD 法在 3 英寸 InP 半绝缘衬底依次生长厚度为 1 μm 掺 Si 的 n-InP 缓冲层, $n\approx 2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$; 厚度为 2.5 μm 并且与 InP 晶格匹配掺 Si 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层, $n\approx 4\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$; 厚度为 0.5 μm 掺 Be(MBE)或掺 Zn(MOCVD)的 p-InP 窗口层, $p\approx 2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。器件主要工艺在前面几章已经介绍, 工艺流程如下:



用手术刀沿解理面解理外延片，依次用三氯甲烷、乙醚、丙酮、乙醇清洗，每次大于 2min，氮气吹干，光刻台面，把完整器件放在样品片中心位置，氩离子刻蚀，湿法腐蚀，丙酮去光刻胶，乙醇清洗，氮气吹干，台阶仪测试刻蚀深度，应该为 $3\mu\text{m}$ ，硫化，去离子水清洗，氮气吹干，生长第一钝化层(ZnS, In_2S_3 或 SiN_x (不用硫化))，旋涂聚酰亚胺膜，预固化，光刻电极孔，乙醇去光刻胶，固化，等离子体清洗 5 分钟(增加光刻胶黏附)，光刻 pn 电极孔，腐蚀电极孔处第一钝化层(具体工艺前面已经提过)，电子束蒸发：Ti/Pt/Au ($200/300/1500\text{\AA}$)，溅射加厚电极 $\text{Au}5000\text{\AA}$ ，浮胶，光刻胶保护，用蜡把样品粘硅片上，拉丝切割划片，取片，依次用二氯乙烯两次、丙酮、乙醇清洗，每次 $>2\text{min}$ ，氮气吹干。

7.3 128×1 线列探测器及焦平面

7.3.1 128×1 线列探测器

我们采用硫化+聚酰亚胺钝化方式制备了 128×1 InGaAs 线列探测器，图 7.1 为 InGaAs 探测器结构照片，图 7.2 为 128×1 线列 InGaAs 探测器照片，中间为共用电极，两侧各有 128 元探测器，光敏元面积为 $60\times 300\mu\text{m}^2$ ，元间距为 $40\mu\text{m}$ 。

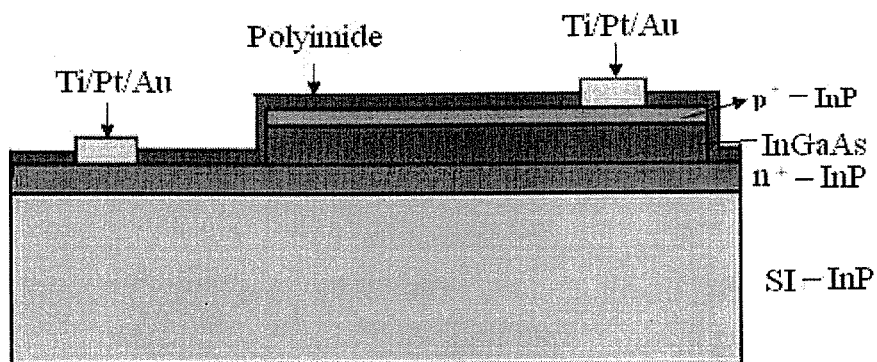


图 7.1 InGaAs 台面探测器结构示意图

Fig.7.1 Schematic illustration of the mesa InGaAs detector structure

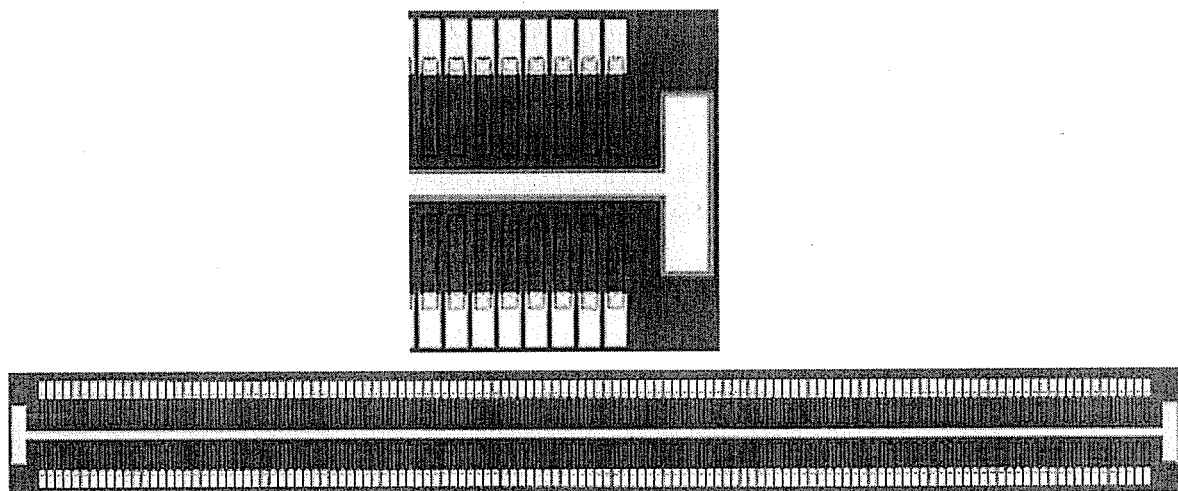


图 7.2 128 元线列 InGaAs 探测器照片

Fig.7.2 Photograph of 128 element linear InGaAs detector array

7.3.2 变温 I-V 测试

用 Keithley236 电流-电压测试仪测试了 128 元其中 1 元 InGaAs 探测器的变温曲线, 器件封装在变温杜瓦中, 由液氮控制温度, 测试电压范围-1V~1V, 变温范围在 96K~296K, 温度每升高 20K, 测量一次。由于低于 196K 暗电流小于仪器测试量程, 图 7.3 中只列出 196K~296K 的测试结果, 从图中可以看出, 随着温度的降低, 由于在基区的扩散电流和空间电荷区的产生-复合电流减小, 暗电流逐渐降低, 零偏压电阻(R_0)和优值因子(R_0A)增大, A 为光敏面面积。从正向偏压下 I-V 可以看出, 温度降低, 器件的开启电压逐渐增大。适当的低温能减小器件的暗电流, 提高器件的性能, 特别是在半导体制冷器范围内具有重要的意义。一般来讲 R_0A 值越大, 探测率越高。从 296K 到 216K, R_0A 值从 $6.68 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 增加到 $1.48 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。但是并非温度越低, 探测率就一定增大, 在 85K 测试探

测器信号电压时，噪声非常大，这与低温下的欧姆接触，噪声产生机理等因素有关。图中还可以看出，随着反向偏压增大，暗电流有明显的增加，器件的钝化工艺还要进一步加强。

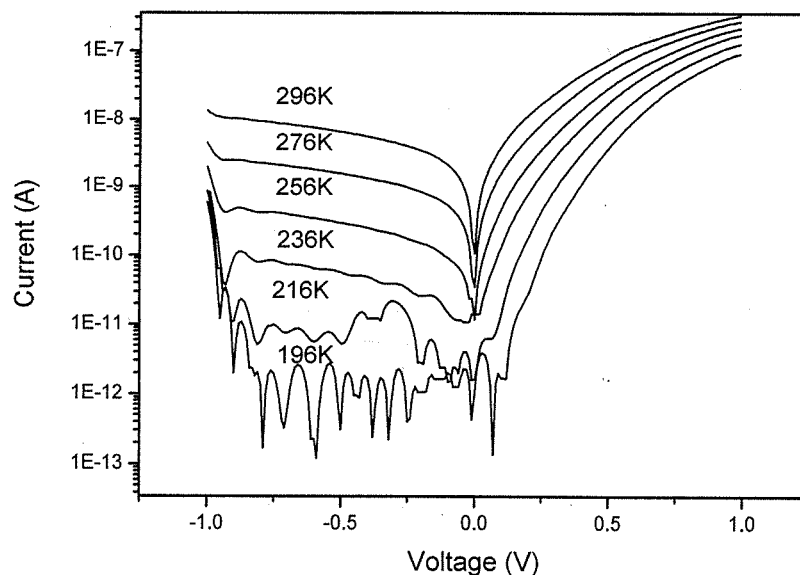


图 7.3 InGaAs 探测器在不同温度下的 I-V 曲线
Fig. 7.3 I-V curves of InGaAs detector at different temperature

