

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院

博士学位论文

短波红外InGaAs探测器关键工艺技术研究

李永富

指导教师 龚海梅 研究员 李雪 副研究员

中国科学院上海技术物理研究所

申请学位级别 博士 学科专业名称 微电子学与固体电子学

论文提交日期 2010.04 论文答辩日期 2010.05

培养单位 中国科学院上海技术物理研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 张永刚 研究员

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：李永富

2010 年 5 月 27 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有权保留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：_____。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：李永富

2010 年 5 月 27 日

指导教师签名：[Signature]

2010 年 5 月 27 日

摘 要

工作于短波红外波段 InGaAs 探测器,在近室温条件下即可获得良好的性能,在红外系统小型化、低成本化等方面具有很强的竞争力,而且 InGaAs 材料外延技术已经比较成熟,这些都使得 InGaAs 探测器在空间遥感、光通讯及环境监测等众多领域有着广泛的应用前景。本论文针对空间遥感用短波红外 InGaAs 探测器的要求,以研制高性能 InGaAs 线列探测器为目的,在前期研究成果的基础上,优化并发展了器件制备的部分关键工艺环节。对平面型器件的部分关键工艺及器件结构进行了优化设计,研究了不同结构器件的串音、平面型器件光敏元扩大现象及其抑制技术,采用优化的器件工艺及器件结构研制出性能良好的光谱仪用 256×1 线列 InGaAs 平面型探测器。采用感应耦合等离子体 ICP 刻蚀台面成型工艺制备了背照射式 N-on-P 型 640×1 元线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 长波扩展探测器芯片。

通过减小扩散石英载物舟的质量以优化扩散成结过程扩散温度的控制,稳定了扩散成结条件,提高了闭管扩散中扩散成结工艺的可控性及重复性。优化扩散掩膜,对比研究了磁控溅射方式生长的 SiO_2 扩散掩膜及 PECVD 生长的 SiN_x 扩散掩膜的钝化效果, SiN_x 薄膜的引入能够有效地降低平面型器件的暗电流水平。室温下, -0.1V 偏压时,器件的暗电流密度由优化前的 $80\sim 300\text{nA}/\text{cm}^2$ 降低至优化后的 $\sim 20\text{nA}/\text{cm}^2$ 。

设计并搭建了串音测试系统,研究了平面型、深台面型以及浅台面型三种不同结构器件的串音特性,发现浅槽隔离及保护环结构对器件串音具有良好的抑制效果,为器件结构的优化提供了一种思路。通过器件结构设计,研究了小扩散孔、环形遮盖电极、保护环以及浅隔离槽结构对正照射式平面型器件的光敏元扩大现象的抑制作用,并采用 AFM、SCM 以及 LBIC 相结合的方法定量地研究了在带有保护环结构的器件中不同保护环与光敏元间距对光敏元扩大现象的抑制效果,引入保护环结构后,光敏元扩大量由无保护环时的 $14.44\mu\text{m}$ 减小为 $7.49\mu\text{m}$ 。

采用优化的扩散工艺及保护环结构制备了光谱仪用 256×1 线列 InGaAs 平面型探测器,器件扩散孔面积 $25 \times 500\mu\text{m}^2$,相邻光敏元中心距 $50\mu\text{m}$,室温下,探测器芯片暗电流密度在 -0.1V 偏压下约为 $23\text{nA}/\text{cm}^2$,峰值探测率 $> 1.00 \times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$,与读出电路互连后在 5ms 积分时间下探测器焦平面的平均峰值探测率约 $1.87 \times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

采用 SCM 及 SIMS 技术研究了掺杂元素 Zn 在晶格失配及晶格匹配两种外延材料中的扩散机制,研究表明,在晶格匹配材料中,PN 结深度与 Zn 元素扩散结深度基本一致,Zn 元素在晶格匹配材料中的激活效率较高。而在晶格失配材料中,Zn 元素的激活效率非常低,增

