

密级: _____



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

高性能平面型InGaAs 短波红外探测器研究

作者姓名: 邓洪海

指导教师: 龚海梅 研究员 李雪 研究员

中国科学院上海技术物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 微电子学与固体电子学

培养单位: 中国科学院上海技术物理研究所

2013 年 5 月

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律責任由本人承担。

学位论文作者签名：

邓洪海

2013 年 5 月 23 日

学位论文使用授权说明

本人同意：中国科学院上海技术物理研究所保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；有权按规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，有权复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

经指导教师审核，本学位论文属于保密，密级为：公开。涉密论文在解密后，以上学位论文使用授权说明适用。

论文作者签名：

邓洪海

2013 年 5 月 23 日

指导教师签名：

邓洪海

2013 年 05 月 23 日

**Study on high-performance planar InGaAs short
wavelength infrared detector**

By

Deng Honghai

A Dissertation Submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Doctor of Science

Shanghai institute of technical physics,

Chinese Academy of Sciences

May, 2013

致 谢

几年前抱着对技物所的无限憧憬来到上海，现在却到了离别的时刻，上海技物所读博士期间的这段时光在我的整个人生中弥足珍贵，有谆谆教导的师徒之情，有互助共勉的同窗之谊，还有朋友间的缓急与共、腹心相结，无一不会被我铭记。

首先，衷心感谢我的导师龚海梅研究员对我的教诲和指导，龚老师务实严谨的治学态度、忘我的工作精神、宽容豁达的生活作风，让我受益匪浅，一直是我学习和追赶的榜样。同时，衷心感谢我的二导李雪研究员，在工作和生活上的指导和帮助，特别是在我刚进所时冒冒失失处于实验低谷的期间给予的宽容和鼓励，使我得以在犯错和失败中不断改进。

感谢方家熊院士、李言谨老师、李向阳老师，微系统所的张永刚老师对我的支持和帮助。他们渊博的学识、敏锐的洞察力，都一直感染和激励着我在科研的道路上前行。在这些年的学习过程中，感谢实验室多年来给予我帮助各位老师 and 师兄师姐：邵秀梅、刘大福、范广宇、张海燕、洪斯敏、朱龙源、刘诗嘉、乔辉、陆荣、叶丽萍、贾嘉、许金通、马伟平、王建新、廖清君、汪洋、陈郁、徐勤飞、曾智江、王妮丽、刘向阳、赵水平、兰添翼、储开慧、汤亦聃、蔡子健、姜佩璐、施永明、张在实等，以及物理室的李天信老师。

感谢与我一起生活和学习的同学和朋友们：唐恒敬、李淘、李永富、朱耀明、程吉凤、邓双燕、魏鹏、刘福浩、刘飞、曹中兴、杨波、王云姬、许中华、朱宪亮、夏王、曹岚、周炜、马学亮、石铭、黄星、曹高奇、王瑞、叶柏松、张立瑶、包西昌、黄张成、黄松垒、王荣阳、李超等。

感谢研究生部的诸位老师在学习、生活上给予的关心和帮助。

最后，我要深深感谢我最亲爱的父母、姐姐和妻子，感谢他们真挚善良而又朴实无华的关爱和默默的支持，希望家人们永远身体健康、幸福快乐！谨以此文献给所有关心和支持我的家人和朋友们。

邓洪海

2013 年 5 月

摘要

短波红外 InGaAs 探测器在近室温具有良好的性能,已成功应用在空间遥感领域。本论文主要针对航天遥感用 InGaAs 短波红外探测器的要求,围绕平面型 InGaAs 焦平面探测器制备的关键工艺技术和器件物理,研究了高温快速热退火过程对结深的影响;开展了子像元结构探测器的研制,采用 LBIC 技术研究了 InGaAs 层少子扩散长度的变温特性及子像元探测器的响应均匀性;成功制备了正照射常规波长和长波扩展的 256×1 线列探测器;优化了背照射器件制备的部分关键工艺,制备了背照射的 32×32 探测器,并最终实现了高性能、无盲元的背照射 800×2 双波段集成焦平面探测器。

采用扫描电容显微镜(SCM)和二次离子质谱(SIMS)技术研究了高温快速热退火过程对 p-n 结结深的影响,以及掺杂元素 Zn 在晶格失配材料和晶格匹配材料中的扩散机制。研究表明,Zn 在晶格失配材料中的扩散速度大于其在晶格匹配材料中的扩散速度,由于掺杂 Zn 元素并不能被完全激活,p-n 结深度小于掺杂元素的扩散深度;计算了 530°C 下,Zn 在 $\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ 、 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ 、InP 中的扩散系数,分别为 $1.327 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ 、 $1.341 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ 、 $1.067 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$; p-n 结的深度在退火前后基本不变,扩散完成后的 p-n 结结深可以近似为器件最终的 p-n 结结深。

利用载流子的侧向收集效应设计并研制了基于子像元模式的平面型 InGaAs 探测器新结构,首先研制了侧向收集区宽度 $15\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 的三种平面型 InGaAs 探测器,利用 LBIC 技术对常温下的光响应均匀性进行了表征,结果表明,侧向收集区宽度 $15\mu\text{m}$ 的器件光响应均匀,侧向收集区产生的载流子能够被相邻的子像元有效收集;然后研究了器件在 $296\text{K} \sim 88\text{K}$ 下的光响应均匀性,并计算了不同温度下的 InGaAs 吸收层的少子扩散长度 L_p ,并有 $L_p \propto \sqrt{T}$,表明声学波散射是主要的散射机制,当侧向收集区宽度为 $15\mu\text{m}$ 时,光敏元可在 $296\text{K} \sim 253\text{K}$ 的温度范围内均匀响应;研制了侧向收集区宽度 $15\mu\text{m}$ 的多种子像元结构器件,在室温-100mV 反向偏压下的暗电流密度为 $3.94 \text{nA}/\text{cm}^2$ 、 R_0A 为 $8.4 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、峰值探测率为 $2.89 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$,与常规结构器件相比,暗电

流密度降低了约 70%。

研制了正照射常规波长的测试结构器件、 256×1 线列探测器, 以及长波扩展的 256×1 线列 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器。研究表明, 对于 InGaAs 吸收层浓度为 $5.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 的器件, 暗电流主要来自于与扩散区面积有关的器件的体内, 对于 InGaAs 吸收层浓度为 $5.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的器件, 暗电流主要是侧面漏电流, 在室温 -100mV 反向偏压下, 两种器件的暗电流密度分别为 15.73nA/cm^2 和 7.84nA/cm^2 ; SiN_x 和 SiO_2 钝化膜器件在室温 -100mV 反向偏压下的暗电流密度分别为 26.8nA/cm^2 、 41.2nA/cm^2 , 峰值探测率分别为 $1.21 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、 $1.08 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 表明采用 PECVD 生长的 SiN_x 钝化膜可以明显改善器件的钝化效果; 对于长波扩展的 256×1 线列 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器, 在室温下, 器件的截止波长为 $2.57 \mu\text{m}$, 峰值探测率为 $7.25 \times 10^8 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 峰值响应率为 0.95A/W , 量子效率为 56.9%, 焦平面的峰值探测率在 153K 达到 $1.11 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 响应非均匀性为 5.28%, 外延材料质量和器件制备工艺还有待提高。

对背照射平面型器件的关键工艺进行了研究, 通过对扩散的精细控制优化了小光敏元高占空比器件的结构, 最终成功研制了背照射的 32×32 面阵和 800×2 双波段集成的 InGaAs 焦平面探测器, 测试并分析了焦平面的光电性能。背照射的 32×32 面阵焦平面探测器在 3ms 积分时间下, 平均峰值响应率和平均峰值探测率分别为 1.04A/W 、 $1.36 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、响应非均匀性为 3.35%; 双波段集成的 800×2 焦平面探测器, 盲元率为 0, 两个波段的响应非均匀性分别为 2.48%、2.61%, 平均峰值探测率分别为 $2.47 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、 $2.37 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 组件在系统应用中的 MTF 约为 0.51。

关键词: InGaAs , 短波红外探测器, 平面结, 子像元, 焦平面

ABSTRACT

Because the short wavelength InGaAs detectors could get high performances under near-room temperature, they have wide applications in the space remote sensing area. This dissertation focused on the urgent demand of next generation short wavelength infrared (SWIR) used for remote sensing application, devices physics and several key fabrication technologies for planar type InGaAs FPAs detectors have been developed and improved. The process of rapid thermal annealing process (RTP) on p-n junction depth variation was investigated. The front-illuminated planar type InGaAs sub-pixels infrared detector was fabricated, and the holes diffusion length and photoresponse uniformity of the detector related to temperature have been also investigated. The front-illuminated 256×1 linear InGaAs detectors with $1.7 \mu\text{m}$ and $2.57 \mu\text{m}$ cut-off wavelength were fabricated. Based on the improvements of several key fabrication technologies for back-illuminated detectors, the back-illuminated 32×32 FPAs detector and the back-illuminated double-band 800×2 FPAs detector with high-performance and none bad pixels were fabricated successfully.

The effects of RTP on p-n junction depth variation and the mechanism of Zn diffusing to lattice-matched and lattice-mismatched hetero structure materials were studied using SCM and SIMS technology. It was indicated that the rate of Zn diffusing to lattice-mismatched materials was bigger than it in lattice-matched materials. Due to the doped Zn in the hetero structure materials is not completely activated, the diffusion depth is deeper than the p-n junction depth in evidence. The diffusion coefficients of Zn into $\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$, $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ and InP under 530°C are figured out, which is $1.327 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$, $1.341 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$, $1.067 \times 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$ respectively. Moreover, RTP has almost no effect on junction depth variation which implies that the p-n junction depth after the diffusion process could be considered to the ultimate p-n junction depth of the detector.

The front-illuminated planar type InGaAs sub-pixels infrared detectors were designed and fabricated based on the lateral collection effect of photogenerated carriers. The detectors with lateral collection width of $15 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$ and $25 \mu\text{m}$ were fabricated and the photoresponse uniformity was carried out with LBIC technique at room temperature. The results indicate that the photoresponse of the detector with lateral collection width of $15 \mu\text{m}$ is quite uniform and the electron/hole pairs generated in the regions are all collected by the adjacent sub-elements. The photoresponse uniformity of the detector with lateral collection width of $15 \mu\text{m}$ was carried out at different temperatures between 88 K and 296 K, and the holes diffusion length L_p related to temperature was calculated. The result shows the acoustic phonon scattering is the chief scattering mechanism, and the photoresponse of the detector with lateral collection width of $15 \mu\text{m}$ is uniform between 296 K and 253 K. Many kinds of detectors with lateral collection width of $15 \mu\text{m}$ were fabricated, and the density of dark current at -100 mV, R_0A and the peak detectivity

are 3.94 nA/cm^2 , $8.4 \times 10^6 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ and $2.89 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ respectively at room temperature. The dark current density of InGaAs detectors at -100 mV with sub-pixels structure is around 70% less than the normal structure detectors without sacrificing the peak detectivity.

The front-illuminated P/A test structure detectors and 256×1 linear InGaAs detectors with $1.7 \text{ } \mu\text{m}$ and $2.57 \text{ } \mu\text{m}$ cut-off wavelength were fabricated. The reverse current is mainly the edge leakage current and branch current for the detector with the InGaAs ($n \approx 5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) layer, and the dark current is mainly from the inside and the surface of the detector with the InGaAs ($n \approx 5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) layer related with diffusion region. The dark current density of the detector with the InGaAs absorption ($n \approx 5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) layer at -100 mV is 7.84 nA/cm^2 which is less than the detector with the InGaAs absorption ($n \approx 5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) layer. The detector with SiN_x antireflection layer has better performance compared to the detector with SiO_2 antireflection layer. At room temperature, the cut-off wavelength, the peak detectivity, the peak responsivity and the quantum efficiency are $2.57 \text{ } \mu\text{m}$, $7.25 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 0.95 A/W and 56.9% respectively for the wavelength extended 256×1 linear InGaAs detectors. Furthermore, the peak detectivity and the non-uniformity of the FPAs detector are $1.11 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ and 5.28% at 153K respectively. The hetero-structure material quality and the device fabrication technique need to be further improved for the overall performance.

The fabrication technology of back-illuminated planar InGaAs detector with high density was investigated, including the improvement of passivation film and the process of grooving the diffusion masking layer and the N type electrode layer. Based on the achievement the back-illuminated 32×32 FPAs detector was fabricated and the structure of the back-illuminated planar detector was also optimized. At integrated time 3ms , the average peak responsivity, the average peak detectivity and the non-uniformity of the signal are 1.04 A/W , $1.36 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ and 3.35% respectively. The back-illuminated dual-band 800×2 FPAs detector with high-performance and none bad pixels was fabricated successfully, whose diffusion area of $18 \times 18 \text{ } \mu\text{m}^2$ and pixel pitch of $25 \text{ } \mu\text{m}$. The non-uniformity of the signal of the dual band are 2.48% and 2.61% , and the average peak detectivity are $2.47 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ and $2.37 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ respectively. Besides, the Modulation Transfer Function (MTF) of FPA detector assembly is about 0.51 in system application.

Key Words: InGaAs, shortwave infrared detector, planar type, sub-pixels, FPA

目 录

致 谢	I
摘 要	III
ABSTRACT	V
1 引言	1
1.1 红外技术的应用	1
1.2 红外探测器的发展及种类	2
1.2.1 红外探测器的发展	2
1.2.2 红外探测器的种类	5
1.3 短波红外及InGaAs短波红外探测器	7
1.3.1 短波红外探测器	7
1.3.2 InGaAs材料特性介绍	8
1.3.3 InGaAs探测器结构和工作原理	10
1.4 InGaAs探测器研究现状	13
1.4.1 国外研究现状	13
1.4.2 国内研究现状	19
1.5 InGaAs焦平面探测器存在的问题和发展趋势	19
1.6 本论文的研究目的和主要内容	21
2 平面型InGaAs探测器关键工艺技术研究	23
2.1 引言	23
2.2 快速热退火过程对结深的影响	23
2.2.1 实验	23
2.2.2 杂质扩散的SIMS和SCM表征	24
2.2.3 实验结果及讨论	27
2.3 降低平面型InGaAs探测器无效像元的结构设计和工艺优化	29
2.3.1 盲元分析	29
2.3.2 平面型线列器件盲元判别	31
2.3.3 抑制P电极流动的工艺优化	33
2.4 背入射高密度器件工艺研究	37
2.4.1 平面型背入射器件工艺流程	37
2.4.2 扩散掩膜开孔工艺优化	39
2.4.3 N电极槽的开孔工艺研究	40
2.5 本章小结	41
3 基于子像元模式的平面型InGaAs探测器研制与性能分析	42
3.1 引言	42
3.2 子像元模式平面型InGaAs探测器工作原理及结构优化	43
3.2.1 子像元模式InGaAs探测器工作原理	43
3.2.2 器件结构优化	44
3.3 子像元模式平面型InGaAs探测器光响应均匀性变温特性研究	47
3.3.1 理论基础	47
3.3.2 实验结果及讨论	49

3.4 探测器芯片性能测试及分析	54
3.4.1 探测器芯片制备	54
3.4.2 实验结果及讨论	55
3.5 本章小结	59
4 正照射平面型InGaAs探测器研制与性能分析	60
4.1 引言	60
4.2 暗电流成分理论基础	61
4.3 低吸收层掺杂浓度的InGaAs器件研究	63
4.3.1 探测器芯片制备	63
4.3.2 性能测试结果及讨论	63
4.4 常规波长 256×1 线列InGaAs探测器研制	67
4.4.1 探测器芯片制备	67
4.4.2 性能测试结果及讨论	68
4.5 长波扩展 256×1 线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器研制	71
4.5.1 探测器芯片制备	71
4.5.2 性能测试结果及讨论	72
4.6 本章小结	77
5 背照射平面型InGaAs焦平面探测器研制与性能分析	79
5.1 引言	79
5.2 焦平面探测器主要的性能参数	79
5.3 背照射 32×32 面阵InGaAs焦平面探测器研制	81
5.3.1 探测器芯片制备	81
5.3.2 阵列探测器边缘效应分析	82
5.3.3 实验结果及讨论	86
5.4 背照射 800×2 双波段集成的InGaAs焦平面探测器研制	89
5.4.1 探测器芯片制备	89
5.4.2 实验结果及讨论	90
5.5 本章小结	93
6 全文总结与展望	94
6.1 全文总结	94
6.2 展望	96
参考文献	99
作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果	111

1 引言

1.1 红外技术的应用

红外辐射俗称红外线，是一种介于可见光和微波之间的电磁波，波长范围为 $0.78\sim 1000\mu\text{m}$ ，是一种人眼看不见的辐射，在绝对零度 (-273°C) 以上的物体都辐射红外能量。红外波段又可以分为近红外波段、中红外波段、中远红外波段、远红外波段，波段范围分别为 $0.78\sim 3\mu\text{m}$ 、 $3\sim 6\mu\text{m}$ 、 $6\sim 20\mu\text{m}$ 、 $20\sim 1000\mu\text{m}$ 。由于其覆盖了极宽的光谱区，所以包含了极其丰富的信息，成功地获取这些信息可以为我所用，造福世界。

红外技术通常是指研究红外辐射的产生、传播、转化、测量及其应用的技术科学，经过近半个世纪以来的漫长发展已经形成了一支相对独立的学科，广泛应用在军事、工业、农业、医药、科学、通讯及空间遥感等领域。在红外技术的众多应用中，军事应用显得尤为突出。以红外成像、红外制导和红外预警为主的军用红外技术与军方实现被动式监测与夜视、武器瞄准、目标追踪、精确制导等应用紧密相连，在现代及未来战争中都是很重要的战术和战略手段^[1]。其具有很多优点，比如一是具有很好的全天候性能，昼夜均能使用，适合夜战需求；二是一般采用无源被动接受系统，与雷达和激光探测相比探测更加安全、隐蔽、不易受干扰，保密性强；三是利用背景和目标的温差及辐射功率差异用于分辨出伪装、便于目标识别；四是在制导应用中具有功耗低、体积小、命中率高、应用范围广等特点。世界各军事大国一直投入大量的人力物力财力进行相关研究，促进了红外技术以前所未有的速度和规模发展。利用红外技术研发的各种探测器和探测系统不断涌现和完善，在军事需求的牵引和带动下，红外技术在军事中的应用将会越来越重要，以红外技术为基础的各种先进的武器装备将会成为衡量一个国家部队综合战斗力的标准。

在红外遥感领域红外技术也有着重要的应用，具体是指应用红外遥感器（如红外摄像机、红外扫描仪）探测远距离外的植被等地物所反射或者辐射红外特性差异的信息，以确定地面物体性质、状态和变化规律的遥感技术。用于红外遥感的传感器有黑白红外摄影、彩色红外摄影、红外扫描仪、红外辐射计等，

在航空和航天领域,采用红外光谱仪对太空或者地面进行信息扫描,变成人眼可以直接识别的图像,从而实现对地观测、天文研究、海洋和环境监控、军事侦察和预警等。因为红外遥感在电磁波谱红外谱段进行,主要感受物体反射或自身辐射的红外线,有时可以不受黑夜限制。又由于红外线波长较长,大气中穿透力强,红外摄影时不受烟雾影响,透过很厚的大气仍能拍摄到地面清晰地像片。另外,红外遥感技术先进、准确、客观、检测覆盖面积大,获取信息丰富、迅速,可实现动态检测,所以红外遥感在气象预报、大气和海洋的温度分布等等领域有着独特的优势,发挥着举足轻重的作用。因此,空间遥感用红外探测器的研究也成为了一个热点。随着科技的不断发展,各种结构新颖且性能优良的红外探测器也相继问世,器件性能也在逐渐提高,如更高的灵敏度、更高的工作温度、更低的噪声、更宽的波长覆盖范围等^[2-5]。

红外技术除了在上述领域具有重要的应用外,在民用方面领域也越来越广泛,作用越来越大。包括农业、工业、环境以及医疗卫生等领域。在农业方面,主要利用红外探测器防治病虫害、灾情预报、农作物估产等,比如在 2011 年日本大地震时就发挥了重要的作用,利用了 DigitalGlobe、GeoEyes、Cnes/Spot 等卫星对灾区进行拍摄,大自然的残酷无情在这些照片中体现的淋漓尽致,也为国际社会及时救援提供了有力的保障;在工业方面,主要利用红外技术进行测温、无损探伤、过程监控及对同位素的分析测试等;在医疗卫生领域,除了可以进行临床诊断外,利用远红外较好的热效应能引起一系列生理效应的特变,用于改善人体微循环、提高免疫力,还有消炎消肿的作用;在环境领域,利用红外探测光谱技术,提取红外波段的特征吸收谱线进行环境监控和污染控制,如冰山融化情况监控、海洋上石油泄漏的油膜范围监控等。

红外技术的应用范围之广泛使其渗透到了国计民生的方方面面,发展之迅速至今仍然势头不减,在国防科技及民用对红外技术需求的带动下,以红外技术为核心开发的产品将会越来越完善,越来越先进,更好地造福人类。

1.2 红外探测器的发展及种类

1.2.1 红外探测器的发展

红外技术主要是指红外探测技术,其发展与应用的前提是人们能够察觉到红外辐射的存在、能够测量它的强弱,这就需要红外探测器把红外辐射转化成

某种可以测量的物理量^[1]。一般来说, 红外辐射照射物体所引起的任何效应, 只要效果可以测量而且足够灵敏, 均可以用来度量红外辐射的强弱^[6]。红外探测器是红外探测系统的核心部件, 这个系统主要包括光学机械装置, 用来收集红外辐射、扫描成像、光学编码; 红外探测器, 主要进行最关键的光电—电光转换; 电子信号处理装置, 进行电信号放大处理; 驱动装置, 主要用于记录显示和伺服^[7]。由于红外探测器在红外技术中的核心地位, 其发展推动了红外技术的不断发展进步。

从 1800 年英国天文学家 Herschel 在研究太阳光谱的热效应时, 第一次发现了红外辐射的存在, 到现在已经有两个世纪。这期间红外技术在军事上的巨大潜力逐渐显现, 一些国家政府对军事技术进行巨大投资, 所以军事应用对红外技术的需求促进了红外探测器以空前的速度和规模发展, 然后向国民经济的各个部门推广。第一个实用的红外探测器是 1940 年前后研制成功的硫化铅(PbS)探测器, 对应 1—3 μm 的短波红外波段。此后的十几年, 铟化铟(InSb)、镓汞(Ge: Hg)等探测器又被研制出来, 分别对应 3—5 μm 、8—14 μm 等大气红外窗口。1959 年英国皇家雷达研究所 W.D.Lawson 等^[8]首次报道了半导体碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$), 在一定温度下, 禁带宽度可由 x 决定, 从而通过调节 x 值得到不同的 E_g , 即得到不同波段的探测器。通过调节材料的禁带宽度从 0 到 1.6eV 之间变化, 研制的探测器几乎可以覆盖所有重要的红外大气窗口谱段。由于 HgCdTe 具有如介电常数小、电子迁移率高、本征跃迁、电子有效质量小而本征载流子浓度低等优点, 开启了红外探测器发展的新局面, 此后 HgCdTe 材料的光电导探测器成为了主流的红外探测技术。与此同时, 随着技术的进步及材料生长工艺的成熟, 各种性能和功能的红外探测器, 如 IR-CID、IR-CCD、IR-CMOS、TeS、QWIP、InAs/GaInSb 超晶格探测器、QD 等不断出现。表 1.2.1 中展示了红外探测技术发展史上的一些重大事件。

表 1.2.1 红外探测技术发展历程^[9-13]

Tab. 1.2.1 Development history of infrared detection technology

1800 年 W. Herschel 发现热红外辐射	1941 年 R. Ohl 发现硅基 p-n 结的光伏效应
1804 年 J. Leilie 研究了热辐射的物理本质和其在一些物质中的吸收和传播	1958 年 M. Lesser 等人研制出了响应波长至 6 μm 的 InSb 探测器 (第一个 III-V 材料的光电探测器!)
1822 年 T. Seeback 发现铜-铋结的热电效应	1959 年 W. Lawson 等人首次报道了
1830 年 L. Nobili 采用热偶对热辐射进行了测量	

1833 年 L. Noblli & M. Melloni 将一系列铋-铋热偶串接在一起, 制造出第一个热电堆 1839 年 M. Melloni 研究了大气对太阳光谱的吸收特性, 并鉴别出其中的水气吸收 1840 年 J. Herschel 发现了红外光的三个大气窗口 1859 年 G. Kirchhoff 建立了红外辐射的吸收与发射关系 1873 年 W. Smith 研究了硒 (Se) 中的光电导效应 1879 年 J. Stefan 确立了黑体辐射强度与温度的经验关系 1884 年 L. Boltzmann 从热力学角度揭示了 J. Stefan 发现的经验关系 1894-1990 年 J. Rayleigh & W. Wien 研究了黑体温度与辐射波长的关系 1900 年 M. Planck 通过引入量子的概念建立了黑体辐射定律 1903 年 W. Coblentz 通过红外光谱测量对星体温度进行了研究 1905 年 A. Einstein 确立了光电理论 1914 年 人们开始利用辐射仪进行探测, 并开始将其应用于鱼类制导 1917 年 T. Case 研制出了 TeS 的近红外光电导探测器 (内光电效应) 1933 年 E. Kutzscher 展示了 PbS 在短波红外波段的光电导特性 1935-1945 年 采用铅盐材料的探测器工作波长不断拓展 (PbS~4μm; PbTe~6μm; PbSe~8μm)	HgTe -CdTe 混晶体系 1965 年 G.. Weckler 在 Si 探测器阵列和 MOS 管上首次实现了单片集成 1970 年以后: ● IR-CID、IR-CCD、IR-CMOS 等红外器件问世 ● HgCdTe 材料的光电导探测器成为主流红外探测技术 ● MBE和MOCVD等精确控制的异质外延技术逐渐成熟 1980 年, C. T. Elliott 发明了具有内部信号处理功能的 SPRITE 结构 HgCdTe 探测器 1980 年以后: ● 光纤通信的迅猛发展, InGaAs 的高速探测器被广泛的研究和应用 ● 红外焦平面技术开始得到人们的广泛关注和发展 ● 红外遥感技术也得到了较快的发展 1985 年以后, Pt-Si 肖特基 FPA、IR-CCD、IR-CMOS 阵列逐渐投入量产并被广泛应用 1985 年 L. C. West 研制成功了第一个 GaAs/AlGaAs 的 QWIP 探测器 1991 年 J. L. Johnson 研制出第一个基于 II 型 InAs/GaInSb 超晶格探测器 1997 年 第一个 QD 探测器诞生 2002 年 波长扩展 InGaAs 探测器阵列首次应用在卫星遥感上 至今 规模在 10⁶ 元以上, 强调多色的第三代器件不断发展
--	---

从第一代的红外扫描系统, 发展到第二代的凝视红外系统, 再到当前第三代更先进的红外成像系统^[14]。相应地, 作为红外成像系统的“心脏”, 探测器阵列也从一维的线列发展到面阵, 再到当前更高的性能、更大的规模、和多色探测的红外焦平面^[13]。所以目前红外探测器也通常被分为三代^[15-16]。第一代以分立型为主, 元数较少, 一般在 10³ 元以下, 有线列和小面阵结构, 其代表产品有: 美国的 60 元、120 元、180 元光导 HgCdTe 器件, 法国 5×11 元光伏 HgCdTe 器件, 英国 4 条(或 8 条)扫积型 HgCdTe 器件等; 第二代为扫描型和凝视型焦平面结构, 在美国出现 LADA I、LADA II、LADA III 型阵列应用的基础上发展起

来的焦平面阵列,规模在 $10^3 \sim 10^6$ 元,其代表产品有: 4×240 元、 4×480 元 HgCdTe 和 256×256 元、 320×240 元 InSb、HgCdTe 等;第三代以凝视型为主,规模在 10^6 元以上,且强调双波长(双色)或多波长(多色)响应和更强的智能化逻辑处理功能,以及价格较低的非制冷焦平面阵列等。多元探测器的优缺点简要总结列于表 1.2.2 中。

表 1.2.2 多元探测器的优缺点简介^[13]

Tab. 1.2.2 Brief introduction of multielement detector characters

		优点	缺点
线列	一字排列	用数量较少的探测元即可获取高的空间分辨率; 侧面有很大面积可用,容易在读出电路上集成更多的功能(易于实现单片集成); 有利于拼接超长线列; 可并行输出,同时性好,无需时间延迟。	由于成像需要光机扫描,因此像元积分时间仍受限制,系统比较复杂。
	错开排列	较高的空间采样率。	不利于并接。
面阵		具有更长的积分时间。	需要光机扫描; FPA 的制造难度正比于探测器规模。
凝视焦平面		结构紧凑,体积小,重量轻;光学系统简单; 由于取消了光机扫描器,探测元的积分时间明显增加,因此 FPA 成像系统具有较高的灵敏度。	制造难度大; 空间采样率不如错位排列的线列; 读出和信号处理电路复杂。

1.2.2 红外探测器的种类

现在红外探测器所利用的主要是红外热效应和光电效应,所以 19 与 20 世纪内研制成功并能生产的红外探测器主要有两类^[17]。一类是利用红外热效应而研制的热敏性红外探测器,探测器受到红外辐射后温度升高,元件的温度随着入射红外功率的变化而变化,利用元件的某种温度敏感特性把辐射能引起的温度变化转化成相应的电信号,或者利用元件的某种温度敏感特性来调制电路中电流强度的大小,从而得到相应的电信号。常见的热探测器有气动探测器、热释电探测器、热电偶、热电堆、铬电池、测辐射热计,如 Golay 辐射计、电容传声器、PZT、TGS、LiTaO 等。热探测器的优点是不需要制冷,探测器的温度变化由吸收的热辐射能量引起,对红外辐射波长没有选择性。缺点是其响应时

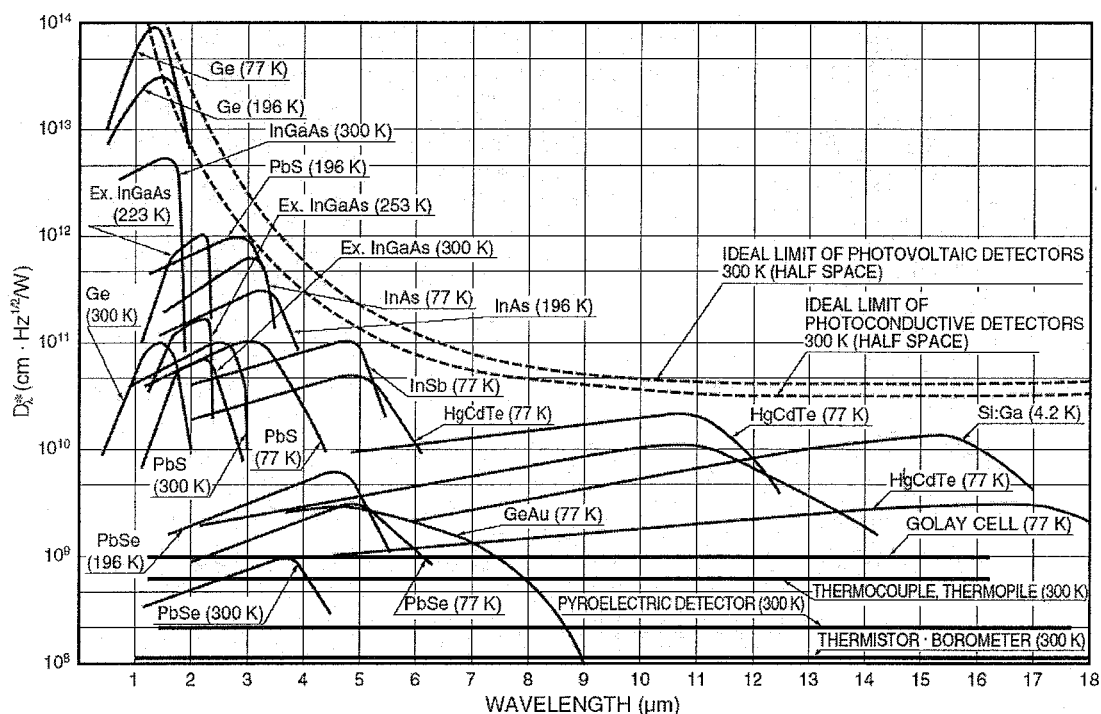
间比较长, 探测能力低^[18]。另一类是利用半导体的光电效应研制的红外光子探测器, 这种探测器受到红外辐射后, 光子将材料中的束缚态电子激发成为传导电子, 引起半导体材料电导变化或者产生光生电压, 这种变化或者光生电压转化为电信号输出, 信号大小正比与吸收的光子数。但入射光子的能量必须达到电子运动状态改变的能量以激发束缚态电子, 所以红外光子探测器都具有某特定截止波长, 具有光谱选择性。常见的光子型探测器种类有: 光电导探测器、光伏探测器、量子结构探测器等。光电导探测器分为本征光电导探测器和非本征光电导探测器, 前者基于带间跃迁吸收光电导效应, 后者基于重掺杂杂质能级跃迁, 常见的有 HgCdTe、PbS、PbSe、InSb 等; 光伏探测器基于光生载流子产生光电压的光生伏特效应, 常见的有 HgCdTe、InGaAs、InAs、InSb 等; 量子结构探测器分为量子阱探测器和量子点探测器, 如 GaAs / AlGaAs 量子阱红外焦平面探测器、InGaAs 量子阱红外探测器、GaSb 基的 II 型量子阱/超晶格探测器、Si 基 Ge 量子点探测器等。光子型探测器响应速度快、噪声低、灵敏度高, 但是探测灵敏度与工作温度有关, 一般来说, 光子型红外探测器都需要制冷以实现精确测量。表 1.2.3 列出了常见的红外探测器种类及特点, 图 1.2.1 展示了多种探测器的探测率特性。

表 1.2.3 常见红外探测器种类及其特点^[17]

Tab. 1.2.3 Classification and characteristic of ordinary infrared detectors

红外探测器种类				工作原理	优点	缺点
热探测器	气动探测器			受热膨胀	简单轻便, 成本低, 可室温工作	无选择性 探测率较低 响应速度较慢
	热电偶、热电堆			温差电效应		
	测辐射热计			电阻温度特性		
	热释电			热释电效应		
光子探测器	光电导探测器	本征光电导探测器	IV-VI 化合物材料	基于带间跃迁吸收光电导效应	禁带宽度窄	机械特性差 介电常数大, 结电容大
			II-VI 化合物材料		应用波长范围宽 技术比较成熟	缺陷密度高 成本较高
			III-V 化合物材料		材料性能优良 技术比较成熟	需要合适衬底
		非本征光电导探测器			重掺杂杂质能级跃迁, 主要应用于长波, 响应波长范围宽	成本低, 工艺简单, 可量产, 易于调节响应波长

	光伏探测器	PIN、Schottky、APD、MSM、RCE	光生载流子产生光电压	高灵敏度和响应率，噪声小，功耗低	薄膜材料生长要求较高 ^[13,19-21]
	量子结构探测器	量子阱探测器	半导体材料相间排列，形成具有量子局限效应的势阱，子带间跃迁	波长大幅可调，技术比较成熟，容易实现多色探测	需特殊的光耦合方式 量子阱中基态电子浓度受掺杂限制 量子效率不高 ^[22-23]
		量子点探测器	维度很小的量子点内部电子受到局限，产生不连续电子能级，子带间跃迁	较小暗电流，较大增益，较高的工作温度	量子点尺寸、密度和均匀性的控制比较困难 ^[24]

图 1.2.1 各种材料探测器的探测特性^[25]Fig. 1.2.1 Detectivity characteristics for detectors of various materials^[25]

1.3 短波红外及 InGaAs 短波红外探测器

1.3.1 短波红外探测器

在实际应用中，红外探测系统探测到的红外辐射都要经过一段距离，在这段距离内，红外辐射会发生反射、吸收和散射，其中吸收是影响传播的主要因素，如大气中含量较少的水蒸汽、二氧化碳、臭氧、甲烷、氧化氮、一氧化碳等物质对红外辐射都有强烈的吸收作用^[2,18,26]，所以在某些特定的吸收谱段红外

辐射的能量就会受到损失，而在吸收较小或者不吸收的某些谱段红外辐射能量损失较少，透过率较高。因此大气将红外辐射分割为几个波段区域，称为“大气窗口”，红外辐射在这几个窗口透过较高，常见的几个窗口波段分别为：0.95~1.05 μm 、1.15~1.35 μm 、1.5~1.8 μm 、2.1~2.4 μm 、3.3~4.2 μm 、4.5~5.1 μm 和 8~13 μm 。一般人们也粗略地认为有 1~3 μm 、3~5 μm 和 8~14 μm 三个大气窗口。一般红外仪器或红外系统都在这三个窗口之内工作，这三个大气窗口对于从事红外光谱研究、红外技术应用尤为重要^[27]。红外辐射大气窗口中的 1~3 μm 属于近红外波段，又称短波红外，由于所有物体都反射环境中普遍存在的短波红外辐射，而且在这个波段很多物质都具有独特的光谱特性，而且很多高温物体如火箭和飞机的发动机喷口、导弹尾焰等红外辐射能量也集中在这个波段，另外，夜天光的大部分能量集中在短波红外波段，所以工作在这个波段的红外探测器在多个领域都有重要的应用，比如空间对地探测、资源分布、土壤水分监测、大气成分分析、农作物估产，以及医学成像、工业多光谱成像分析、安全防范、军事监视、红外预警和夜视成像等众多关键的民用和军事领域。

应用于短波红外窗口的红外探测器材料有 HgCdTe、InAs、InSb、InGaAs、PtSi 等。在本节前面讲过，由于 HgCdTe 具有介电常数小、电子迁移率高、本征跃迁等一系列的优点，开启了红外探测器发展的新局面，但由于 II-VI 族 HgCdTe 材料中较弱的 Hg-Te 键，其具有较高的本征缺陷密度和较差的抗辐照性能。材料制备困难较大，体材料及液相外延材料的均匀性较差，不利于阵列的制备，造价昂贵^[13]。而且 HgCdTe 探测器也需要一定程度的制冷，这样就增加了整个工艺的复杂性和成本。InSb 和 PtSi 等探测器也都需要某种程度的制冷，不是探测器需要制冷就是光学系统需要制冷，或者两者都需要制冷^[7]。这样制冷器的重量和体积必然计算在红外系统之内，无疑增加了整个系统的复杂性和成本，以及可能会带来一些棘手的问题比如震动、可靠性、寿命等，制约了这类探测器在航天航空等高技术要求领域的应用。

1.3.2 InGaAs 材料特性介绍

三元化合物 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 是 III-V 族的赝二元系、直接带隙的半导体材料^[28,29]，可由 InAs 与 GaAs 以任何配比形成。图 1.3.1 和图 1.3.2 分别显示了 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 材料的能带结构和晶格常数与截止波长的关系。其晶格常数随 In 组分的变化近

似为线性,从GaAs的 $5.6533\text{\AA}$ 变化到InAs的 $6.0583\text{\AA}$,禁带宽度在InAs(0.35eV)与GaAs(1.43eV)之间变化,截止波长在 $3.5\mu\text{m}$ 和 $0.87\mu\text{m}$ 之间变化,很好的覆盖了 $1\sim 3\mu\text{m}$ 的大气窗口,而且具有高迁移率、良好的抗辐照特性等优点,是制备短波红外探测器的合适材料。当In组分为0.53时,InP和 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的晶格完全匹配,因此在InP衬底上可以生长出高质量的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 外延层,研制出高性能的器件。调节材料中In组分的含量,可以使 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 探测器的响应波段向长波方向扩展,当InP衬底通过特殊工艺移除后,其探测范围可以向可见光波段拓展,这样可以适应更多的需求。虽然波长延伸的 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 材料晶格常数与InP衬底失配,但是通过通过热电制冷也可以实现较好的性能。

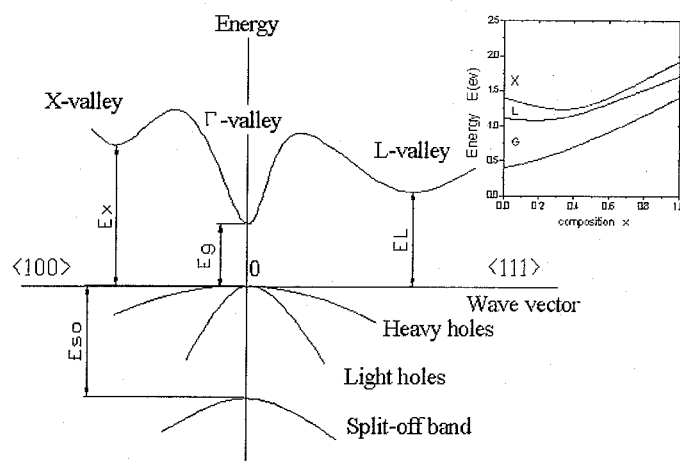


图 1.3.1 InGaAs 能带结构及 X、L、 Γ 随组分 x 变化关系^[7,28,29]

Fig. 1.3.1 Band structure of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ and variation of X, L and Γ conduction band with composition^[7,28,29]