7.3.3 响应光谱测试

我们采用 InGaAs 吸收层 Si 掺杂，掺杂浓度 $n \approx 4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，是对 R_0A 优化的结果。K.P.Linga 和 M.J.Cohen 在研制遥感用 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 器件时都采用了提高吸收层掺杂浓度的办法^[7]，这样能减小耗尽层的宽度，减小产生-复合电流，进而提高探测率。用 NICOLET 红外光谱仪测试探测器的短波响应光谱归一化后如图 7.4 所示，响应波段和非掺杂 InGaAs 探测器响应波段基本一样，室温截止波长(λ_c)都在 $1.7\mu\text{m}$ 左右。掺杂 InGaAs 探测器在 291K、278K 和 85K 的截止波长分别为 $1.685\mu\text{m}$ 、 $1.681\mu\text{m}$ 和 $1.546\mu\text{m}$ 。由公式^[8]：

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (\text{eV})} (\mu\text{m}) \quad (7.1)$$

计算出禁带宽度(E_g)分别为：0.736eV、0.738eV 和 0.802eV，能带宽度从 291K 到 85K 增加了 0.066eV。

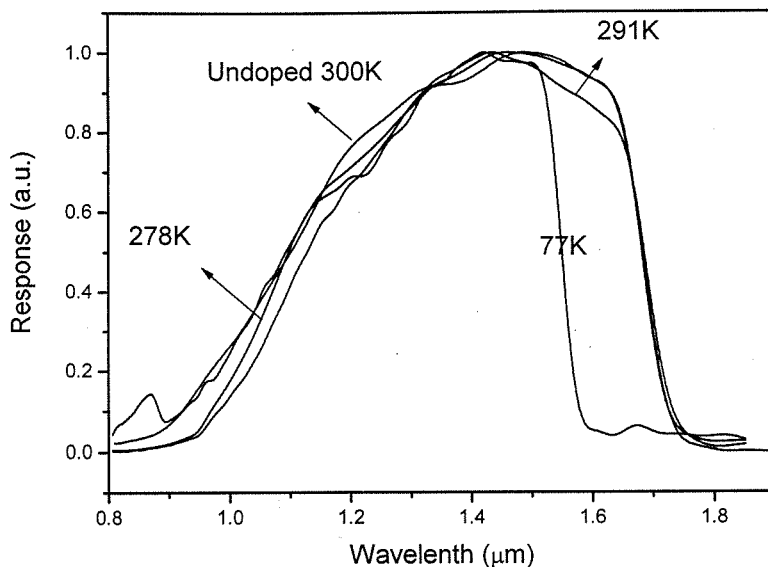


图 7.4 掺杂 InGaAs 探测器在不同温度下和非掺杂 InGaAs 探测器的响应光谱
 Fig.7.4 Response spectrums of doped InGaAs detector at different temperature and undoped InGaAs detector

7.3.4 探测率测试

把 128 元线列探测器封装在杜瓦瓶中，抽真空，连续抽取 10 元测试了 291K 和 278K 两个温度下零偏压电阻、暗电流(I_D)、响应光谱、信号电压(V_s)和噪声电压(V_n)。虽然温度降低 13K，零偏压电阻平均增加 1 倍多(如图 7.5a)，暗电流降低一个数量级(如图 7.5b)。由于响应光谱的稍微变化，g 因子减小，平均值由 96.43 降到 79.59(如图 7.5c)。峰值探测率 $D_{\lambda_p}^*$ 由以下公式得出^[9]：

$$D_{\lambda_p}^* = gD_{bb}^* = \frac{2\sqrt{2}g\pi L^2 V_s \sqrt{\Delta f}}{V_n \sigma \varepsilon (T_B^4 - T_0^4) A_B \sqrt{A}} \quad (7.2)$$

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， Δf 为频率带宽， σ 为斯忒藩常数， ε 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。降温后，由于信号的增加和暗电流的减小，峰值探测率平均增加 $3.09 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ (如图 7.5d)，在 278K 时，平均峰值探测率为 $1.03 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。

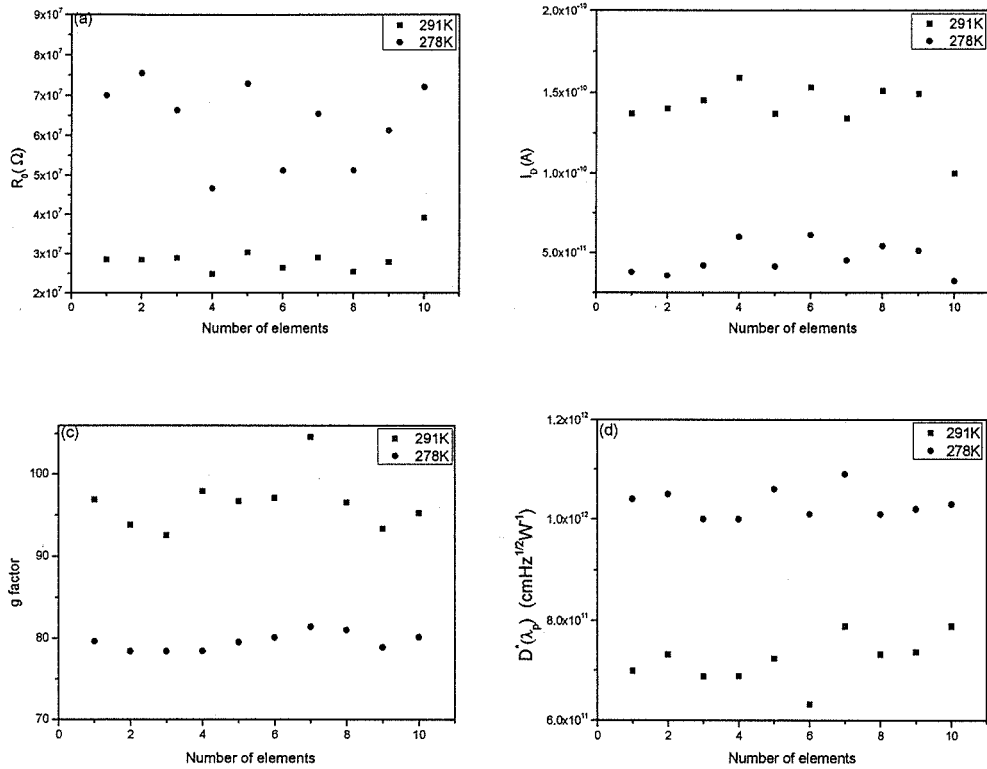


图 7.5 10 元相邻 InGaAs 探测器分别在 291K 和 278K 时的性能 (a) 零偏压电阻 (b) 暗电流 (c) g 因子 (d) 峰值探测率
 Fig.7.5 Characters of ten neighbor InGaAs detectors at 291K and 278K respectively (a) the shunt resistance (b) the dark current (c) the g factor (d) the peak detectivity