大了器件制备的难度。采用 InP 及 InAsP 作为盖帽层的异质结构材料制备了平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器, 对于 InP 盖帽层材料器件, $T=210\text{K}$ 时, 器件峰值探测率达到最大, 单元器件峰值探测率 $1.70\times 10^9\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 八元器件峰值探测率 $9.40\times 10^9\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。对于 InAsP 盖帽层材料器件, 随着温度降低, 器件黑体信号首先增大后降低, 在 200K 左右达到峰值, 而噪声首先下降迅速, 在 150K 以后变化趋缓, 而器件的峰值探测率在 150K 达到峰值约 $8.30\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

采用感应耦合等离子体 ICP(Inductive Coupled Plasma)刻蚀台面成型工艺, 在 N-on-P 型 $\text{In}_{0.78}\text{Al}_{0.22}\text{As}/\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ 材料上制备了背照射式 N-on-P 型 640×1 元线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器芯片, 这种应用在国内尚属首次。室温下器件截止波长达到 $2.4\mu\text{m}$, 抽测器件的优值因子约为 $16\Omega\cdot\text{cm}^2$, 在 240K 温度下探测器的优值因子 $\sim 1000\Omega\cdot\text{cm}^2$, 信噪比 ~ 650 。在 1ms 积分时间下, 250K 工作温度下对应焦平面的平均峰值探测率达到 $1.55\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 焦平面信号非均匀性约为 8.59% , 232K 工作温度下对应焦平面的平均峰值探测率达到 $2.16\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 焦平面信号非均匀性约为 7.10% 。

关键词: InGaAs; 空间遥感; 短波红外探测器; 保护环; 串音; 焦平面

Key technical study on InGaAs SWIR detectors

Abstract

Li Yongfu (Microelectronics and solid electronics)

Directed by Professor Gong Haimei

InGaAs detectors covering the short-wave infrared spectrum could get high performances under near-room temperature, thus have great advantages in infrared system miniaturization and cost cut. And InGaAs detectors have found wide applications in space remote sensing, optical communication and environment supervision. This dissertation focused on the desire for the next generation short wavelength infrared (SWIR) detector used for remote sensing application in our country, and aimed at the design and fabrication of high performance InGaAs FPAs. Based on the existing achievements of our research group, several key fabrication technologies have been developed and improved. The cross-talk in three types of InGaAs detectors was studied. And different detector structures were developed to study the suppression technology of extension of the photosensitive area in planar-type detectors. The open-tube diffusion method for planar-type detector was developed. The diffusion mechanisms of Zn element in lattice-matched and lattice-mismatched were analyzed, and planar-type long wavelength extended $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ detectors were fabricated by using epitaxial wafers with InP and InAsP cap layers respectively. And then the N-on-P type back-illuminated 640×1 linear $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ detectors with $2.4\mu\text{m}$ cut-off wavelength were fabricated using ICP etching method. And the main results achieved in this dissertation could be listed as follows:

The mass of the quartz loading boat was reduced to decrease the temperature-raising time of the wafers, and thus the diffusion process was greatly stabilized and thus the detector fabrication process became controllable and repeatable. To optimize the diffusion mask, the SiN_x film grown by PECVD was developed instead of the SiO_2 film grown by magnetic sputtering, and the dark current of the planar-type InGaAs detector was greatly reduced. Under room temperature, the dark current density at -0.1V bias was reduced to $\sim 20\text{nA}/\text{cm}^2$ from $100\sim 300\text{nA}/\text{cm}^2$.

One experiment setup was developed to study the cross-talk characteristics of the planar-type, deep trench and shallow trench InGaAs detectors, and it was indicated that the guard-ring and shallow trench structures were useful in cross-talk suppression. The small diffusion window method, circling cover contact, guard-ring and shallow trench structures were developed to suppress the extension of photo-sensitive area in planar detectors, and AFM, SCM and LBIC technology were used to quantificationally study the suppression effect of guard-ring for the detectors with guard-rings structures. After guard-ring was brought in, the extension value of the photo-sensitive area reduced to $7.49\mu\text{m}$ from $14.44\mu\text{m}$.