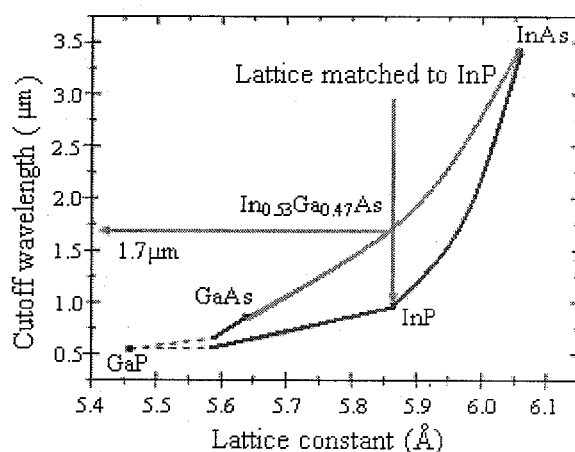


图 1.3.2 III-V 族化合物晶格常数与截止波长的关系

Fig. 1.3.2 The relationship between the lattice constant and the long wavelength cutoff of III-V compounds

目前生长 InGaAs 外延材料工艺比较成熟,有多种先进的生长技术可以选

择：气相外延(VPE)、液相外延(LPE)、金属有机化合物化学气相淀积(MOCVD)、分子束外延(MBE)技术制备,各种方法均能生长出高质量的外延材料。由于 III-V 族良好的材料特性和成熟的外延工艺,使得 InGaAs 材料在短波红外领域方面在技术和成本方面都有着相当的优势。表 1.3.1 列出了 InP、In_{0.53}Ga_{0.47}As、In_{1-x}Ga_xAs 在 300K 时的材料参数。

表 1.3.1 InP、In_{0.53}Ga_{0.47}As 和 In_{1-x}Ga_xAs 在 300 K 时的材料参数^[7]
Tab. 1.3.1 Basic parameters of InP, In_{0.53}Ga_{0.47}As and In_{1-x}Ga_xAs at 300K^[7]

参数	InP	In _{0.53} Ga _{0.47} As	In _{1-x} Ga _x As
晶格结构	闪锌矿	闪锌矿	闪锌矿
晶格常数(Å)	5.8687	5.8687	6.0583-0.405x
禁带宽度(eV)	1.344	0.75	0.324+0.7x+0.4x ²
低频介电常数	12.5	13.9	15.1-2.87x+0.67x ²
高频介电常数	9.61	11.6	12.3-1.4x
本征载流子浓度 (cm ⁻³)	1.3×10 ⁷	6.1×10 ¹¹	
电子迁移率(cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	≤5400	≤12000	40-80.7x+49.2x ² ×10 ³
空穴迁移率(cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	≤200	≤300	
有效导带态密度 (cm ⁻³)	5.7×10 ¹⁷	2.1×10 ¹⁷	2.5×10 ¹⁹ [0.023+0.037x+0.003x ²] ^{3/2}
有效价带态密度 (cm ⁻³)	1.1×10 ¹⁹	7.7×10 ¹⁸	2.5×10 ¹⁹ [0.41+0.1x] ^{3/2}
电子的有效质量(m ₀)	0.08	0.041	0.023+0.037x+0.003x ²
轻空穴有效质量(m ₀)	0.089	0.052	0.026+0.056x
重空穴有效质量(m ₀)	0.6	0.45	0.41+0.1x

1.3.3 InGaAs 探测器结构和工作原理

p-n 结是 InGaAs 探测器能探测到红外辐射的关键,根据 p-n 结形成方式的不同,InGaAs 探测器可以分为台面型结构和平面型结构,台面型器件的 p-n 结通过外延材料在生长过程中进行原位掺杂形成,平面型器件的 p-n 结通过将掺杂元素以杂质扩散或者离子注入的方式在 n-i-n⁺结构外延材料中成结。两种结构器件的截面图如图 1.3.3 中。

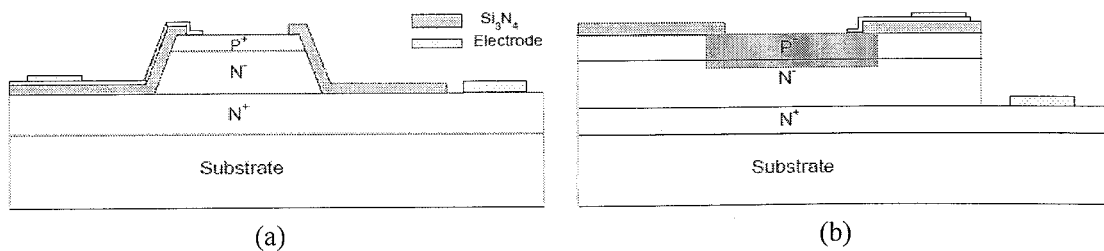


图 1.3.3 (a)台面型和平面型(b)InGaAs 红外探测器

Fig 1.3.3 The cross-sectional structure of (a)mesa-type and (b) planar-type InGaAs frared detector

台面型器件通过刻蚀隔离槽来实现相邻光敏元的隔离,这种结构的优点是重复性好,工艺简单,串音小。缺点由于刻蚀工艺造成 p-n 结的侧面暴露,钝化困难,会使器件的可靠性降低,暗电流和噪声较大,很大程度上限制了器件探测率的提高。平面型器件相邻的光敏元在 InGaAs 吸收层上是相连的,而且在制备平面型器件的过程中,掺杂元素在扩散或者离子注入的工艺中都会存在一定程度的横向扩散,这样光敏元之间可能会存在较大的串音,光敏元扩大问题比较严重,制备工艺比较复杂。由于平面型器件的 p-n 结是埋在帽层中, p-n 结的侧面不需要额外的工艺进行钝化,因此器件具有比较低的暗电流和噪声,可靠性比较高,比较适用于航天遥感领域。就目前的发展现状,大部分国外的研究机构研制的空间遥感用 InGaAs 红外探测器都采用平面型结构。首先,平面型器件作为 InGaAs 探测器的主流结构,尽管制作技术复杂,但就可靠性而论,它比台面型优越,其次台面型器件的暗电流过大,目前尚无很有效的应对措施。在解决平面型器件存在的缺点方面,国内外很多文献都做了相应的研究,比如采用小扩散孔进行扩散以控制光敏面的扩大、采用环形电极以及结合台面结的优点采用浅隔离槽与保护环的一体化设计等。在未来的发展趋势,平面型器件应比台面型器件更有发展的空间和前景。

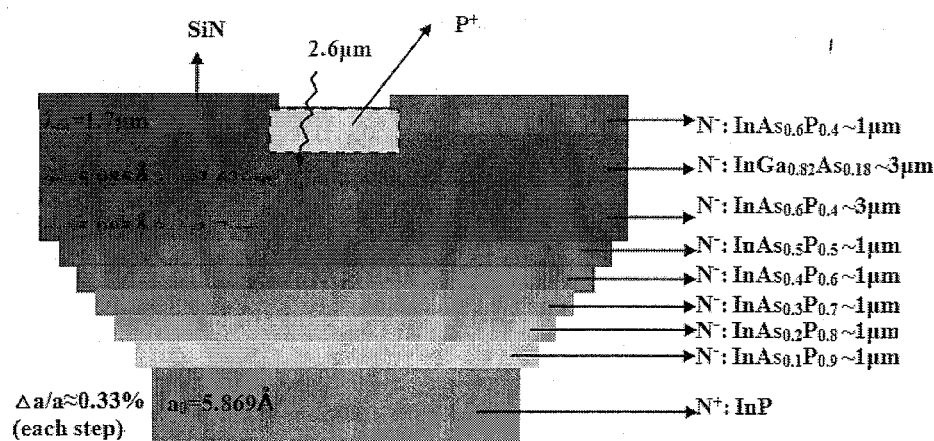


图 1.3.3 2.6 μm InGaAs 材料结构示意图

Fig. 1.3.3 Schemes of configuration for 2.6 μm InGaAs material

InGaAs 探测器除了可以响应 0.9~1.7 μm , 还可以向长波延伸和短波拓展。延伸波长的探测器可以延伸到 3.0 μm , 在 In 组分比较高的外延材料上进行制备, 波长越向长波延伸, InGaAs 同 InP 衬底的晶格失配越严重, 这样就需要在衬底和吸收层之间生长渐变缓冲层以缓解或者释放晶格不匹配带来的应变, 如图

1.3.3 所示。对于制备向短波扩展的探测器通常在吸收层和衬底和之间生在一层刻蚀阻挡层，然后减薄 InP 帽层或者衬底厚度来增强探测器对可见光部分的吸收，常见的工艺有衬底转移和衬底剥离技术，如图 1.3.4 所示为一种衬底转移工艺流程。根据光入射的不同，InGaAs 探测器还可以分为正入射和背入射两种方式，另外，人们还采用 InGaAs 和 GaAs 的周期结构制备了 InGaAs 量子阱红外探测器(QWIP)用于中长波红外成像和夜视领域，这里就不一一介绍了。

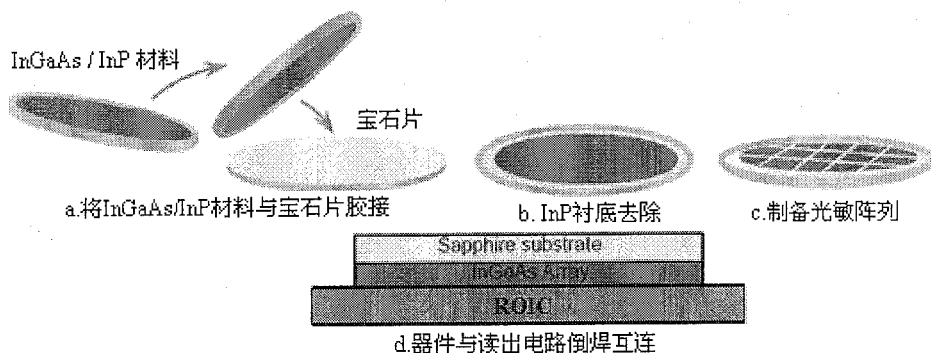


图 1.3.4 衬底转移技术流程^[30]

Fig. 1.3.4 Process of Epitaxial transfer of InGaAs to sapphire substrate^[30]

InGaAs PIN 红外探测器在重掺杂的 P 区和 N 区生长一层非掺杂或轻掺杂的 i 型吸收层以增加器件的耗尽层宽度和结电阻，从而改善器件的灵敏度和信噪比。图 1.3.5 为双异质结型 InGaAs PIN 探测器结构示意图和典型的 I-V 曲线。当入射光的能量大于 InGaAs 的禁带宽度时，在耗尽区或者载流子扩散长度内

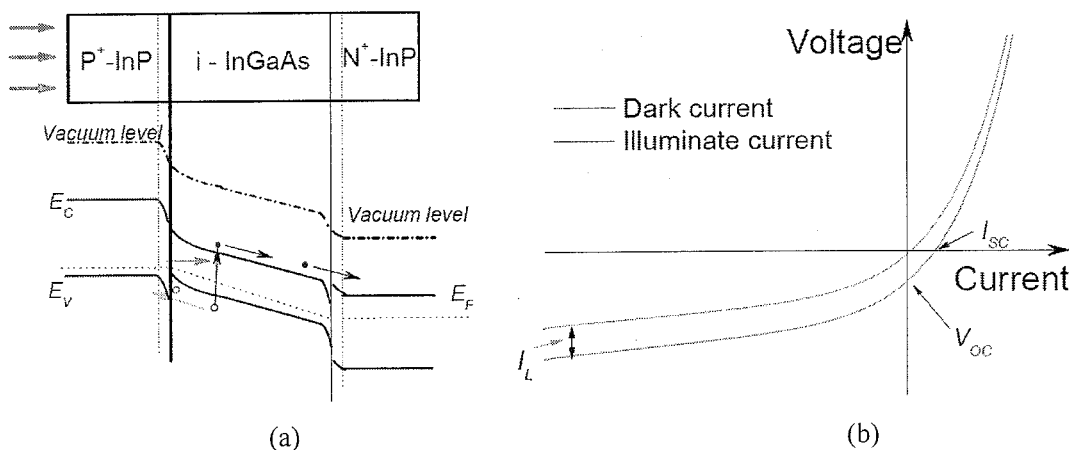


图 1.3.5 (a)InGaAs PIN 探测器结构示意图和(b)典型 I-V 曲线^[13]

Fig.1.3.5 (a) Schemes of configuration for InGaAs PIN detector and (b) typical I-V cure^[13]

电子-空穴对最终会被电场分离，导致载流子漂移出耗尽层而在外部电路产生电流。光照时 InGaAs PIN 探测器的 I-V 特性可以表示为：

$$I(V) = I_s [\exp(\frac{qV}{nkT}) - 1] - I_L \quad (1.3.1)$$

其中 I_s 为反向饱和电流。上式中前一项是探测器的暗电流，后一项为探测器的光电流。

光通信用的 PIN 型 InGaAs 探测器通常工作在较高的反向偏压下，以获得更好的频响特性^[31]。因为在反向偏压下耗尽层变宽，增大了耗尽区电场强度，缩短了载流子在 InGaAs 层中的渡越时间，同时在场区产生了更多的载流子，器件可以获得比较高的响应速度和灵敏度。在空间遥感领域，对器件的响应速度要求不高，人们比较关心低的暗电流和高的探测率，器件通常工作在零偏压下，但实际上由于读出电路会引起一定电压漂移，为了确保系统的稳定工作，探测器的工作点通常会选定在较小的反向偏压下，偏压大小由相应读出电路的种类决定^[13]。

1.4 InGaAs 探测器研究现状

1.4.1 国外研究现状

早期 InGaAs 探测器的研究主要针对于光纤通信系统用的高频器件。光通信用探测器的研究主要侧重器件的响应速度，因此在对传统的 PIN 型结构优化的基础上，相应发展出了如波导型 PIN 探测器、MSM 结构、APD、WG-APD、RCE-PIN 及 RCE-APD 等结构。从上世纪 80 年代开始，多个国家也开始致力于空间遥感用 InGaAs 探测器的研究，目前国际上研究 InGaAs 探测器的单位众多，器件性能也比以前有了很大提高，由于功能逐渐丰富，极大的扩展了器件的应用范围。

上世纪八十年代中期，法国 THOMSON 公司研制了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面，应用在陆地卫星(SPOT4, SPOT5)的高分辨可见红外系统(HRG)和植被仪(Vegetation)中^[32]。该线列焦平面探测器工作波长为 1.55~1.70 μm ，室温工作，是由 10 个 300 元 InGaAs 小线列拼接而成，主要应用于土壤、植被含水量的监测。该探测器的主要性能：像元面积为 30 μm ×30 μm ，探测率为 6×10¹¹cmHz^{1/2}/W，平均噪声为 0.3mV，非均匀性小于 10%，平均量子效率为 65%，噪声等效功率为 10⁻¹³W，焦平面探测器的动态范围超过 4000。

Sensors Unlimited 公司在 InGaAs 探测器方面研制水平处于领先地位，从上

世纪 90 年代开始, 该公司已经开发出了多种规模和功能的探测器^[33]。2005 年, Alan. Hoffman 等就已经报道了该公司制备的规模为 1280×1024 和 1024×1024 的平面型 InGaAs 短波红外焦平面探测器, 响应波长为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 光敏元中心距 $20 \mu\text{m}$, 其中 1024×1024 焦平面器件的优值因子 R_0A 为 $1.5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (265K) 和 $8 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (280K)^[34]。同年, Tara. Martin 报道了向短波方向延伸的 640×512 红外焦平面, 该器件在波长为 500nm 处的量子效率 15%, 850nm 处的量子效率为 70%, 1310nm 处的量子效率为 85%, 1550nm 处的量子效率为 80%, 器件性能在可见光和短波红外波段达到了很高的水平^[7,35]。在 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 资助下, 研制了超低噪声的 1280×1024 元的 InGaAs 双色成像焦平面, 像元面积 $12.5 \mu\text{m} \times 12.5 \mu\text{m}$, 室温下暗电流密度 $< 2 \text{nA/cm}^2$, InGaAs 双色焦平面可在无月光照射的情况下识别 450 米外的目标如图 1.4.1 所示; 该公司的 Gregory H. Olsen 等人研制出了 $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ InGaAs 集成三色近红外探测器, 响应波长分别截止到 $1.65 \mu\text{m}$ 、 $2.07 \mu\text{m}$ 、 $2.64 \mu\text{m}$ 。2008 年, 该公司的 M. D. Enriquez 等报道了可响应 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段的低噪声 1280×1024 元焦平面, 光敏元为 $15 \times 15 \mu\text{m}^2$, 在 -100mV 偏压下, 298K 时为 52.5fA , 在 308K 时的暗电流也仅为 142fA ^[36]。2009 年, 他们报道了在 3 英寸及 4 英寸的 InGaAs 外延片上制备的背照射式 1280×1024 的阵列焦平面器件, 响应波长为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 光敏元中心距缩减为 $15 \mu\text{m}$, 并且通过器件工艺优化, 探测器暗



图 1.4.1 传感无限公司研制的 InGaAs 双波段焦平面的成像效果 (无月光、距离 450 米)

Fig. 1.4.1 The image capture on a dark (moonless night) using the VIS-NIR InGaAs FPAs at distances of approximately 450m

电流密度 $< 1 \text{nA/cm}^2$ (283K), 峰值探测率 $1.5 \times 10^{13} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ (295K)^[18,37]。2013 年 1 月, Doug Malchow 等公布了该公司最新的 2048 元 InGaAs 探测器应用在行

扫描摄像机上来进行 3-D 光学相干断层扫描, 中心距 $10\mu\text{m}$, 是目前最高光谱分辨率的 InGaAs 相机。

成立于 2004 年的 Aerius Photonics 公司, 该公司研制的 InGaAs 探测器主要应用于天文观测, 采用平面型结构。通过材料结构的优化设计, 成功将器件在 293K 时-100mV 偏压下的暗电流密度从 18 nA/cm^2 降至 8.4 nA/cm^2 。再通过对器件工艺流程中的扩散成结及表面钝化进行了优化, 将器件在 7°C 时的暗电流密度降至 $<1\text{ nA/cm}^2$ 。该公司已经成功研制出 1280×1024 元的平面型 InGaAs 焦平面器件, 光敏元中心距 $18\mu\text{m}$, 单个光敏元电容小于 35 fF , 量子效率 79%, 响应非均匀性低于 2%, 有效像元 99.88%器件, 与 Teledyne Scientific 公司的读出电路 HAWAII-1RG 互连后, 应用在对猎户座星云天文成像上, 取得了良好的效果如图 1.4.2 左所示, 右图为 Si CCD 相机(2148×1472 象素级别)的成像效果, 可以看到, InGaAs 相机可以将 Si CCD 相机不能显示的天体进行清晰地成像。

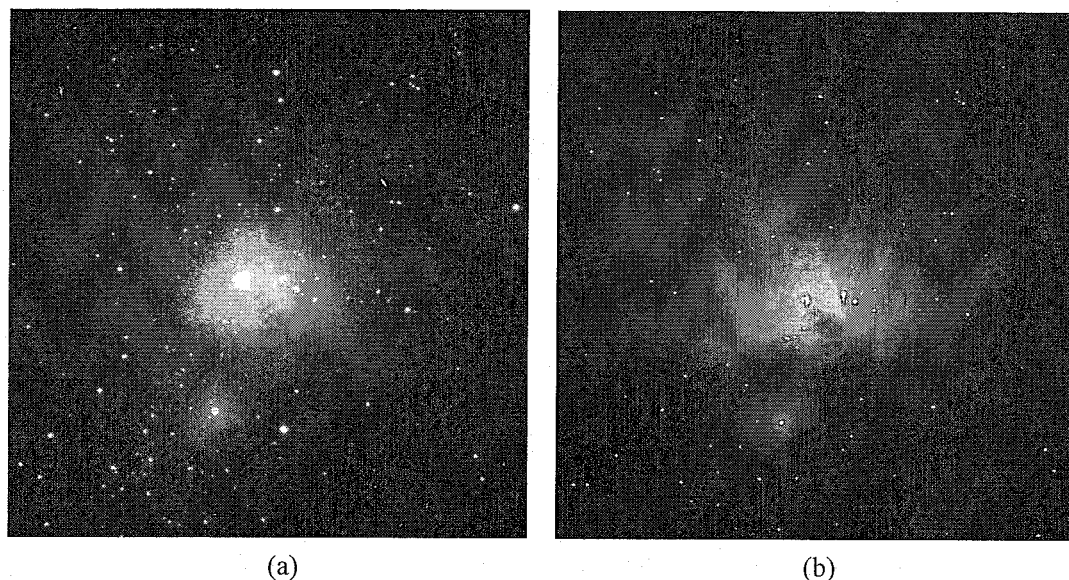


图 1.4.2 对猎户座星云的成像图(a) 1024×1024 InGaAs相机, (b) 2148×1472 CCD相机
Fig. 1.4.2 Image of the Orion Nebula taken by (a) 1024×1024 InGaAs camera and (b) 2148×1472 CCD camera

目前, 该公司宣称他们已经具备 4096×4096 规模 InGaAs 焦平面器件的研制能力^[38,39]。2011 年, 该公司进一步优化界面和材料生长, $25\mu\text{m}$ 中心距的器件的暗电流密度在 20°C 下达到 1.5 nA/cm^2 , 在 280K 下小于 0.5 nA/cm^2 , 推出了典型产品 APS640B (640×512 元), 并将技术扩展到 1280×1024 规模器件上(采用 RVS 的 $1280\times 1024\text{ ROIC}$, 中心距 $20\mu\text{m}$)^[40]。2012 年, 为适应国防应用的迫

切需求,器件向小光敏元和大面阵发展,核心是降低噪声,需要在读出电路、探测器材料和器件工艺三个方面努力,主要报道 HD 模式 1920×1080 (APS1920) 和 VGA 模式的 640×512 元(APS640C) $15\mu\text{m}$ 中心距的焦平面。前者的暗电流密度在 293K 下为 2.95 nA/cm^2 , 室温下三种增益下的读出噪声分别为: 150 e- 、 58 e- 和 26 e- ; 后者暗电流密度在 283K 下为 0.26 nA/cm^2 , 焦平面读出噪声为 22 e- [41]。

原 EPITAXX 公司很早就进行 InGaAs 单片长线列焦平面的研究,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) [27,42,43], 四个通道分别采用了该公司研制的单片 1024 元的 III-V 族 InGaAs 晶格匹配和晶格失配的 InGaAs 线列器件,单元尺寸 $25\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$, 器件分别工作在 200K 和 150K, -2mV 偏压下,暗电流为 $20 \sim 100 \text{ fA}$, 优值因子 R_0A 为 $2.5 \sim 12.5 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。这是晶格失配 InGaAs 探测器件首次在卫星遥感上的应用。在 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级大地震发生后,欧空局向日本提供了 Spot-5 卫星、ENVISAT 卫星以及德国测绘卫星 TerraSAR-X 的观测图片,如图 1.4.3 所示。2012 年 ESA 将发射 Proba-V 卫星接替 SPOT 系列 [44], 近红外的 InGaAs 探测器光敏元密度提高一倍,即由“品”字型 $26\mu\text{m}$ 中心距提高到“一”字型 $25\mu\text{m}$ 中心距,同时器件的暗电流水平进一步降低,子模块读出由 CCD 模式转变为 CMOS 模式,规模由 300 元提高到 1024 元。

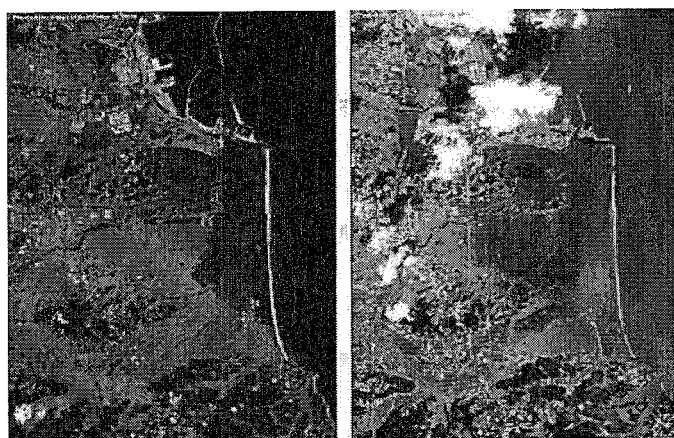


图 1.4.3 地震前后日本沿海卫星图片对比 (左: 2010-9-5; 右: 2011-3-12)
Fig.1.4.3 Satellitic images of Japan seaboard before and after earthquake (left: 2010-9-5, right: 2011-3-12)

2008 年, Herry Yuan 等人报道了美国 Judson (Teledyne Judson Technologies) 公司的研制进展 [45], 该公司可生产常规、短波方向延伸和向长波方向延伸的 320

×256 元 InGaAs 焦平面,所用外延材料采用 MOCVD 方法生长,器件采用平面 Zn 扩散工艺制备。所制备的响应波段为 0.9~1.7 μm 的常规 InGaAs 焦平面器件在 1.35~1.6 μm 波段的量子效率在 80%~85%之间,有效像元为 99.8%。该公司向短波方向延伸的 InGaAs 焦平面器件,响应波段为 0.4~1.7 μm , -65℃~+40℃ 温度范围内,器件在 0.5~1.6 μm 响应波段内的量子效率最低为 40%。向长波方向延伸 InGaAs 焦平面的响应波段为 1.4~2.6 μm ,峰值量子效率优于 80%。另外,该公司还公布了大光敏元线列器件,响应波段 0.8~1.8 μm ,规模为 16×1 及 32×1,光敏元大小 500×1000 μm^2 ,光敏元间距 10 μm ^[46]。

在 DARPA 的 PCAR(Photon Counting Array)计划的资助下,2008 年,美国 Boeing Spectrolab 公司的 J. Boisvert 等人报道了 1280×1024 元的 InGaAs 焦平面器件^[47],光敏元大小为 15 μm ×15 μm ,暗电流密度低于 1nA/cm²(@280K),在室温下,1.55 μm 峰值响应率达到 1.08A/W。在 DARPA's MANTIS (Multispectral Adaptive Networked Tactical Imaging System)计划资助下,2009 年,美国 Raytheon 公司制备了高动态范围的 1280×1024 规模的读出电路,并与 Boeing Spectrolab 公司的低暗电流的 InGaAs 焦平面器件互连,研制出高动态范围低噪声的军用短波红外成像系统^[27,48]。

日本的 Hamamatsu 公司生产的 InGaAs 探测器及其附件产品系列很多,包括高性能低噪声近红外 p-i-n 探测器组件、向长波方向和短波方向延伸的探测器组件、带有前置放大器的 p-i-n 探测器组件、线列成像探测器组件等。据报道,2003 年 9 月欧空局发射的探月卫星 SMART1 的有效载荷 SIR(SMART-1 Infrared Spectrometer)上采用了由该公司生产的 256×256 面阵延伸波长焦平面器件^[49]。

比利时 XenICs 公司在扫描型 InGaAs 焦平面探测器研究方面也具有很高地水平。目前,该公司的 128 元、256 元和 512 元线列焦平面、320×256 元、640×512 元焦平面已经商品化。该公司在 2010 年报道了 3072 元的超长线列 InGaAs 焦平面探测器^[50],应用在 Proba-V 小卫星的多光谱仪器上,如图 1.4.4 所示,封装在 72 个管脚 Kovar 管壳中,阵列总长度 68 mm,由三个 1024 元线列探测器交错拼接而成,拼接精度在平面内 X 和 Y 方向的误差≤25 μm ,Z 方向偏差≤100 μm ,焦平面功耗<900mW。响应中心波长 1610nm,FWHM 为 80nm、填充因子 100%、量子效率约为 70%,探测器在 Nyquist 频率处 MTF 接近 55%。接下

来将要研制中心距为 $12.5\mu\text{m}$ 的成像单元，采用双向的 ROIC 和 PDA，初步的光学成像结果如图 1.4.5。

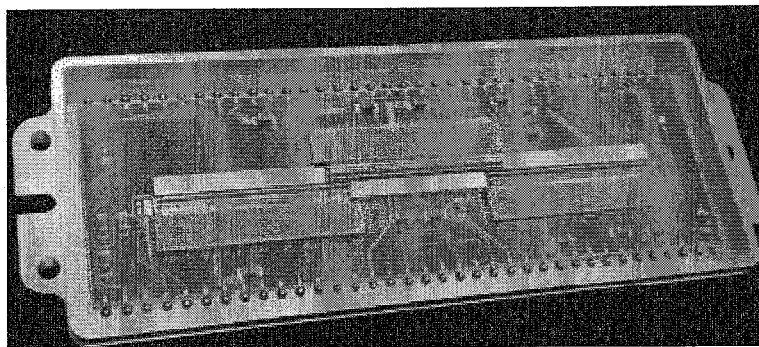


图 1.4.4 Xenics 公司的 3072 元线列焦平面组件（无窗口）

Fig. 1.4.4 The complete populated package without lid



图 1.4.5 无校正的光学成像

Fig. 1.4.5 Uncorrected image of the “Lena” test target

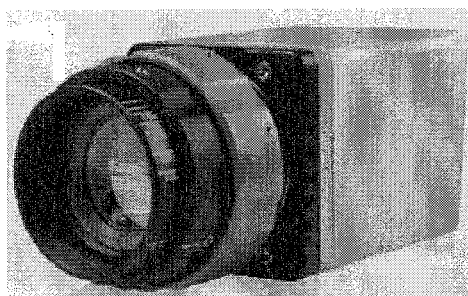


图 1.4.6 Xenics 公司 Lynx-GigE/CL 红外相机（采用 2048 元 InGaAs 线列焦平面）

Fig.1.4.6 Lynx-GigE/CL line-scan camera of Xenics (by 1024 pixels InGaAs Linear Array)

2012 年 10 月该公司公布了最新产品 Lynx-GigE/CL 红外相机，采用 2048 元单片扫描型线列 InGaAs 焦平面探测器^[51]，器件响应波段 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ ，像元尺寸 $12.5\times 12.5\mu\text{m}^2$ ，InGaAs 阵列长度 25.6mm，盲元率小于 2%，扫描速度最大 10kHz，是目前世界上体积最小的产品，如图 1.4.6 所示。

1.4.2 国内研究现状

国内从事 InGaAs 探测器研究的机构有中科院上海技术物理研究所、中科院上海微系统与信息技术研究所、中科院长春光学精密机械与物理研究所、中科院半导体研究所、中国电子科技集团第 13 所、重庆光电技术研究所等。重庆光电技术研究所成功研制了 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 的背照射式 320×256 规模的 InGaAs 面阵探测器, 光敏元中心距 $30\mu\text{m}$, 采用 Zn 扩散成结工艺, 与 Si 基 CMOS 读出电路倒焊互连后, 室温下, 器件平均峰值探测率 $6\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$; 中科院上海微系统所利用 MBE 方式在 InGaAs 外延材料生长优化上进行了大量研究, 包括 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 的 NIN 型材料及原位掺杂的 PIN 型材料, 波长扩展至 $2.0\mu\text{m}$ 及 $2.4\mu\text{m}$ 的材料, 并制备了探测器; 中科院长春光机对晶格匹配的 InGaAs 红外探测器材料进行了深入研究, 并致力于 MOCVD 方式生长高 In 组分 InGaAs 材料的优化; 中电 13 所和中科院半导体研究所研究的 InGaAs 探测器主要应用于光纤通讯, 重点方向是提高器件的响应速度。

上海技术物理研究所同时开展了台面型和平面型 InGaAs 线列焦平面探测器的研究。在台面型响应波长 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 器件方面, 研制了 256×1 正照射 InGaAs 焦平面探测器, 芯片的峰值响应率 1.09 A/W , 平均峰值探测率为 $1.20\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 响应非均匀性为 3.87% ; 256×1 元背照射线列 InGaAs 焦平面探测器, 探测芯片的峰值响应率为 0.95 A/W , 峰值探测率为 $4.5\sim 6\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 响应非均匀性 $3.5\%\sim 5.0\%$; 512×1 元背照射 InGaAs 探测器, 平均峰值探测率为 $6.13\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 响应不均匀性为 3.71% ^[7,52]; 在台面型延伸波长器件方面, 研制出了 640×1 、 516×284 InGaAs 焦平面探测器, 波长分别延伸至 $2.4\mu\text{m}$ 和 $2.6\mu\text{m}$ 。在平面型响应波长 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 器件方面, 成功研制了 10×1 元、 24×1 元正照射 InGaAs 焦平面探测器; 256×1 、 800×1 元背照射 InGaAs 焦平面探测器, 探测器芯片的典型性能为探测率 $3\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、暗电流 20 nA/cm^2 、量子效率近 95% , 其性能已接近国际先进水平^[53]。

1.5 InGaAs 焦平面探测器存在的问题和发展趋势

国内外很多机构已经研制出了功能多样的 InGaAs 探测器应用在多个领域, 空间遥感及民用的多方面需求也促进着 InGaAs 技术的不断发展进步。目前 InGaAs 探测器制备存在的几个问题有:

从材料生长上来看, 在 InP 和 GaAs 等衬底上外延生长高 In 组分 InGaAs 材料仍未达到像 $1.7\mu\text{m}$ 晶格匹配的 InGaAs 材料那样成熟。高 In 组分的探测器寿命较短, 如欧空局环境卫星 (SCIAMACHY) 上的高 In 组分 InGaAs 线列探测器每年大约有 50 个像元失效^[54], 如图 1.5.1 所示为 SCIAMACHY 上的高 In 组分 InGaAs 探测器像元失效随着时间的演化。因此对于高 In 组分的 InGaAs 探测器的稳定性、抗辐照等特性还需要进一步的研究。当然, 高 In 组分的 InGaAs 探测器列阵的发展和性能的提高, 还主要取决于如何在高 In 组分材料的生长过程中控制由晶格失配引起的缺陷。

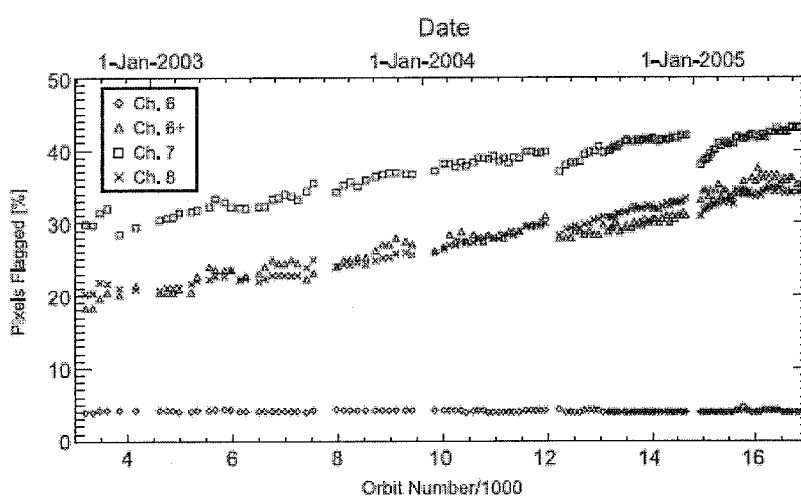


图 1.5.1 SCIAMACHY 上的高 In 组分 InGaAs 探测器的失效演化

Fig. 1.5.1 Evolution of the number of dead pixels for the InGaAs FPA's of SCIAMACHY's channels 6~8 (extended-wavelength InGaAs detectors)

从器件的工艺制备来讲, 因为平面型结构的器件容易获得高性能, 无论是常规波长还是长波延伸的 InGaAs 探测器, 国际上通常采用扩散成结工艺, 横向扩散比较严重, 光敏元之间存在较大的串音, 串音的存在会严重影响器件的成像质量, 为了减少串音, 有时候会牺牲一定的填充因子, 而在相邻光敏元之间引入保护环结构或深隔离槽结构^[55,56], 这样对器件结构的设计比较重要, p-n 结杂质掺杂成结还采用离子注入的方式, 与常规的闭管或者开管扩散相比, 横向扩散较易控制, 但也存在离子注入损伤的消除; 平面型器件一般需要经历高温过程, 掺杂元素需要一定程度的激活才能形成质量好的 p-n 结, 特别在晶格失配的材料中, 由于存在较多的缺陷, 激活效率较低; 对于台面型结构的器件, 随着器件规模的增大、光敏元间距的减小, 需要满足选择比高、各项异性、损伤小、大面积刻蚀均匀的刻蚀技术; 要有效地降低器件的暗电流, 还需要对台

面侧面进行有效的钝化。

现在的红外系统已经进入第三代发展阶段, 显著特征有: 大规模阵列、小光敏元、多波段工作、探测器芯片与读出电路的单片集成、低暗电流低噪声。根据国内外对 InGaAs 探测器的发展现状和应用需求, 很长一段时间内 InGaAs 短波红外焦平面探测器的发展将会主要集中在以下几个方面:

(1) 小光敏元、大规模阵列焦平面器件。InGaAs 红外成像探测器将向更大面阵和甚长线列的大规模阵列方向发展以显著提高系统的性能。

(2) 低暗电流、低噪声焦平面器件。“轻便、灵敏、廉价”是技术发展的必然要求, 由于采用制冷器存在的种种弊端, 加上红外系统对功耗、系统质量及成本等方面的要求, 进一步地降低暗电流和噪声, 提高器件性能是必然趋势。

(3) 探测器芯片与读出电路的单片集成、单片集成 InGaAs 焦平面阵列。

(4) 多波段工作。获取更丰富、更精确、更可靠的目标信息。随着材料生长以及器件制备的技术进步, 红外成像探测器将向更多的光谱波段发展, 对于 InGaAs 焦平面来说, 多色也是其重要的发展方向之一^[18]。

从 InGaAs 短波红外探测器的研究现状分析来看, 与国外的技术水平相比, 国内研制的探测器在探测器规模、功能多样性、焦平面性能等各方面都存在很大的差距。

1.6 本论文的研究目的和主要内容

本学位论文针对空间遥感用 InGaAs 短波红外探测器的要求, 以研制高性能平面型 InGaAs 短波红外探测器为目的, 对 InP 基 InGaAs 短波红探测器的器件物理和关键工艺进入了深入研究。第一章回顾了红外探测器的应用和发展历程, 简要介绍了红外探测器的种类和特点, 概述了 InGaAs 短波红外探测器的器件结构, 并对 InGaAs 焦平面的国内外发展现状、存在的问题和发展趋势进行了分析; 第二章围绕闭管扩散成结关键工艺, 研究了高温快速热退火合金化过程对 p-n 结深的影响, 对线列或面阵器件中的无效像元进行了判别和分析, 通过工艺方法降低了盲元率, 研究了背照射平面型高密度器件的关键制备工艺; 第三章提出了一种基于子像元模式的平面型 InGaAs 探测器新结构, 对器件结构进行了优化设计, 并对器件的变温光响应均匀性进行了研究; 第四章对正照射平面型 InGaAs 器件进行了研究, 对比分析了吸收层掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 与 $5.0 \times$

10^{15}cm^{-3} 两种类型 InGaAs 器件的 I-V 特性, 并研制了正照射平面型常规波长的 256×1 线列 InGaAs 探测器和截止波长延伸到 $2.57\mu\text{m}$ 的长波扩展 256×1 线列 InGaAs 探测器, 测试并分析了探测器的光电性能; 第五章采用优化的工艺方法首次研制了背照射平面型焦平面探测器, 包括 32×32 面阵焦平面探测器和双波段集成的 800×2 焦平面探测器, 测量并分析了其光电性能; 第六章是全文总结及展望。

2 平面型 InGaAs 探测器关键工艺技术研究

2.1 引言

目前, 由于平面型 InGaAs 探测器具有很高的可靠性, 较低的暗电流水平, 所以平面型结构被国际上普遍采用。制备平面型 InGaAs 探测器采用 N 型的帽层外延材料, 其 p-n 结采用离子注入工艺或者扩散工艺形成。扩散工艺又分为开管扩散和闭管扩散, 开管扩散主要采用二乙基锌、二甲基锌等气态扩散源或者 ZnO 等固态扩散源, 适合进行大规模的生产, 但可控性较差。闭管扩散一般采用固态的 Zn_3P_2 或者 Zn_3As_2 作为扩散源, 这种方式常受到石英管尺寸的限制, 不能进行大规模器件的制备, 但是对设备要求低、扩散均匀、对材料损伤较小, 适合进行科学研究。p-n 结埋于材料以下, p-n 结特性是影响光伏器件性能的关键因素, 而 p-n 结的成结工艺是光伏型 InGaAs 探测器的关键工艺。

本章的主要研究内容有: 围绕闭管扩散成结关键工艺, 研究了高温快速热退火合金化过程对 p-n 结深的影响; 对线列或面阵器件中的盲元进行了判别和分析, 并采取针对性的措施降低了盲元率, 包括扩散掩膜开孔优化、抑制 P 电极流动工艺优化、器件结构改进; 对背照射高密度器件制备工艺进行了研究。

2.2 快速热退火过程对结深的影响

2.2.1 实验

制备平面型 InGaAs PIN 探测器常采用 Zn 扩散工艺在吸收层中形成 P 型掺杂, 掺杂浓度及 p-n 结的成结质量直接关系到器件性能的优劣, 因此扩散工艺在器件研制中至关重要。在扩散工艺完成后的后续器件制备环节中, 为了形成良好的 P 电极欧姆接触常需要进行快速热退火处理, 较高的热退火温度对 p-n 结结深的影响鲜有报道。本节通过闭管扩散方式, 实现了 Zn 元素在晶格失配及晶格匹配异质结构材料中的掺杂, 采用扫描电容显微技术(SCM)及二次离子质谱(SIMS)对 Zn 在两种材料中的扩散机制进行了研究, 并对高温快速热退火过程(RTP)对 p-n 结结深的影响进行了研究。