7.3.5 128×1 线列焦平面

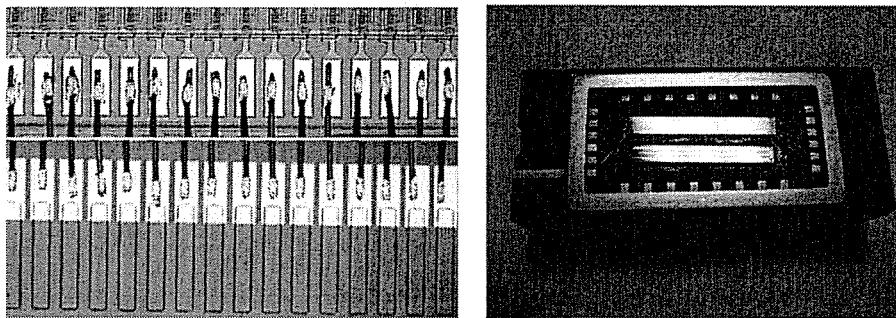


图 7.6 128 元 InGaAs 探测器与读出电路连接及封装照片
 Fig.7.6 Photographs of 128 element InGaAs detector array connected with ROIC and package

取一片 128×1 线列 InGaAs 探测器与读出电路芯片置入 28 脚双列直插式管壳中，用金丝一一互连，按一定定义用硅铝丝将电路连接至各管脚，如图 7.6 所示。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, 扫描结束时给出 EOS 信号。CTIA 结构单元电路原理图^[10]如图 7.7 所示。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。无光照条件下, 选取积分时间为 $500\mu\text{s}$, 将读出电路两路输出 V_{O2} 和 V_{O1} 由外部差分放大器进行差分处理, 然后经 PI4007 采样, 对电路的噪声性能进行测试, 结果如图 7.8 所示, 测试结果显示电路的噪声约为 $1\times 10^{-3}\text{V}$ 左右。

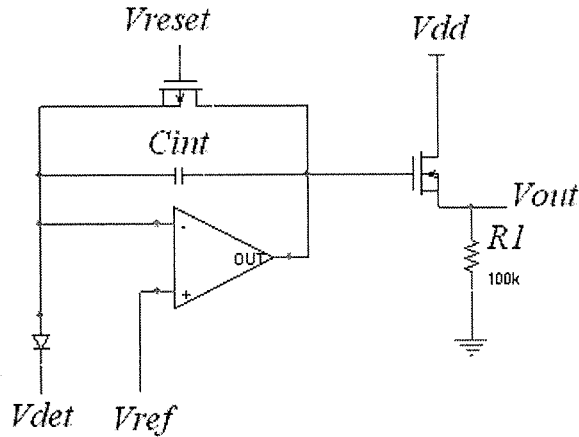


图 7.7 CTIA 结构单元电路原理图
Fig.7.7 Schematic of a capacitive transimpedance amplifier unit cell

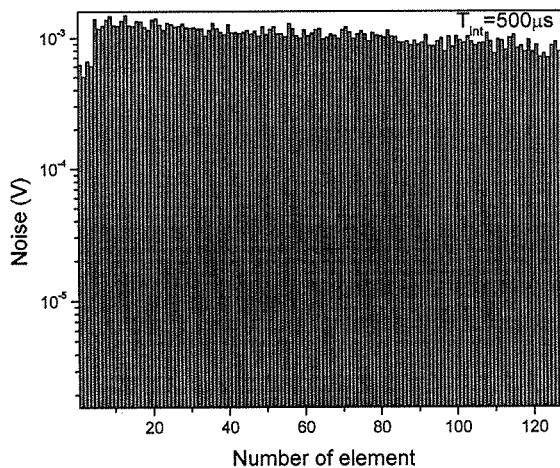


图 7.8 电路的噪声测试结果
Fig. 7.8 Noise of 128×1 ROIC

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, 环

境温度为 291K，用 Pulse Instruments 4000 系统测试焦平面的信号响应，积分时间 400 μ s，每一元读出时间为 20 μ s，示波器中观察到的 EOS 波形图和 128 元 InGaAs 探测器信号图如图 7.9 所示。焦平面中每元探测器的响应电压(V_{res})为参考电压(V_{ref})和信号输出电压(V_{out})的差，128 \times 1 InGaAs 焦平面响应直方图如图 7.10 所示，没有死像元，不均匀性为 18.3%。根据公式：

$$V_s = \frac{I_{ph} t_{int}}{C_{int}} \quad (7.3)$$

$$V_s = \frac{V_{ref}}{0.606} - \frac{V_{out}}{0.55} \quad (7.4)$$

$$R_{\lambda_p} = gR_{bb} = \frac{\pi g V_s L^2}{\sigma \varepsilon (T_B^4 - T_0^4) A_B A} \quad (7.5)$$

式中 V_s 为积分电压， I_{ph} 为探测器感生电流， R_{λ_p} 为峰值响应率， R_{bb} 为黑体响应率，0.606 和 0.55 为源极跟随器电压增益， g 因子取 96.43，计算出焦平面在 291K 时平均峰值响应率为 0.35A/W。探测器的理论响应率(R_i)为^[11]：

$$R_i = \frac{\lambda \eta}{hc} q g_1 \quad (7.6)$$

式中 η 为量子效率， g_1 为光电增益。对于光伏型探测器 g_1 取 1，在 291K 时峰值波长 1.435 μ m 处，量子效率取 80%时，理论响应率的最大值为 0.928A/W。也就是说焦平面的平均峰值响应率为理论最高值的 37.7%。

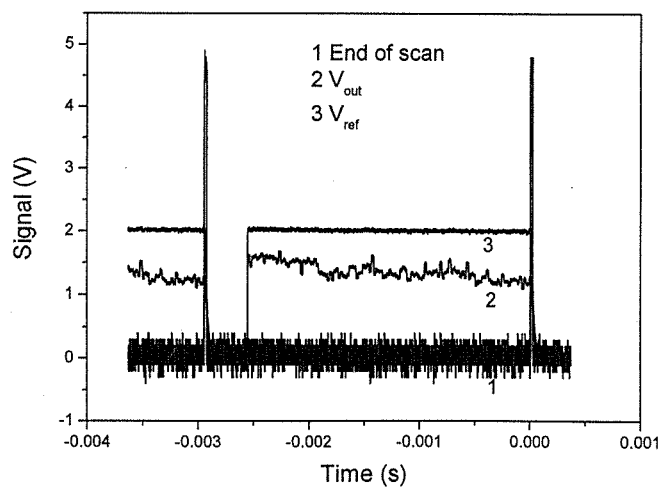


图 7.9 示波器中观察到的 EOS 波形图和 128 元 InGaAs 探测器信号图
Fig.7.9 Wave diagrams of EOS and signal of 128 elements InGaAs detectors in oscillograph

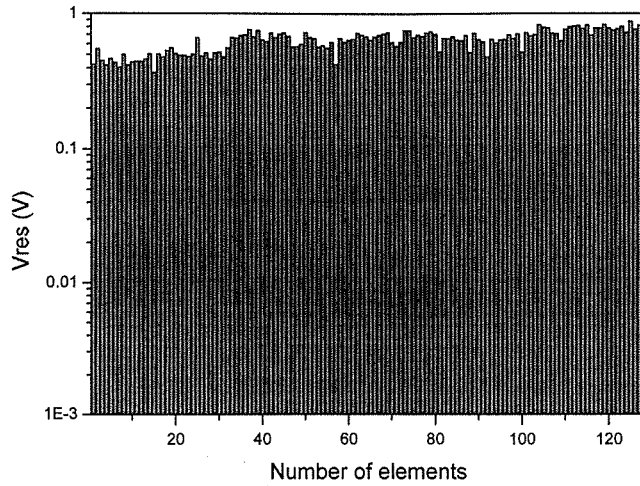


图 7.10 128×1 InGaAs 焦平面响应直方图

Fig. 7.10 The histogram of the response of the 128×1 element InGaAs FPA

7.4 256×1 线列探测器及焦平面

7.4.1 256×1 线列探测器

256×1 线列探测器是采用 ZnS/聚酰亚胺双层钝化结构如图 7.11 所示，热蒸发 ZnS 钝化层时，蒸发源为纯度为 99.99%的 ZnS 块状晶体，然后覆盖 2μm 聚酰亚胺第二钝化层。256×1 InGaAs 台面线列探测器(图 7.12)，光敏面面积为 56×56μm²，品字型交错排列，中间为公用电极。

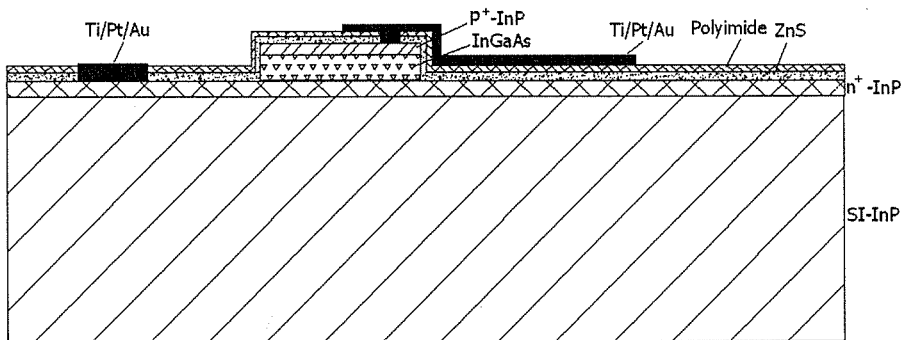


图 7.11 ZnS/聚酰亚胺双层钝化 InGaAs 台面探测器的结构

Fig.7.11 The mesa InGaAs detector structure with ZnS/polyimide double passivation layers

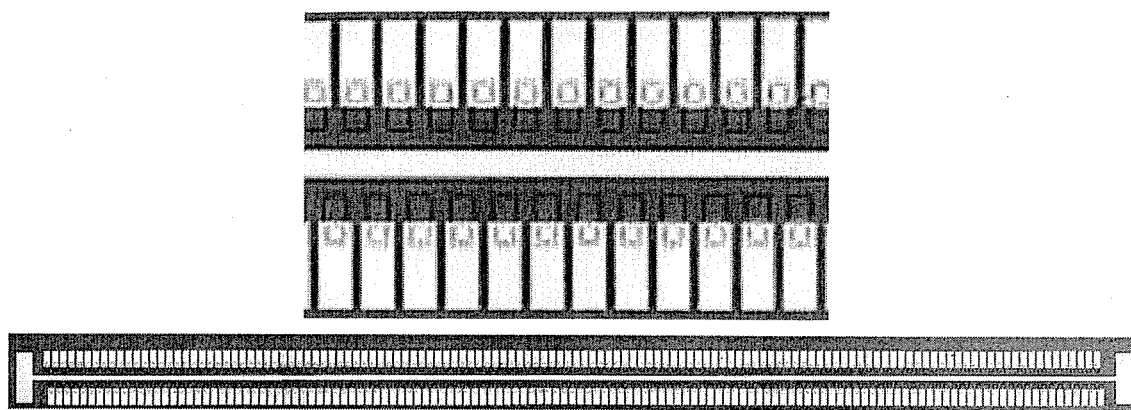


图 7.12 256×1 InGaAs 台面线列探测器照片
Fig.7.12 Photograph of 256×1 mesa InGaAs linear detector array

7.4.2 探测器性能测试

测试了 256 元其中 1 元 InGaAs 探测器的变温曲线，器件封装在变温杜瓦中，由液氮控制温度，测试电压范围 -2V~2V，变温范围在 237V~297K，温度每升高 20K，测量一次。图 7.13 中列出了测试结果，从图中可以看出，随着温度的降低，由于在基区的扩散电流和空间电荷区的产生-复合电流减小，暗电流逐渐降低，零偏压电阻 R_0 和优值因子 R_0A 增大。适当的低温能减小器件的暗电流^[12,13]，提高器件的性能，特别是在半导体制冷器范围内具有重要的意义。测试探测器的短波响应光谱如图 7.14 所示，室温截止波长(λ_c)在 1.7 μm 左右。

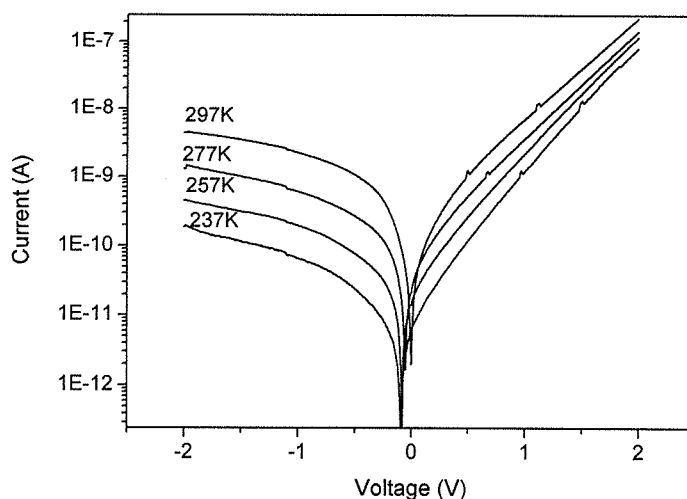


图 7.13 InGaAs 探测器变温 I-V 曲线
Fig.7.14 I-V curves of InGaAs detector at different temperature

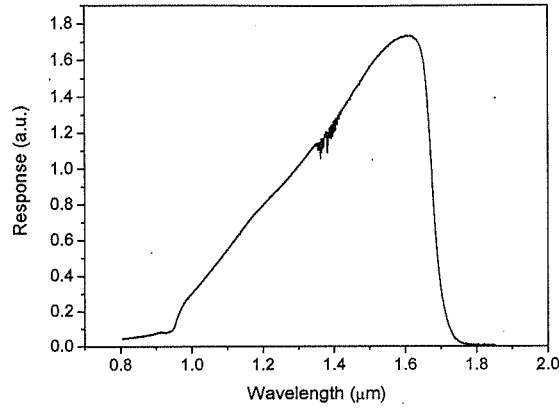


图 7.14 InGaAs 探测器响应光谱
Fig.7.14 Response spectrum of InGaAs detector

将 256 元 InGaAs 线列探测器封装到杜瓦中, 连续抽取 20 元, 在 278K 测试其信号和噪声, 各探测器峰值探测率 $D_{\lambda_p}^*$ 由 7.2 公式得出, 如图 7.15。探测器平均峰值探测率为 $1.33 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$, 比单层聚酰亚胺钝化 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%^[14-17]。I-V 测试反偏电压 1V 时, 暗电流比单层聚酰亚胺钝化 InGaAs 探测器低一个数量级。实验表明 ZnS/聚酰亚胺双层钝化可以减小暗电流, 进而提高探测器的探测率。

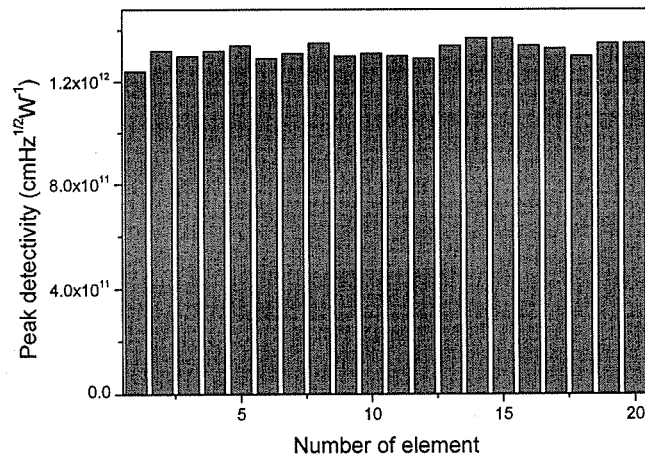


图 7.15 InGaAs 探测器峰值探测率
Fig.7.15 Detectivity of InGaAs detectors

7.4.3 256×1 线列焦平面

图 7.16 是 256×1 InGaAs 线列探测器的两端用金丝与两个 L128 读出电路互连, 读出电路电极和探测器电极校正对准, 通过过渡电极板与 32 引脚的陶瓷管