III-V 族合金半导体材料中, V 族元素 P、As 等容易在高温下从材料表面分

解挥发，因此为了对不同的扩散样品中损失的 V 族元素进行补充，常采用不同的扩散源。本实验有三种制备 InGaAs 探测器的外延材料，对帽层是 InP 的晶格失配外延材料使用 Zn_3P_2 作为扩散源，对帽层是 $\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ 和 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ 的晶格失配外延材料使用 Zn_3As_2 作为扩散源。实验中使用的晶格失配材料为分子束外延（MBE）生长的 $\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}/\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.81}\text{As}/\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ buf./InP，帽层和吸收层厚度分别为 $1\mu\text{m}$ ， $2.5\mu\text{m}$ ；金属有机化合物化学气相沉积（MOCVD）生长的 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}/\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{InAsP}$ buf./InP，帽层和吸收层厚度分别为 $1\mu\text{m}$ ， $3\mu\text{m}$ ；晶格匹配材料为 MOCVD 生长的 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ ，帽层和吸收层厚度分别为 $1\mu\text{m}$ ， $2.5\mu\text{m}$ 。三种材料均为 NIN 型结构。将药品和实验样品一起封装在真空石英管中，体积约为 45cm^3 ，真空度优于 $3\times 10^{-4}\text{Pa}$ ，扩散采用双温区扩散，即先进行较低温度下的预扩散，然后进行 530°C 的恒温扩散。在扩散完成后的样品表面磁控溅射生长一层钝化膜用作退火阻挡层，提供反压力，阻止帽层中 V 族元素的蒸发。然后将样品均解理为两片，一片由 SIMS 和 SCM 进行测试，另一片进行快速热退火处理，并在退火后进行 SCM 测试以观察 RTP 对 p-n 结深度的影响。实验中材料的编号、相应的扩散及快速热退火条件如表 2.2.1 所示。

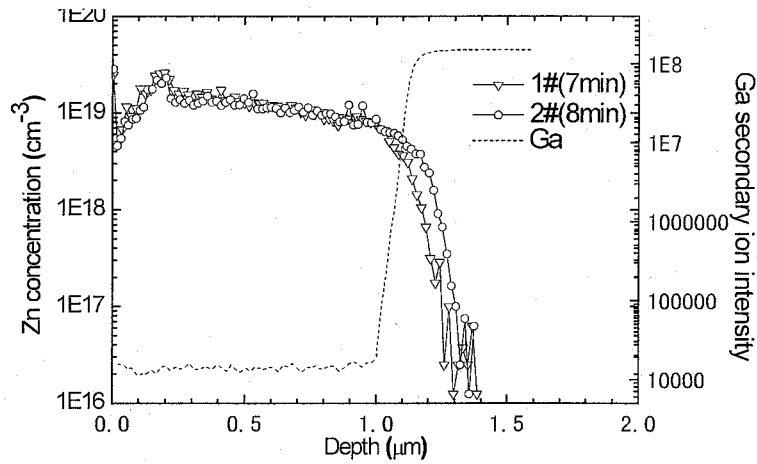
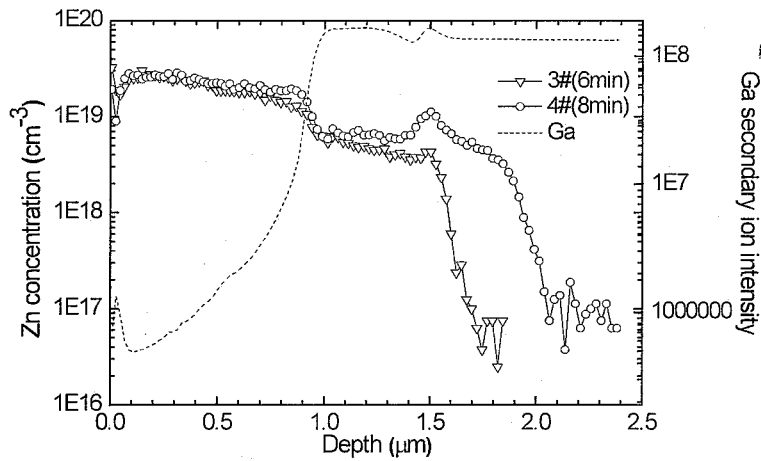
表 2.2.1 材料编号，扩散及快速热退火条件
Tab 2.2.1 Material number, conditions of diffusion and RTP

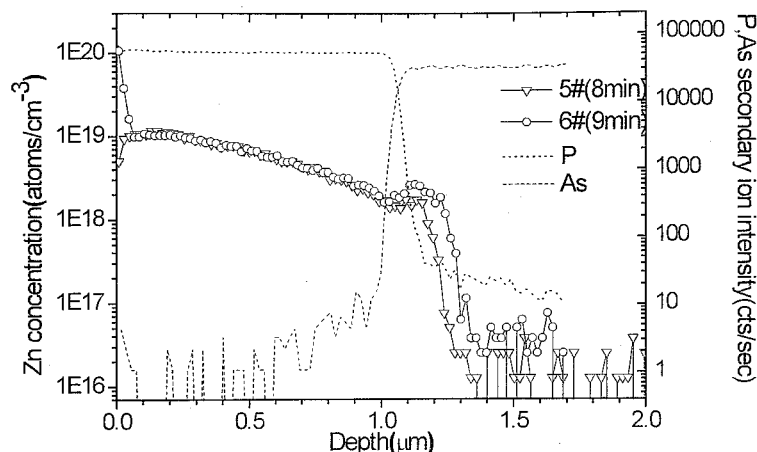
Material style	Wafer with $\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ cap layer		Wafer with $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ cap layer		Wafer with InP cap layer	
	1#	2#	3#	4#	5#	6#
Diffusion temperature/ $^\circ\text{C}$	530	530	530	530	530	530
Diffusion time/min	7	8	6	8	8	9
RTP temperature/ $^\circ\text{C}$	400	350	400	350	480	480
RTP Time/s	60	45	60	45	15	15

2.2.2 杂质扩散的 SIMS 和 SCM 表征

如图 2.2.1 为三种样品由 SIMS 测得的 Zn 浓度在深度方向上的一维分布曲线，由参考元素的浓度变化，很明显地分辨出帽层和吸收层的交界面，而且在交界面处掺杂元素的浓度也有很明显变化。晶格失配材料 1#、2#、3#、4# 的掺杂浓度在界面均出现下降，而晶格匹配的 5# 和 6# 材料在界面处出现了 Zn 积累现象。因为 Zn 在 InP 中的扩散速度比在 InGaAs 中的扩散速度高，所以在界面上会形成一个“扩散势垒”，从而造成界面上 Zn 元素的累积，而晶格失配材料

中存在较多的线缺陷,使得 Zn 元素在材料内及界面上的扩散速度相差不大,界面上的累积现象并不明显^[57,58]。MBE 生长的 1#和 2#样品的 Zn 浓度在界面附近下降比较缓慢,而 MOCVD 生长的 3#和 4#样品的 Zn 浓度在界面处突然降低,并在降低后的 $0.5\mu\text{m}$ 区域内保持约 $6\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$,分布比较均匀。在温度 530°C 扩散 8min 的条件下,2#、4#和 5#样品的扩散深度分别为 1.305 、 1.941 、 $1.195\mu\text{m}$,研究结果表明掺杂元素在晶格失配材料中的扩散速度大于在晶格匹配中的扩散速度。

(a) $\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ 帽层材料(a) Wafer with $\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ cap layer(b) $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ 帽层材料(b) Wafer with $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ cap layer



(c) InP 帽层材料

(c) Wafer with InP cap

图 2.2.1 SIMS 测得 Zn 浓度在深度方向上的分布曲线

Fig. 2.2.1 Profile of Zn concentration versus diffusion depth measured by SIMS

SCM 作为一种新颖的材料表征方法,是扫描探针显微镜 SPM(scanning probe microscopy)的一种重要的扩展模式,它可以获得样品在纳米尺寸上的二维电学分布图,目前已经广泛应用于硅器件的电学性能研究中,SCM 扫描是获得 p-n 结电学分布的重要微观表征手段^[59-64]。扫描图像的获得主要依赖材料表面载流子的耗尽和积累,非本征材料中的载流子主要来源于激活的掺杂元素,在实际应用中,通过对横截面的纵向扫描就可以获得光敏元大小和相邻光敏元的实际间距。本实验中采用恒压模式,即固定 ΔV 值,通过测量 $\Delta C / \Delta V$ 来确定样品的电学特性。

$$\Delta C = \epsilon_{ox} [1 - \alpha N^{1/2} / (\epsilon_{ox} / T_{ox} + \alpha N^{1/2})] / T_{ox} \quad \alpha = \sqrt{\epsilon_s q / 2(V_{bi} - V_{app})} \quad (2.2.1)$$

其中, ϵ_{ox} 、 ϵ_s 为表面氧化层及样品的介电常数, V_{app} 为施加电场。

图 2.2.2 为几种不同外延材料在扩散后的横截面 SCM 扫描图像及以 InP 帽层材料为例的横截面掺杂分布图,图 2.2.3 为 InP 帽层外延材料的扫描电子显微镜(SEM)成像图。从两种扫描图中,我们均可以分辨出不同外延层的厚度,但是对比 SCM 和 SEM 扫描照片,SCM 扫描图的成像质量更为清晰,而且还可以获得掺杂元素在外延材料中的分布情况,获得 p-n 结的扩散深度。两种显微镜测得 InP 外延层厚度越分别为 $1\mu\text{m}$ 和 $1.14\mu\text{m}$ 。SCM 的测试结果显示,在表 2.2.1 的扩散条件下,1#~6#的结深分别为 $1.15\mu\text{m}$ 、 $1.25\mu\text{m}$ 、 $1.43\mu\text{m}$ 、 $1.6\mu\text{m}$ 、 $1.07\mu\text{m}$ 、 $1.2\mu\text{m}$ 。同时,还对 InGaAs 层 Si 掺杂浓度为 $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 的外延材料进行了扩散

实验并测试了 p-n 结结深, 其在 530℃ 扩散 8min 和 9min 后结深分别为 1.175μm 和 2.4μm, 与 6# 外延材料相比(InGaAs 层 Si 掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 在 530℃ 扩散 8min 和 9min 的结深分别为 1.07μm 和 1.19μm), 扩散速度明显变大。Si 掺杂浓度高的材料内部的产生复合中心相对较多, 这样势必会阻碍 Zn 元素向外延层内掺杂。SCM 图像中得出帽层的厚度与 SIMS 得出的帽层厚度比较吻合。

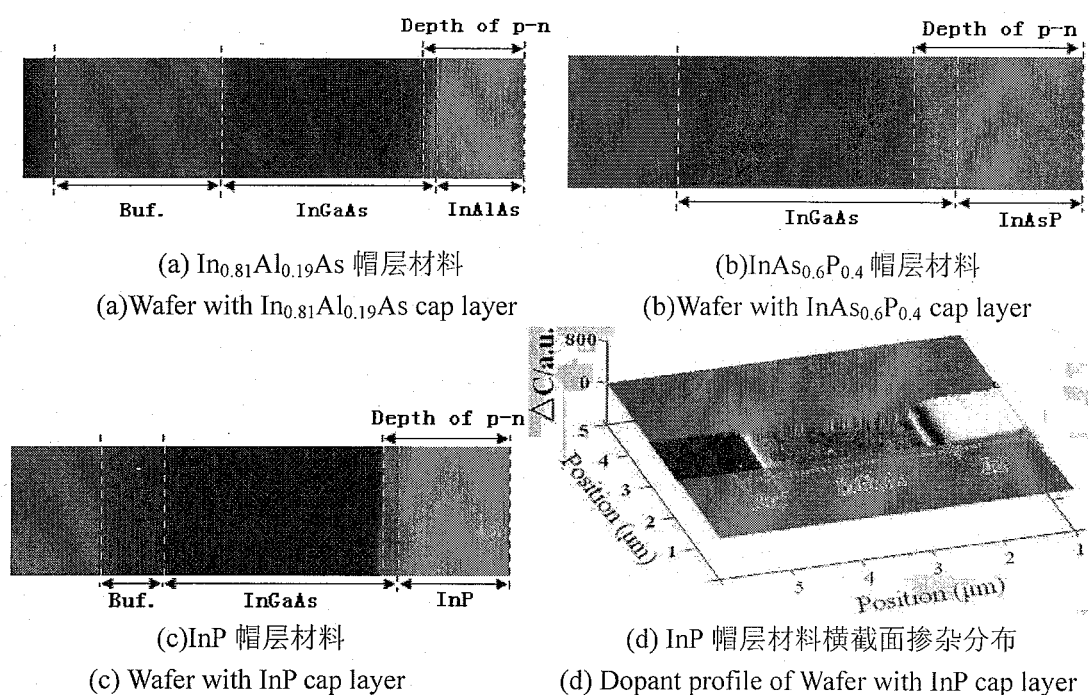


图 2.2.2 SCM 测得外延层的 p-n 结深

Fig. 2.2.2 Junction depth of epitaxial layer by SCM

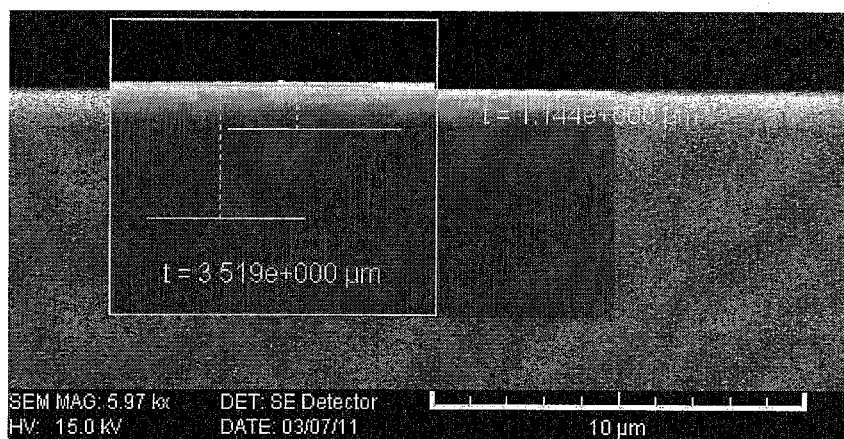


图 2.2.3 InP 帽层材料横截面扫描电镜照片

Fig. 2.2.3 SEM micrographs of the cross-section of epitaxial material with InP cap layer

2.2.3 实验结果及讨论

SCM测试显示, 实验样品在3种不同的RTP条件下, p-n结结深均无明显变化,

如图2.2.4及表2.2.2所示。RTP前后，p-n结结深基本相等，在平面型InGaAs探测器的后续制备工艺中，只有RTP和部分薄膜淀积时样品需要经历大于300℃的高温过程，而薄膜淀积的温度通常小于退火所需要的400℃及以上，所以在本实验室制备平面型InGaAs探测器的标准工艺中，扩散完成后的p-n结结深可以近似为器件最终的p-n结结深。

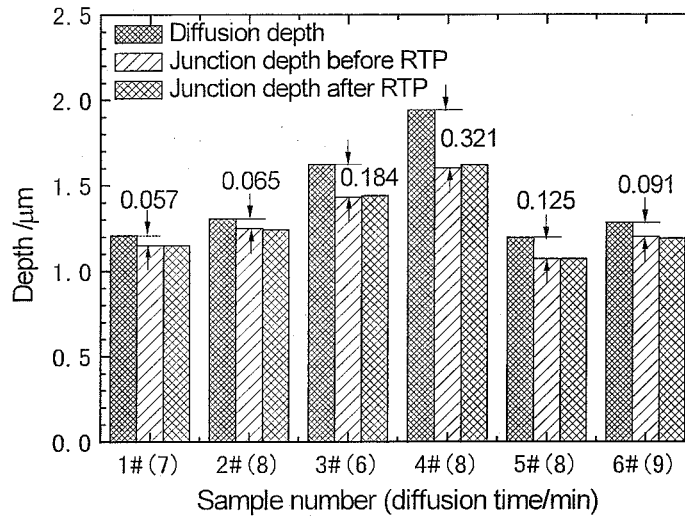


图 2.2.4 扩散深度（SIMS）及退火前后的结深（SCM）

Fig.2.2.4 Diffusion depth (SIMS) and junction depth(SCM) before and after RTP

表 2.2.2 扩散深度、RTP前后结深变化

Tab. 2.2.2 Diffusion depth and p-n junction depth before and after RTP

Sample number	Diffusion Time /min	Diffusion Depth /μm	Junction depth before RTP /μm	Junction depth after RTP /μm	Difference of junction depth before and after RTP /μm
1#	7	1.207	1.15	1.15	0
2#	8	1.305	1.25	1.24	-0.01
3#	6	1.624	1.43	1.44	0.01
4#	8	1.941	1.6	1.62	0.02
5#	8	1.195	1.07	1.07	0
6#	9	1.281	1.2	1.19	-0.01

Zn的扩散过程可以描述为：

$$x^2 = 4D[\operatorname{erfc}^{-1}(\frac{C(x,t)}{C_s})]^2 t \quad (2.2.2)$$

$$D = D_0 e^{-\frac{E_a}{k_b T}} \quad (2.2.3)$$

式中：x 为结深； C_s 为杂质的表面浓度； $C(x, t)$ 为扩散时间 t 时结深 x 处

的杂质浓度； D 为扩散系数； D_0 为扩散率； E_a 为与扩散工艺有关的激活能^[65,66]； k_B 为 Boltzman 常数； T 为常数。由公式(2.2.3)计算可得，530℃时，Zn 在 InP 中的扩散系数 $D=1.067 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ ，与参考文献[67]中报道的 535℃下 $D=1.97 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ 相差不大。530℃下，Zn 在 $\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ 和 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ 中的扩散系数分别为 $1.327 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ 和 $1.341 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ 。

本小节通过 SCM 和 SIMS 相结合，研究了 Zn 在晶格失配和晶格匹配材料中的扩散行为。研究表明，RTP 不会影响 p-n 结的深度；掺杂 Zn 元素并不能被完全激活，另外，由于杂质元素的补偿效应，激活的 Zn 元素（受主）所提供的空穴也会首先补偿材料中施主提供的电子^[68]，由于晶格失配材料中较多的缺陷能级，SCM 测得的 p-n 结深度会比掺杂元素扩散深度浅，掺杂元素在晶格失配材料中的扩散速度大于其在晶格匹配材料中的扩散速度，掺杂元素的激活需要进一步解决。另外，由于 InGaAs 样品表面的氧化层是通过半导体表面吸附空气中的氧得到的，成分比较复杂，对氧化层厚度与介电常数的测试比较困难，利用 SCM 定量地对 InGaAs 材料进行表征比较困难，目前对掺杂机制的表征还仅仅是定性的，主要是对材料电学结构的分布、掺杂特性的大体分布、p-n 结结深位置等，要获得定量结果还需要进一步研究。

2.3 降低平面型 InGaAs 探测器无效像元的结构设计和工艺优化

2.3.1 盲元分析

焦平面器件的“盲元率”是指焦平面中无效像元占总像元数的百分比^[69]，“盲元”包括“死像元”和“过热像元”，前者是指采集到的信号电压 <0.5 倍平均信号电压，后者指信号电压 >1.5 倍平均信号电压，且噪声均大于 10 倍的平均噪声，符号分别记为 d 和 h ，“盲元率” N_{ef} 表示为：

$$N_{ef} = \frac{d+h}{N} \times 100\% \quad (2.3.1)$$

其中 N 为总像元数。

由于器件工艺、材料质量等各方面的原因，红外焦平面探测器不可避免地存在着盲元，影响了图像质量和红外系统的性能，随着焦平面阵列规模的扩大以及像元尺寸的减小，材料和工艺的影响越发显著，盲元出现的几率也大幅提高^[70,71]。导致盲元产生的原因有很多，从芯片制备前期的材料生长过程中产生

的晶格缺陷，到工艺制备过程中的多个环节如扩散、钝化、刻蚀等，再到后期封装过程中的 In 柱倒装焊、充胶、键压等都会引入盲元。盲元率是衡量 InGaAs 焦平面探测器性能的一个重要技术指标，通过对盲元类型的判别、来源及其在工艺过程中的定位，可以找到工艺过程中的薄弱环节，提出针对性的改进措施来减少盲元数量，提高焦平面阵列的成品率。因此，研究盲元类型及其成因对红外焦平面阵列的研制有着非常重要的意义。

如图 2.3.1 显示了在器件工艺中可使焦平面阵列产生盲元的图片：(a)材料缺陷，当材料的缺陷正好落在光敏元上，可以造成器件暗电流过大，信号变小，出现盲元；(b)光刻图形失真，造成这种现象的原因主要是样品表面的污染物残

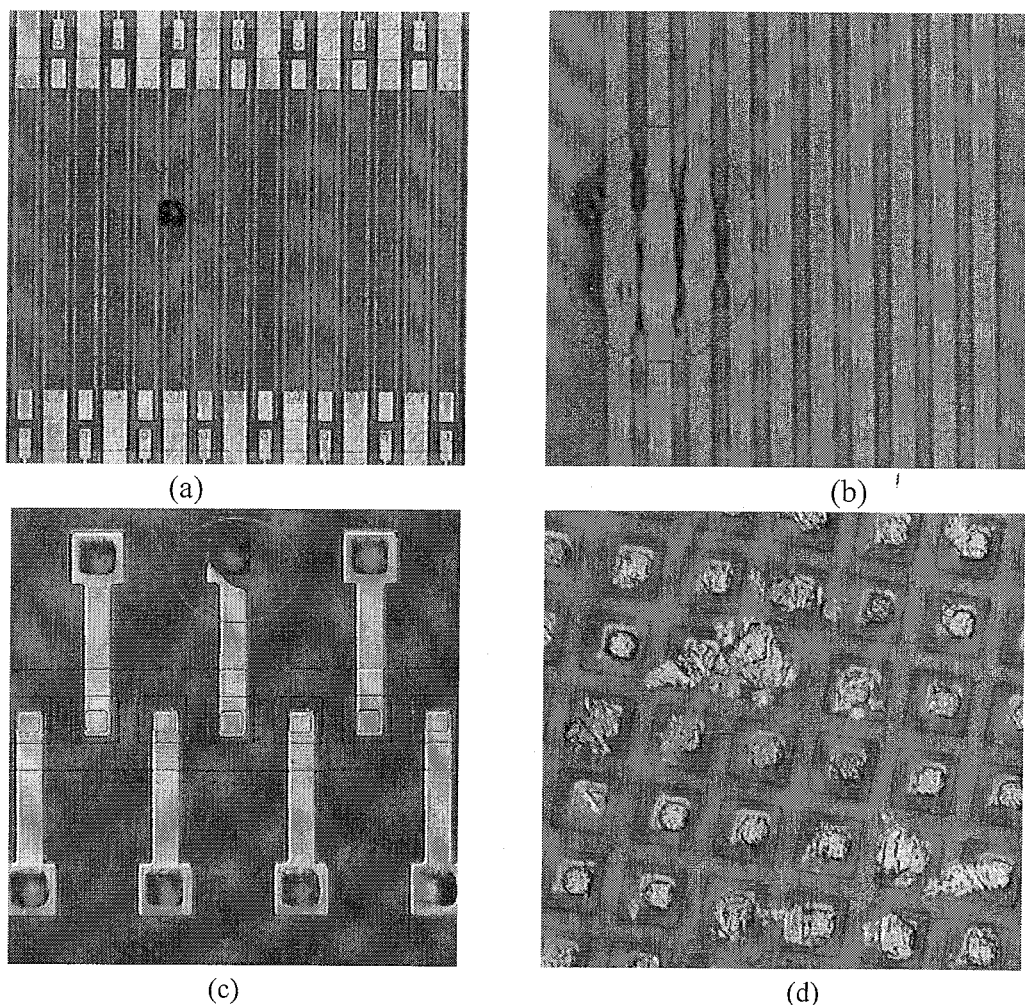


图 2.3.1 工艺过程中产生的盲元照片：(a)材料缺陷(b)光刻失真(c)延伸电极脱落(d)In柱残留
Fig. 2.3.1 Picture of bad pixels formed in chip fabrication process: (a) material defect (b) photolithography distortion (c) extended electrode detachment (d) indium residual

留背盖在光刻胶下，或者光刻胶涂胶后产生气泡；(c)延伸电极脱落，产生无信号的死像元；(d)In 柱残留，In 柱未剥离干净，造成多个光敏元互连，在焦平面

测试时表现为信号过大，产生过热像元。

红外焦平面阵列中存在盲元势必将降低红外图像的质量以及红外系统的性能。在系统应用中，虽然可以在信号处理的环节对盲元进行检测并使用相应的算法对盲元进行替换或者补偿，但对于焦平面阵列芯片研制而言，盲元的状态却是决定其是否合格的重要因素之一，而且增加了后期算法实现的难度和复杂度。在芯片的研制过程中，可以通过增加中间测试环节剔除芯片制备中可能产生盲元的芯片，比如材料缺陷、光刻失真、电极脱落、减薄断裂、In 柱残留等。对于另一部分由于后期封装造成的盲元，比如充胶不均匀、倒焊应力过大等，可以通过老化试验、加速寿命试验、高低温连续冲击等方式加速缺陷的暴露，通过筛选得到合格的器件。要降低盲元率，从而提高红外焦平面阵列的性能和成品率，使其满足多种应用场合，还需要对每个批次焦平面阵列的盲元类型进行判别与归类，针对器件研制中的问题进一步优化稳定的器件制备工艺、提高材料和器件的筛选能力。

2.3.2 平面型线列器件盲元判别

平面型 10×1 线列、 24×1 线列出现较多的盲元，研究盲元分类，通过对性的改进措施，减少盲元数量。以 24×1 线列器件为例进行分析。 24×1 线列器件部分芯片照片如图 2.3.2 所示，24 个光敏元呈“一字型”排列，扩散孔 $1\text{mm} \times 0.46\text{mm}$ ，实际有效的光敏面为 $1\text{mm} \times 0.45\text{mm}$ ，光敏元的中心距为 0.5mm 。采用环形接触电极，其中电极的一部分外边缘与扩散孔边缘重合，而没有重合的部分外边缘离扩散距离为 $5\mu\text{m}$ ，在光敏元四周设置保护环，保护环宽度为 $10\mu\text{m}$ 且与两侧扩散区之间的间隔为 $15\mu\text{m}$ 。

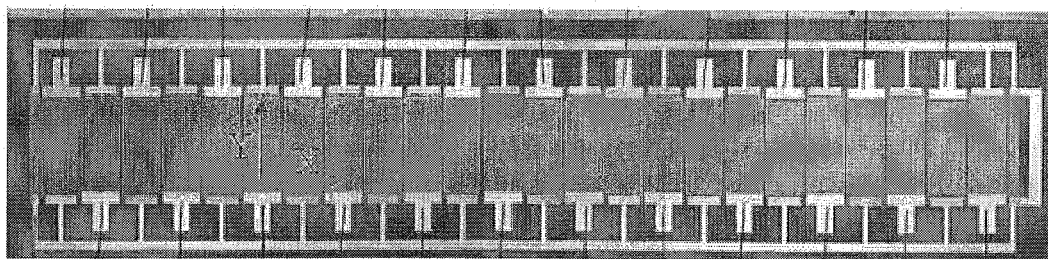


图 2.3.2 24×1 InGaAs 线列光敏芯片照片

Fig.2.3.2 Photograph of the 24×1 InGaAs detector chip

器件无效像元的 I-V 特性异常，即负偏压下该光敏元的暗电流过大，可与

正向偏置电流相比拟，两个线列器件 1#和 2#的抽测结果如图 2.3.3 所示。将出现无效像元的器件按图 2.3.2 中 X 轴方向解理，解理面的 SCM 扫描图如 2.3.4 所示。芯片的正常像元与无效像元具有相同的扩散结结构，其 p-n 结深度均为 $1.28\sim 1.30\mu\text{m}$ ，像元扩散区与保护环扩散区之间的间隙约为 $12\mu\text{m}$ 。对多个无效像元进行解理测试后发现，扩散工艺在不同样品、不同探测器单元上具有较好的均匀性，像元扩散区与保护环扩散区并没有在内部连通，因而排除了因扩散差异引起漏电的可能性。

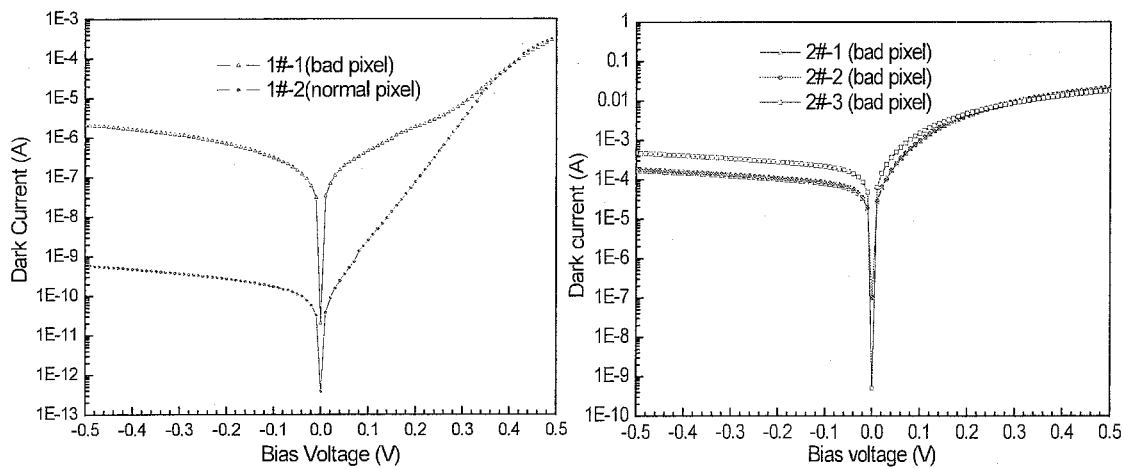


图 2.3.3 24×1 元 InGaAs 线列 I-V 曲线

Fig. 2.3.3 The I-V characteristics of 24×1 linear InGaAs detector

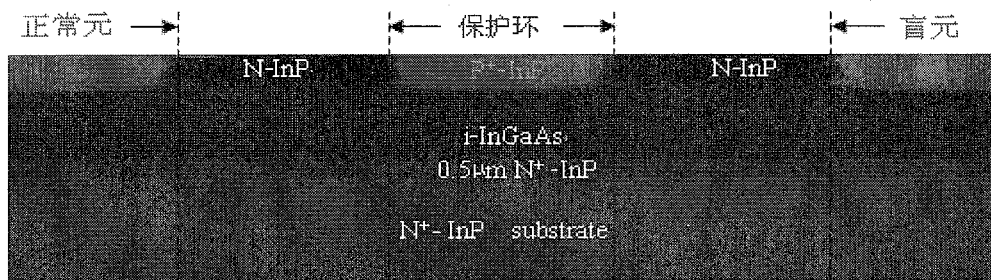


图2.3.4沿X轴的器件横截面SCM扫描图

Fig. 2.3.4 The cross-section of detector along X axis scanned by SCM

产生无效像元的原因还可能有：(1) SiO_2 薄膜在爬坡处断裂，或者薄膜质量不够致密，导致在其上淀积的延伸电极与保护环形成导电接触，如图 2.3.5 中的 a、b、c 处；(2) 由于 P 电极采用的 Au 为快扩散杂质，RTP 导致 P 电极横向流动，然后与 SiN_x 掩膜下的 N-InP 帽层接触，即 P 电极同时与 $\text{P}^+\text{-InP}$ 和 N-InP 形成了导电通道，如图 2.3.6 所示。

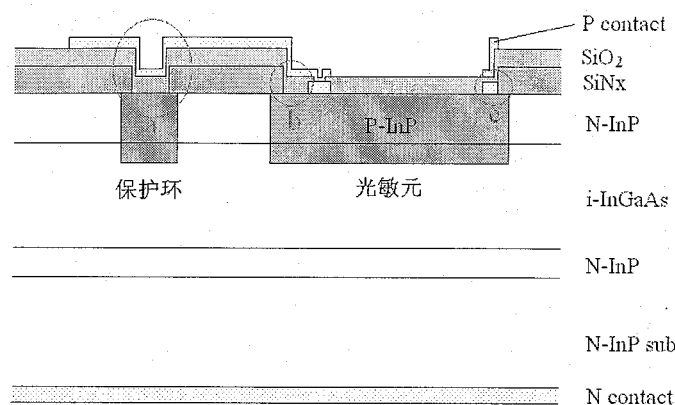


图 2.3.5 光敏芯片横截面示意图

Fig. 2.3.5 The cross-section schematic of the detector

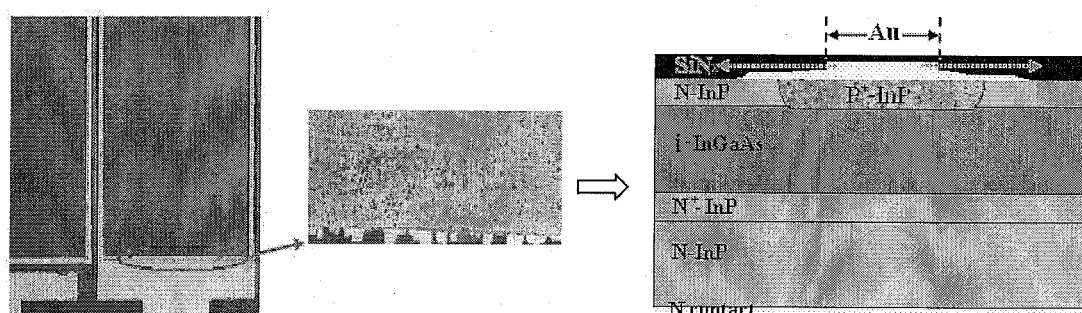


图 2.3.6 Au电极快速热退火合金化处理后横向流动照片

Fig. 2.3.6 The picture of Au flowing after RTP

为降低盲元率，需要改进器件结构，只保留光敏元之间的保护环扩散区，而取消延伸电极下方的保护环扩散区，增加接触电极与扩散孔边缘的距离，解决可能由于 SiO_2 断裂或者致密度不高造成的 P 电极与保护环形成导电通道；优化高温快速热退火工艺，控制电极流动，这在下一小节进行了详细研究。

2.3.3 抑制 P 电极流动的工艺优化

良好的欧姆接触对于器件的性能、可靠性和稳定性都至关重要，一个好的欧姆接触其比接触电阻要足够小，使得电极接触电阻与器件的电阻相比可以忽略。对于 InP 族化合物半导体，P 型欧姆接触要比 n 型难做得多，其原因一是由于材料本身特性决定的，空穴的有效质量要比电子的有效质量大得多，势垒高度也比 n 型材料高（n-InP 的势垒高度 Φ_{Bn} 为 0.4eV，而 p-InP 的 Φ_{Bp} 为 0.97eV），另一原因是欧姆接触制备工艺本身的问题^[72]。目前 p-InP 欧姆接触多采用 Zn/Au, Be/Au, Ti/Pd/Au, AuBe/Cr/Au, Ge/Pd/Zn/Pd, Zn/Pd, AgZn/Mn, WSb, Au/Pd/Zn/Pd, Ni/Zn/Ni, Pd/Zn/Pd 等电极^[73-77]。前期对于 InP 的电极接触研究

对象多为原位掺杂的 P-InP 材料,然而,对于扩散成结的平面型 InGaAs 探测器来说,p 型 InP 的掺杂情况以及表面特性更为复杂,这使其与在原位掺杂的 p-InP 材料中得到的结果有较大的差别。由于 Au/Zn/Au 金属体系表面比较粗糙,与 InP 表面的粘附性不好,容易在浮胶过程中从样品表面脱落,本实验室前期的工作已经将 Au/Zn/Au 金属体系优化为离子溅射方式生长的 Au 层 p 电极,其比接触电阻约为 $1.7 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ^[78]。

平面型正照射 InGaAs 探测器常规工艺制备过程中,生长完 P 型电极后,在其上淀积一层增透膜/钝化膜。在金属/InP 体系表面生长 SiN_x 能够阻止 In 或 P 元素的向外扩散,降低 InP 表面的组分分解,值得一提的是,在 Au/InP 体系的高温快速退火合金化过程中,In 元素优先向金属中扩散,而 P 元素由于不溶于 Au 而不能在 Au 中扩散^[79-82]。采用传输线模型法(Transmission line model)对欧姆接触电阻进行研究已经进行了很多报道^[83-85],这里不再对传输线的理论模型进行赘述。本节针对器件制备过程中高温快速热退火工艺导致 P 电极流动现象,对平面结材料扩散后的 p-InP 与 Au 欧姆接触特性进行了研究,研究了不同外延材料不同退火温度对接触的影响并计算了比接触电阻,采用优化后的工艺条件解决了 P 电极流动的问题,对 InGaAs 探测器的制备工艺的改进有重要的指导意义。

实验采用两种样品 1#和 2#,帽层分别为 N-InP 和 N- $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$,吸收层掺杂浓度分别为 $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 和 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,厚度均为 $1 \mu\text{m}$ 。晶片样品经清洗后采用闭管扩散工艺对整片进行 Zn 掺杂,使帽层由 N 型变为 P 型。采用标准光刻工艺来定义 TLM 图形,采用与平面型 24×1 线列器件相同的工艺,先利用离子束溅射系统淀积 Au~50nm,后利用磁控溅射系统在样品表面淀积一层 SiO_2 作为退火阻挡层。将样品解理后置于退火炉中,两种样品均在 N_2 气氛下进行 450°C 和 480°C 快速退火。退火后打开电极孔并采用离子束溅射系统淀积 Cr/Au~20/300nm。划片后样品照片如图 2.3.8 所示,金属层长 $250 \mu\text{m}$,宽 $120 \mu\text{m}$,间距从 $10 \mu\text{m}$ 间隔 $2 \mu\text{m}$ 变化到 $28 \mu\text{m}$ 。将样品封装在杜瓦瓶中利用 Keithley4200 测试仪进行 I-V 特性测试。

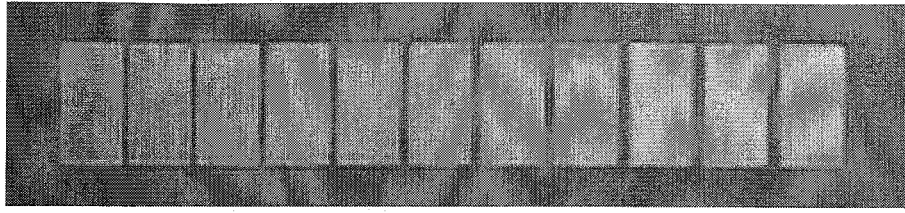


图 2.3.8 TLM样品图

Fig. 2.3.8 The picture of TLM structure

图 2.3.9 为不同退火条件下两种样品不同间距电极间的 I-V 曲线。两种样品在两种退火条件下电极之间的 I-V 曲线均呈良好的线性，这说明器件的电极接触已是良好的欧姆接触。线性拟合不同间距的传输线电极之间的电阻，如图 2.3.10 所示。

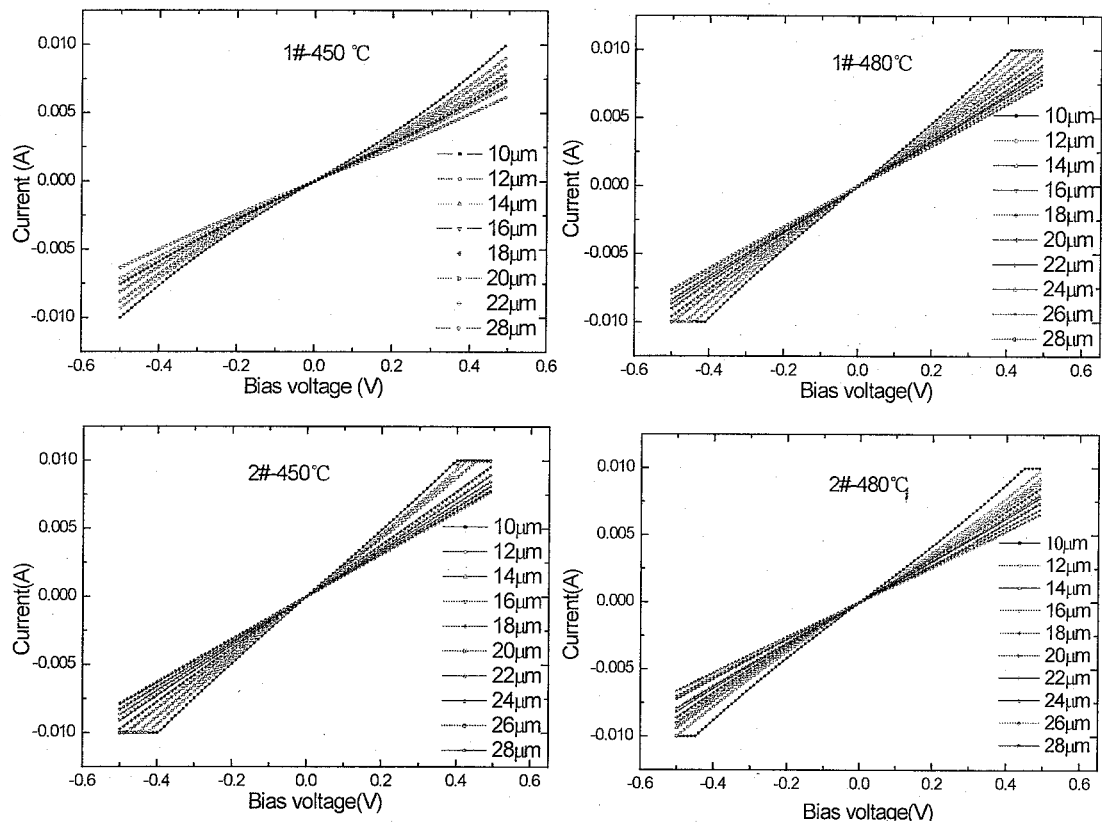


图 2.3.9 传输线模型电极间I-V曲线

Fig. 2.3.9 I-V curves between TLM pads

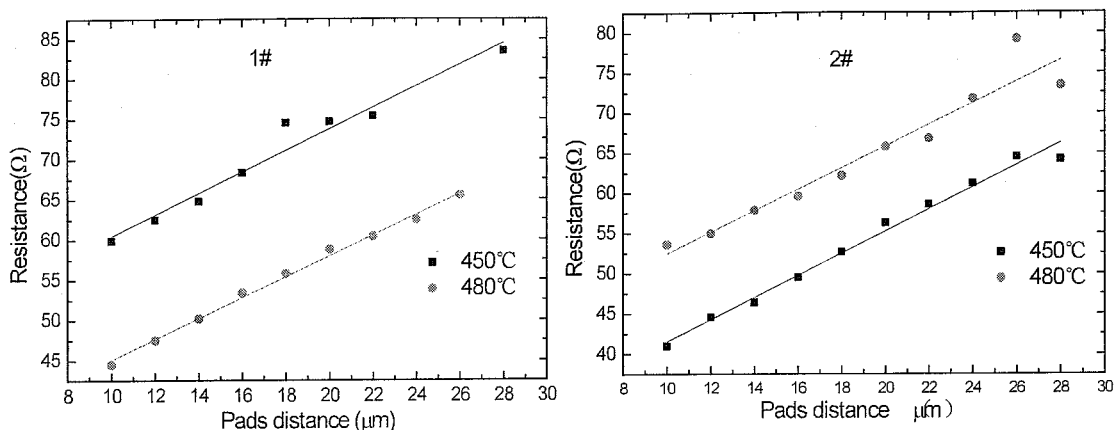


图 2.3.10 从I-V曲线中提取的传输线模型电极间电阻

Fig. 2.3.10 Resistance from I-V curves between TLM pads

比接触电阻表示为:

$$\rho_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} \Big|_{V=0} = R_c^2 W^2 / R_{sh} (\Omega \cdot \text{cm}^{-2}) \quad (2.3.2)$$

其中 R_c 为接触电阻, R_{sh} 为半导体材料的方块电阻, W 为接触电极的宽度。 $2R_c$ 和 R_{sh}/W 分别为图 2.3.10 中直线的截距和斜率。经计算得, 1#样品在 450°C 和 480°C 下得比接触电阻分别为 $1.04 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $5.02 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$; 2#样品在 450°C 和 480°C 下得比接触电阻分别为 $7.12 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $3.52 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ 。两种样品的比接触电阻在 450°C 的快速热退火条件下略大于 480°C, 但是仍处于比较小的一个量级, 采用 450°C 的退火条件对器件性能的影响不大, 而且电极能够保持良好的形貌, 并没有出现 P 电极流动的现象。

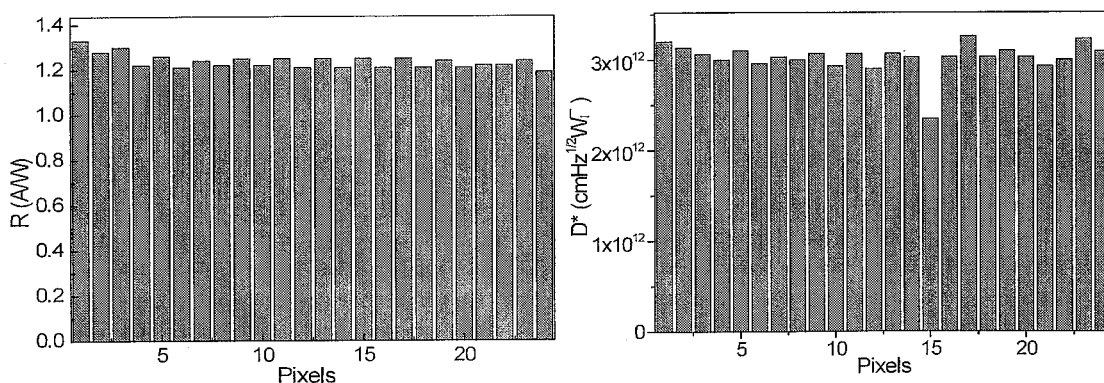


图 2.3.11 (a)峰值响应率和(b)峰值探测率

Fig. 2.3.11 (a)The peak responsivity and (b) the peak detectivity

通过在 10×1 线列和 24×1 线列制备中采取针对性的优化措施: 器件保护环结构改进、电极结构改进、P 电极流动抑制, 成功制备了无盲元的 10×1 线列和 24×1 线列探测器, 其中 24×1 线列探测器的平均峰值探测率为 3.0×10^{12}

$\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 、量子效率接近 95%、响应非均匀性为 2.63%，探测器各光敏元的峰值电流响应率、峰值探测率分别见图 2.3.11 所示^[53]。24×1 无盲元线列探测器在项目应用中的成像效果清晰，如图 2.3.12 所示。



图 2.3.12 平面型 24×1 InGaAs 线列探测器地面扫描成像照片

Fig 2.3.12 Scanning image by planar type 24×1 linear detectors

2.4 背入射高密度器件工艺研究

2.4.1 平面型背入射器件工艺流程

按照光入射方式的不同，InGaAs 探测器可采用正面入射和背面入射两种方式。采用背面入射结构，适于制备大规模线列或者面阵器件。背面入射器件一般采用倒装焊工艺将探测器芯片与读出电路互连，工作时光由探测器芯片的衬底端入射。图 2.4.1 显示了美国传感器无限公司报道的平面型 640×512 元背面入射 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 阵列探测器的制备过程^[86]，探测器总面积约 2cm^2 ，光敏元尺寸是 $25\times 25\mu\text{m}^2$ ，覆盖波段为 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ ，室温下的探测率为 $D^*_{\lambda p} > 5\times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，盲元率小于 2%。外延材料是通过 MOCVD 或 VPE 方法生长，表面淀积一层 SiN_x 作为钝化层和保护层，通过光刻和等离子体刻蚀在 SiN_x 层上开

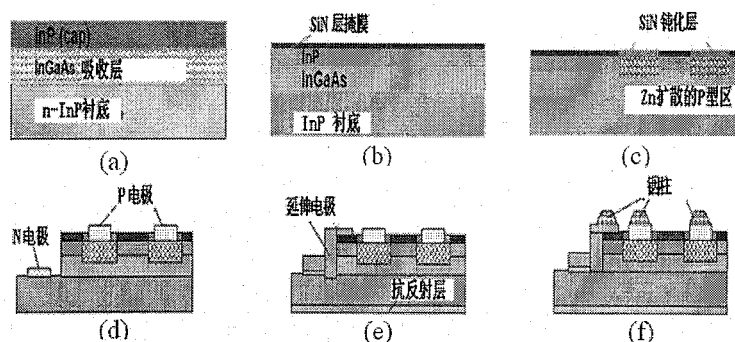


图 2.4.1 传感无限公司背面照射 InGaAs 阵列探测器的制备工艺

Fig. 2.4.1 Fabrication processes of backside illuminated InGaAs detector of Sensors

Unlimited Corporation

孔，以 Zn_3As_2 作为扩散源进行扩散成结，再淀积一层 SiN_x 盖住扩散孔，开孔后

生长 P 型电极，在 InP 衬底上生长 N 型电极，P 型电极和 N 型电极分别采用 Au/Zn 和 Au/Ge 膜系，芯片通过 In 柱与读出电路相连。

本论文在正面入射结构平面型 InGaAs 器件研制的基础上，开展了平面型背面入射焦平面探测器的研制，平面型背照射 InGaAs 器件制备工艺流程主要包括：(1)扩散掩膜生长；(2)打开扩散窗口，(3)闭管扩散；(4)p 电极生长；(5)打开 N 电极槽；(6)钝化膜生长；(7)高温快速热退火；(8)电极孔开孔；(9)加厚电极生长；(10)In 柱生长；(11)背面抛光；(12)背面增透膜生长，工艺流程图如图 2.4.2 所示，器件的部分横截面示意图如图 2.4.3 所示。

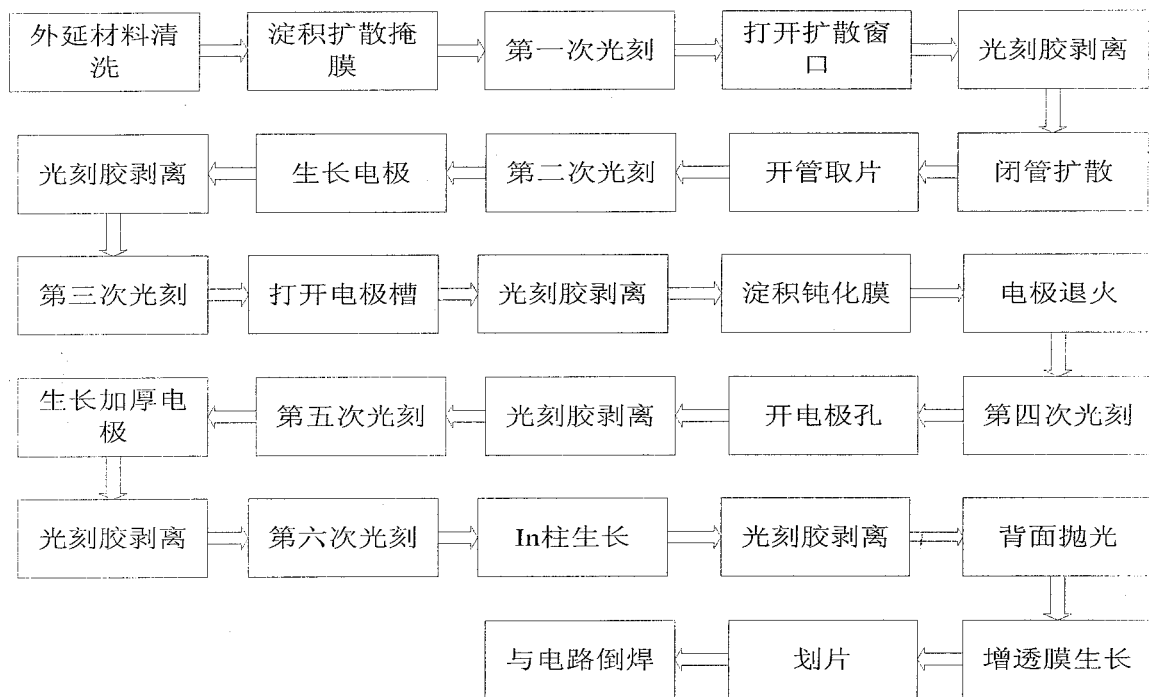


图 2.4.2 平面型 InGaAs 背照射阵列探测器的制备工艺

Fig. 2.4.2 Fabrication processes of backside illuminated InGaAs detector

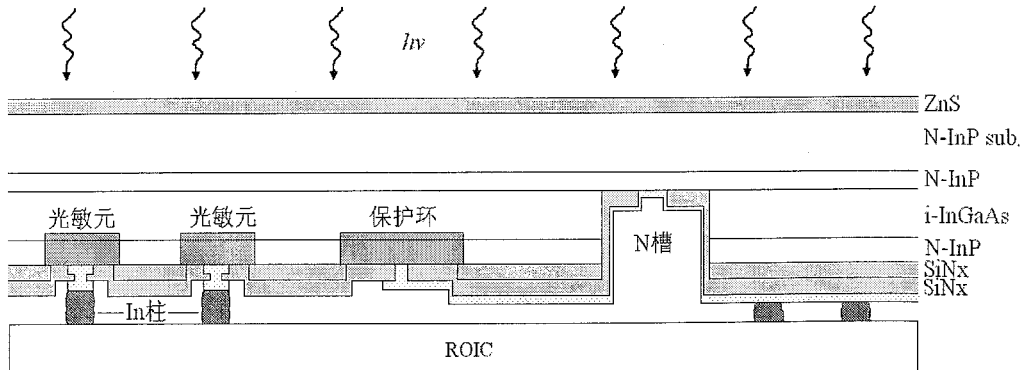


图 2.4.3 背入射平面型 InGaAs 阵列探测器

Fig. 2.4.3 The backside-illuminated planar type InGaAs array detectors

2.4.2 扩散掩膜开孔工艺优化

光刻误差和扩散孔开孔等工艺因素造成的扩散窗口尺寸扩大是造成平面结光伏器件光敏元扩大的一个原因，平面结器件工艺的第一步通常是生长一层 SiO_2 或者 SiN_x 作为扩散掩膜，扩散掩膜的作用除了定义扩散窗口外，还有对结区边缘钝化的作用。大规模器件对高密度和小光敏元的要求意味着需要精细控制扩散过程，在闭管扩散条件趋于稳定的基础上，优化扩散掩膜的开孔工艺使之精确稳定尤为重要，既要具有较高的图形保真度又要减少侧向钻蚀。

由于 SiN_x 薄膜致密、硬度高，并且具有良好的绝缘特性、优良的掩蔽特性等优点，因此被广泛应用于半导体器件的钝化保护中。由于 III-V 族半导体材料在较高温度下 V 族元素易挥发，器件工艺过程的温度受到了限制^[13]。等离子体增强化学气相淀积(PECVD)可在较低的温度下生长的 SiN_x 膜致密均匀，且具有较好的侧壁覆盖特性，因而广泛应用在 III-V 族半导体器件制备中。

SiN_x 扩散掩膜采用牛津公司的 PECVD 技术进行生长，生长时衬底温度 330°C ， SiH_4 和 NH_3 流量分别为 50ml/min 和 900ml/min ，厚度 230nm ，薄膜形貌良好，生长厚度均匀。 SiO_2 或者 SiN_x 扩散掩膜开孔通常采用湿法腐蚀的方式，腐蚀速率往往与腐蚀液体系、配比、腐蚀材料、环境温度等众多因素相关，而且有些湿法腐蚀液体系的组分会随着时间而变化，因而化学性质也会随时间的变化而发生变化。正面入射工艺一般采用湿法腐蚀的方式，腐蚀 SiN_x 膜在 HF 缓冲液中进行，溶液配比为 $\text{HF}:\text{NH}_4:\text{H}_2\text{O}=3:6:10$ ，温度保持冰水状态，但是 SiN_x 膜的腐蚀在不同晶向的腐蚀速率通常呈现各向同性的特点，所以扩散掩膜开孔工艺不稳定，过程不容易控制，腐蚀工艺如图 2.4.4 所示，钻蚀严重、窗口

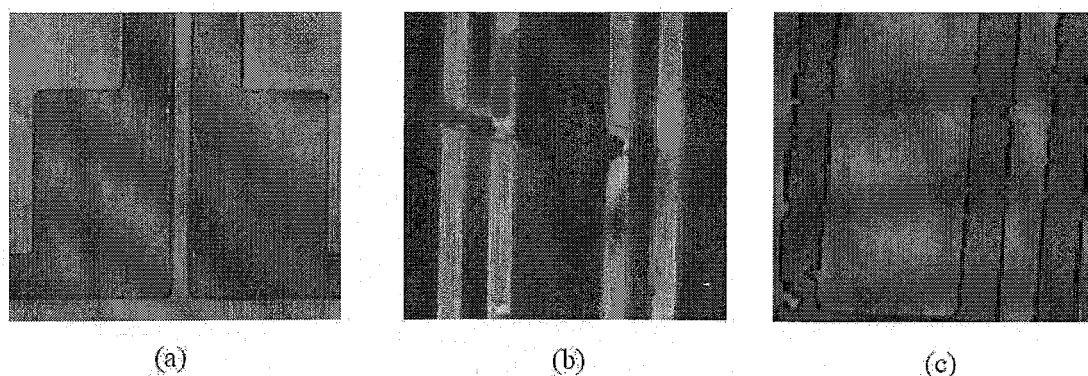


图 2.4.4 扩散掩膜开孔腐蚀工艺

Fig. 2.4.4 Wet chemical etching process

边缘参差不齐、均匀性较差，容易使光敏元扩大明显，导致相邻的光敏元之间串通，从而产生盲元。

为了实现工艺的一致性和可控性，研究了先干法刻蚀后湿法腐蚀的工艺，本实验的干法刻蚀工艺采用英国牛津公司的 ICP180 system100 感应耦合等离子刻蚀设备，采用两个独立的射频功率源分别控制产生等离子体的密度和能量，所以 ICP 刻蚀技术可避免传统 RIE 技术存在刻蚀速率与刻蚀损伤这一矛盾。将样品光刻打开窗口后控制 ICP 控制刻蚀速率使 SiN_x 膜剩余 80nm 左右，然后用 HF 酸缓冲液腐蚀至打开扩散窗口，去除光刻胶后照片如图 2.4.5 所示。

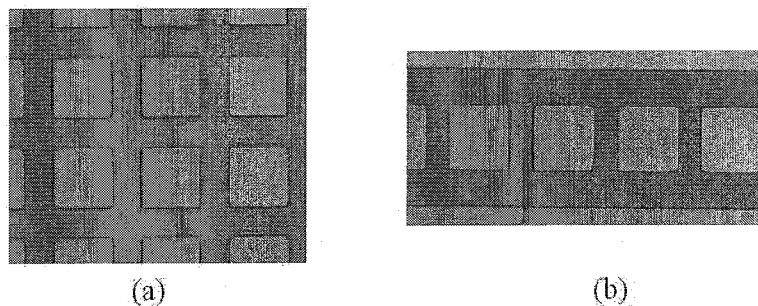


图 2.4.5 ICP刻蚀并湿法腐蚀后照片

Fig. 2.4.5 Picture after ICP-etching and wet chemical etching process

通过对比两种扩散窗口开孔工艺，采用 ICP 刻蚀结合湿法腐蚀的方式图像保真度高，几乎没有侧向钻蚀现象，同时也克服了常规干法刻蚀中对半导体材料表面的晶格损伤，工艺条件容易控制，重复性好，有利于实现较高占空比的长线列或大规模面阵器件，较好地满足器件制备的要求。

2.4.3N 电极槽的开孔工艺研究

平面型 InGaAs 器件背入射结构制备中，N 型电极生长在外延材料的正面，需要在淀积钝化膜之前打开 N 型电极孔使 N 电极生长在 N^+ -InP 上，使用同一种光刻图形同时打开 SiN_x 扩散掩膜层、帽层、InGaAs 吸收层，同时控制侧向钻蚀，减少侧壁损伤。本文尝试采用光刻胶作为掩膜经历 HF 酸缓冲液腐蚀、Ar 离子刻蚀、酒石酸溶液腐蚀三个过程。

实验采用 MOCVD 技术生长的 NIN 型 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 外延材料，N-InP 衬底上依次生长厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 掺 Si 的 N^+ -InP 缓冲层，厚度为 $2.5\mu\text{m}$ 与 InP 晶格匹配掺 Si 的 $\text{i-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层，厚度为 $1\mu\text{m}$ 掺 Si 的 N-InP 窗口层。外延片经过清洗、 SiN_x 扩散掩膜生长、光刻形成 N 电极槽图形，为进行腐蚀及刻

蚀速率计算, 实验采用两种样品, 腐蚀及刻蚀深度采用台阶仪测量完成。其中 Ar 离子刻蚀条件为 300eV、束流强度 80cm^{-3} ; InGaAs 的腐蚀在酒石酸溶液中水浴 35°C 进行, 溶液配比 (重量比酒石酸: $\text{H}_2\text{O}=1:1$): $\text{H}_2\text{O}_2=5:1$ 。

工艺过程如图 2.4.6 所示, 形貌保真度高, 基本无钻蚀现象, 由于在 Ar 离子刻蚀后进行了酒石酸湿法腐蚀, 对材料的侧壁影响较小。计算得在本实验室的工艺条件下 Ar 离子刻蚀 InP 和 InGaAs 的速率分别为 $97.2\text{nm}/\text{min}$ 和 $26.2\text{nm}/\text{min}$, 酒石酸溶液腐蚀 InP 和 InGaAs 的速率分别为 $620\text{nm}/\text{min}$ 和 $190\text{nm}/\text{min}$ 。

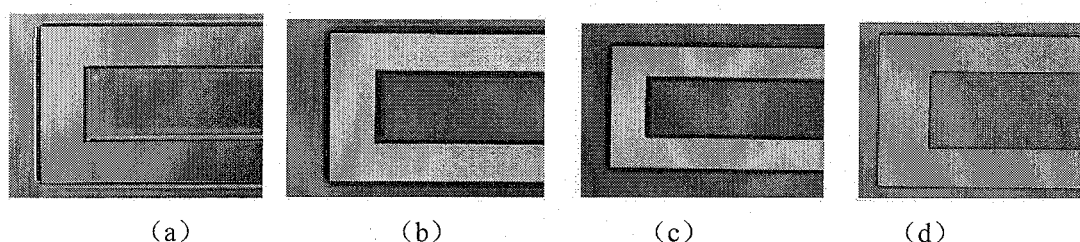


图 2.4.6 N型电极槽开孔照片: (a)光刻后(b)腐蚀SiNx后(c)Ar离子刻蚀后(d)酒石酸腐蚀后

Fig 2.4.6 Picture of slotting N-type electrode process

2.5 本章小结

本章在主要研究内容有: 围绕扩散成结关键工艺, 研究了 Zn 在晶格失配和晶格匹配材料中的扩散行为, 并研究了高温快速热退火合金化过程对 p-n 结深度的影响, 结果表明, RTP 不会影响 p-n 结的深度, 因此 P 型掺杂后的 p-n 结深度可以认为是器件的最终结深; 以 24×1 元线列探测器为例对线列或面阵器件中的盲元进行了判别和分析, 并采取针对性的措施降低了盲元率, 包括器件保护环结构改进、电极结构改进、抑制 P 电极流动的工艺优化; 首次对平面型背入射高密度 InGaAs 器件制备工艺进行了研究, 对扩散掩膜及 N 电极槽的开孔进行了优化。

3 基于子像元模式的平面型 InGaAs 探测器研制与性能分析

3.1 引言

平面型 InGaAs 器件具有暗电流低、探测率高、可靠性高等优点,采用扩散或者离子注入方式成结被普遍采用^[87,88],然而平面型阵列焦平面探测器往往存在光敏元扩大现象,即产生在 p-n 结结区内的光生载流子被吸收以外,在 p-n 结结区周围一定距离内产生在吸收层的光生载流子,同样会被 p-n 结侧向收集,从而造成有效光敏元扩大^[89]。上一章讲过造成光敏元扩大现象往往有三个因素,而扩散和离子注入造成的掺杂元素横向扩散一般是一个小量,可以忽略不计,另外通过优化光刻和扩散掩膜开孔等工艺,可以很大程度上减小工艺因素的影响。因此, p-n 结对结区外围光生载流子的侧向收集是造成平面型器件有效光敏元扩大的主要因素,这将会给器件的结构设计带来困难,造成阵列器件调制传递函数(MTF)的降低,从而影响成像质量。目前抑制光敏元扩大现象一般通过保护环或者隔离槽的方式^[90,91],但是随着焦平面阵列的发展,器件光敏元尺寸和中心距越来越小,对阵列的占空比要求越来越高,这种方式必将受到限制,平面扩散工艺所制备的光伏探测器有效光敏元扩大的问题越来越突出^[92,93]。

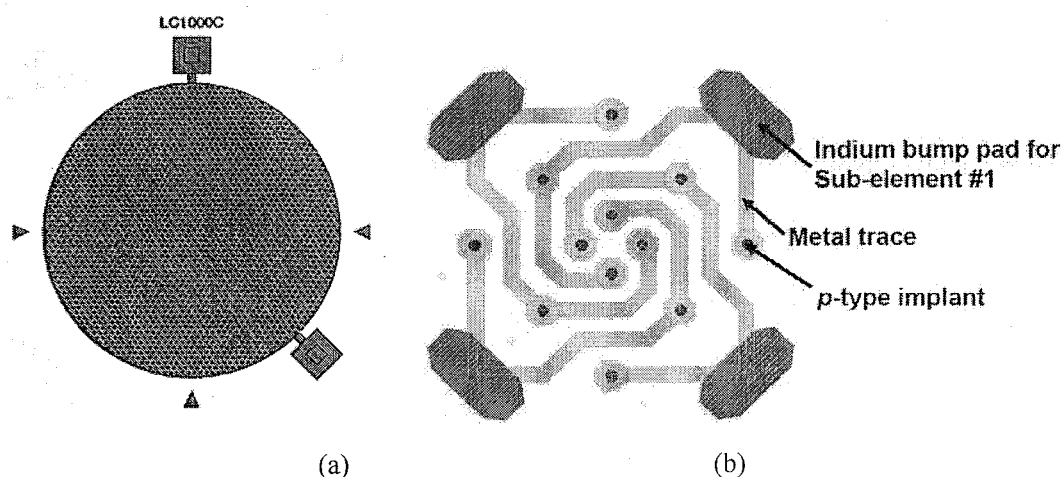


图 3.1.1 (a) 直径 1000μm 的侧向收集探测器和(b) 交错对插型子像元探测器
Fig. 3.1.1 (a) 1000 μm diameter lateral collection detector; (b) One embodiment of the interdigitated pixel concept

近来,人们利用这种存在于平面型阵列中的载流子侧向收集效应,研制了

甚长波红外的 HgCdTe 焦平面探测器(VLWIR HgCdTe FPA)和可见波段的 CCD 探测器, 然而利用侧向收集效应制备的 InGaAs 探测器却鲜有报道。如图 3.1.1 所示为 Boeing 公司的 A.I. D' SOUZA 等人报道的两种基于子像元模式的 HgCdTe 探测器^[94,95]: (a)中探测器由电极连接 2298 个子象元组成; (b)中探测器由四个交错对插的四个子像元组成, ROIC 可以取消选择那些成为盲元的子像元, 只要有一个子像元性能正常, 器件仍可以正常工作。

本章提出了一种基于子像元模式的平面型 InGaAs 探测器新结构, 并对探测器的结构进行了优化; 研制了多种不同间距的单元正照射的平面型 InGaAs 子像元结构探测器及常规结构的探测器, 对器件的性能进行了对比测试分析, 并采用 LBIC 技术对子像元在不同温度下的光响应均匀性进行了研究。

3.2 子像元模式平面型 InGaAs 探测器工作原理及结构优化

3.2.1 子像元模式 InGaAs 探测器工作原理

子像元模式探测器利用了载流子的侧向收集效应, 产生在侧向收集区距离 p-n 结一个少子扩散长度内的光生载流子可以被相邻的子像元有效吸收, 在探测器探测率不降低的前提下, 光敏元响应均匀。由于减少了扩散区域从而有效地减少了扩散热损伤, 降低器件的暗电流和盲元率。探测器横截面示意图如图 3.2.1 所示, 图中给出了两个相邻的子像元。侧向收集区宽度即相邻子像元间距 W_L 是子像元探测器最关键的设计参数, 与少子扩散长度 L_p 密切相关, 而 L_p 又同少子寿命 τ_p 相关, 如果 $W_L < 2L_p$, 那么产生在侧向收集区内的光生载流子可以被相邻的子象元有效收集, 整个光敏元光响应均匀, 而探测率又不会降低; 如

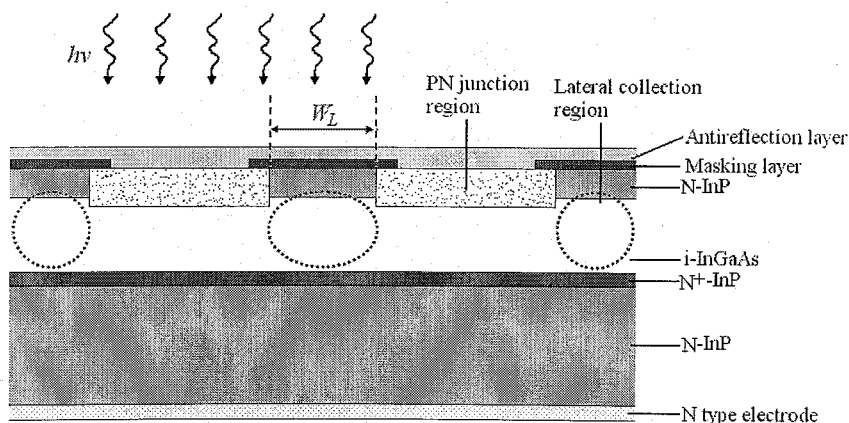


图 3.2.1 子像元模式探测器横截面示意图

Fig. 3.2.1 The cross-sectional structure of InGaAs sub-pixels infrared detector

果 $W_L \gg 2L_p$, 则侧向收集区光响应信号较弱, 大部分光生载流子在未扩散到达子像元结区之前就被复合。因此需要利用有效手段表征探测器的光响应均匀性, 得到合适的设计参数, 优化器件结构。

激光诱导电流技术(LBIC)是一种高效的、非破坏性的用来表征半导体材料的内部空间结构、电活性区域以及缺陷的光学方法^[96, 97]。这项技术已经广泛应用于光伏焦平面器件的均匀性和盲元检测方面, 包括 p-n 结结深、载流子的扩散长度、探测器的品质因子(R_0A)及均匀性等^[98-101]。LBIC 信号产生的机理如图 3.2.2 所示, 激光束在 p-n 结表面扫描时, 若连接 a 和 b 电极, 光生载流子扩散到空间电荷区边缘会立刻被电极收集, 产生光伏响应信号 I_{LBIC} 。具体的工作原理已经有很多报道^[90, 98, 102], 这里不再赘述。

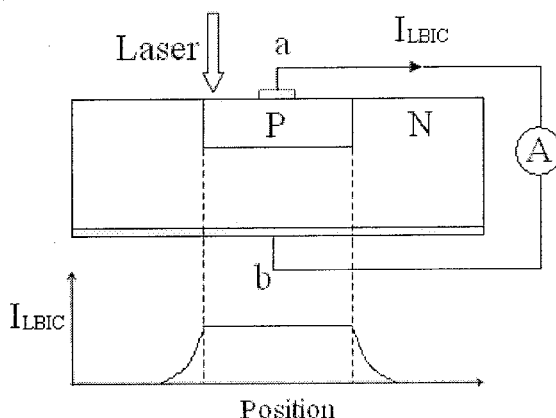


图 3.2.2 LBIC 信号原理图

Fig. 3.2.2 Schematic of LBIC signal

本文采用 SEMILAB 公司的 Micro LBIC 系统测试来表征器件光敏元的光响应均匀性, 系统所用的脉冲激光波长 980nm、频率 1kHz、激光束斑直径 $5\mu\text{m}$ 、激光总功率 $2\mu\text{W}$, 扫描步进和激光强度可调, 整个系统可以通过自动控制液氮和加热系统进行温度调节, 精度 $< \pm 1^\circ\text{C}$, 最低温度可以达到液氮温度(77K), 因此还可以用于表征器件在不同温度下的光响应均匀性。

3.2.2 器件结构优化

实验采用 MOCVD 生长的 N-i-N⁺型 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 的材料, 采用标准的闭管扩散工艺研制了侧向收集区宽度不同的三种平面型 InGaAs 探测器 1#、2#、3#, 如图 3.2.3 所示。三种类型的探测器均由 10 个子像元组成, 每个子像元面积均为 $25 \times 500\mu\text{m}^2$, 侧向收集区宽度分别为 $15\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$, 其中 1#

器件每两个子像元一组先通过底部的 P 电极连接，然后通过金丝键压与下方的公共电极相连后引出。2#和 3#器件 P 电极均采用环形遮盖电极，所有子像元共同引出，三种器件均采用正面入射结构和背面 N 电极，N 电极通过导电银胶与导电基极互连后引出。

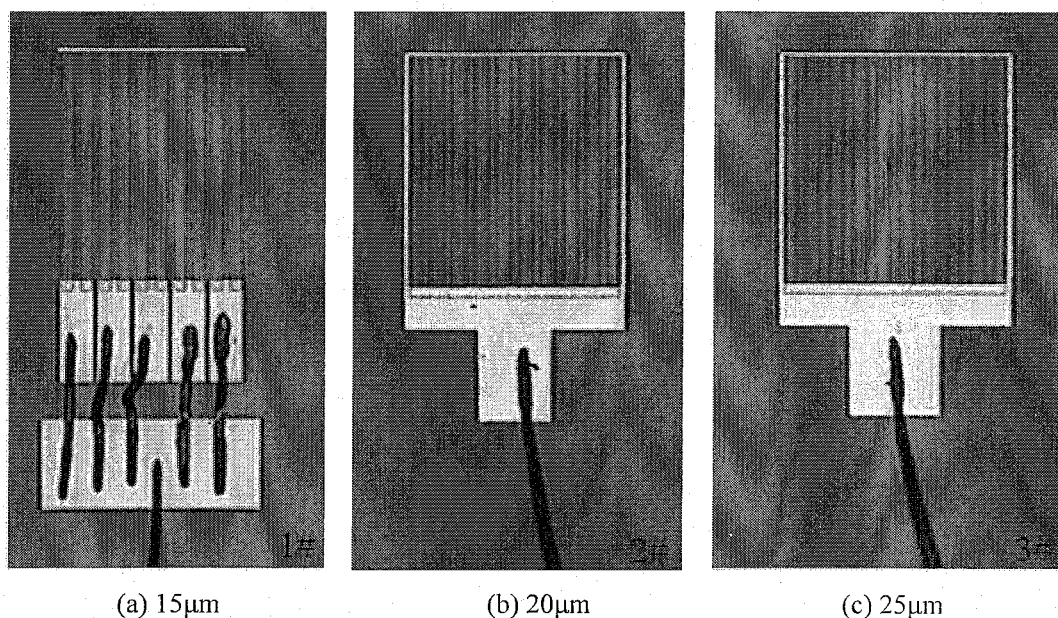


图 3.2.3 三种侧向收集区宽度不同的 InGaAs 子像元探测器: (a)1#; (b)2#; (c)3#

Fig. 3.2.3 The InGaAs sub-pixels detector with the lateral collection region width of three different specifications: (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#

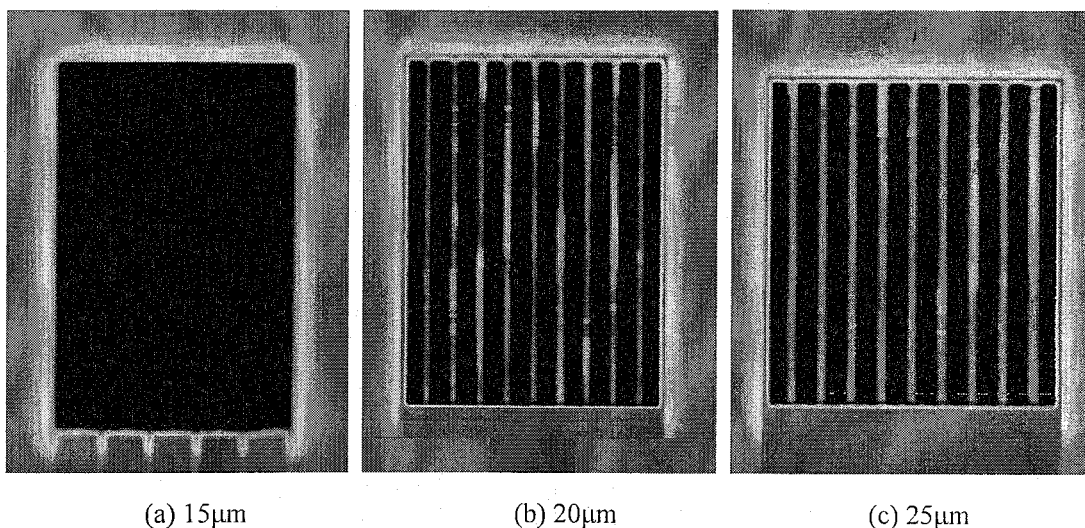


图 3.2.4 296K 下三种器件的 LBIC 光响应扫描图: (a)1#; (b)2#; (c)3#

Fig. 3.2.4 Photoresponse uniformity maps by LBIC at 296K (a)1#, (b)2#, (c)3#

LBIC 测试在室温(296K)下进行,采用最小的扫描步进 $1\mu\text{m}$, 激光强度 3%。可以认为 InP 帽层不吸收 980nm 的激光辐射, 因此激光辐射可以被 InGaAs 吸收层吸收, 器件的 LBIC 光响应均匀性扫描图如图 3.2.4 所示。

测试结果表明, W_L 为 $15\mu\text{m}$ 的 1#器件光敏区响应均匀, 然而可以很明显地从间距为 $20\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 的 2#和 3#器件 LBIC 扫描图中分辨出信号较弱的侧向收集区。三种器件的相应的信号等值图如图 3.2.5 所示, 其中一个侧向收集区的横向信号响应曲线如图 3.2.6 所示, 1#器件的整个光敏元的 I_{LBIC} 均达到了饱和值 10235nA , 2#和 3#器件子像元区域信号达到饱和值, 但是是侧向收集区的信号最小值分别只有 8675nA 和 7970nA , 在此区域产生的光生载流子只有部分能够扩散到最近的 p-n 结结区产生信号, 另一部分在到达结区前就被复合中心俘获。

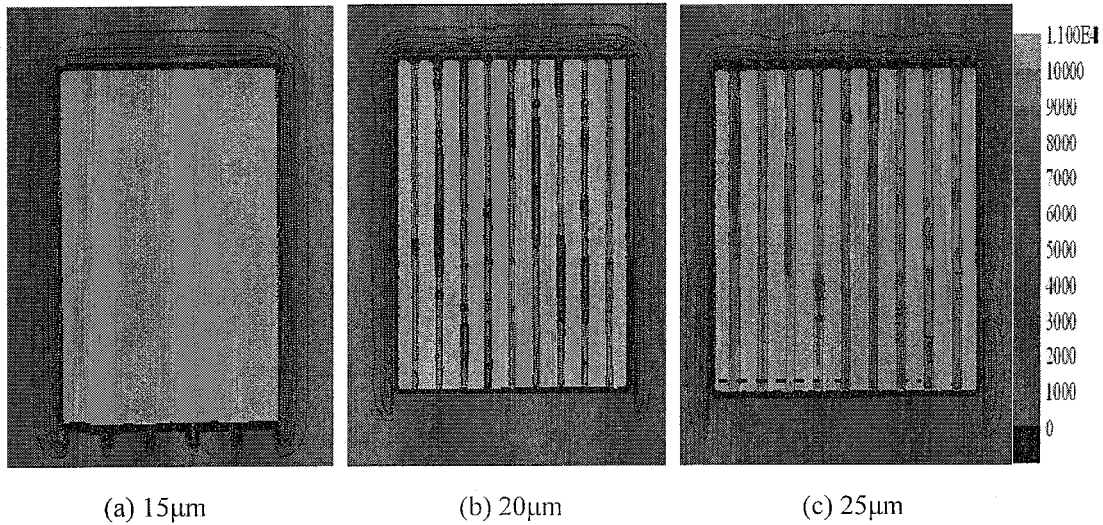


图 3.2.5 296K 下三种器件的 LBIC 信号等值图: (a)1#; (b)2#; (c)3#

Fig. 3.2.5 LBIC signals contour distribution at 296K: (a)1#, (b)2#, (c)3#

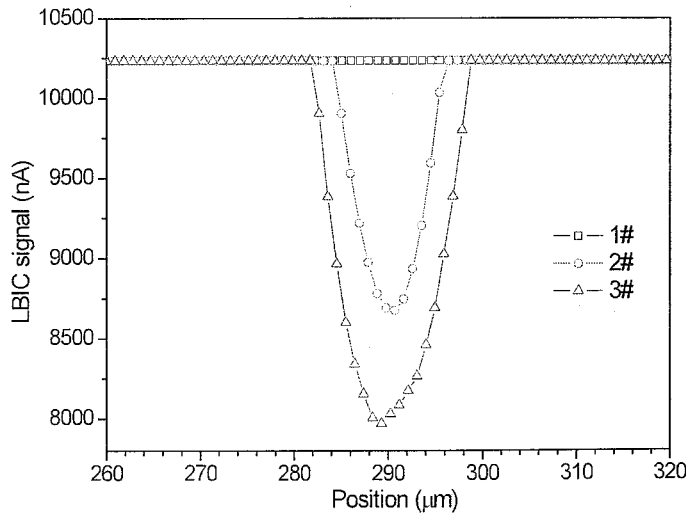


图 3.2.6 296K 下三种器件侧向收集区的横向信号响应曲线

Fig. 3.2.6 LBIC signals line-scan profiles of the lateral collection region detector at 296K

图 3.2.7 所示为 1#器件的 I-V 特性曲线和典型光谱响应曲线, 由图可知, 在室温下, 器件的优值因子 $R_0A > 3 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$, -100 mV 反向偏压下的暗电流密