壳互联。测试短波黑体红外光源温度为 900K，距离为 40cm。封装后的管壳放在屏蔽盒中，用我室最新搭建的 128×1InGaAs FPAs 器件性能测试系统(原理图如图 7.17)测试电路及焦平面的性能，积分时间 1000μs，每一元读出时间为 20μs。

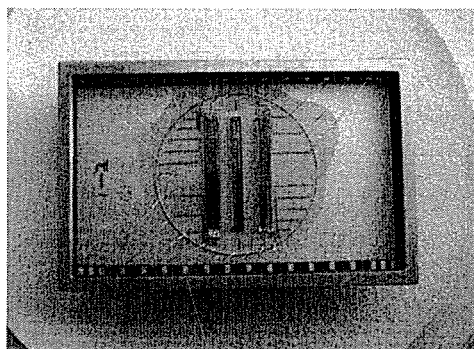


图 7.16 256×1 InGaAs 线列探测器封装后照片

Fig.7.16 Photographs of 256 element InGaAs linear detector array after package

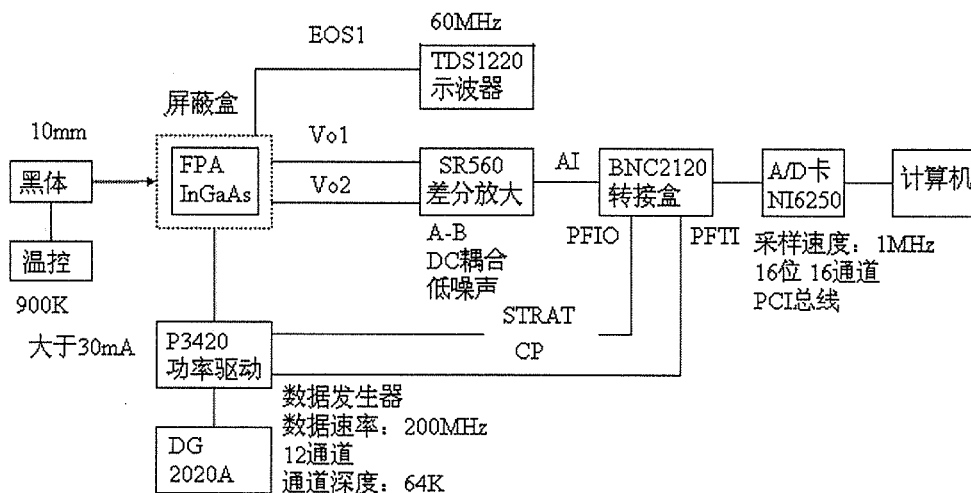


图 7.17 128×1InGaAs FPAs 器件性能测试系统

Fig.7.17 Device performance measurement system of 128×1InGaAs FPAs

256×1 电路或焦平面的测试，由于该焦平面采用相同的 L128 读出电路，首先分别测试两侧奇行和偶行 128×1 电路或焦平面，然后把偶行数据逆序插到奇行得出 256×1 数据。我们首先测试了 256×1 电路的噪声，如图 7.18 所示为 256 元读出电路室温噪声直方图，积分时间 1000μs 时，平均噪声电压 $1 \times 10^{-4}V$ ，完全满足对 256×1 InGaAs 线列探测器的测试。图 7.19 为 256 元 InGaAs 焦平面在室温无光时噪声直方图，积分时间 1000μs 时，平均噪声电压为 $8 \times 10^{-4}V$ ，噪声比电路大了 8 倍。256 元 InGaAs 焦平面响应直方图如图 7.20 所示，平均信号电压为 0.34V，有两个过热像元，响应不均匀性为 19.3%。

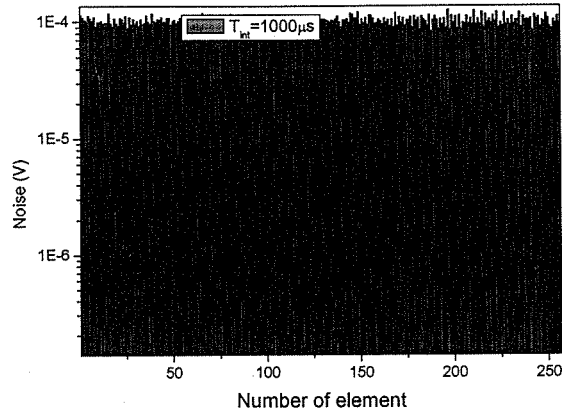


图 7.18 256 元读出电路噪声直方图
Fig.7.18 The histogram of the noise of the 256 element ROIC

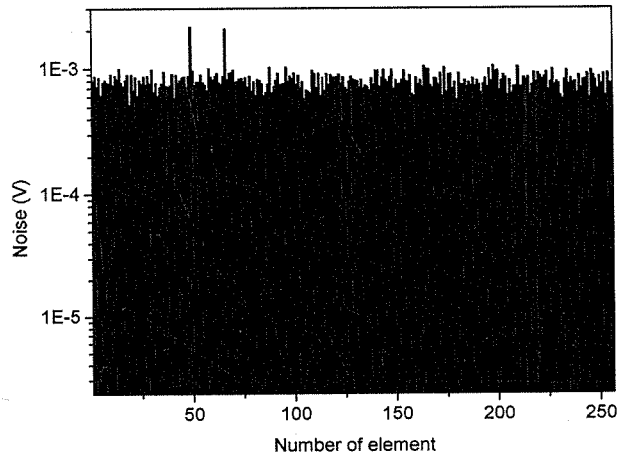


图 7.19 256 元 InGaAs 焦平面噪声直方图
Fig.7.19 The histogram of the noise of the 256 element InGaAs FPAs

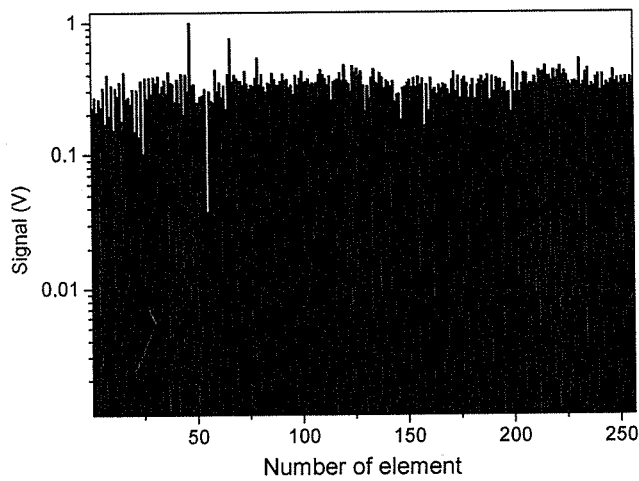


图 7.20 256 元 InGaAs 焦平面响应直方图
Fig.7.20 The histogram of the response of the 256 element InGaAs FPAs

7.4.4 256×1 线列焦平面扫描成像

我们和本所七室徐蒙等同学合作, 实现了 256×1 线列焦平面扫描成像。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, 数据经过不均匀校正得到的图像如图 7.21 所示, 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 7.21 256 元 InGaAs 线列焦平面扫描图像
Fig.7.21 Scanning image by 256 element InGaAs linear focal plane array

7.5 不均匀性研究

平均响应率 \bar{R} 是焦平面各有效像元响应率的平均值, 对于线列焦平面, 由下式表示^[18]:

$$\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i \quad (7.7)$$

响应率的均方根偏差 Δ_R 是焦平面有效像元响应率与平均响应率的差的均方根值, 由下式表示:

$$\Delta_R = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2}, \quad (7.8)$$

响应率不均匀性是响应均方根偏差与平均响应率的比:

$$U_R = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2} \quad (7.9)$$

式中 N 为探测器个数, R_i 为第 i 个探测器响应率。由于响应的信号电压值, 与探测器的响应率直接对应, 所以可以通过计算响应电压的不均匀性, 可以更快更简