度为 13.4 nA/cm^2 、峰值波长 $1.49 \mu\text{m}$ 、G 因子为 80。对器件的黑体信号及噪声性能进行测试，黑体出射孔与器件距离 17.2cm 、测试时环境温度 296K 、黑体出射孔径 5mm 、带宽 80Hz ，计算得器件的黑体探测率为 $4.3 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、峰值探测率为 $3.4 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、量子效率近 100% 。因此，侧向收集区宽度为 $15\mu\text{m}$ 的 1#器件性能良好，对于采用晶格匹配的外延材料研制的子像元模式 InGaAs 探测器来说，当工作温度为室温时，侧向收集区宽度可以设计成 $15\mu\text{m}$ 。

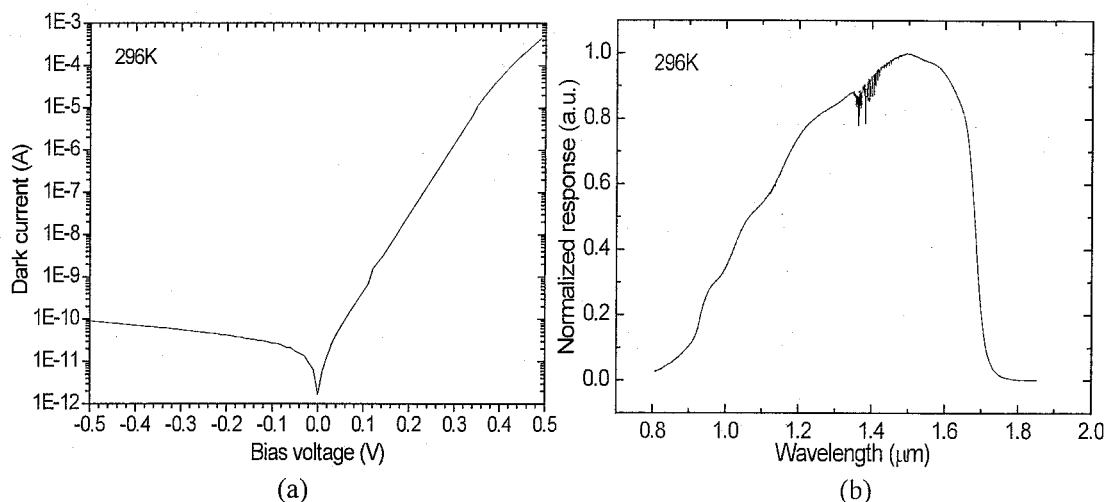


图 3.2.7 296K 下 1#种器件的(a) I-V 特性曲线和(b) 光谱响应曲线

Fig. 3.2.7 (a) The I-V characteristics and (b) response spectrum of 1# detector at 296K

3.3 子像元模式平面型 InGaAs 探测器光响应均匀性变温特性研究

3.3.1 理论基础

探测器吸收特定波长范围的光产生电子-空穴对，在耗尽区内或者离 p-n 结一个扩散长度内产生的电子-空穴被电场分开，使得外电路有电流通过，产生信号。稳态条件下，通过耗尽区的总的光电流密度为^[103]：

$$J_{\text{tot}} = J_{\text{dr}} + J_{\text{diff}} \quad (3.3.1)$$

J_{dr} 为耗尽区内产生的载流子所形成的漂移电流密度， J_{diff} 为耗尽区以外的半导体材料体内产生的载流子扩散到结区形成的扩散电流。

当 $x > W_D$ (耗尽层宽度) 时，半导体体内的少数载流子(空穴)浓度由一维扩散方程决定^[104]：

$$D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + G_e(x) = 0 \quad (3.3.2)$$

其中, D_p 为空穴扩散系数, τ_p 为过剩载流子寿命, p_{n0} 为平衡态空穴浓度。

取 $x = \infty$ 时, $p_n = p_{n0}$ 及 $x = W_D$ 时, $p_n = 0$ 为边界条件, 得到扩散电流密度为:

$$J_{diff} = q\Phi_0 \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} \exp(-\alpha W_D) + \frac{q p_{n0} D_p}{L_p} \quad (3.3.3)$$

在正常工作状态下, 含 p_{n0} 的暗电流一项要小的多, 则

$$J_{diff} = q\Phi_0 \frac{\alpha}{\frac{1}{L_p} + \alpha} \exp(-\alpha W_D) \quad (3.3.4)$$

其中,

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (3.3.5)$$

Φ_0 为单位面积的入射光子通量, 因而少子寿命受温度变化的影响进而导致少子扩散长度的变化, 少子寿命是决定探测器量子效率的重要参数之一, 寿命越高量子效率越高。在激光激发和停止激发后, 载流子都会发生重新分配。测量的少子扩散长度反映的寿命是复合寿命, 由体内复合和表面复合主导^[105]:

$$\frac{1}{\tau_{meas}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{1}{\tau_{diff} + \tau_{surf}} \quad (3.3.6)$$

$$\tau_{diff} = \frac{d^2}{\pi^2 D_p} \quad (3.3.7)$$

$$\tau_{surf} = \frac{d}{2S} \quad (3.3.8)$$

式中 τ_{bulk} 为体复合寿命, τ_{diff} 为载流子从样品内部扩散到表面的时间, τ_{surf} 为表面复合寿命, 取决于表面复合速度和样品厚度, d 为样品厚度, S 为表面复合速度。

表面复合由两个过程组成: 自由载流子扩散到表面和自由载流子在表面复合。如果器件表面钝化效果差, τ_{surf} 很小, τ_{diff} 为主; 只有器件表面通过有效的钝化, 减少表面复合的影响, 并且体寿命比扩散寿命大的多的情况下(如低掺杂), 测试结果才能比较准确的反映出体寿命的变化。

D_p 反映了存在浓度梯度时空穴运动的难易程度, 而迁移率 μ 反映了载流子

在电场作用下运动难易程度的物理量，两者的定量关系通过经典的爱因斯坦关系式相联系^[106]，

$$D_p = \frac{\mu K T}{e} \quad (3.3.9)$$

式中 K 为 Boltzman 常数($1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)， e 为电子电荷。对于不同的散射机构，迁移率与温度的关系为^[104]

$$\text{电离杂质散射: } \mu_i \propto N_i^{-1} T^{3/2} \quad (3.3.10)$$

$$\text{声学波散射: } \mu_s \propto T^{-3/2} \quad (3.3.11)$$

$$\text{光学波散射: } \mu_0 \propto (\exp(\frac{h\nu_i}{k_0 T}) - 1)^{-1} V \quad (3.3.12)$$

任何时候都有三种散射机构同时存在，对于起主要作用的散射机制，它的平均自由时间特别短，散射几率特别大。迁移率同温度的变化关系，可以间接反映出所测半导体材料的主要散射机制。

子像元模式器件光敏元的光响应均匀性是衡量器件性能的一个重要因素，上一节测试分析了室温下(296K)几种不同侧向收集区宽度器件的光响应均匀性，由于光谱响应 $0.9 \sim 1.68 \mu\text{m}$ 的平面结 InGaAs 探测器一般在室温下工作，因此，将侧向收集区宽度设计为 $15 \mu\text{m}$ 是比较理想的。少子寿命是表征外延材料质量和器件性能的关键参数^[107]，受温度变化影响。InGaAs 探测器的光响应均匀性与吸收层的少子扩散长度密切相关，由于 InGaAs 探测器表面淀积了钝化层，若钝化效果良好，少子扩散长度随温度变化的测试结果反映的是少子体寿命的温度响应。本小节在研究了室温下子像元探测器的响应均匀性的基础上，进一步研究了探测器在变温下光响应均匀性，并分析了不同温度范围内，少子扩散长度随温度的变化。

3.3.2 实验结果及讨论

一般情况下，造成平面结光伏器件光敏元扩大的主要原因有：(1)光刻误差和扩散孔开孔等工艺因素造成的扩散窗口尺寸扩大；(2)扩散或离子注入过程中掺杂元素的横向扩散；(3)p-n 结对结区外围光生载流子的侧向收集作用^[108]。考虑到前两个因素对子像元区域及侧向收集区域光敏元扩大的影响，采用 SCM 技术扫描了 1#器件的横截面以观察杂质掺杂情况，测试结果如图 3.3.1 所示，子

像元区域及侧向收集区域宽度分别为 $27.539\mu\text{m}$ 和 $12.422\mu\text{m}$ （两者的设计宽度分别为 $25\mu\text{m}$ 和 $15\mu\text{m}$ ），因此，由于前两个原因造成的子像元区域扩大值为 $1.28\mu\text{m}$ ，记为 L_1 。理想情况下，SCM 技术可以对杂质掺杂区域进行精确到纳米尺度的表征。

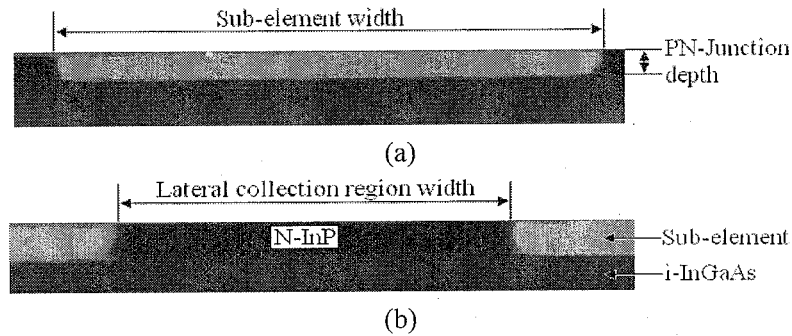
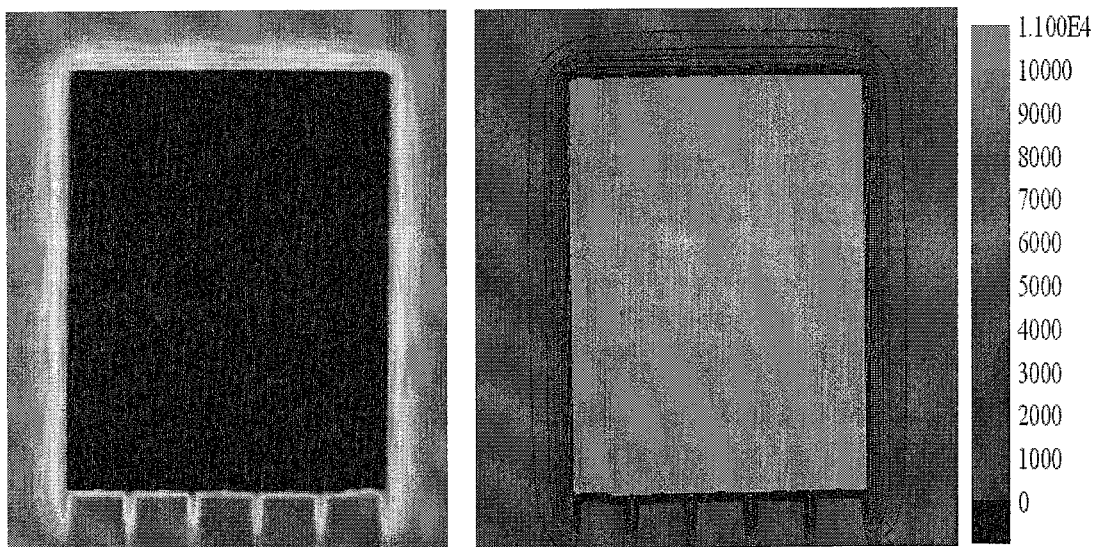


图 3.3.1 横截面掺杂情况 SCM 扫描图：(a) 子像元区域和(b) 侧向收集区

Fig. 3.3.1 The dopant maps of (a) sub-element and (b) lateral collection region of cross-sectional scanning by SCM.

因为 L_1 几乎不受温度的影响，所以有效光敏元扩大随温度的变化主要是第三个原因导致的，即来源于光生载流子的侧向收集作用的温度特性。LBIC 的激光光束透过 InP 帽层被 InGaAs 吸收层吸收，探测器的 LBIC 光响应均匀性扫描图显示了 InGaAs 层的光响应均匀性，直接反映了 InGaAs 层少子扩散长度的温度响应。上一小节采用了 SEMILAB 公司的 Micro LBIC 系统测试了 1#器件在室温(296 K)下的光响应扫描图，本小节对 1#器件进行了不同温度下的测试，测试温度为 273 K、253 K、223 K、193 K、173 K、123 K 和 88 K。如图 3.3.2 所示



(a) 273K

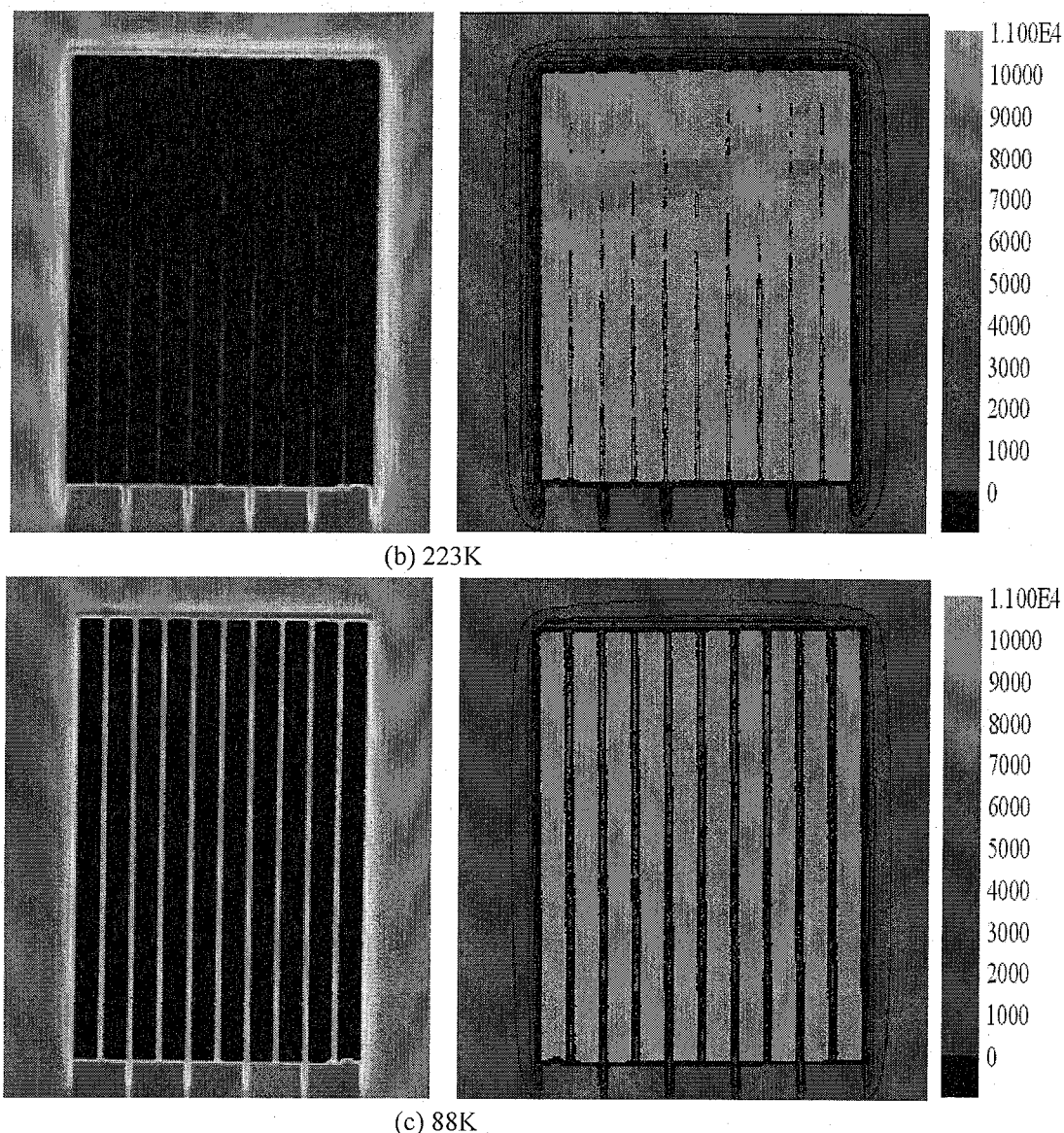


图 3.3.2 1#器件的变温 LBIC 光响应扫描图及信号等值图: (a) 273K; (b) 223K; (c) 88K
Fig. 3.3.2 LBIC photoresponse uniformity maps and contour distribution at different temperature of 1#: (a) 273K, (b) 223K, (c) 88K

为 273K、223K、88K 的 LBIC 光响应均匀性扫描图及相应的信号等值图, 其他温度下的测试结果未在这里给出的。

测试结果显示, 温度 $>223\text{K}$ 时, LBIC 扫描图同室温下的结果一致, 整个器件光敏元响应均匀, 子像元侧向收集区的信号与子像元光敏元区的信号同样达到饱和。在 $296\text{K}\sim 253\text{K}$ 的温度范围内, 在侧向收集区产生的大部分光生载流子能够扩散到最近的 p-n 结区产生信号, 即器件工作在 $296\text{K}\sim 253\text{K}$ 的温度范围内, 少子扩散长度随温度的变化不会导致光敏元光响应均匀变差。当温度进一步降低到 $\leq 223\text{K}$, 产生在侧向收集区的光信号逐渐降低, 当温度降低到 88K 时

侧向收集区在扫描图上已经能很清晰地显示出来,如图 3.3.1(c)所示。侧向收集区的 LBIC 信号电流随着温度的降低逐渐变小,表明少子扩散长度在低温下与常温相比变短。另外,因为在离最边缘子像元的 p-n 结一个扩散长度内产生的光生载流子被最外围 p-n 结侧向收集,载流子离子像元越远,其扩散到结区然后被收集的概率就越小,故在探测器光敏元最外围等距离处产生了许多等幅信号环。

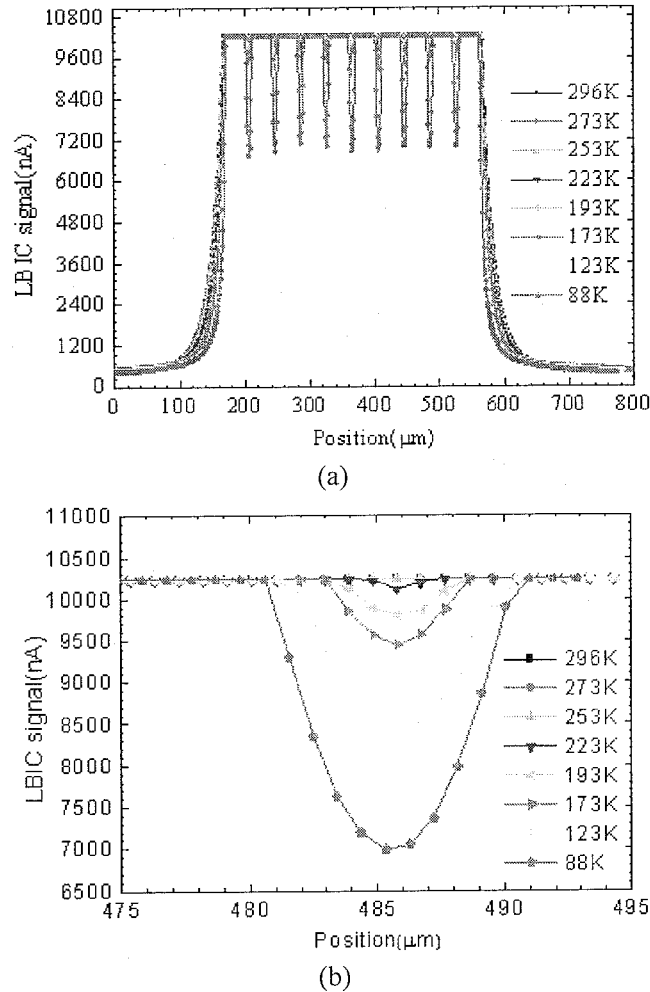


图 3.3.3 探测器在 296K~88K 温度下横向信号响应曲线

Fig. 3.3.3 Line-scan profiles of the detector (a) and the lateral collection regions (b) at 296K~88K

图 3.3.3 为 1#器件在不同温度下的横向信号响应曲线,测试结果揭示了 LBIC 信号电流与温度的关系。由于产生在探测器光敏元最外围的载流子只能被最外侧的子像元吸收,因此用最外侧两个子像元信号电流的上升和下降曲线对任意一个侧向收集区的信号进行拟合。取探测器 485 μm 处的子像元在 88K 温度下的 LBIC 横向信号响应曲线为例,将信号电流上升和下降曲线线性叠加并扣

掉背景信号，拟合结果同实验值可以很好的吻合，如图 3.3.4 所示，证明了侧向收集区的 LBIC 信号是由相邻的两个子像元共同侧向收集产生的。

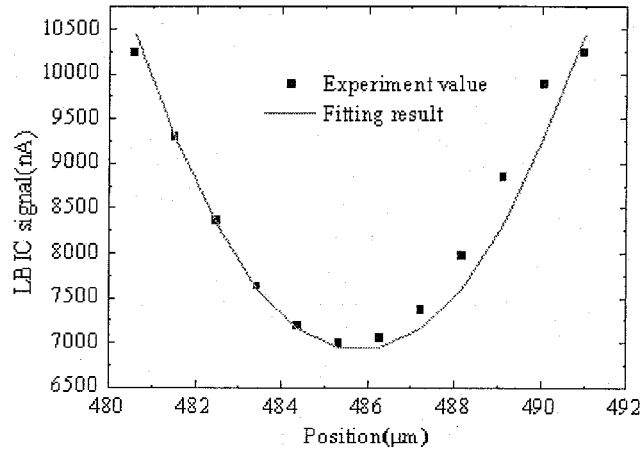


图 3.3.4 T=88K 时侧向收集区的响应信号值及拟合结果

Fig. 3.3.4 Photoresponse signal profile of the lateral collection region at 88K and the fitting result

将 LBIC 光响应信号值衰减到最大值的 $1/e$ 时的宽度扣除光斑直径误差定义为光敏元的宽度，记为 W_p 。实验测量的少子扩散长度可以表示为：

$$L_p = \frac{(W_p - L_d)}{2} - L_1 \quad (3.3.13)$$

其中，探测器的设计宽度 L_d 和 L_1 分别是 $385 \mu\text{m}$ 和 $1.28 \mu\text{m}$ 。计算 296K~88K 不同温度下的 W_p 和 L_p 列于表 3.3.1 中。

表 3.3.1 296K~88K 下的 W_p 和 L_p 的实验值

Tab. 3.3.1 The experimental value of W_p and L_p at 296K~88K

T (K)	296	273	253	223	193	173	123	88
$\sqrt{T} \text{ (K}^{1/2}\text{)}$	17.20	16.52	15.91	14.93	13.89	13.15	11.09	9.38
$W_p \text{ (}\mu\text{m)}$	426.83	424.62	421.74	417.04	411.19	408.3	399.55	393.97
$L_p \text{ (}\mu\text{m)}$	19.64	18.53	17.09	14.74	11.82	10.37	6.00	3.21

随着温度降低， L_p 变短，如图 3.3.5 所示，而且 L_p 与 $\sqrt{T}$ 成如下关系：

$$L_p \propto \sqrt{T} \quad (3.3.14)$$

当 InGaAs 层受入射激光激发产生光生电子-空穴对，离 p-n 结结区大于—

个少子扩散长度距离的载流子在扩散到结区的过程中不断复合直至逐渐消失，假设在此过程中辐射复合起主要作用，那么，在侧向收集区空穴的寿命基本上就是辐射复合情况下的寿命，此时^[109]，

$$\tau_p \propto \sqrt[3]{T^2} \quad (3.3.15)$$

由式 3.3.5、式 3.3.9、式 3.3.14、式 3.3.15 可得，

$$\mu \propto \frac{1}{\sqrt[3]{T^2}} \quad (3.3.16)$$

这是典型的声学波散射为主导机制时迁移率与温度的关系。因此，对于采用掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的 InGaAs 吸收层的 InP/InGaAs/InP 外延材料制成的 PIN 探测器，在温度 296K~88K 范围内，声学波散射是主要的散射机制。

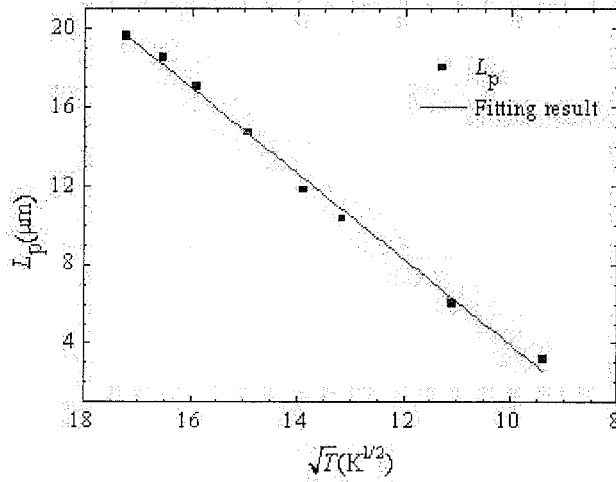


图 3.3.5 L_p 与温度的变化及拟合结果

Fig 3.3.5 Temperature dependence of L_p and the fitting result

3.4 探测器芯片性能测试及分析

3.4.1 探测器芯片制备

根据上述分析，对于采用晶格匹配的 N-i-N⁺型 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 材料(吸收层掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)研制的子像元模式的 InGaAs 探测器，侧向收集区宽度优化为 15μm，并在环境温度 296K~253K 内光敏元光响应均匀。本小节采用了 MOCVD 生长技术在 InP 导电衬底上生长的外延薄膜材料，研制了子像元模式的 InGaAs 探测器和常规结构的 InGaAs 探测器，并对器件进行了测试分析，以对比两种结构器件在性能上的差异。所制备器件侧向收集区宽度均为 15μm，采用正照射结构，P 电极采用环形遮盖电极对光敏元大小进行定义，N 电极背

面引出, 器件结构如表 3.4.2 所示。如图 3.4.1 所示, 器件共有 7 种: A#~F#器件的光敏区面积均为 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$, 其中 A#为常规结构器件, B#~F#为子像元结构器件, 子像元个数不同; G#为子像元结构器件, 光敏区面积为 $450 \times 1000 \mu\text{m}^2$, 同第二章中 24×1 线列焦平面中单个器件面积相同。

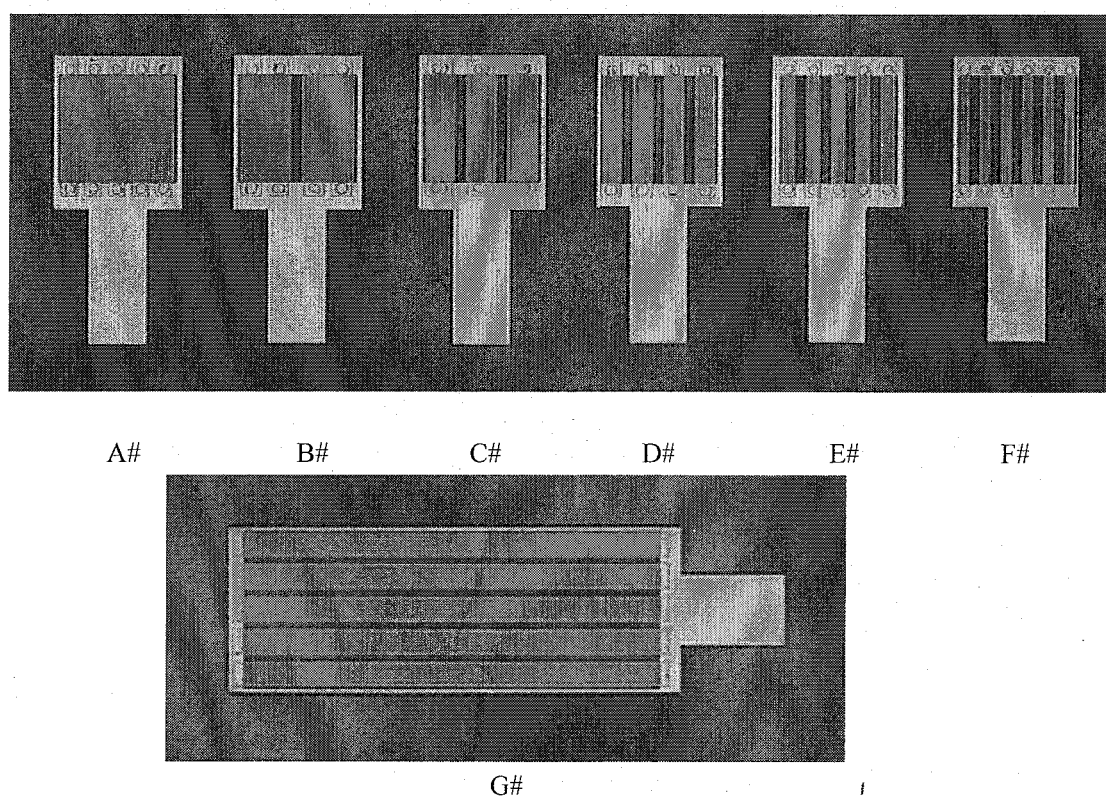


图 3.4.1 正照射常规结构(A#)和子像元结构(B#~G#)InGaAs 探测器

Fig. 3.4.1 Front-illuminated planar type InGaAs normal structure detector (A#) and sub-pixels structure (B#~G#) detectors

表 3.4.2 器件结构

Tab. 3.4.2 Designed detector structure

	器件编号	光敏元面积 (μm^2)	侧向收集区 宽度(μm)	子像元个数	子像元宽度 (μm)
常规结构器件	A#	200×200			
子像元结构器件	B#	200×200	15	2	92.5
	C#	200×200	15	3	56.67
	D#	200×200	15	4	38.75
	E#	200×200	15	5	28
	F#	200×200	15	6	20.83
	G#	460×1000	15	5	78

3.4.2 实验结果及讨论

将制备好的器件封装在测试杜瓦中, 置于屏蔽盒中, 在室温下使用

Keithley6430 可编程电流-电压测试仪测试其 I-V 曲线。图 3.4.2(a)所示为器件 A#~E#的 I-V 特性曲线,图 3.4.2(b)所示为器件 F#与 24×1 线列焦平面探测器中任意一元的 I-V 特性曲线。由图可知,室温下,子像元结构器件与常规结构器件相比,在-100 mV 反向偏压下具有较低的暗电流密度。在-100 mV 反向偏压下,常规结构器件 A#与子像元结构 B#~F#的暗电流密度分别为 12.7 nA/cm^2 、 3.94 nA/cm^2 , R_0A 分别为 $5.3 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $8.4 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$; 24×1 线列焦平面器件与子像元结构的器件 G#的暗电流密度分别为 22 nA/cm^2 、 4.85 nA/cm^2 , R_0A 分别为 $4.2 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $1.05 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。室温下,子像元结构器件与常规结构器件相比,在-100 mV 反向偏压下暗电流密度降低了约 70%。

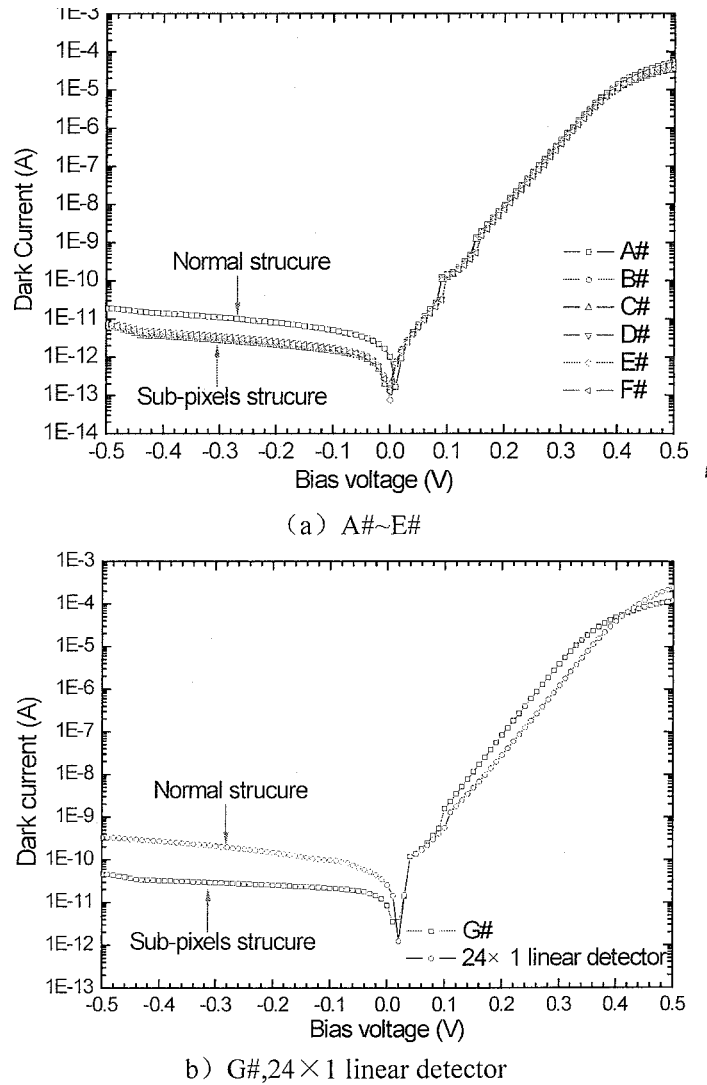


图 3.4.2 不同结构 InGaAs 器件的 I-V 特性曲线

Fig. 3.4.2 The I-V characteristics of InGaAs detector with different structure

一般来说, p-n 结器件的正向电流的主要成分为扩散电流和产生-复合电流,

当背景和信号光强为零,且流过二极管的电流较小时,器件的 I - V 关系可以表示为^[110]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (3.4.1)$$

式中: I_0 为反向饱和电流, K 为 Boltzman 常数(1.38066×10^{-23} J/K), T 为器件温度, n 为理想因子, 由电流机制决定, 当 n 接近 1 时, 器件的正向电流主要是扩散电流; 当 n 接近 2 时, 正向电流主要是产生-复合电流; 如果 n 介于 1 和 2 之间则说明为两种电流机制的共同起作用。对公式(3.4.1)进行变换, 得到:

$$\ln I = \ln I_0 + \left(\frac{q}{nKT} \right) V \quad (3.4.2)$$

可以看出, $\ln I$ 与 V 存在线性关系, 比例系数为 q/nKT , 可通过对 $\ln I$ - V 曲线线性部分进行拟合得到理想因子 n 。

对 A#~G#及 24×1 线列焦平面器件的正向 $\ln(I)$ - V 特性曲线按照式(3.4.2)进行拟合, 拟合所得的理想因子值分别为: 0.99、0.98、0.99、1.00、0.98、0.99、1.04、1.08, 两种结构器件的理想因子都非常接近 1, 说明各种器件正向电流成分主要为扩散电流, 接近二极管器件的理想情况。

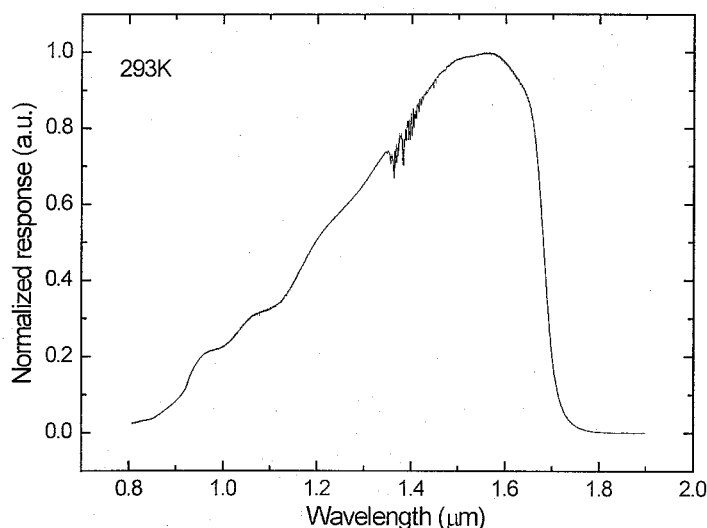


图 3.4.3 293K 下 B#器件的光谱响应曲线

Fig. 3.4.3 The response spectrum of B# detector at 293K

对光敏芯片进行响应光谱测试, 如图 3.4.3 为器件 B#在 293K 温度下归一化后的相对光谱响应曲线, 响应光谱在 $0.9 \sim 1.68 \mu\text{m}$ 波段范围, 峰值波长 $\lambda_p = 1.55$

μm 。器件 G 因子由以下公式给出^[17]：

$$g = \frac{G(\lambda_p) \int_0^\infty \phi(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G(\lambda) \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/(\lambda k T_0)} - 1)} d\lambda} = \frac{G(\lambda_p) \sigma T_B^4}{\int_0^\infty G(\lambda) \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/(\lambda k T_0)} - 1)} d\lambda} \quad (3.4.3)$$

式中： $G(\lambda)$ 是随波长变化的信号相对值、 $G(\lambda_p)$ 是峰值波长对应的信号的相对值、 c 为光速、Stefan 常数 $\sigma=5.673 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \text{K}^4)$ 、 T_B 为黑体温度、 T_0 为调制盘温度。当黑体温度为 900K 时，计算得 g 因子为 80，不同器件的相对光谱响应和 g 因子基本一致。

采用 $T_B=900 \text{ K}$ 黑体作为光源，对所有器件进行了信号、噪声测试，主要测试条件如下：调制频率 800 Hz、黑体孔径 $d=8 \text{ mm}$ 、黑体出射孔与探测器距离 $L=19 \text{ cm}$ 、环境温度 $T_0=293 \text{ K}$ 、系统带宽 $\Delta f=80 \text{ Hz}$ 。峰值探测率 $D_{\lambda_p}^*$ 由以下公式给出^[17]：

$$D_{\lambda_p}^* = g D_{bb}^* = \frac{2\sqrt{2} g \pi L^2 V_s \sqrt{\Delta f}}{V_n \sigma \varepsilon (T_B^4 - T_0^4) d \sqrt{A_D}} \quad (3.4.4)$$

式中 D_{bb}^* 为黑体探测率， V_s 为信号电压， V_n 为噪声电压， $2\sqrt{2}$ 为调制因子， ε 为黑体比辐射率， A_D 为探测器光敏元面积。

测试结果如表 3.4.3 所示。子像元结构探测器(C#~F#)的平均峰值探测率(器件 B#杜瓦管脚断路)和常规结构器件的峰值探测率分别为 $2.89 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、 $2.88 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，两种结构器件的探测率基本一致；器件 G#的峰值探测率为 $3.22 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，也同 24×1 线列焦平面器件的 $3.0 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 一致。

表 3.4.3 器件的黑体信号及噪声性能

Tab. 3.4.3 Black-body signal and noise characteristics of the tested detectors

	A#	C#	D#	E#	F#	G#
信号(A)	4.50E-9	4.55E-9	4.55E-9	4.55E-9	4.55E-9	4.3E-8
噪声(A)	9.8E-14	9.8E-14	9.8E-14	1.00E-13	1.00E-13	2.50E-13
峰值探测率 ($\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)	2.88E12	2.91E12	2.91E12	2.86E12	2.86E12	3.22E12

室温下，通过 p-n 结结区对载流子的侧向收集，侧向收集区宽度为 $15 \mu\text{m}$ 的具有子像元结构的器件，与常规结构器件相比，由于减少了扩散热损伤，在

-100mV 偏压下的暗电流密度降低了约 70%。将子像元结构应用在线列焦平面探测器上, 可以一定程度降低盲元率。

3.5 本章小结

本章主要介绍了一种基于子像元模式的平面型 InGaAs 探测器新结构, 具有子像元结构 InGaAs 器件的工作原理、LBIC 技术的工作原理进行了简单的介绍。研制了侧向收集区宽度分别为 15 μm 、20 μm 、25 μm 的三种平面型 InGaAs 探测器, 并通过利用 LBIC 技术对三种器件在常温下的光响应均匀性进行表征, 最后得出侧向收集区宽度较优的设计参数是 15 μm 。同时利用 LBIC 技术研究了器件在不同温度下的光响应均匀性, 对于采用掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ InGaAs 吸收层的子像元探测器, 当侧向收集区宽度 15 μm 时, 器件可在 296K~253K 的温度范围内光敏元光响应均匀。对于所研制的子像元 InGaAs 探测器计算了 296K~88K 范围内少子的扩散长度, 在所测温度范围内声学波散射是主要的散射机制。研制了侧向收集区宽度 15 μm 的多种子像元结构器件, 与常规结构器件相比, 在室温-100 mV 反向偏压下, 暗电流密度降低了约 70%。

4 正照射平面型 InGaAs 探测器研制与性能分析

4.1 引言

红外焦平面阵列探测器是海洋成像仪、资源卫星用成像光谱仪等新一代红外探测系统的核心器件。随着红外探测技术的发展,目前红外探测器已经发展到了第三代。第三代红外探测器具备以下特点:大规模阵列、小光敏元、多波段工作、探测器芯片与读出电路的混合集成、低暗电流和低噪声^[111,112]。随着空间遥感领域的发展,我国对航天遥感用短波红外 InGaAs 长线列及大面阵焦平面探测器需求越来越迫切,因此,实现小光敏元、高密度、高占空比的长线列及大面阵焦平面探测器,并有效抑制探测器的暗电流和低频噪声是航天遥感用 InGaAs 探测器重要发展方向。

正照射平面型 InGaAs 器件的工艺流程主要包括:(1)扩散掩膜生长;(2)开扩散窗口,(3)闭管扩散;(4)p 电极生长;(5)增透膜/钝化膜生长;(6)高温快速热退火;(7)电极孔开孔;(8)加厚电极生长;(9)背面抛光;(10)背面 N 电极生长。正照射器件的部分横截面示意图如图 4.1.1 所示。

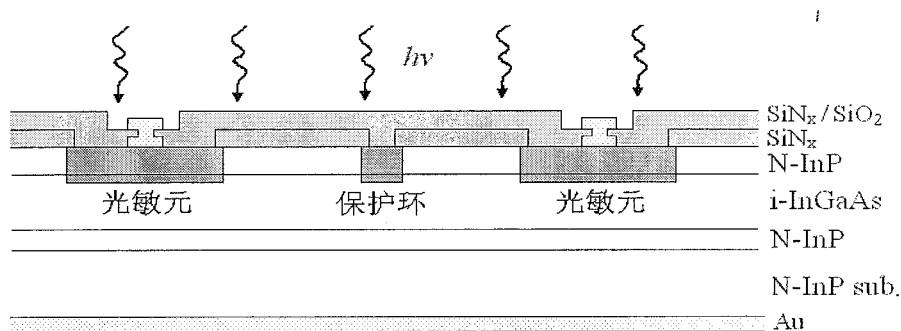


图 4.1.1 正入射平面型 InGaAs 阵列探测器

Fig. 4.1.1 The backside-illuminated planar type InGaAs detector

前期的工作已经研制成功了多种线列及面阵器件,但主要采用台面型结构,本章对正照射平面型 InGaAs 器件进行了研究,对比分析了吸收层掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 与 $5.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 两种类型 InGaAs 器件的 I-V 特性,研制了正照射平面型常规波长的 256×1 线列 InGaAs 探测器和截止波长延伸到 $2.57 \mu\text{m}$ 的长波扩展 256×1 线列 InGaAs 探测器,测试并分析了探测器的光电性能。

4.2 暗电流成分理论基础

非制冷探测器要求器件具有极低的暗电流和噪声,通过优化材料生长质量、器件表面钝化、结构设计等措施来降低器件的暗电流^[113-115]。对于平面 PIN 型 InGaAs 探测器的暗电流,波音实验室的 Joseph Boisvert 等人^[116]认为平面型探测器暗电流主要来源于:缓冲层与有源层的界面处、吸收层内部、吸收层与帽层的界面处、帽层表面与钝化层界面处以及钝化层表面,这其中暗电流主要受到吸收层与帽层的界面影响,如图 4.2.1 所示。

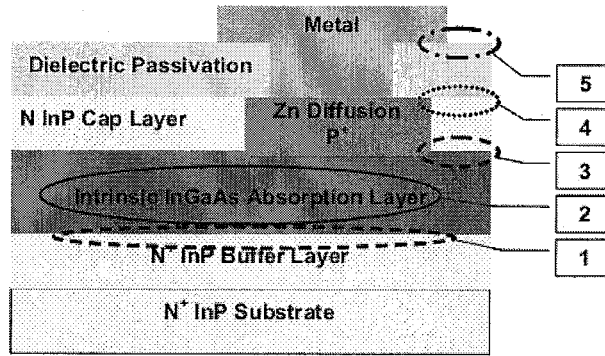


图 4.2.1 平面型探测器暗电流来源示意图^[1]: 1.吸收层与缓冲层界面; 2.吸收层; 3.帽层与吸收层界面; 4.钝化层与帽层界面; 5.钝化层表面。

Fig. 4.2.1 Schemes of dark current sources in planar detector: 1.absorber and buffer interface; 2.absorption layer; 3.cap and absorber layer interface; 4.cap and passivation interface; 5.surface of passivation layer.

一般认为 InGaAs PIN 探测器的暗电流由扩散电流、产生复合电流及隧穿电流组成。扩散电流来源于耗尽区边缘热激发产生的少数载流子向耗尽层的扩散,是由少子浓度不均匀造成的,可以由下式表示^[113, 117]:

$$I_{diff}^n = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{1/2} \left(\frac{A}{N_d} \right) [\exp(\frac{qV}{kT}) - 1] \quad (4.2.1)$$

$$I_{diff}^p = qn_i^2 \left(\frac{D_n}{\tau_n} \right)^{1/2} \left(\frac{A}{N_a} \right) [\exp(\frac{qV}{kT}) - 1] \quad (4.2.2)$$

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi K_0 T}{h^2} \right)^{3/2} (m_e m_h)^{3/4} \exp(-\frac{E_g}{2K_0 T}) \quad (4.2.3)$$

其中, I_{diff}^n 、 I_{diff}^p 分别为 n 区和 p 区向耗尽层的扩散电流, n_i 为本征载流子浓度, D_p 、 D_n 分别为 n 区中空穴扩散系数和 p 区中电子扩散系数; τ_p 、 τ_n 分别

为 n 区空穴寿命和 p 区电子寿命， N_d 、 N_a 分别为 n 区和 p 区的掺杂浓度， N_p 为 I 区掺杂浓度， A 为结面积， V 为探测器所加偏压，正向偏压时 V 是正值。对于平面型结构的 InGaAs 单边突变异质结 (p^+n) 器件，P 区是重掺杂的帽层，与 InGaAs 吸收层相比，带隙较宽，本征载流子浓度 n_i 较小，所以可以忽略 P 区向耗尽层的电子扩散电流，只用考虑 InGaAs 层向耗尽层的空穴扩散电流 I_{diff}^n 。

产生复合电流起源于耗尽区热激发产生的载流子在电场作用下向势垒两边漂移，产生复合电流在耗尽区比较强，其表达式可以表示为^[118]：

$$I_{gr} = \frac{qn_i AW}{\tau_{eff}} [\exp(\frac{qV}{2KT}) - 1] \quad (4.2.4)$$

其中， τ_{eff} 是有效载流子寿命， $W = [2\varepsilon(V_b + V)/qN_d]^{1/2}$ 为耗尽层宽度， $V_b = (kT/q) \ln(N_D N_A / n_i^2)$ 为内建电势差。

隧穿电流来源于载流子的隧道效应，对探测器施加较高的偏压时，一般隧穿电流占主要成分，隧穿电流分为带间隧穿电流和陷阱辅助隧穿电流，可以分别表示为^[119]：

$$I_t^{b-b} = \gamma A \exp(-\frac{\Theta m_0^{1/2} E_g^{3/2}}{qE_m \hbar}) \quad (4.2.5)$$

$$I_t' = CE_m V \exp(-\frac{\Theta m_0^{1/2} E_t^{3/2}}{q\hbar E_m}) \quad (4.2.6)$$

其中， E_g 为禁带宽度、 $E_m = 2(V_b + V)/W$ 为耗尽层电场强度、 $\Theta = \alpha(2m_e^2 / m_0)^{1/2}$ 、 C 为隧穿常数、 E_t 为缺陷能级。

探测器在实际的工作中，还存在一些其他的电流，比如表面和界面复合电流、漏电流等。例如表面缺陷以及污染可以在半导体表面形成的复合中心，产生表面复合电流，可以表示为^[120]：

$$J_s = \frac{1}{2} q n_i S_0 \quad (5.3.7)$$

其中， S_0 为表面复合速率。

在不同的环境温度、施加偏压等外界因素影响下，探测器的暗电流常常受

一种或者多种电流机制共同影响。

4.3 低吸收层掺杂浓度的 InGaAs 器件研究

4.3.1 探测器芯片制备

为了研究不同掺杂浓度的 InGaAs 吸收层对器件性能的影响,以及分析器件在不同偏压下暗电流的成分,采用 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层的掺杂浓度分别为 $5.0 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 和 $5.0 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 的两种外延材料研制了 P/A 比不同的测试结构器件,外延材料是采用 MOCVD 技术生长的晶格匹配材料,编号分别为 F21 和 F27,参数如表 4.3.1 所示。采用标准的闭管扩散工艺研制的测试结构光敏芯片如图 4.3.1 所示,两种材料研制的器件钝化膜均采用 PECVD 技术淀积的 SiN_x 薄膜。器件 B1~B7 的光敏元均采用正方形结构,边长分别为 $50\mu\text{m}$ 、 $60\mu\text{m}$ 、 $80\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $120\mu\text{m}$ 、 $150\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$, P/A 比依次减小, P 电极分别引出,公共 N 电极采用背面和正面两种方式引出。

表 4.3.1 外延材料结构及参数

Tab. 4.3.1 The structure and parameters epitaxial materials

	F21		F27	
	Thickness	Concentration	Thickness	Concentration
InP	1	5.0×10^{16}	1	5.0×10^{16}
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	2.5	5.0×10^{15}	2.5	5.0×10^{16}
InP	0.5	$>2.0 \times 10^{18}$	0.5	$>2.0 \times 10^{18}$
InP sub.	350	$>3.0 \times 10^{18}$	350	$>3.0 \times 10^{18}$

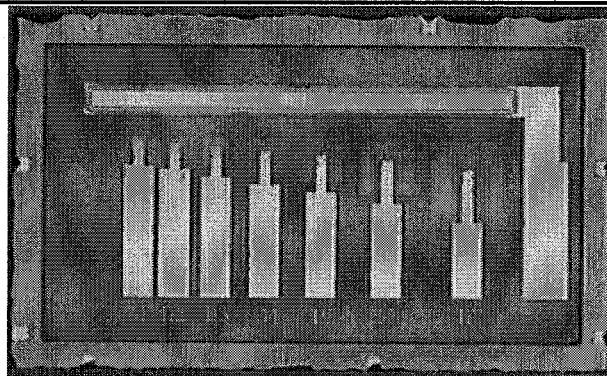


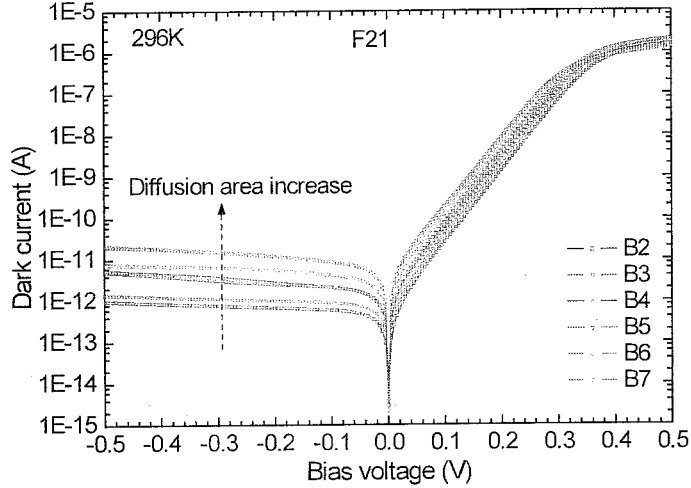
图 4.3.1 P/A 测试结构光敏芯片

Fig. 4.3.1 The P/A test structure of InGaAs detector chip

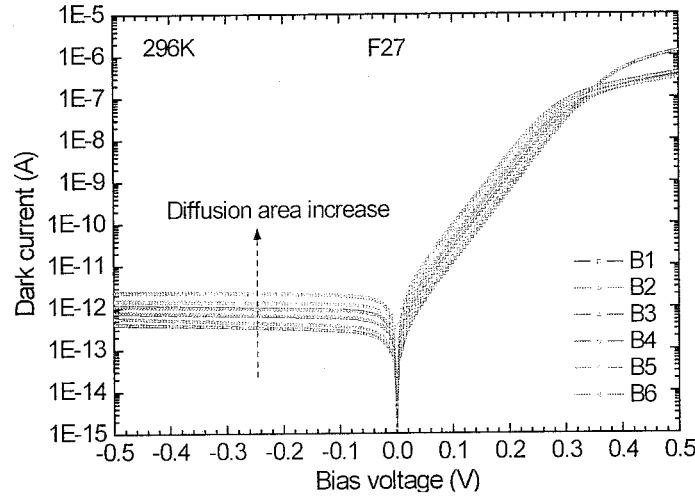
4.3.2 性能测试结果及讨论

将光敏芯片封装在杜瓦中,测试了吸收层掺杂浓度不同的两种器件在室温

下的 I-V 特性。如图 4.3.2 所示为抽测的器件在室温(296K)下的 I-V 特性曲线, 其中 F21 材料的器件 B1 和 F27 材料的器件 B7 均匀性较差, 未在图中标出。由图可知, 随着扩散区面积的增大, 器件的反向电流明显变大。



(a)F21(吸收层掺杂浓度 $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)



(b)F27(吸收层掺杂浓度 $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)

图 4.3.2 296K 器件的 I-V 特性曲线

Fig. 4.3.2 The I-V characteristics at 296K

当正向外加偏压趋近 p-n 结势垒大小时, 流过 p-n 结的电流会显著增大, 串联电阻上的压降相对 p-n 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, p-n 结压降修正为 $V_j = V - IR_s$ (R_s 为串联电阻), 此时流过二极管的电流可以表示为^[121]:

$$I = I_0 e^{\frac{q(V - IR_s)}{nKT}} \quad (4.3.1)$$

将 I-V 特性产生偏离之前的曲线外延, 在相同电流下它们的电压差就是串联电阻上的压降 $\Delta V = V - V_j = IR_s$, 因此利用 ΔV 与 I 的关系, 可以得到串联电阻。

F21 和 F27 两种材料研制的器件的平均串联电阻较大, 分别为 $1.33 \times 10^5 \Omega$ 、 $5.04 \times 10^5 \Omega$, 器件的欧姆接触工艺需要进一步研究。

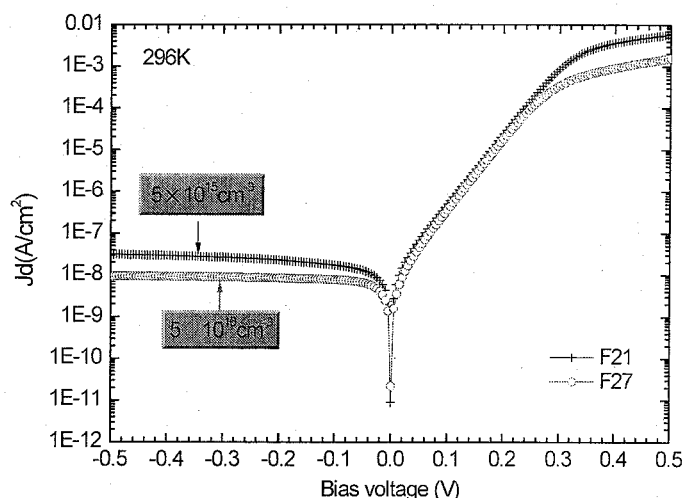


图 4.3.3 296K 器件的 I-V 特性曲线

Fig 4.3.3 The I-V characteristics at 296K

在室温下, F21 和 F27 两种器件的平均优值因子 R_0A 分别为 $2.07 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $3.33 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。采用公式 3.4.1 对器件的正向电流 $\ln(I)-V$ 特性曲线进行拟合, 拟合所得的平均理想因子 n 分别为 0.99、0.98, 正向电流成分主要为扩散电流。两种结构器件的暗电流密度曲线如图 4.3.3 所示, 在 -100mV 反向偏压下, 器件 F21 和 F27 的平均暗电流密度分别为 15.73 nA/cm^2 、 7.84 nA/cm^2 , 即与吸收层掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的器件相比, 吸收层掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的器件具有更低的暗电流密度, 两种器件的性能列于表 4.3.2 中。

表 4.3.2 器件 F21 和 F27 的平均性能

Tab 4.3.2 The mean characteristics of detector F21 and F27

	n	$R_S(\Omega)$	$R_0A (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$J_d (\text{nA/cm}^2 @ -0.1\text{V})$
F21	0.99	1.33×10^5	2.07×10^6	15.73
F27	0.98	5.04×10^5	3.33×10^6	7.84

器件暗电流的来源可以分为与器件扩散区面积成正比的电流成分, 以及与器件周长成正比的电流成分, 前者主要是体电流(包括体内电流和表面电流), 后者主要是侧面漏电流, 这样, 器件暗电流可以写为^[122]:

$$I = J_B A + J_S P \quad (4.3.2)$$

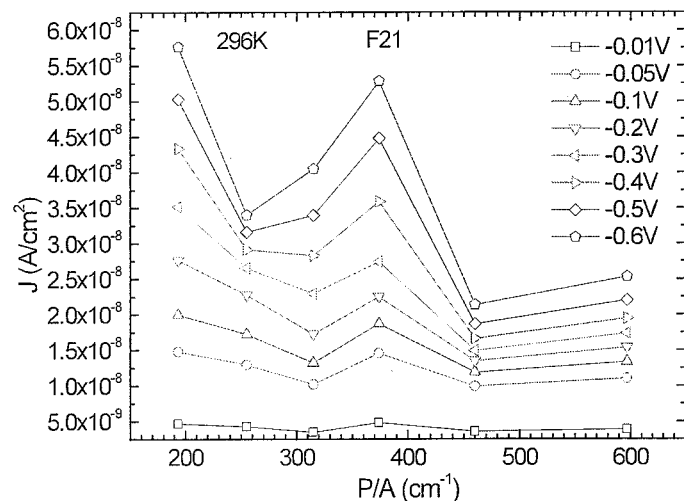
其中, A 为器件扩散区面积, P 为扩散区周长, J_B 为体电流密度, J_S 为侧面漏电流密度, 那么器件的暗电流密度可表示为:

$$J = \frac{I}{A} = J_B + J_s \frac{P}{A} \quad (4.3.3)$$

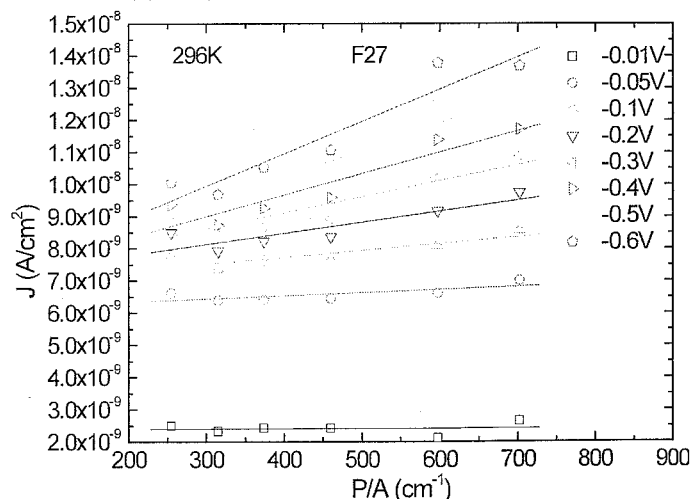
通过分析暗电流密度与器件 P/A 的关系可以获得器件暗电流的成分。在反向偏压下, 当 $V \gg K_0 T / q$ 时, 由扩散电流和产生复合电流的公式, 可以得出:

$$\frac{J_{diff}}{J_{gr}} = \frac{n_i \tau_{eff}}{N_D W} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \quad (4.3.4)$$

由上式可以看出, 随着反向偏压的增大, 耗尽区宽度 W 增大, 扩散电流与产生复合电流大小的比值将会越来越小, 所以当偏压增大到一定程度时, 扩散电流相比于产生复合电流小到可以忽略不计。



(a) F21 (吸收层掺杂浓度 $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)



(b) F27 (吸收层掺杂浓度 $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)

图 4.3.4 不同偏压下 P/A 与暗电流密度的关系曲线

Fig. 4.3.4 The curve of P/A vs dark current density

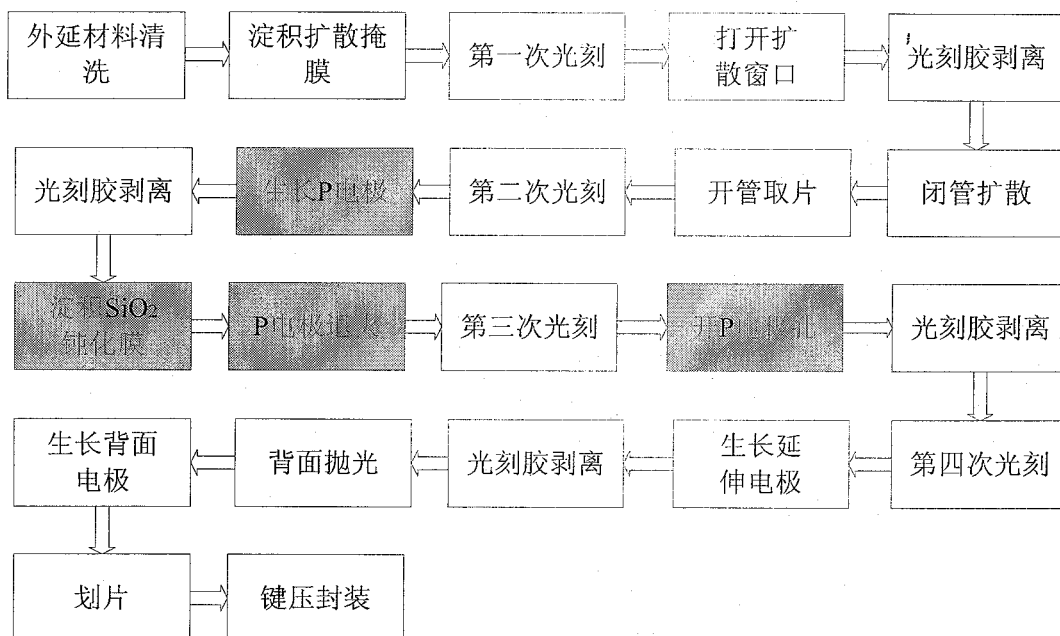
图 4.3.4 所示为不同的反向偏压下, 两种器件的 P/A 与暗电流密度的关系。

由图可知,对于吸收层掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 的器件 F21,不同偏压下的暗电流密度与 P/A 值并没有直接的联系,暗电流主要来自于与扩散区面积有关的器件的体内(包括表面);而吸收层掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的器件 F27,其暗电流密度与器件的 P/A 值成线性关系,而且随着对探测器施加较高的反向偏压,暗电流密度与 P/A 的斜率随着偏压的增大而增大。由于反向偏压越大,与器件周长有关的侧面漏电流占主要成分,而扩散电流可以忽略,掺杂浓度越高的材料具有越多的位错等晶体缺陷,表现为产生复合中心,而在掺杂浓度较低的器件 F21 中表现不明显。

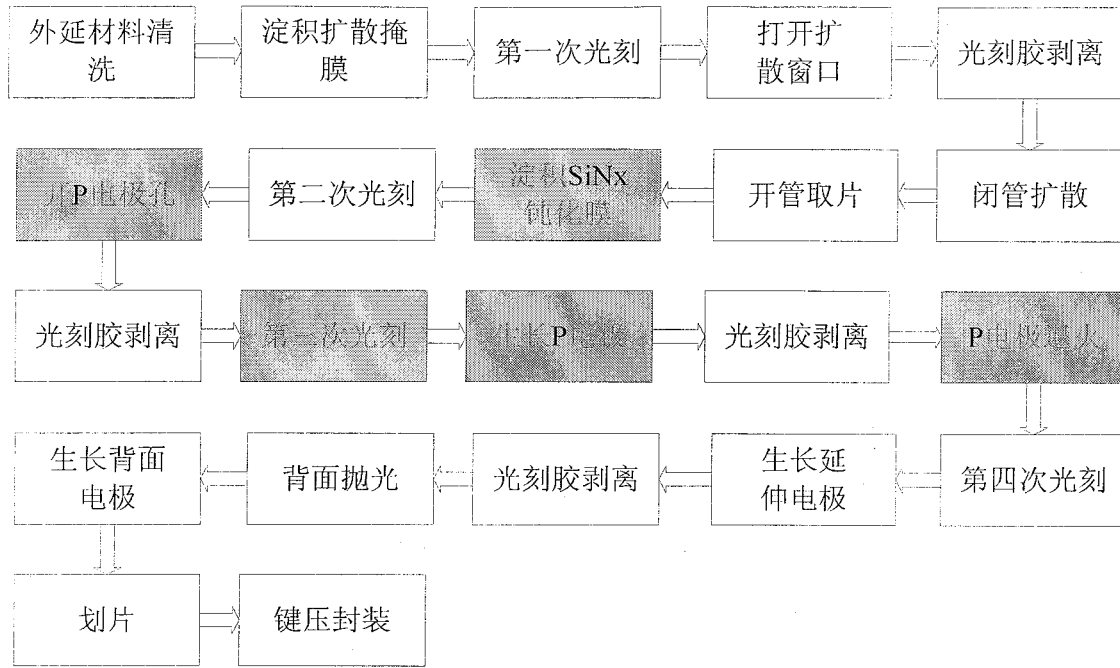
4.4 常规波长 256×1 线列 InGaAs 探测器研制

4.4.1 探测器芯片制备

正照射 256×1 线列探测器制备所采用的 $\text{N-InP/n-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As/N}^+\text{-InP}$ 外延薄膜材料是采用 MOCVD 生长技术在 $\text{N}^+\text{-InP}$ 导电衬底上生长的,为了对比不同钝化膜的钝化效果,采用标准的闭管扩散工艺制备了两种钝化膜的器件,分别采用了磁控溅射技术淀积的 SiO_2 薄膜和 PECVD 技术淀积的 SiN_x 薄膜作为钝化膜,考虑到两种介质的折射率不同,淀积的薄膜厚度分别为 280nm 和 210nm,



(a) SiO_2 钝化膜



(b) SiN_x 钝化膜

图 4.4.1 256×1 制备工艺流程

Fig. 4.4.1 The fabrication process of 256×1 detector array

增透 $1.5\mu\text{m}$ 波长。两种工艺步骤均在薄膜淀积完毕后进行 P 电极退火，器件的制备流程如图 4.4.1 所示。

研制的光敏芯片如图 4.4.2 所示，器件扩散区面积 $25 \times 500\mu\text{m}^2$ 、中心距为 $50\mu\text{m}$ 、P 电极双边引出、公共 N 电极采用背电极结构并通过银胶与导电基板互连后引出，采用保护环结构对光敏元进行定义和隔离，保护环宽度 $5\mu\text{m}$ 、保护环与扩散区设计间距为 $10\mu\text{m}$ ，光敏芯片总面积 $13.55 \times 2.70\text{mm}^2$ 。

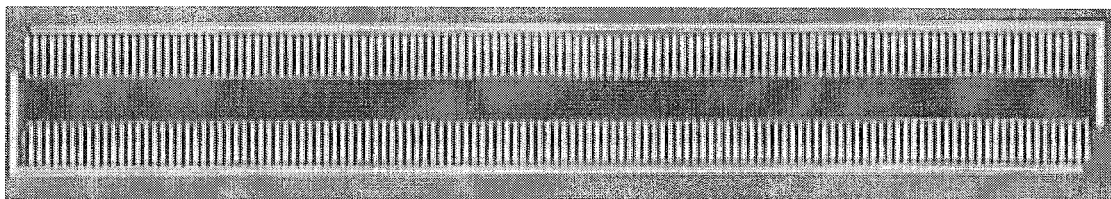


图 4.4.2 正照射 256×1 线列光敏芯片

Fig. 4.4.2 The front-illuminated InGaAs detectors

4.4.2 性能测试结果及讨论

采用 LBIC 技术扫描了器件的光响应均匀性，如图 4.4.3 所示为两种器件任意相邻的三元在室温下(296K)下的扫描图。为方便进行对比分析，将器件的横向 LBIC 响应电流信号进行了归一化处理如图 4.4.4 所示。

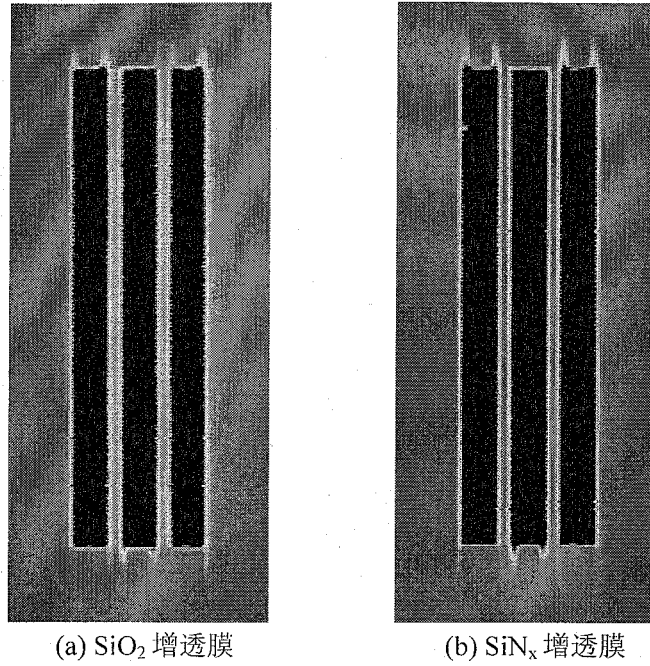


图 4.4.3 296K 下器件的 LBIC 光响应扫描图

Fig 4.4.3 Photoresponse uniformity maps of by LBIC at 296K

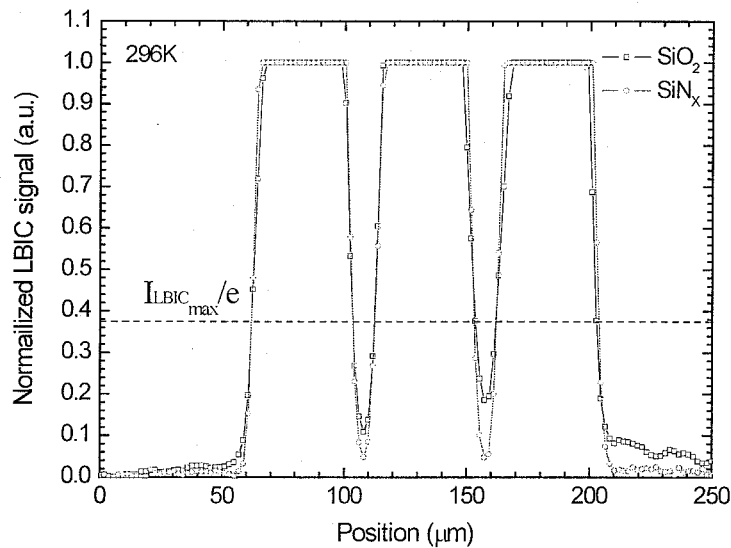


图 4.4.4 296K 下器件的横向信号响应曲线

Fig 4.4.4 Line-scan profiles of the detector at 296K

从图中可以看到，保护环在进行相邻光敏元隔离方面起到了显著的作用，其中，SiN_x 钝化膜器件的相邻光敏元之间的信号较小，保护环的隔离效果要优于 SiO₂ 钝化膜器件。LBIC 信号电流下降至最大值的 1/e 时，两种器件的实际光敏区面积约为 $40 \times 500 \mu\text{m}^2$ ，图中光敏元尖端响应较大是因为采用了 $25 \times 50 \mu\text{m}^2$ 的遮盖电极所致。

将光敏芯片封装在杜瓦中，测试了钝化膜不同的两种器件在常温下的光电

特性。如图 4.4.5 所示为抽测的器件在室温(296K)下的 I-V 特性曲线, 由图可知, SiN_x 钝化膜器件的电流电压特性要优于 SiO_2 钝化膜器件, 在 -100mV 反向偏压下两种器件的平均暗电流密度分别为 $26.8\text{nA}/\text{cm}^2$ 、 $41.2\text{nA}/\text{cm}^2$, 拟合正向电流获得理想因子 n 分别为 1.00 和 1.04, 都非常接近 1, 说明正向电流成分主要为扩散电流; 平均优值因子 R_0A 分别为 $1.15 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $1.20 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。 SiN_x 钝化膜器件与 SiO_2 钝化膜器件相比具有较低的暗电流密度, 反映出采用 PECVD 生长技术淀积的 SiN_x 薄膜具有更好的钝化效果。

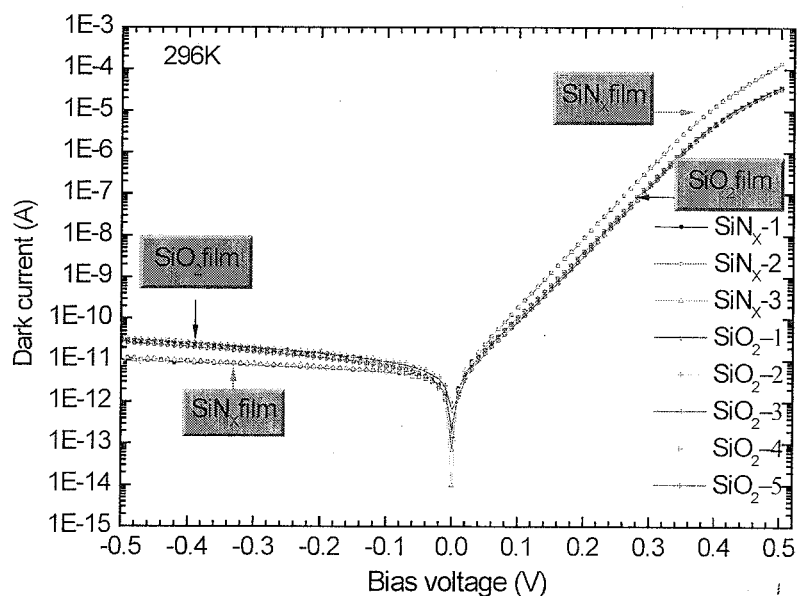


图 4.4.5 296K 器件的 I-V 特性曲线

Fig 4.4.5 The I-V characteristics at 296K

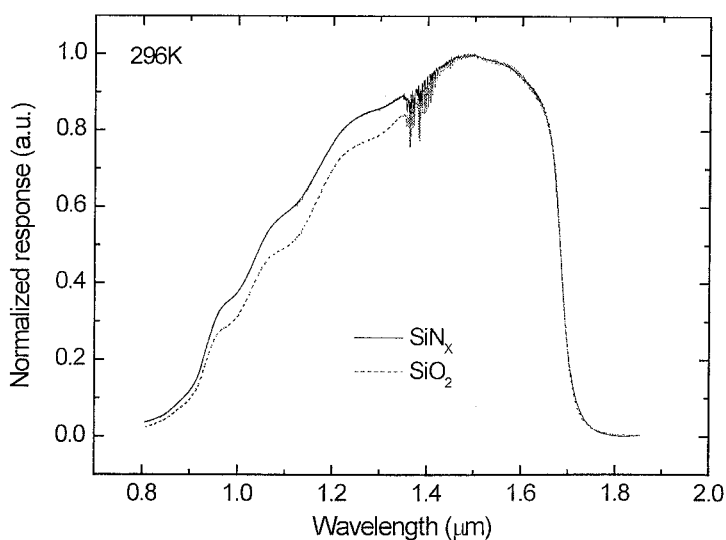


图 4.4.6 296K 下器件的相对光谱响应曲线

Fig 4.4.6 The response spectrum of detectors at 296K

两种器件在 296K 温度下归一化的相对光谱响应曲线如图 4.4.6 所示, SiN_x 钝化膜器件与 SiO_2 钝化膜器件的光谱均响应在 $0.90\sim 1.68\ \mu\text{m}$ 波段, 峰值波长 $\lambda_p=1.49\ \mu\text{m}$, 器件的 G 因子分别为 78 和 77。

采用黑体作为光源, 对抽测器件进行了信号、噪声测试, 测试条件为: $T_B=900\ \text{K}$ 、 $T_0=300\ \text{K}$ 、 $\Delta f=80\ \text{Hz}$ 、调制频率 $800\ \text{Hz}$ 、黑体孔径 $d=5\ \text{mm}$, SiN_x 钝化膜器件与 SiO_2 钝化膜器件的黑体出射孔与探测器距离 L 分别为 $16.5\ \text{cm}$ 、 $15.2\ \text{cm}$ 。测试结果表明, 两种器件所抽测元的平均峰值探测率 $D_{\lambda_p}^*$ 分别为 $1.21\times 10^{12}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 、 $1.08\times 10^{12}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

综上, 在探测器暗电流、相邻光敏元隔离、峰值探测率性能上, SiN_x 钝化膜器件都要优于 SiO_2 钝化膜器件。在平面型 InGaAs 器件的制备中, 扩散完毕后在芯片表面淀积一层 SiN_x 薄膜, 除了可作为 InGaAs 器件的钝化外, 还起到了有效增透的作用。

4.5 长波扩展 256×1 线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器研制

4.5.1 探测器芯片制备

通过增加 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料中 In 的组分含量使材料的禁带宽度相应减小, 高 In 组分的 InGaAs 探测器响应波长可以扩展到 $3.0\ \mu\text{m}$, 相对于工作在同一波段其它类型的探测器, 具有可在室温或热电制冷环境下工作、高均匀性、高量子效率和高灵敏度等优点^[123]。

前期主要采用了背照射台面型器件结构, 包括 32×32 、 64×16 、 64×64 及 640×1 等焦平面探测器, 其中 640×1 线列 InGaAs 线列探测器在室温下的峰值波长为 $1.92\ \mu\text{m}$, 截止波长 $2.4\ \mu\text{m}$, 在 $1\ \text{ms}$ 积分时间, 一级热电制冷条件下焦平面探测器的平均峰值探测率为 $2.01\times 10^{11}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$, 响应非均匀性 8.77% , 平均量子效率 40.3% ^[124]。在平面型器件方面研究较少, 在 NIN 型 $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}/\text{InP}$ 材料上通过闭管扩散方式, 制备了单元及八元平面型红外探测器件^[125], 并对器件的变温 I-V 特性进行了研究。本节研究了正照射平面型长波扩展 256×1 线列 InGaAs 探测器在常温及低温下的光电性能。

与 2.2 小节快速热退火实验使用的材料一致, 本小节采用金属有机化合物化学气相沉积 (MOCVD) 生长的 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}/\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{InAsP}\ \text{buf.}/\text{InP}$ 外延材

料, 先在掺杂浓度为 $3.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 的 N^+ -InP 衬底上生长一层 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 缓冲层, 然后生长厚度 $3 \mu\text{m}$ 非故意掺杂的浓度为 $3.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的吸收层和厚度为 $1 \mu\text{m}$ 掺杂浓度为 $3.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的帽层。如图 4.5.1 所示为外延材料表面的偏振照片和横截面的 SEM 照片, 由于 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ 帽层同 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 吸收层之间存在较大的晶格失配, 材料表面平整度较差。

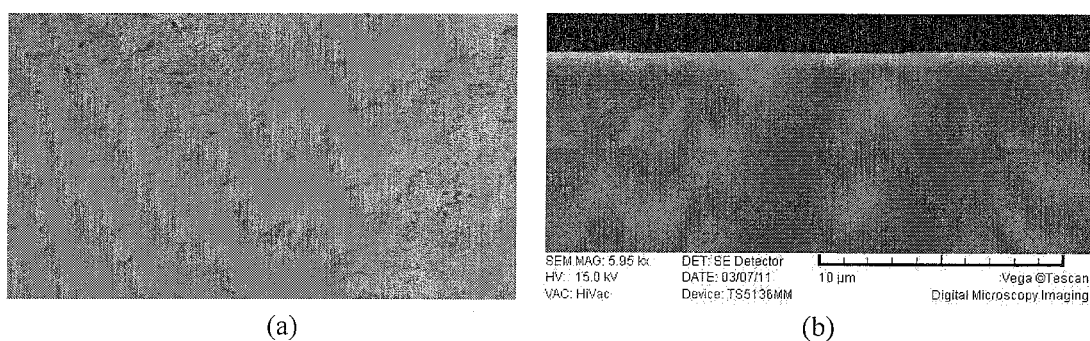


图 4.5.1 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ 帽层外延材料(a)表面的偏振照片和(b)横截面扫描电镜照片
Fig. 4.5.1 (a) The polarized micrograph and (b) SEM micrographs of the epitaxial material with $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}\text{InP}$ layer

采用了标准的正照射平面型 InGaAs 制备工艺, Zn_3As_2 作为扩散源, SiN_x 作为扩散掩膜, 研制了长波扩展的 256×1 线列 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器, 研制的光敏芯片如图 4.5.2 所示, 器件扩散区面积 $25 \times 500 \mu\text{m}^2$ 、中心距为 $50 \mu\text{m}$ 、P 电极双边引出、公共 N 电极采用背电极结构并通过银胶与导电基板互连后引出, 相邻光敏元之间引入保护环结构, 保护环宽度 $4 \mu\text{m}$, 保护环距离扩散区 $10.5 \mu\text{m}$, 光敏芯片总面积 $13.55 \times 2.7 \text{mm}^2$ 。

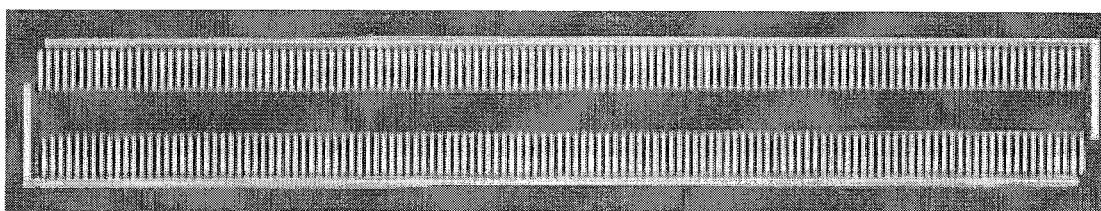


图 4.5.2 正照射长波扩展 256×1 线列 InGaAs 光敏芯片
Fig. 4.5.2 The front-illuminated wavelength-extended 256×1 InGaAs linear detector