捷的表征响应率不均匀性。

我们所研制的 InGaAs 焦平面的探测率已经满足工程的要求，但焦平面的响应率不均匀性一直是制约应用的主要障碍^[19-22]。分析前边所测 128×1 和 256×1 InGaAs 线列焦平面在动态范围内不均匀性产生的原因，我们认为可以从以下几方面考虑：由于刻蚀、腐蚀等工艺引起的光敏面面积的不均匀性；电路的电容、增益和偏压的不均匀性；黑体光源的不均匀性(测试所用的是点光源，不是面光源)；钝化效果的好坏；外延材料的不均匀性，包括：各层外延厚度、In/Ga 比和掺杂浓度的不均匀；p 型电极接触的不均匀性；探测器和电路的耦合影响。根据目前测试及工艺分析，认为产生响应率不均匀性的主要原因可能是最后两条，因为在第五章我们已经分析了 Ti/Pt/Au 的 p-InP 接触特性，由于接触电阻较大，影响器件响应率不均匀性可能性较大，另外材料的不均匀性在第二章也已分析，到底是那个因素在焦平面的测试中起到主导作用，现在还不能给以定论，但如果通过外延层的结构改造，解决了欧姆接触问题，影响响应率不均匀性的主要因素就可以搞清楚，才能指导我们下一步工作。

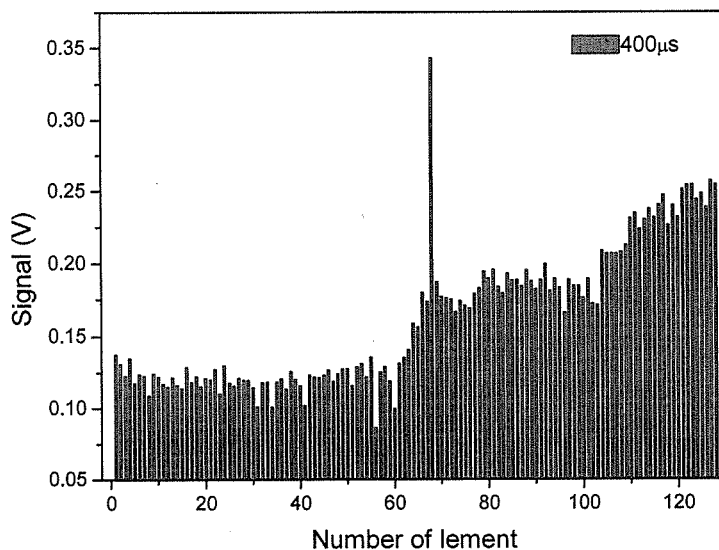


图 7.22 InGaAs 焦平面中 128 元响应直方图

Fig.7.22 The histogram of the response of the 128 element in InGaAs FPAs

测试参数的选择，如积分时间、测试温度等，是否会影响响应率的不均匀性。接下来，我们研究了积分时间对响应率的不均匀性的影响。测试的为 256×1 线列 InGaAs 探测器，采用 MOCVD 方法生长的外延材料，ZnS/聚酰亚胺双层钝化结

构。测试黑体温度 900K，距离 40cm，测试的一侧焦平面如图 7.22，积分时间为 $400\mu\text{s}$ 。由于右侧响应较高，容易提前饱和，所以对前 60 元进行不同积分时间测试，积分时间从 $400\mu\text{s}$ 到 $2200\mu\text{s}$ ，每隔 $100\mu\text{s}$ 测试一次，图 7.23 为 InGaAs 焦平面中 60 元响应部分测试结果。图中可以看出，随着积分时间的增加，响应信号呈相同趋势逐渐增大。

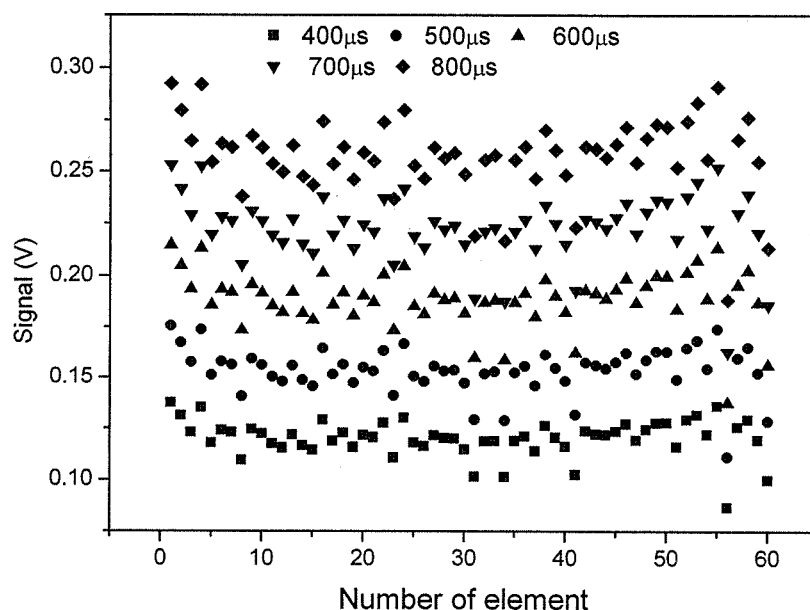


图 7.23 InGaAs 焦平面中 60 元响应随积分时间的变化
Fig.7.23 The response of the 60 element with integral time in InGaAs FPAs

根据公式 7.9 分别算出不同积分时间的响应电压不均匀性，如图 7.24 所示，积分时间从 $400\mu\text{s}$ 到 $2200\mu\text{s}$ ，不均匀性呈下降趋势，很明显的看出不均匀性在积分时间 $1700\mu\text{s}$ 处发生转折。从 $400\mu\text{s}$ 到 $1700\mu\text{s}$ ，不均匀性从 7.5% 降到 7.0%，变化较小，从 $1700\mu\text{s}$ 到 $2200\mu\text{s}$ ，不均匀性陡然下降，从 7.0% 降到 2.3%。说明在该测试条件下，积分时间小于 $1700\mu\text{s}$ 为该焦平面的线性测试范围，此时，积分时间对不均匀性影响较小。积分时间大于 $1700\mu\text{s}$ ，响应有趋于饱和的趋势，虽然不均匀性降低，焦平面很难反映实际测试光强的分布。所以测试 InGaAs 红外线列焦平面时，合适的选择积分时间非常重要，否则就不能正确反映焦平面性能。对不均匀性拐点的测试，将有助于知道我们的测试范围和将来的使用范围，是一件非常有意义的事情。

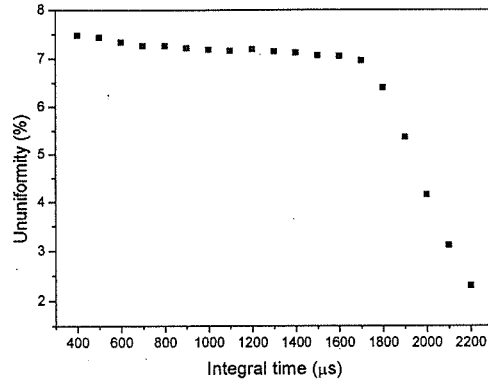


图 7.24 不均匀性与积分时间的关系
Fig.7.24 Relationship of non-uniformity and integral time

为了研究不均匀性与温度的关系，我们测试了热电制冷封装的 InGaAs 焦平面(如图 7.25)，探测器是采用硫化+ZnS/聚酰亚胺钝化方式，我们分别在 0°C、5°C、10°C 和 20°C 测试了 256×1 InGaAs 焦平面一边的响应信号，图 7.26 为 0°C 去除盲元后的响应图。测试黑体温度 900K，距离为 30cm，积分时间为 1000μs。测试结果表明，焦平面响应信号随温度降低而增大。0°C、5°C、10°C 和 20°C 的平均响应电压为 0.133mV，0.126mV，0.115mV 和 0.109mV，说明适当降低温度可以提高响应率。四个温度下测试的不均匀性如图 7.27 所示，从 20°C 到 0°C 不均匀性降低了 8%。理论上讲，温度对每个探测器的作用是一样的，所以降低温度，每个探测响应的提高也是一致的，不均匀性应该不随温度的变化而变化。实际测试表明，温度对每个探测器的影响不是线形的，我们认为主要是外延材料不均匀引起的，在第二章微波反射光电导衰减法变温测试少子寿命时，发现外延材料各点随温度的变化也不是线形的，造成不均匀性降低的原因是掺杂和缺陷分布不均匀造成的。不均匀性随温度减低，是因为测试的焦平面中探测器的不均匀性太大，温度对探测器的影响不是线性的。