4.5.2 性能测试结果及讨论

将探光敏芯片封装在真空杜瓦中, 采用 Keithley6430 可编程电流—电压测试仪测试其 I-V 特性曲线。共抽测 24 元, 器件在室温 296K 温度下的 I-V 特性曲线如图 4.5.3 所示。图中可以看到, 所抽测器件已经实现了 p-n 结的制备, 均匀性较好, 无盲元, 但是反向偏压下的暗电流比较大, 平均 R_0A 约 $0.07 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

图 4.5.4 所示为器件 B2 的变温 I-V 特性曲线, 器件的暗电流随着温度降低出现明显下降, 但是当温度下降至 193K 以后变化不再明显, 此时, 反向电流受偏压影响很大。

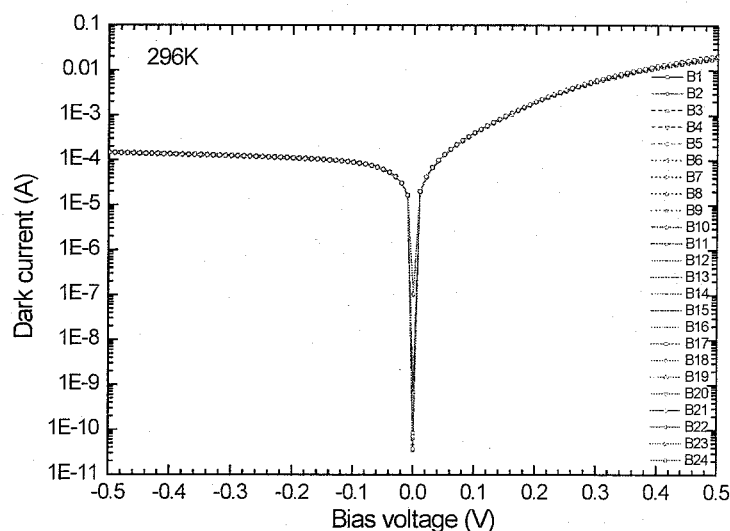


图 4.5.3 296K 温度下器件的 I-V 特性曲线

Fig. 4.5.3 The I-V characteristics at 296K

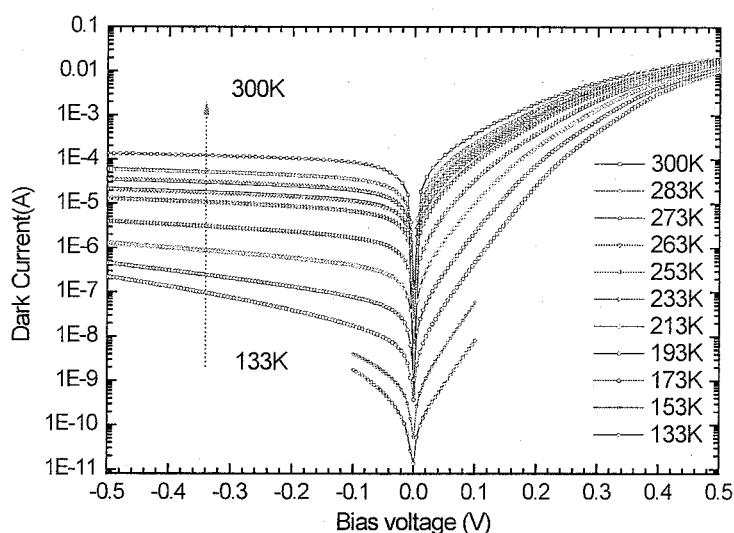


图 4.5.4 器件 B2 的变温 I-V 特性曲线

Fig. 4.5.4 Temperature dependent I-V characteristics of detector B2

器件 B2 在不同反向偏压下的暗电流随温度的变化曲线如图 4.5.5 所示; 器件的反向电流可以分为三个区域, 在近室温的“ I ”区, 器件的反向电流在不同的偏压下变化不大, 此时器件暗电流的主要成分为扩散电流及产生复合电流^[18];

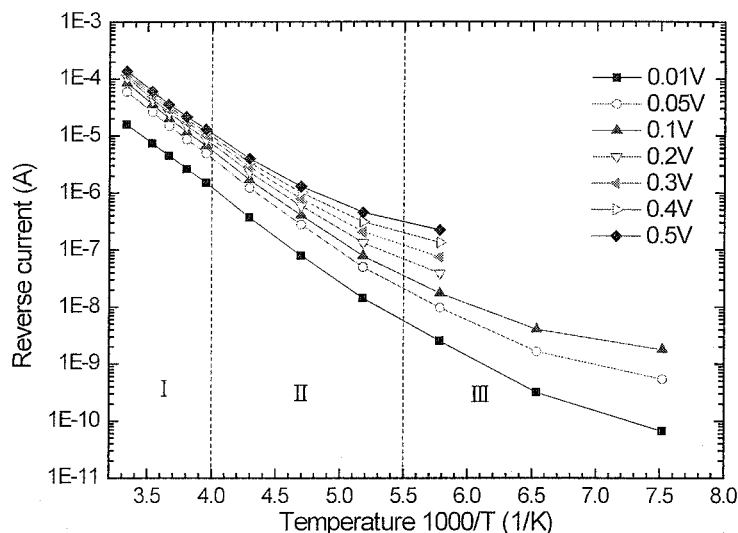


图 4.5.5 器件 B2 在反向偏压下的暗电流随温度和电压变化曲线

Fig. 4.5.5 Temperature dependent reverses I-V characteristics of detector B2

在“II”区随着温度的下降，本征载流子浓度 n_i 迅速下降，由公式 4.2.1 和 4.2.4 可知，导致扩散电流与产生复合电流此时急速下降，由缺陷引起的隧穿电流开始起作用，使得不同偏压下，器件的暗电流开始发生分离；在温度低于 180K 的“III”区，器件的暗电流与温度的依赖关系将会变小，趋于一个恒定的值，扩散电流与产生复合电流已经可以忽略，此时器件的暗电流只与所加偏压有关，主要暗电流机制为隧穿电流^[126,127]。

采用公式 3.4.2 对曲线的正向电流 $\ln(I)-V$ 特性曲线进行拟合，如图 4.5.6 所示。从 300K 下降到 133K，拟合正向电流得到器件的理想因子分别为 2.65、2.42、2.34、2.23、2.14、1.83、1.50、1.22、1.02、0.83、0.85。在正向大偏压下，公式 4.2.4 中的 $\exp(qV/2KT)$ 相对 1 可以忽略，而且器件的耗尽区变小，但是由于晶格失配导致材料体内和不同外延层的界面中存在较多的位错缺陷，这些缺陷表现为产生复合中心，并且掺杂 Zn 元素在晶格失配材料中具有比较大的扩散速度，掺杂 Zn 元素并不能被完全激活，当温度 $>250\text{K}$ 时，理想因子比较接近 2，正向电流以产生复合电流为主；当温度在 250K~193K 时，正向电流由产生复合电流和扩散电流共同组成；当温度进一步降低，扩散电流和产生复合电流均降低，但是后者的降低速度更为明显，此时理想因子接近 1，正向电流的主要成分是扩散电流。要降低器件在反向的暗电流，使正向的电流以扩散电流为主，材料的生长及掺杂元素的激活都需要进一步优化。

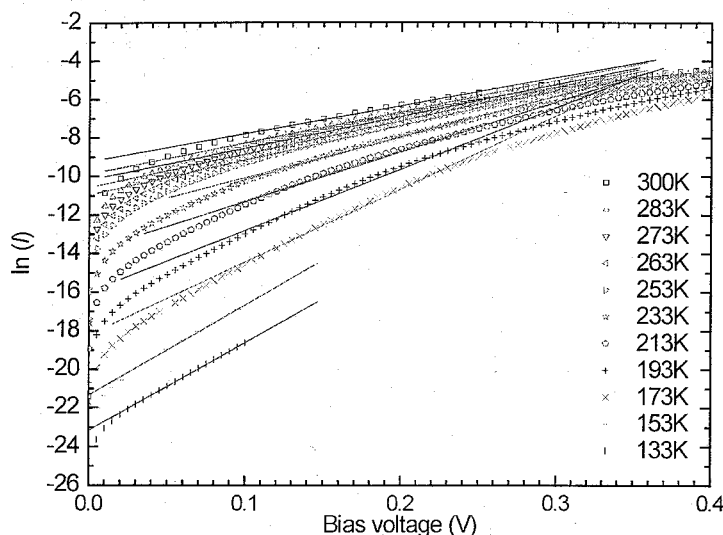


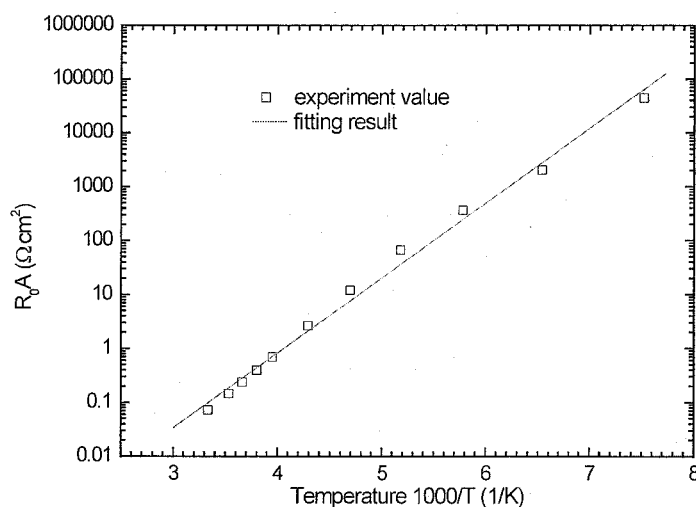
图 4.5.6 器件 B2 的正向 I-V 曲线及拟合结果

Fig. 4.5.6 Temperature dependent forward I-V characteristics and the fitting result of detector B2

一般认为 R_0A 受产生复合电流的影响由下式表示^[128]:

$$R_{gr0}A = 2kT\tau_{gr} / (q^2n_iW) \quad (4.5.1)$$

其中, τ_{gr} 为产生-复合少数载流子寿命。利用公式 4.2.4 和 4.5.1 对器件 B2 在 300K~133K 内的 R_0A 进行拟合, 测试结果及拟合结果如图 4.5.7 所示, 二者吻合很好, R_0A 与温度的倒数 $1/T$ 成指数关系, 此时 R_0A 主要受耗尽区载流子的产生-复合影响^[129,130]。李永富等人报道的采用 InP/In_{0.82}Ga_{0.18}As/InP 制备的延伸到 2.55 μ m 的探测器在温度<158K 时, R_0A 趋于一个定值, 主要受“陷阱辅助隧穿效应”影响^[128], 两者的差异可能是由两种外延材料中的陷阱密度和陷阱态能级不同导致的。

图 4.5.7 器件 B2 的 R_0A 随温度的变化Fig. 4.5.7 Temperature dependent R_0A product of detector B2

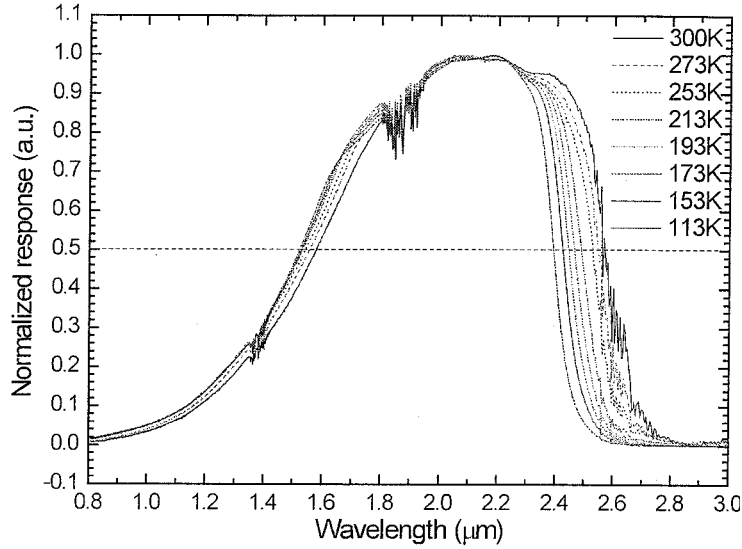


图 4.5.8 器件 B2 的变温相对光谱响应曲线

Fig. 4.5.8 Temperature dependent response spectrum of detector B2

器件 B2 的变温响应光谱为如图 4.5.8 所示, 在 300K, 峰值响应半高宽下的长波截止波长和短波截止波长分别为 $2.57\mu\text{m}$ 和 $1.58\mu\text{m}$ 。对于 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 三元体系, 禁带宽度随温度及组分的变化可以表示为^[131]:

$$E_g(x, T) = E_g^{\text{InAs}}(0) - \alpha^{\text{InAs}} T^2 / (T + \beta^{\text{InAs}}) + \left[E_g^{\text{GaAs}}(0) - \alpha^{\text{GaAs}} T^2 / (T + \beta^{\text{GaAs}}) - E_g^{\text{InAs}}(0) + \alpha^{\text{InAs}} T^2 / (T + \beta^{\text{InAs}}) \right] x - 0.475x(1-x) \quad (4.5.2)$$

其中: $E_g^{\text{InAs}}(0) = 0.35\text{eV}$, $E_g^{\text{GaAs}} = 1.43\text{eV}$, $\alpha^{\text{InAs}} = 2.7 \times 10^{-4} \text{eV/K}$,

$\alpha^{\text{GaAs}} = 5.1 \times 10^{-4} \text{eV/K}$, $\beta^{\text{InAs}} = 83\text{K}$, $\beta^{\text{GaAs}} = 190\text{K}$ 。

对于 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 四元体系, 在温度 300K 下的禁带宽度可以表示为^[132]:

$$E_g(x, y) = 1.35 + 0.668x - 1.068y + 0.078y^2 \quad (4.5.3)$$

由上两式计算得, $T=300\text{K}$ 、 $x=0.8$, $y=0.6$ 时, $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 和 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ 的禁带宽度 E_g 分别为 0.48eV 、 0.74eV , 对应的截止波长 λ_c 分别为 $2.58\mu\text{m}$ 、 $1.68\mu\text{m}$, 同实验结果比较接近。为计算不同温度下的峰值探测率, 根据响应光谱计算的器件 G 因子列于表 4.5.1 中。

 表 4.5.1 器件B2在不同温度下的G因子和截止波长 λ_c

 Tab. 4.5.1 The G factor and cutoff-wavelength λ_c of detector B2 at different temperature

Temperature (K)	300	273	253	213	193	173	153	113
G	9.0	9.4	9.8	10.3	10.7	11.0	11.5	12.2
$\lambda_c (\mu\text{m})$	2.57	2.55	2.53	2.49	2.46	2.44	2.42	2.39

采用黑体作为光源,对抽测器件进行了信号、噪声测试,测试条件为: $T_B=900$ K、 $T_0=300$ K、 $\Delta f=80$ Hz、调制频率 800 Hz、黑体孔径 $d=8$ mm、黑体出射孔与探测器距离 $L=25$ cm。由测试结果计算器件在室温 300K 时的平均峰值探测率为 $7.25 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 平均峰值响应率 0.95 A/W , 量子效率 56.9%。焦平面探测器在变温下的测试结果如图 4.5.9 所示,随着温度的降低,噪声下降迅速,而响应信号先增大,在 273K 达到峰值,平均峰值探测率在 153K 达到 $1.11 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 响应非均匀性为 5.28%, 器件性能还需要进一步提高。

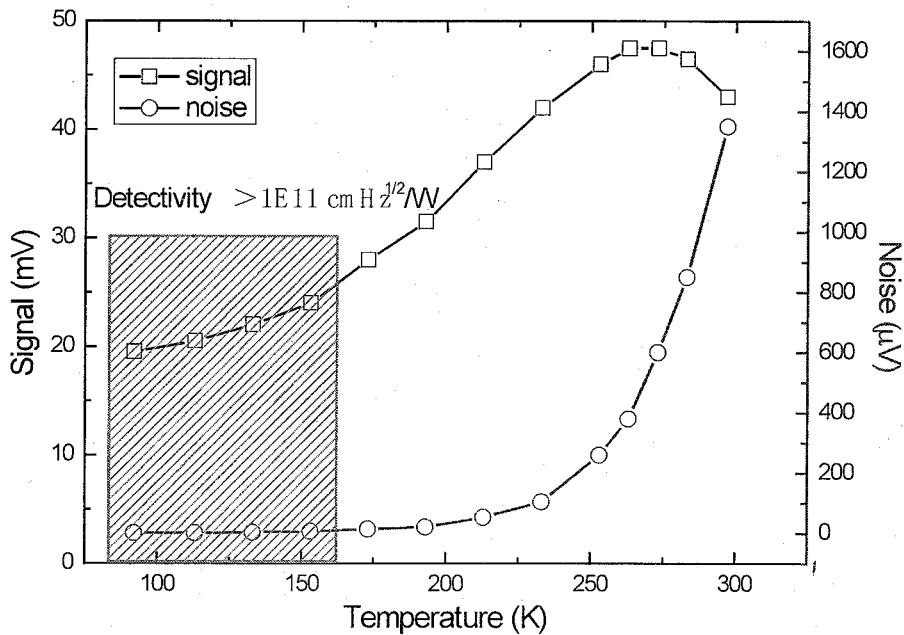


图 4.5.9 焦平面探测器的信号、噪声和探测率随温度的变化

Fig. 4.5.9 Temperature dependent signal and noise of FPAs detector

4.6 本章小结

本章主要在前期工艺优化的基础上研制了正照射平面型 InGaAs 焦平面探测器。

采用掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 和 $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的两种 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{47}\text{As}$ 吸收层的外延材料研制了 P/A 比不同的 InGaAs 测试结构器件,对于吸收层掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的器件,暗电流密度与器件的 P/A 成线性关系,反向电流主要是与器件周长有关的边缘漏电流;室温-100mV 反向偏压下,吸收层掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的器件暗电流密度约为 15.73 nA/cm^2 ,暗电流密度与 P/A 比变化不明显,暗电流正比于扩散区面积,表明器件的体内扩散电流是其主要来源;吸

收层掺杂浓度为 $5.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的器件暗电流密度约为 7.84nA/cm^2 ，暗电流密度随 P/A 比变化明显，与器件周长有关的侧面漏电流占主要成分。

研制了 SiN_x 和 SiO_2 两种钝化膜的正照射 256×1 线列 InGaAs 探测器，中心距 $50 \mu\text{m}$ ，两种器件在室温-100mV 反向偏压下的暗电流密度分别为 26.8nA/cm^2 、 41.2nA/cm^2 ，峰值探测率分别为 $1.21 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、 $1.08 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，表明采用 SiN_x 作为钝化膜可以得到比较良好的性能。

采用 MOCVD 技术生长的 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}/\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{InAsP buf.}/\text{InP}$ 外延材料，研制了长波扩展的 256×1 线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器，测试并分析了探测器在常温及低温下的光电性能。室温下，器件的波长响应范围为 $1.58 \mu\text{m} \sim 2.57 \mu\text{m}$ ，峰值探测率为 $7.25 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，峰值响应率为 0.95A/W ，量子效率 56.9%。250K~300K 范围内，正向电流以产生复合电流为主；193K~250K 范围内，正向电流由产生复合电流和扩散电流共同组成；133K~193K 范围内，正向电流的主要成分是扩散电流。随着温度的降低，焦平面探测器的噪声下降迅速，而响应信号先增大，在 273K 达到峰值，平均峰值探测率在 153K 达到 $1.11 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，响应非均匀性为 5.28%，外延材料质量和器件制备工艺还有待提高。

5 背照射平面型 InGaAs 焦平面探测器研制与性能分析

5.1 引言

前期研制的平面型结构器件均采用正面入射, 还未开展背面入射器件的研究。本章首先介绍了焦平面阵列探测器的性能参数, 然后在项目应用需求的基础之上, 采用第二章优化的工艺条件和参数首次研制了背照射平面型焦平面探测器, 包括 32×32 面阵焦平面探测器, 中心距 $30 \mu\text{m}$ 、扩散区面积 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 和 $23 \times 23 \mu\text{m}^2$; 双波段集成的 800×2 焦平面探测器, 中心距 $25 \mu\text{m}$ 、扩散区面积 $18 \times 18 \mu\text{m}^2$ 、光敏元采用一字型排列, 光敏芯片与读出电路通过 In 柱倒装焊形成焦平面探测器, 并测量分析了焦平面探测器的光电性能。

5.2 焦平面探测器主要的性能参数

红外焦平面探测器组件主要由红外探测器阵列芯片、读出电路芯片和封装组成。其工作性能既与探测器性能如量子效率、光谱响应、噪声谱、均匀性等有关, 还与信号的输出性能有关, 如电路输入级的电荷存储、均匀性、线性度、注入效率, 输出电路中的电荷转移效率、电荷处理能力等。短波红外焦平面阵列的主要性能参数包括信号电压、噪声电压、峰值探测率、响应不均匀性、电流响应率、盲元率、噪声等效功率、噪声等效温差、视场角等^[133,134]。

焦平面的信号电压表示为^[69]:

$$V_s = I_{\text{int}} T_{\text{int}} A_v / C_{\text{int}} \quad (5.2.1)$$

其中, I_{int} 为积分电流, T_{int} 为积分时间, A_v 为电路增益, C_{int} 为积分电容。由于积分电流包括光电流和暗电流, 因此焦平面探测器的信号电压由光信号和暗信号两部分组成。

噪声实质上是物理量围绕其平均值的涨落现象, 焦平面的噪声由瞬态噪声与空间噪声两部分组成, 其测量通常采用测量像元响应的均方根偏差的方法(即标准偏差)。焦平面的噪声电压表示为^[69]:

$$V_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_n(i) - \bar{V}_n)^2} \quad (5.2.2)$$

其中, $V_n(i)$ 为第 i 个像元的噪声电压, $\overline{V_n}$ 为所有像元的平均噪声电压。

焦平面的峰值探测率表示为^[18]:

$$D_{\lambda p}^* = gD_{bb}^* = \frac{gV_s 4L^2 \sqrt{1/2T_{\text{int}}}}{V_n \sigma (T_B^4 - T_0^4) d^2 \sqrt{A_D}} \quad (5.2.3)$$

焦平面响应的不均匀性定义为, 红外焦平面有效像元响应率均方根与平均响应率的百分比, 用焦平面的信号电压可以表示为^[69]:

$$U_{VS} = \frac{1}{\overline{V_s}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N [V_s(i) - \overline{V_s}]^2} \quad (5.2.4)$$

其中, $V_s(i)$ 为第 i 个像元的信号电压, $\overline{V_s}$ 为所有像元的平均信号电压。

电流响应率可以表示为^[69]:

$$R = G \frac{I}{P} = G \frac{V_s C_{\text{int}}}{T_{\text{int}} A_V P} \quad (5.2.5)$$

其中, G 为转换因子, I 为光电流, P 为辐射功率。

综上所述, 焦平面探测率等参数的测试, 可归结为响应信号电压 V_s 和噪声电压 V_n 的测试, 其它特性参数可根据定义计算得到。积分时间、噪声等效功率、噪声等效温差、视场角、帧周期、饱和辐照功率、动态范围等参数与红外系统的光学系统、电路设计以及特定应用场合等因素有关, 这里不进行一一说明。由于焦平面探测器的光敏元少则数十个, 多则成千上万, 它的测量方法比单管器件要复杂很多。

InGaAs 焦平面探测器测试系统如图 5.2.1 所示, 主要由黑体辐射源、示波器、数据发生器、差分放大器、A/D 卡等组成, 数据采样由计算机 Labview8.0 程序控制完成, 其示意框架图如 5.2.2 所示。

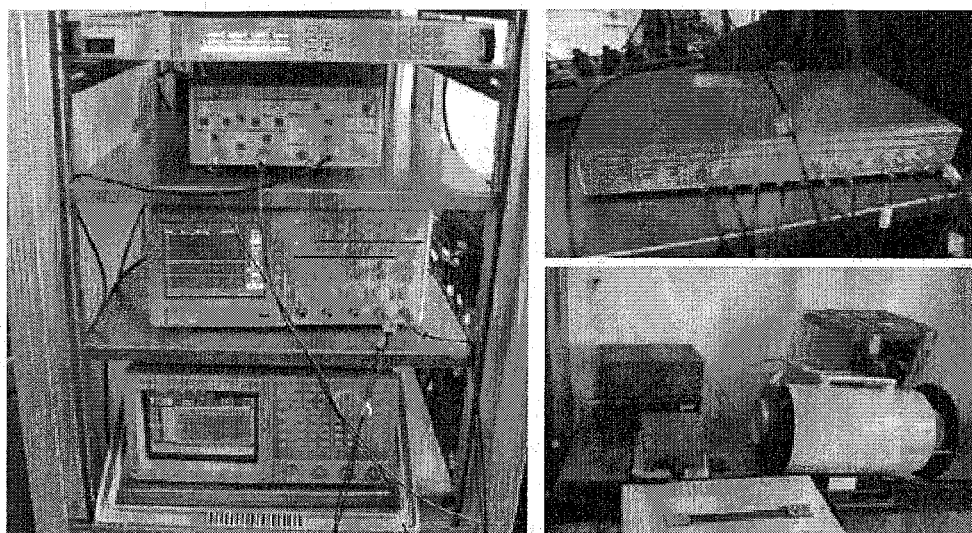


图 5.2.1 InGaAs 焦平面探测器测试系统

Fig. 5.2.1 InGaAs FPA measurement system

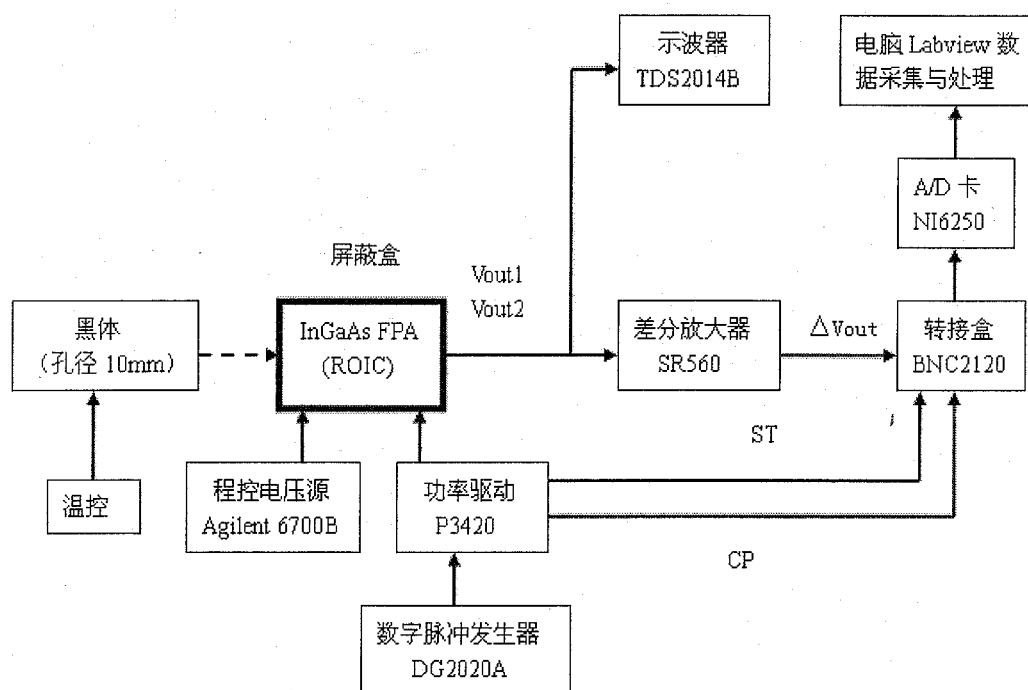


图 5.2.2 InGaAs 焦平面探测器测试系统示意框架图

Fig. 5.2.2 The schematic of InGaAs FPA measurement system

5.3 背照射 32×32 面阵 InGaAs 焦平面探测器研制

5.3.1 探测器芯片制备

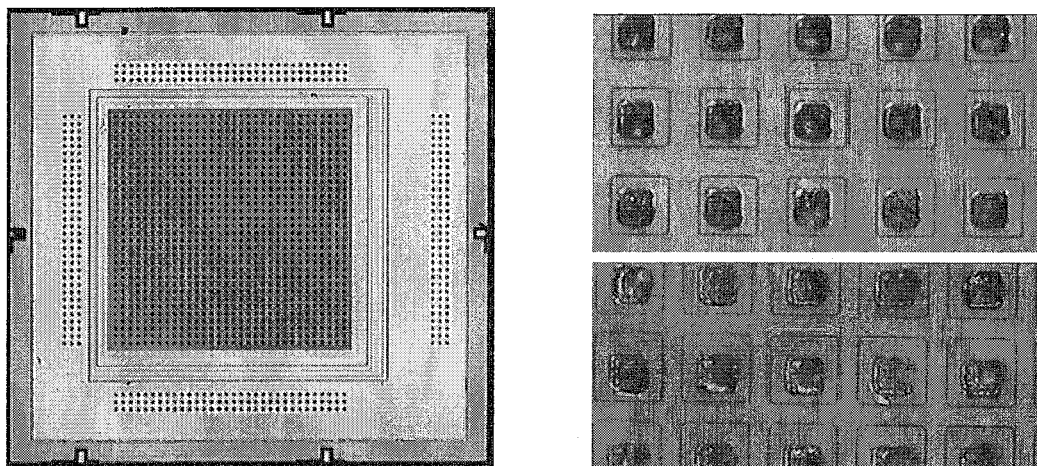
本小节采用 MOCVD 和 MBE 两种技术生长的 $\text{N-InP}/\text{n-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{N}^+\text{-InP}$ 外延薄膜材料, 研制了背照射平面型的 32×32 面阵焦平面探测器, 焦平面探测器通过光敏芯片与读出电路通过 In 柱倒装焊形成。外延材料结构及参数如表

5.3.1 所示, 光敏芯片及器件局部放大照片如图 5.3.1 所示, 采用两种类型的外延材料均制备了两种规格的器件, 扩散区面积分别为 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 和 $23 \times 23 \mu\text{m}^2$, 中心距均为 $30 \mu\text{m}$, 面阵周围引入了保护环结构, 保护环离面阵最外围的扩散区距离 $10 \mu\text{m}$, 并通过延伸电极与 N 电极相连, 光敏芯片总面积 $1.675 \times 1.775 \text{ mm}^2$, 两种规格的芯片采用同一套光刻版图制备而成, 对于扩散区面积为 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 和 $23 \times 23 \mu\text{m}^2$, 采用 MOCVD 外延材料制备的器件记为 F20、F23, 采用 MBE 外延材料制备的器件记为 M20、M23。

表 5.3.1 外延材料结构及参数

Tab. 5.3.1 The structure and parameters epitaxial materials

	material by MOCVD		Material by MBE	
	Thickness	Concentration	Thickness	Concentration
InP	1	$5.00\text{E}+16$	1	$3.00\text{E}+16$
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	2.5	$5.00\text{E}+16$	1.5	$3.00\text{E}+16$
InP	0.5	$>2.00\text{E}+18$	0.5	$2.00\text{E}+18$
InP sub.	350	$>3.00\text{E}+18$	350	

图 5.3.1 背照射 32×32 面阵 InGaAs 光敏芯片Fig. 5.3.1 The back-illuminated 32×32 InGaAs detectors array

5.3.2 阵列探测器边缘效应分析

在光敏芯片与电极板 In 柱倒装焊互连后, 对其中相邻的 20 元引出进行性能测试, 每 5 个一组, 互连后测试模块和其背面照片如图 5.3.2 所示。采用 LBIC 技术扫描了 F20 和 F23 两种规格器件面阵中其中一元和相邻五元在 296K 和 123K 温度下的光响应电流信号, 以确定光敏元的实际大小及填充因子, 并对平面型阵列探测器中的响应信号的边缘效应进行分析。

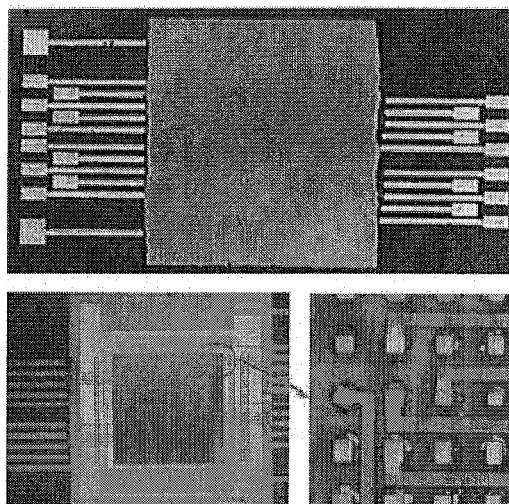
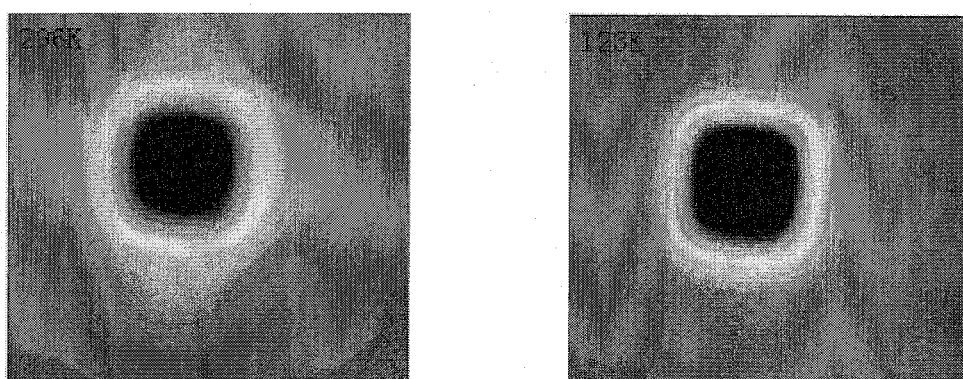
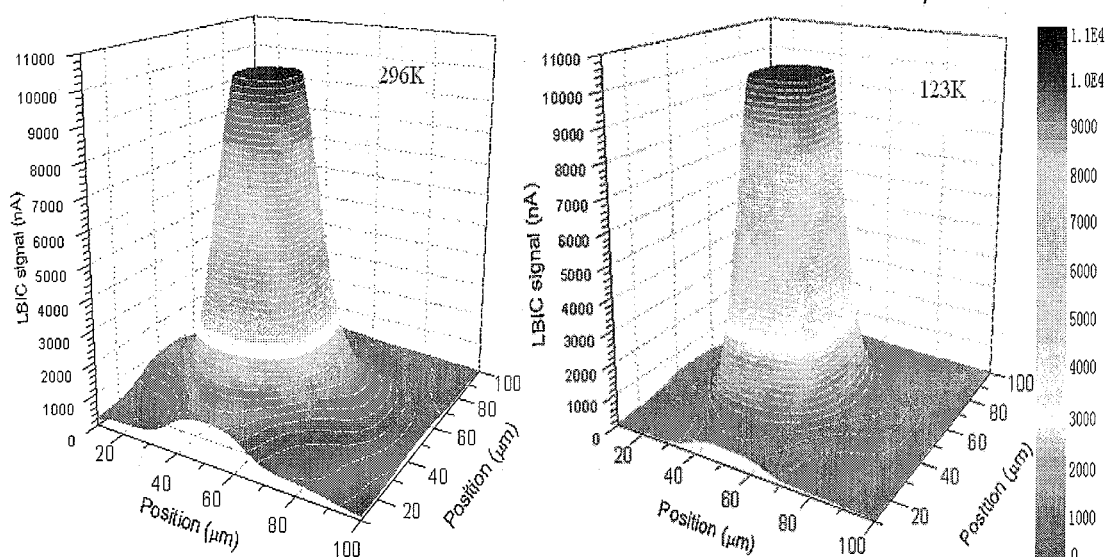


图 5.3.2 背照射 32×32 面阵 InGaAs 光敏芯片测试模块

Fig. 5.3.2 Testing module of the back-illuminated 32×32 InGaAs detector array



(a)



(b)

图 5.3.3 F23器件的LBIC (a)光响应扫描图及(b)相应信号等幅立体图

Fig. 5.3.3 (a) Photoresponse uniformity maps by LBIC and (b) 3D signals contour distribution

图 5.3.3 所示为 F23 面阵中所引出的其中一元在 296K 和 123K 温度下的

LBIC 扫描图及相应的信号等幅立体图, 测试条件: 步进 $1\mu\text{m}$, 激光强度 $4\%\times 2\mu\text{W}$ 。由图中可以看到在 $T=296\text{K}$, 测试元周围四个区域有明显的响应信号, 是由测试元对载流子的侧向收集产生, 侧向收集的载流子主要产生在两个区域: (1) 所测元同相邻四个光敏元之间的杂质未扩散区域, 宽度 $7\mu\text{m}$; (2) 相邻四个光敏元区域。小节 3.3.2 中曾讨论了 InGaAs 吸收层少子扩散长度的温度响应, 在 $T=123\text{K}$ 下, 少子扩散长度 $L_p=6\mu\text{m}$, 即此时只有所测元同相邻四个光敏元之间的杂质未扩散区域产生的载流子, 才能扩散到所测元而后被收集产生信号, 而相邻四个光敏元区域产生的载流子或被自身的结区收集, 或在扩散过程中复合消失, 故所测元周围的四个响应信号区域消失。

图 5.3.4 为 LBIC 信号电流响应曲线, 取电流信号下降至最大值的 $1/e$ 时的宽度并扣除测量误差, 计算得 F23 器件在 296K 和 123K 下的实际光敏区面积约为 $29.5\times 29.5\mu\text{m}^2$ 、 $26.5\times 26.5\mu\text{m}^2$, F20 器件与 F23 器件在 296K 下的实际光敏区面积基本相同, 光敏元的填充因子达到了 98%。

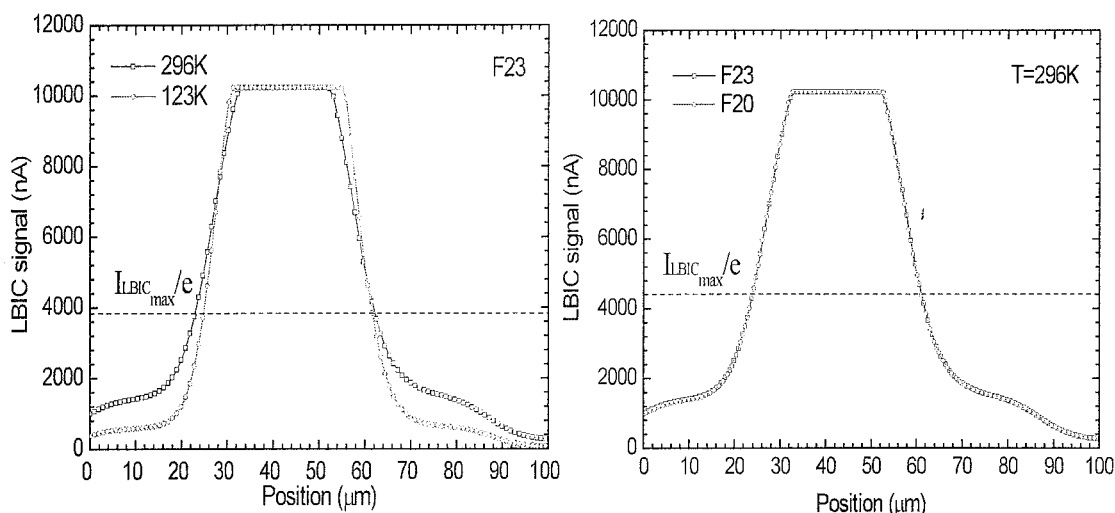


图 5.3.4 296K 下器件的横向信号响应曲线

Fig. 5.3.4 Line-scan profiles of the detector at 296K

根据光敏元处于面阵中不同的位置, 光敏元可以分为三类: (1) 面阵中四个顶角的光敏元, 其周围共有两个相邻元; (2) 面阵最边缘除去四个顶角的光敏元, 其周围有三个相邻元; (3) 剩余的其他光敏元, 其周围有四个相邻元。在平面型阵列探测器中, 由于所处位置的不同, 阵列最边缘的光敏元与内部的光敏元响应信号不同, 存在边缘效应。本实验测试了 296K 和 123K 下 F23 器件

五个相邻光敏元被不同强度的激光入射时的 LBIC 响应图, 其中器件在 296K 下被强度为 $2\mu\text{W}\times 4\%$ 的激光扫描时的光响应如图 5.3.5 所示。根据图中响应信号强弱, 不同的位置分别标记为 p1~p2, 沿图中 x1、x2 方向不同激光入射功率下的响应信号曲线如图 5.3.6 所示。

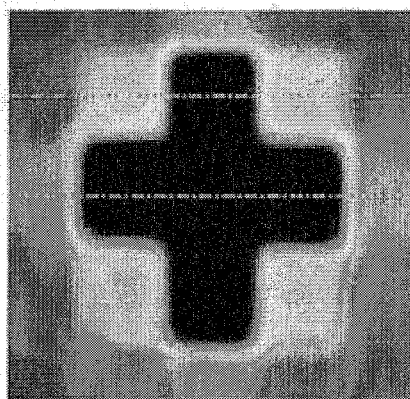


图 5.3.5 面阵中五个相邻光敏元的 LBIC 光响应扫描图

Fig. 5.3.5 Photoresponse uniformity maps of five adjacent pixels in array

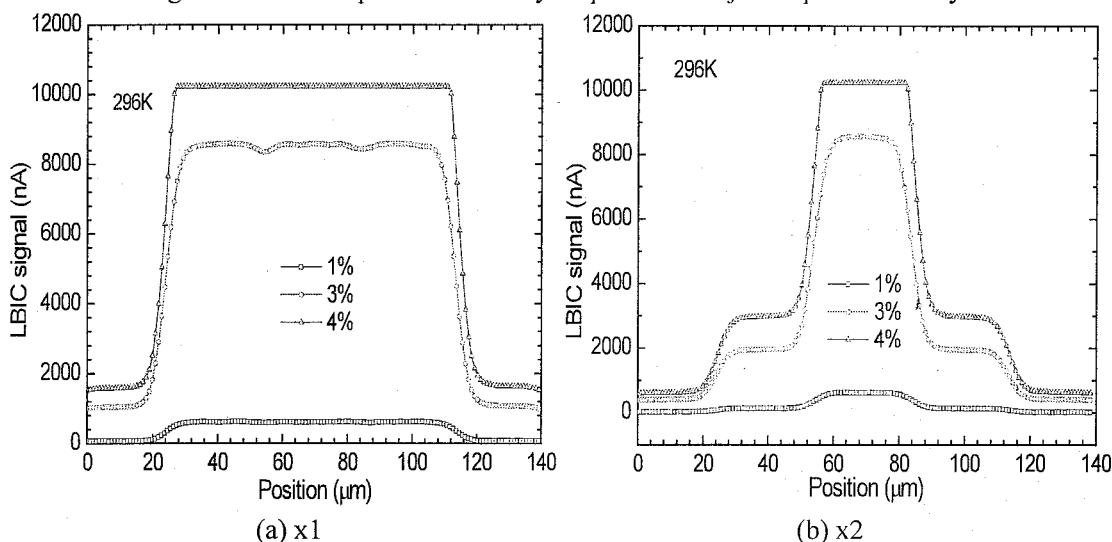


图 5.3.6 沿x1和x2的响应信号曲线

Fig. 5.3.6 Response signal curve along x1 and x2

由于 p1、p2、p5、p6 区域的光生载流子可以扩散到相邻的两个光敏元结区被收集, 而 p3、p4、p7、p8 区域的光生载流子只能被相邻的一个光敏元收集, 将 p1、p2、p5、p6 区域和 p3、p4、p7、p8 区域的平均信号分别记为 S1、S2, 提取不同区域的平均信号值列于表 5.3.2 中, 计算得, 两种温度下均有 $S1/S2 \approx 2$ 。平面型阵列探测器在正常工作时, 当外界辐射照射到探测器的入射面, 所有光敏元的信号同时被采集, 阵列内部未扩散区的光生载流子被相邻的几个光敏元共同争夺, 而阵列边缘处的光敏元可收集到的光生载流子较多, 因此, 边缘的

光敏元与内部的光敏元响应信号相比偏大。在对焦平面探测器进行信号测试时,这种由于光敏元所处位置不同而存在于阵列探测器中的边缘效应,在线列器件中表现为两端的信号偏大,在面阵器件中表现为行数或者列数的周期性。

表 5.3.2 测试元周围不同位置的响应信号

Tab. 5.3.2 The response signal around the tested pixels at different position

Laser power	1%		3%		4%	
Temperature (K)	296	123	296	123	296	123
S1 (nA)	137.9	49.3	1978.9	884.0	3003.1	1371.0
S2 (nA)	69.6	22.1	1062.3	458.4	1611.6	689.6

5.3.3 实验结果及讨论

将四种光敏芯片的测试模块置于屏蔽盒中进行了光电特性测试。图 5.3.7 为室温下所制备器件的抽测元典型的 I-V 特性曲线,每种光敏芯片至少抽测 4 元,对每元均测试 20 次求平均值。测试结果显示,抽测元均匀性良好,由图可知,扩散区 $20\mu\text{m}^2$ 的器件具有更低的暗电流,采用 MOCVD 外延材料制备的器件 $R_0A > 1 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$,在 -100mV 偏压下的暗电流密度 $J_d < 25 \text{ nA}/\text{cm}^2$,其性能要优于采用 MBE 外延材料制备的器件。几种器件正向电流的理想因子 n 均接近 1,以扩散电流成分为主。器件在室温-100mV 偏压下的暗电流密度和 R_0A 列于表 5.3.3 中。根据 LBIC 的测试结果,在计算中取四种器件的实际光敏区面积为 $29.5 \times 29.5 \mu\text{m}^2$ 。

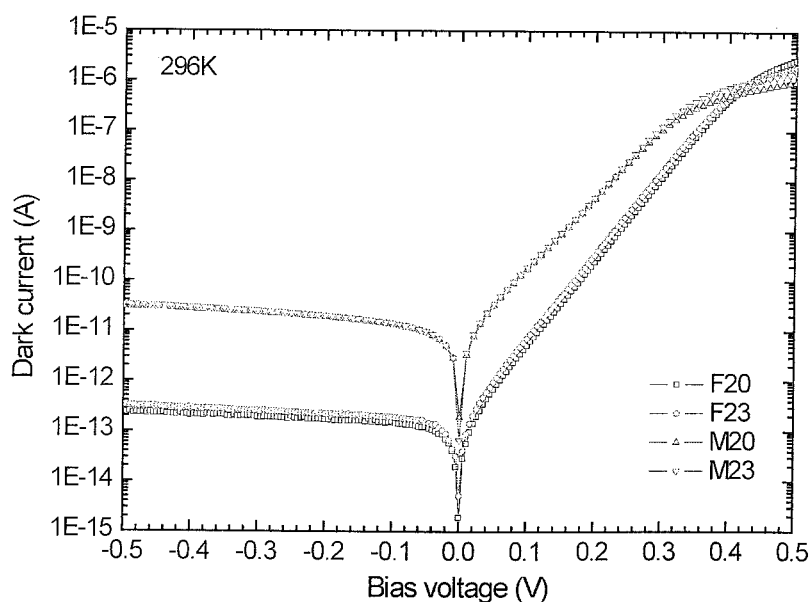


图 5.3.7 295K 温度下 32×32 面阵 InGaAs 器件的 I-V 特性曲线

Fig. 5.3.7 The I-V characteristics of 32×32 InGaAs detector at 295K

表 5.3.3 器件在-100mV偏压下的暗电流密度和 R_0A Tab.5.3.3 The density of dark current at 100mV and R_0A of detector

	F20	F23	M20	M23
R_0A ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	1.87×10^6	1.31×10^6	2.74×10^4	2.50×10^4
J_d (nA/cm ² @-0.1V)	16.66	23.04	1573	1716

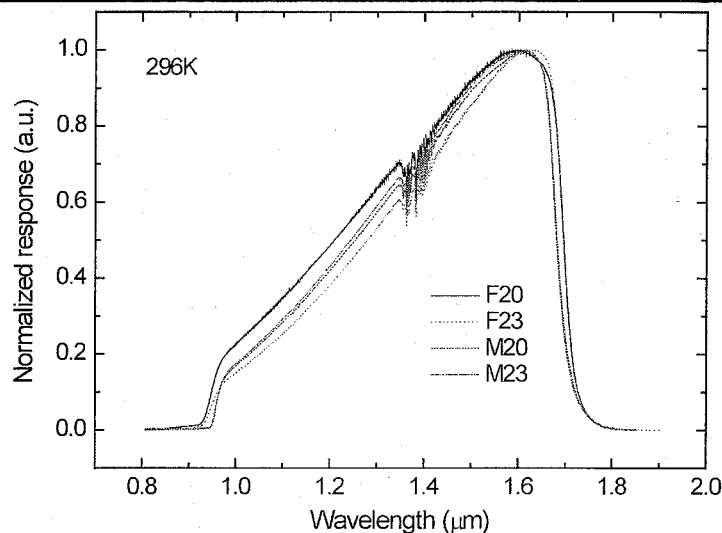


图 5.3.8 296K 下器件的相对光谱响应曲线

Fig. 5.3.8 The response spectrum of detector at 296K

四种器件在 296K 温度下归一化的相对光谱响应曲线如图 5.3.8 所示, 采用 MOCVD 外延材料制备器件的 F20 和 F23 响应截止波长为 $1.67\mu\text{m}$, G 因子为 79, 采用 MBE 外延材料制备的器件 M20 和 M23 响应截止波长为 $1.68\mu\text{m}$ 波段, G 因子为 85。

图 5.3.9 所示为读出电路及光敏芯片与读出电路互连后的焦平面探测器照

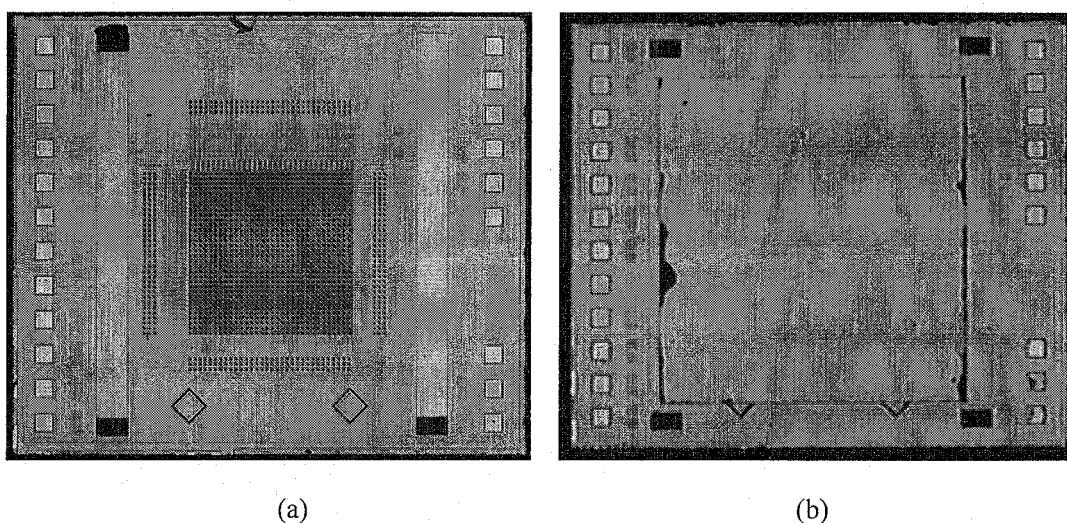


图 5.3.9 (a) 读出电路及(b) 与读出电路互连后的 InGaAs 焦平面探测器照片

Fig. 5.3.9 (a) Photographs of the ROIC and (b) the InGaAs FPA with ROIC and detector chip

片，电路的前 32×16 元是常规结构，后 32×16 是测试结构，因此主要对焦平面探测器的前 32×16 元进行性能测试及分析。利用 4.2 节介绍的 InGaAs 焦平面探测器测试系统对采用 MOCVD 外延材料制备的器件 F20、F23 进行了焦平面性能测试，焦平面探测器封装在金属杜瓦中，焦平面探测器测试条件：室温 293K，900K 黑体光源，黑体出射孔距离焦平面 40cm，黑体出射孔径 10mm。

图 5.3.10 为 F23 焦平面探测器在 3ms 积分时间下去除盲元后的信号和噪声，响应非均匀性为 3.35%。测试结果表明，两种探测器均存在 8 个盲元，盲元率为 1.56%，而且均为死像元 (<0.5 倍平均信号电压)。F20 焦平面探测器的盲元较为分散，而且在没有光照的情况下，读出信号有很多过热像元存在，可能与倒焊压力有关^[27]。F23 焦平面探测器的盲元分布较为集中，具有局域性，存在

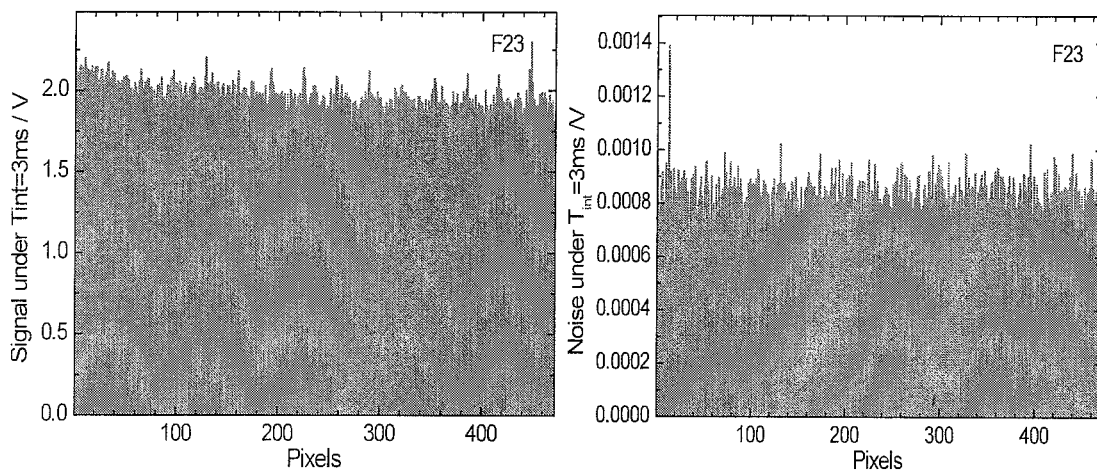


图 5.3.10 3ms 积分时间下焦平面器件的信号和噪声

Fig. 5.3.10 FPA signals and noise under 3ms integrated time

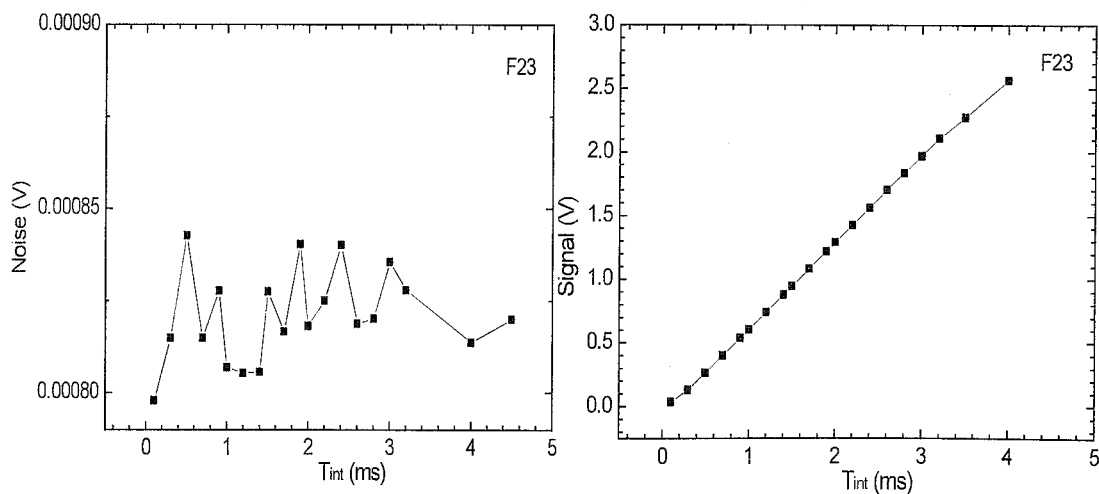


图 5.3.11 不同积分时间下 F23 焦平面探测器的信号和噪声的变化

Fig. 5.3.11 Integrated time dependent noise and signal for the F23 FPA

盲元的主要原因是该处的材料存在缺陷,或者制备工艺中对此处造成了较大的损伤。

图 5.3.11 为 F23 焦平面探测器的噪声和信号随积分时间的变化曲线,可以看到,在测量范围内,焦平面探测器的噪声与积分时间没有明显的对应关系,说明该焦平面探测器的噪声受探测器芯片的影响较小,此时噪声主要来源于读出电路的噪声。

图 5.3.12 为 F23 焦平面探测器的峰值响应率和峰值探测率,由于平面型面阵焦平面探测器中存在的边缘效应,从图中可以明显地看出不同光敏元的响应分布呈现每 32 元为一个周期性的特点,这与 5.3.2 节中讨论一致。在 3ms 积分时间下,平均峰值响应率和平均峰值探测率分别为 1.04A/W 、 $1.36\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。F20 焦平面探测器在该积分时间下的平均峰值响应率和平均峰值探测率分别为 1.02A/W 、 $1.10\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。与 F20 焦平面探测器相比, F23 焦平面探测器具有更加良好的性能,在平面型 InGaAs 阵列焦平面探测器的设计中,确定了扩散成结的工艺规范,即考虑到器件的侧向收集作用,相邻扩散区的间隔为 $7\mu\text{m}$ 时,器件占空比接近 100%。

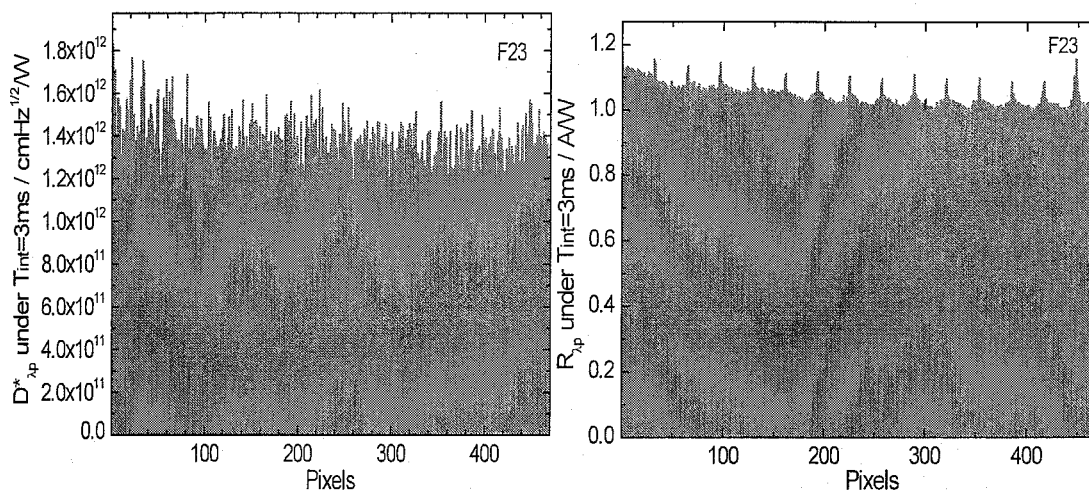


图 5.3.12 3ms 积分时间下 F23 焦平面探测器的峰值响应率和峰值探测率

Fig. 5.3.12 The $R_{\lambda p}$ and $D_{\lambda p}^*$ under 3ms integrated time of F23 FPA

5.4 背照射 800×2 双波段集成的 InGaAs 焦平面探测器研制

5.4.1 探测器芯片制备

本小节采用背照射平面型 InGaAs 器件制备工艺,利用 MOCVD 技术生长

的 N-InP/n-In_{0.53}Ga_{0.47}As/N⁺-InP 外延薄膜材料，研制了背照射的平面型 800×2 双波段集成的 InGaAs 焦平面探测器，外延材料的参数同背照射 32×32 面阵 InGaAs 焦平面探测器相同，光敏芯片与读出电路通过 In 柱倒装焊形成焦平面探测器。光敏芯片及光敏芯片与读出电路互连后的焦平面照片如图 5.4.1 所示，焦平面探测器封装在双列直插 38 引脚的金属管壳中。基于背照射 32×32 面阵 InGaAs 焦平面探测器的结果，背照射 800×2 双波段集成的焦平面探测器扩散区面积为 $18 \times 18 \mu\text{m}^2$ 、中心距 $25 \mu\text{m}$ 、光敏元采用一字型排列、双边电极引出。为了抑制光敏区的扩大，在垂直线列方向引入了保护环结构，保护环内边缘离面阵最外围的扩散区 $10 \mu\text{m}$ ，并通过延伸电极将保护环与 N 电极相连。采用延伸 P 电极与 In 柱倒装焊，光敏芯片总面积 $1.3 \times 20.613 \text{ mm}^2$ ，最后在组件的窗口通过集成滤光片方式实现双波段的功能。

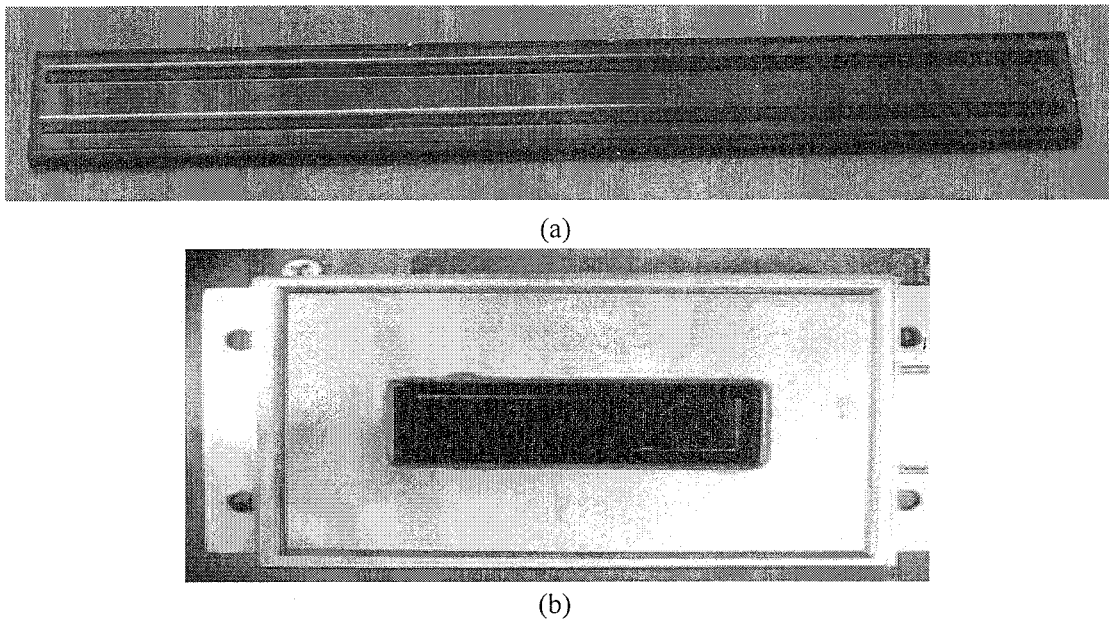


图 5.4.1 背照射 800×2 双波段集成的 InGaAs (a) 光敏芯片和 (b) 焦平面

Fig. 5.4.1 The back-illuminated double-band 800×2 InGaAs (a) detector array chip and (b) FPA

5.4.2 实验结果及讨论

296K 温度下器件的归一化的相对光谱响应曲线如图 5.4.2 所示，两个波段器件的响应波段范围和峰值波长分别是 $0.94 \sim 1.70 \mu\text{m}$ 、 $1.58 \mu\text{m}$ ， $0.95 \sim 1.70 \mu\text{m}$ 、 $1.59 \mu\text{m}$ ，G 因子均为 77。

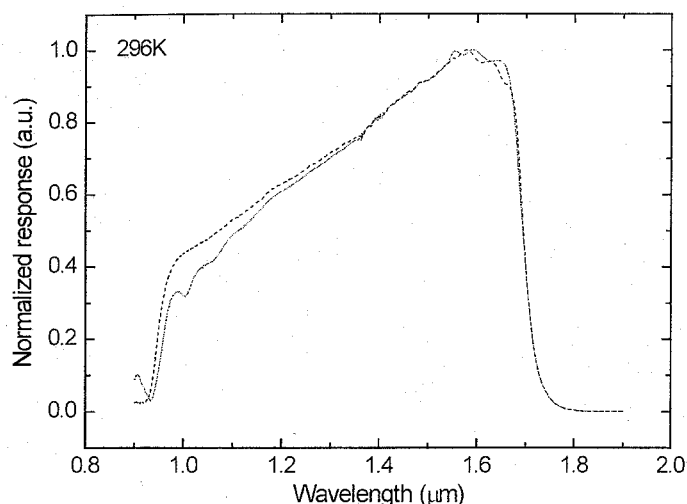
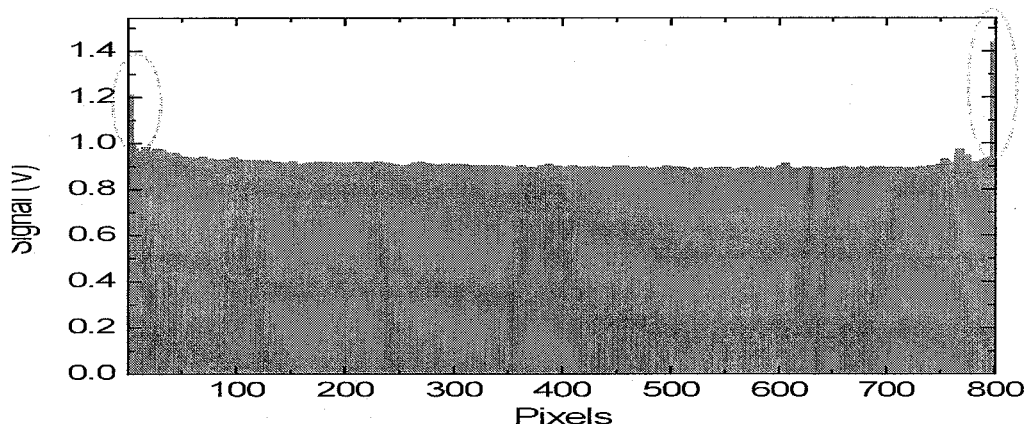


图 5.4.2 296K 下器件的相对光谱响应曲线

Fig. 5.4.2 The response spectrum of detector at 296K

对焦平面进行性能测试，测试条件：测试环境温度 296K，黑体温度 900K，黑体出射孔距离焦平面 30cm，黑体出射孔径 10mm。由于在每条 800×1 线列的两端均设计了测试单元，当焦平面探测器采集信号时，受平面型阵列器件边缘效应的影响，线列两端的光敏元响应信号比内部光敏元要大的多，很容易表现为过热“盲元”，如图 5.4.3 所示。将每条线列的测试单元连接到 N 电极上，以抑制线列两端的光敏元对光生载流子的侧向收集，此时两端的光敏元响应信号正常，如图 5.4.4 所示为两个波段的 800×1 线列在积分时间 5ms 下的光电响应性能。两条线列焦平面都具有较低的响应非均匀性，分别为 2.48%、2.61%，无盲元，平均峰值探测率分别为 $2.47 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、 $2.37 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

图 5.4.3 背照射 800×2 双波段集成的 InGaAs 焦平面探测器在 5ms 积分时间下的信号Fig. 5.4.3 The signal under $T_{\text{int}}=5\text{ms}$ of the back-illuminated double-band 800×2 InGaAs FPA

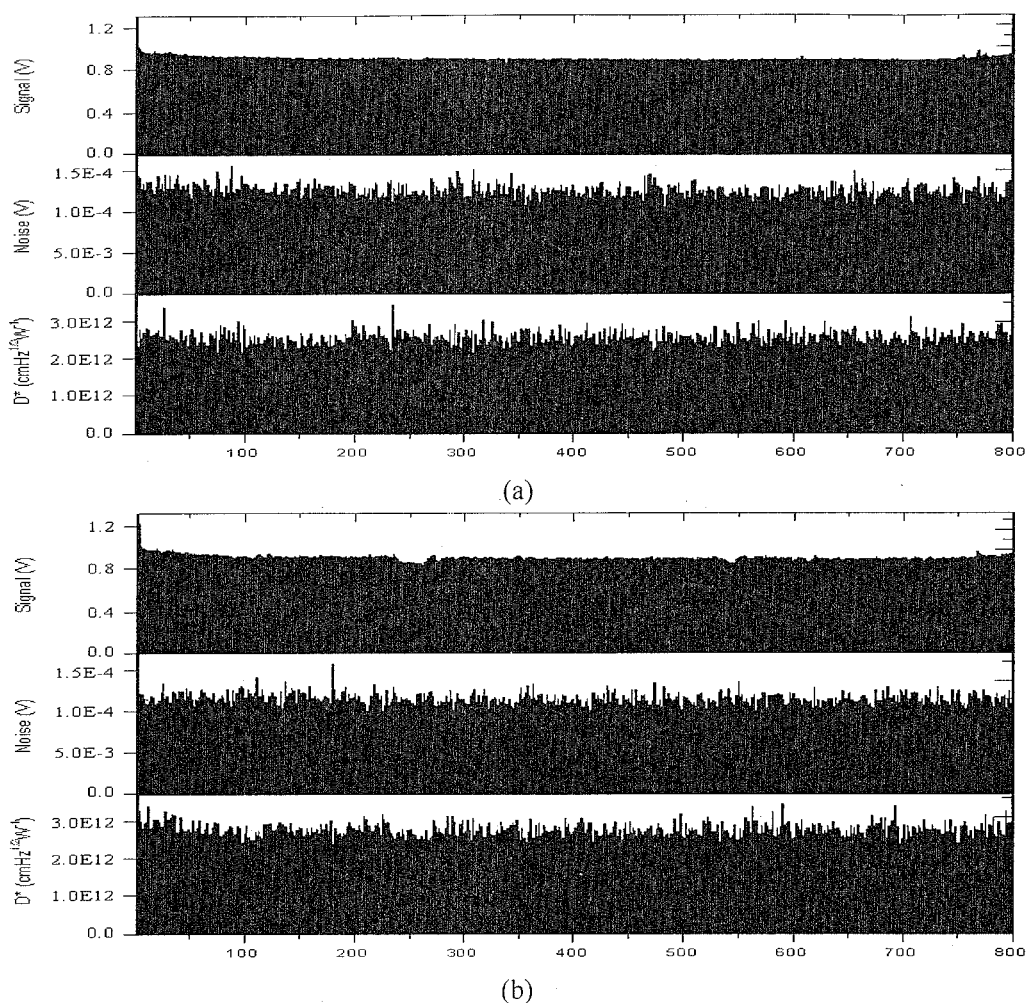


图 5.4.4 背照射 800×2 双波段集成的 InGaAs 焦平面探测器光电性能

Fig 5.4.4 The performance of the back-illuminated double-band 800×2 InGaAs FPA

Modulation Transfer Function (MTF), 调制传递函数, 定义为输出信号调制度与输入信号调制度的比值; 它亦为光学传递函数(OTF)的模, 是一种在空间频率域内考察光学系统成像质量的方法^[135]。在航天遥感领域等领域常采用 MTF 曲线定量计算和测量成像系统的分辨率, 并作为评价探测器成像质量好坏的手段。

本实验采用平行光管测试系统测量了焦平面探测器组件在固定频率下的调制传递函数(MTF)。测量原理是, 采用狭缝光阑限制通过平行光管的光源, 使处于中间的光敏元无光照射, 而与这个光敏元相邻的两个光敏元被两个条形光束照射, 因此被照射的两个光敏元会出现响应信号峰值, 而中间光敏元的信号基本由基底信号和旁边两个光敏元的串音组成。相邻光敏元之间的 MTF 可以表示为^[136]:

$$MTF = \frac{\pi(V_{\max} - V_{\min})}{4(V_{\max} + V_{\min})} \quad (5.4.1)$$

其中, $V_{\max}$ 为两个有光照射得光敏元的信号平均值, $V_{\min}$ 为中间无光照射的光敏元的信号值。

采用平行光管系统测量了此双波段集成的焦平面模块的中心视场, 即两个 800×1 线列的第 400 元附近的光敏元, 组件在系统应用中的 MTF 约为 0.51, 表明采用 $7\mu\text{m}$ 的光敏区间距和保护环结构可以使光敏区实现较好的隔离。背照射 800×2 线列 InGaAs 焦平面成像质量比较清晰, 其中一个波段的成像如图 5.4.5 所示。

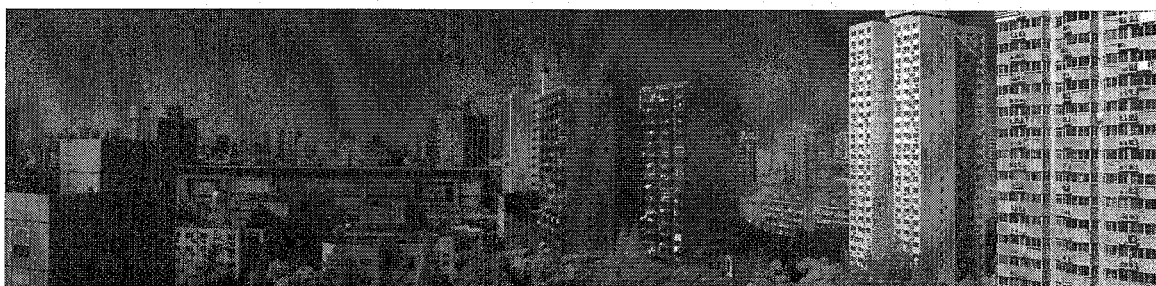


图 5.4.5 背照射平面型线列探测器地面推扫成像

Fig 5.4.5 Scanning image by back-illuminated planar type linear detectors array

5.5 本章小结

本章对背照射平面型器件的关键工艺进行了研究, 通过对扩散的精细控制优化了小光敏元高占空比器件的结构, 最终成功研制了背照射的 32×32 面阵和 800×2 双波段集成的 InGaAs 焦平面探测器, 测试分析了焦平面的光电性能。背照射的 32×32 面阵焦平面探测器中心距 $30\mu\text{m}$, 其响应非均匀性为 3.35%, 平均峰值响应率和平均峰值探测率分别为 1.04A/W 、 $1.36 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。双波段集成无盲元的 800×2 焦平面探测器中心距 $25\mu\text{m}$, 两个波段的响应非均匀性分别为 2.48%、2.61%, 平均峰值探测率分别为 $2.47 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、 $2.37 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 组件在系统应用中的 MTF 约为 0.51, 成像质量比较清晰。

6 全文总结与展望

6.1 全文总结

短波红外 InGaAs 探测器在空间遥感、光通讯和环境监测等众多国计民生领域具有广泛的应用，基于 InGaAs 探测器的发展趋势和国家对于空间遥感用 InGaAs 探测器的迫切需求，本论文在已有的基础之上对平面型正照射及背照射 InGaAs 探测器的部分问题进行了研究，优化并设计了器件的部分关键工艺、降低了器件的盲元率和暗电流水平、研制了基于子像元模式正照射的 InGaAs 探测器、突破了背照射的平面型 InGaAs 探测器制备的关键工艺。所取得的主要研究成果如下：

1.快速热退火过程对结深的影响分析

采用 SCM 和 SIMS 技术研究了掺杂元素 Zn 在晶格失配材料 $\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}/\text{In}_{0.81}\text{Ga}_{0.81}\text{As}/\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As buf.}/\text{InP}$ 和 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}/\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{InAsP buf.}/\text{InP}$ ，以及晶格匹配材料 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 中的扩散行为，研究表明，Zn 在晶格失配材料中的扩散速度大于其在晶格匹配材料中的扩散速度；由于掺杂 Zn 元素并不能被完全激活，p-n 结深度小于掺杂元素的扩散深度；计算了 530°C 时，Zn 在 $\text{In}_{0.81}\text{Al}_{0.19}\text{As}$ 、 $\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ 和 InP 三种帽层材料中的扩散系数，分别为 $1.327 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ 、 $1.341 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ 和 $1.067 \times 10^{-12} \text{cm}^2/\text{s}$ 。RTP 基本不会影响 p-n 结的深度。

2. 降低平面型 InGaAs 探测器无效像元的结构设计和工艺优化

分析了器件制备工艺中出现盲元的原因，并以 24×1 元线列探测器为例对线列或面阵器件中的盲元进行了判别和分析，通过优化器件器件结构和抑制 P 电极流动，最终成功制备了无盲元的 24×1 线列探测器，平均峰值探测率为 $3.0 \times 10^{12} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 、量子效率约为 95%、响应非均匀性为 2.63%。

3.基于子像元模式的平面型 InGaAs 探测器研制与性能分析

1)提出了一种基于子像元模式的平面型 InGaAs 探测器新结构，研制了侧向收集区宽度分别为 $15\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ 的三种平面型 InGaAs 探测器，并利用 LBIC 技术对三种器件在常温下的光响应均匀性进行表征，最后得出侧向收集区

宽度较优的设计参数是 $15\mu\text{m}$ 。

2)利用 LBIC 技术研究了器件在不同温度下的光响应均匀性,对于采用掺杂浓度为 $5.0\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ InGaAs 吸收层的子像元探测器,当侧向收集区宽度为 $15\mu\text{m}$ 时,器件可在 296K~253K 的温度范围内光敏元光响应均匀;计算了 296K~88K 温度范围内少子的扩散长度 L_p , 并有 $L_p \propto \sqrt{T}$, 声学波散射是主要的散射机制。

3)研究了子像元结构 InGaAs 器件与常规结构的 InGaAs 器件的光电性能,室温下,对于光敏区面积为 $200\times 200\mu\text{m}^2$ 的器件,在 -100 mV 反向偏压下,暗电流密度为 3.94 nA/cm^{-3} 、 R_0A 为 $8.4\times 10^6\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 、峰值探测率为 $2.89\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$;与 24×1 线列探测器中光敏区面积 $450\times 1000\mu\text{m}^2$ 相同的子像元器件,在 -100 mV 反向偏压下,暗电流密度为 4.85 nA/cm^2 、 R_0A 为 $1.05\times 10^7\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 、峰值探测率为 $3.22\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。室温下,与常规结构器件相比,暗电流密度降低了约 70%。

4.正照射平面型 InGaAs 探测器研制

1)对 InGaAs 层浓度为 $5.0\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 和 $5.0\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 的器件的暗电流机制进行了研究,在室温-0.1V 下的暗电流密度分别为 15.73 nA/cm^2 和 7.84 nA/cm^2 ,且前者的暗电流密度与 P/A 值并没有直接的联系,暗电流主要来自于与扩散区面积有关的器件的体内;后者的暗电流密度与器件的 P/A 值成线性关系,其暗电流主要是侧面漏电流。

2)研究了 SiN_x 和 SiO_2 两种钝化膜的正照射 256×1 线列 InGaAs 探测器的性能,中心距 $50\mu\text{m}$,两种器件在室温-100mV 反向偏压下的暗电流密度分别为 26.8 nA/cm^2 、 41.2 nA/cm^2 ,峰值探测率分别为 $1.21\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、 $1.08\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$,采用 SiN_x 作为钝化膜可以得到比较好的性能。

3)研究了长波扩展的 256×1 线列 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器在室温和变温下的光电性能。室温下,器件的截止波长 $2.57\mu\text{m}$,峰值探测率为 $7.25\times 10^8\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$,峰值响应率为 0.95 A/W ,量子效率 56.9%。随着温度的降低,焦平面探测器的噪声下降迅速,而响应信号先增大,在 273K 达到峰值,平均峰值探测率在 153K 达到 $1.11\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$,响应非均匀性为 5.28%。

5.背照射平面型 InGaAs 焦平面探测器研制

1)对背照射平面型器件的关键工艺进行了研究,通过对扩散的精细控制优

化了小光敏元高占空比器件的结构。研究了两种扩散区间距的背照射 32×32 面阵 InGaAs 焦平面探测器的性能, 中心距 $30 \mu\text{m}$ 、相邻扩散区间距 $10 \mu\text{m}$ 和 $7 \mu\text{m}$, 器件的填充因子达到了 98%, 其中后者的器件性能较优, 在 3ms 积分时间下, 平均峰值响应率和平均峰值探测率分别为 1.04A/W 、 $1.36 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、响应非均匀性为 3.35%。

2)首次研制了背照射平面型双波段集成的无盲元 800×2 焦平面探测器, 两个线列焦平面响应非均匀性分别为 2.48%、2.61%, 平均峰值探测率分别为 $2.47 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 、 $2.37 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 组件在系统应用中的 MTF 约为 0.51, 成像质量比较清晰。

6.2 展望

虽然本论文工作取得了一定的研究成果, 但有些问题还没有得到充分的解决, 仍需要开展大量的研究工作, 以实现更高性能的 InGaAs 探测器。

1.采用扩散工艺制备大规模的平面型器件研究。

平面型器件的制备目前采用闭管扩散工艺, 但是受到真空石英管尺寸的限制, 还不能进行大批量的制备, 当项目需求大量芯片时, 就需要进行多批次流片, 这样很可能造成几个批次器件性能的差异; 另外, 石英管为一次性耗材, 多批次的流片使成本升高; 在已经购置的半开管扩散设备上, 深入研究扩散均匀性、稳定性和可控性等, 对器件性能的提升和器件规模的扩大有重要意义。

2.子像元结构平面型延伸波长的 InGaAs 探测器研究

本文已经对子像元结构的平面型常规波长的 InGaAs 探测器进行了初步的研究, 从研究结果上看, 与常规结构器件相比, 子像元结构的器件降低了器件的暗电流, 但是目前子像元结构未应用在延伸波长的器件以及线列和面阵焦平面探测器上, 同时对子像元结构探测器性能的模拟计算, 也将很有意义。

3.长波扩展的平面型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器研究

目前研制的长波扩展的平面型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器性能较差, 需要进一步研究外延材料的缓冲层晶格失配问题, 优化外延材料质量, 同时提高掺杂元素在晶格失配材料中的激活效率; 晶格失配材料在不同温度下的扩散长度、延伸波长器件在不同温度下的光响应均匀性需要进一步研究。

总之, 空间遥感用平面型 InGaAs 探测器的研究取得了一些进步, 但从材料

生长、器件结构、器件工艺、器件封装等方面，航天遥感用 InGaAs 红外焦平面仍有大量的工作需要继续改进和研究。