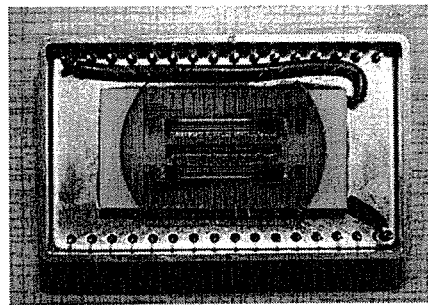


图 7.25 热电制冷 256×1 InGaAs 焦平面封装
Fig.7.25 Package of 256×1 InGaAs FPAs with TE-cooler

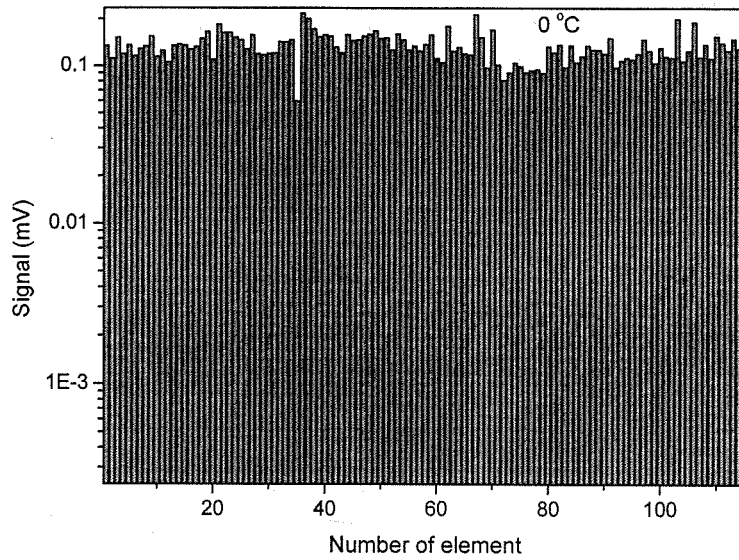


图 7.26 InGaAs 焦平面 0°C 响应图
Fig.7.26 Response of InGaAs FPAs at 0°C

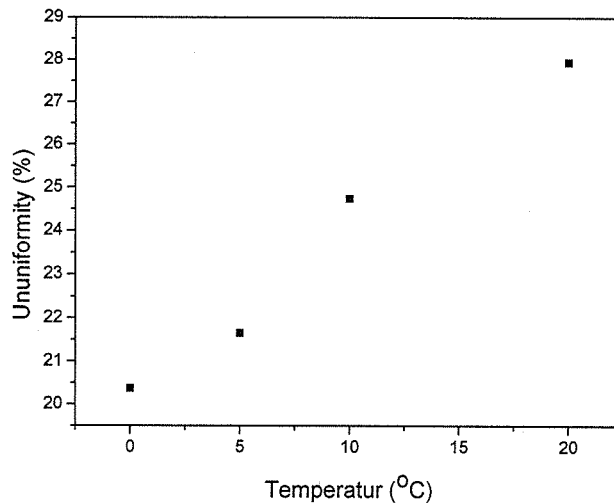


图 7.27 不均匀性与温度的关系
Fig.7.27 Relationship of non-uniformity and temperature

7.6 小结

本章主要介绍了 InGaAs 台面探测的制备工艺，包括材料解理、清洗、光刻、Ar⁺离子刻蚀、湿法腐蚀、硫化、钝化工艺、电极生长、划片，有些工艺在前几章已具体介绍，本章进行系统概括的介绍。

我们制备了 128×1 台面正照射 InGaAs 探测器阵列，并与 CTIA 结构 L128 读出电路互连形成焦平面，测试了器件的变温 I-V，响应光谱。278K 探测器平

均峰值探测率为 $1.03 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ，分别测试了电路噪声，焦平面噪声和焦平面响应，焦平面响应的不均匀性为 18.34%。

制备了 256×1 正照射台面 InGaAs 探测器阵列。测试了器件的变温 I-V 曲线，响应光谱。278K 时平均峰值探测率为 $1.33 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。 256×1 InGaAs 探测器阵列与两个 CTIA 结构 128 读出电路互连并封装，分别测试了电路噪声，焦平面噪声和焦平面响应，焦平面响应的不均匀性为 19.3%，配合演示系统实现了 256×1 线列焦平面室温扫描成像。

分析了引起响应不均匀性的原因，p-InP 接触性能和外延材料的不均匀性是影响不均匀性的可能主要原因。测试了积分时间从 $400 \mu\text{s}$ 到 $2200 \mu\text{s}$ ，不均匀性特征，发现了不均匀性的拐点，拐点前，为该焦平面的线性测试范围，积分时间对不均匀性影响较小。拐点后，不均匀性降低，但焦平面很难反映实际测试光强的分布。测试了 InGaAs 焦平面响应不均匀性随温度的变化，结果表明不均匀性随温度降低而减小，原因是测试的焦平面中探测器的不均匀性太大，温度对探测器的影响不是线性的。

参考文献

- [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, SPIE, 1988, 972: 279-285.
- [2] Kozlowski L J, Tennant W E, Zandian M, et al, SWIR staring FPA performance at room temperature, SPIE, 1996, 2746: 93-100.
- [3] Olsen G, Joshi A, Lange M, et al, A 128×128 InGaAs detector array for 1.0-1.7 microns, SPIE, 1990, 1341: 432-437.
- [4] Moy J P, Hugon X, Chabbal J, et al, 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for the spot 4 SWIR channel, SPIE, 1989, 1107: 137-151.
- [5] Olsen G H, Joshi A M, Mykietyn E, et al, Room-temperature InGaAs Arrays for 1.0-1.7 μm , SPIE, 1989, 1107: 188-193.
- [6] Linga K P, Joshi A M, Ban V S, et al, 1024 element linear $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ detector arrays for environmental sensing from $1 \mu\text{m}$ to $2.6 \mu\text{m}$, SPIE, 1993, 2021: 90-97.
- [7] Sze S M, Physics of Semiconductor Devices, Willey, New York, 1981.
- [8] Fossum E R, Pain B, Infrared readout electronics for space science sensors: state of the art and future directions, SPIE, 1993, 2020: 262-284.
- [9] 汤定元, 糜正瑜, 等, 光电器件概论, 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
- [10] Piotrowski J, Kaniewski J, Optimisation of InGaAs infrared photovoltaic detectors, IEE

- Pro.-Optoelectron, 1999, 146: 173-176.
- [11] HUANG Rong-Ting, Renner D, Improvement in dark current characteristics and long-term stability of mesa InGaAs/InP p-i-n photodiodes with two-step SiN_x surface passivation, IEEE Photonics Technology letters, 1991, 3: 934-937.
- [12] 庄春全, 汤英文, 黄杨程, 等, (NH₄)₂S 硫化后 ZnS/InP 界面的电学特性, 半导体学报, 2005, 26(10): 1945
- [13] 庄春全, 遥感用 InGaAs 红外探测器的工艺研究, 中国科学院上海技术物理研究所博士学位论文, 2006.
- [14] 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.
- [15] Lyer R, Chang R R, Lile D L, Sulfur as a surface passivation for InP, Appl. Phys. Lett., 1988, 53(2): 134-136.
- [16] Kozlowski L J, Tennant W E, Zandian M, et al, SWIR staring FPA performance at room temperature, SPIE, 1996, 2746: 93-100.
- [17] 吕衍秋, 徐运华, 韩冰, 等, 128×1 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.
- [18] 红外焦平面测试评价技术研究课题组, 焦平面探测器测试与评价, 中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 1995.
- [19] Fossum E R, Pain B, Infrared readout electronics for space science sensors: state of the art and future directions, SPIE, 1993, 2020: 262-285.
- [20] Zemel A, Gallant M, Carrier lifetime in InP/InGaAs/InP by open-circuit voltage and photoluminescence decay, J. Appl. Phys., 1995, 78: 1094-1099.
- [21] 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, Semicond. Sci. Technol., 2006, 21: 771-774.
- [22] 李拂晓, 杨乃彬, Post G, 等, 一种实用的磷化铟 MMIC 背面工艺技术, 半导体学报, 2001, 22(12): 1497-1501.

第八章 结论与展望

8.1 结论

由于 InGaAs 探测器具有室温工作、探测率高等优点,在西方国家,InGaAs 红外焦平面已成功用于空间遥感。为了满足我国航天遥感用短波红外探测器及线列焦平面的迫切需求,本论文主要对 InGaAs 台面探测器和线列焦平面制备的关键工艺和技术进行研究,以满足航天应用。研究内容主要包括材料均匀性表征、台面制作、欧姆接触、钝化工艺、可靠性、焦平面不均匀性等,主要结论如下:

(1)用 XRD、红外透射谱、电化学 C-V 法对 InGaAs 外延材料性质进行了表征。首次用微波反射光电导衰减法(μ -PCD)法通过测量 InGaAs 层的少子寿命,来评价 InGaAs 吸收层的均匀性。p-InP/InGaAs/n-InP 结构外延片在 300K 和 85K 时平均寿命分别为 168.2ns 和 149.4ns。寿命变温曲线表明,在低温下 InGaAs 层少子寿命虽然有减小趋势,但相对非掺杂 InGaAs 相比变化较小,这主要是因为中等掺杂的少子复合是以辐射复合为主。InGaAs 吸收层的掺杂及缺陷的均匀性决定了寿命分布,所以寿命的均匀性反映了吸收层的均匀性。

(2)采用 Ar^+ 离子刻蚀和湿法化学腐蚀结合制作台面,提高了光敏面的图形保真度和减小了刻蚀损伤。 Ar^+ 离子刻蚀后 InGaAs 均方根粗糙度较小,PL 强度增加,反射率增大。 Ar^+ 离子刻蚀后 n-InP 和 p-InP 表面变粗糙,PL 强度减小,反射率减小,峰位向波数小的方向移动。XPS 分析表明,刻蚀后样品表面成分都发生明显变化,InGaAs 表面 In 和 Ga 含量增加明显,n-InP 和 p-InP 表面有严重 P 缺失,湿法腐蚀后处理可以消除刻蚀损伤。

(3)对 InGaAs 台面探测器的钝化进行了研究。用原子力显微镜、扫描电镜、XRD 和 XPS 研究了 In_2S_3 薄膜性质,热蒸发可生长致密的 In_2S_3 薄膜,主要以 $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ 结构存在,在高温退火后, $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ 含量进一步增加。硫化可以改进钝化效果,钝化效果从高到低依次是:硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化、硫化+ In_2S_3 /聚酰亚胺双层钝化、硫化+聚酰亚胺钝化、 SiN_x /聚酰亚胺双层钝化、单层 SiN_x 钝化和单层聚酰亚胺钝化。 In_2S_3 比 ZnS 更易于腐蚀处理, SiN_x /聚酰亚胺双层钝化比 SiN_x 单层钝化稳定性好。

(4) p-InP 与 Ti/Pt/Au 接触电阻随着退火温度的升高和退火时间的增长而变大,

MBE 生长 p-InP 掺杂浓度为 $7 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 时, 未退火 Ti/Pt/Au 为欧姆接触, 比接触电阻为 $2.49 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 时, 为肖特基接触。AES 分析认为退火后 Ti/Pt/Au 层和 InP 外延层之间形成 Pt, Ti, In, P 四元体系, 由于 In 扩散较快, 所以中间层以 TiIn 化合物为主, 由于这种化合物存在, 增加了接触电阻。在原来外延结构的基础上, 增加 p-In_{0.53}Ga_{0.47}As 层, 可以在不退火的情况下同时实现 p 电极和 n 电极的欧姆接触。

(5)用 LBIC 研究了 InGaAs 台面线列探测器相邻探测器串音和有效光敏感区, 相邻探测器间没有光串音, 发现有效光敏感区扩大, 与平面结 InGaAs 探测器相比光串音和光敏感区扩大较小。研究了偏压和温度对 InGaAs 探测器低频噪声的影响, 结果表明硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化器件噪声小, 拐点频率为 110Hz, 主要是因为我们采用的外延材料对 InGaAs 层掺杂, 并且加强表面钝化, 使器件的表面漏电流明显减小, 降低了低频噪声。研究了 InGaAs 探测器的电子辐照特性, 通过辐照后响应光谱、暗电流和探测率的变化, 分析了因辐照引起的器件内部的损伤。

(6)通过优化工艺, 建立了 InGaAs 探测器制备工艺, 制备了 128×1 和 256×1 InGaAs 台面线列探测器, 并与 CTIA 结构 L128 读出电路相连接形成焦平面。测试了探测器的变温 I-V 曲线、响应光谱、探测率, 电路噪声, 焦平面噪声和焦平面响应。278K 探测器平均峰值探测率分别为 $1.03 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 和 $1.33 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$, 焦平面响应的不均匀性分别为 18.3%和 19.3%, 并配合演示系统实现了 256×1 线列焦平面室温扫描成像。测试了积分时间从 400μs 到 2200μs 响应率不均匀性的特征, 发现了响应率不均匀性的拐点。拐点前, 为该焦平面的线性响应范围, 积分时间对不均匀性影响较小; 拐点后, 不均匀性降低, 但焦平面很难反映实际响应光强的分布。测试了 InGaAs 焦平面响应不均匀性随温度的变化, 结果表明不均匀性随温度降低而减小, 原因是测试的焦平面中探测器的不均匀性太大, 温度对探测器的影响不是线性的。

8.2 展望

虽然本论文工作取得了上述的研究成果, 但仍然还有些问题没有得到充分的研究, 有待在今后的工作中进一步开展。

- (1) 对微波反射光电导衰减法测量 InGaAs 外延结构的原理进一步研究, 建立理论模型, 研究内建电场对测试的影响。改进测试系统, 增进测试结

果的准确性。对每次外延材料的测试结果建立档案，与最终的器件测试结果比较，研究出寿命和器件不均匀性的对应关系。

- (2) 通过单项工艺的分析，包括材料均匀性、台面制作、钝化、欧姆接触、互连、耦合等，找出最终影响焦平面不均匀性的原因。然后解决问题，改进工艺，最终研制出正照射、无盲元、不均匀性小于 10% 的台面 256×1 线列焦平面。
- (3) 为了满足航天遥感的要求，对 InGaAs 探测器继续进行可靠性试验，包括辐照和老化寿命试验。研究电子辐照、 γ 辐照、中子辐照、激光辐照等对器件的损伤，对低频噪声、探测率、暗电流和响应率的影响，分析损伤机理。对器件进行高温并加反偏电压加速寿命试验，研究失效机理。然后改进工艺，进一步加固器件。
- (4) 对背照射 InGaAs 台面探测器焦平面进行研究，解决抛光减薄、抗反射层、钢柱互连等问题。
- (5) 在现有正照射 256×1 焦平面基础上，发展无盲元拼接技术，制备出 1280 元、1024 元等大线列焦平面，以满足航天应用。