The optimized diffusion technology and the guard-ring structure were used in fabricating the 256×1 linear InGaAs detectors with diffusion area of $25 \times 500 \mu\text{m}^2$ and pixel pitch of $50 \mu\text{m}$. Under room temperature, the dark current density at -0.1V bias and peak detectivity of the detector were $\sim 23 \text{nA/cm}^2$ and $> 1.00 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ respectively. And at 5ms integrated time the average peak detectivity of the FPA was $1.87 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$.

The diffusion mechanism of Zn was studied in the lattice-matched InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As and lattice-mismatched InP/In_{0.82}Ga_{0.18}As hetero structure with the sealed ampoule method using the SIMS and SCM technology. It was indicated that in the lattice-matched material the difference between the PN junction depth and the Zn diffusion depth was smaller for the larger Zn activation ratio. However, the difference was bigger due to the smaller Zn activation ratio in the lattice-mismatched material, and thus made it difficult for detector fabrication. The planar-type long wavelength extended In_xGa_{1-x}As detectors were fabricated by using epitaxial wafers with InP and InAsP cap layers respectively. For the detectors with InP cap layers, at 210K, the peak detectivity of the single elemental and eight-pixel detectors got the peak value of $1.70 \times 10^9 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ and $9.40 \times 10^9 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ respectively. For the detectors with InAsP cap layers, the peak detectivity got the peak value of $8.30 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ at 150K.

The ICP etching method was used to fabricate the N-on-P type back-illuminated 640×1 linear In_xGa_{1-x}As detectors with $2.4 \mu\text{m}$ cut-off wavelength on the N-on-P type In_{0.78}Al_{0.22}As/In_{0.78}Ga_{0.22}As epitaxial wafers. Under room temperature, the R_0A product of the detector was $16 \Omega \cdot \text{cm}^2$. And at 240K, the R_0A product and the signal-to-noise ratio of the detector were $\sim 1000 \Omega \cdot \text{cm}^2$ and ~ 650 respectively. At 1ms integrated time, the average peak detectivity of the detector FPAs would get the value of $1.55 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ at 250K and $2.16 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ at 232K respectively. And the non-uniformity of the signal was 8.59% at 250K and 7.10% at 232K.

Key words: InGaAs, space remote sensing, short wavelength infrared detector, guard-ring, cross-talk, focal plane arrays

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 录.....	V
第一章 引 言.....	1
1.1 红外探测器的应用	1
1.2 红外探测器的分类	4
1.3 短波红外及 InGaAs 探测器.....	5
1.3.1 InGaAs 探测器的优势	6
1.3.2 长波扩展的 InGaAs 探测器	7
1.3.3 短波长增强的 InGaAs 探测器	7
1.3.4 量子阱探测器.....	8
1.4 InGaAs 红外探测器国内外研究与应用现状.....	8
1.4.1 国外研究现状.....	9
1.4.2 国内研究现状.....	14
1.4.3 InGaAs 短波红外焦平面器件发展趋势	15
1.4.4 InGaAs 器件研制中存在的问题	17
1.5 本论文的研究目的和主要内容	18
参考文献	18
第二章 平面型常规波长 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器关键工艺技术研究.....	21
2.1 引言	21
2.2 常规波长 InGaAs 探测器扩散成结工艺的优化.....	21
2.2.1 扩散成结工艺扩散温度的优化.....	21
2.2.2 扩散掩膜优化.....	22
2.3 器件串音研究	26
2.3.1 串音测试系统.....	27
2.3.2 器件结构.....	29
2.3.3 器件结构对器件串音的影响.....	29
2.4 光敏元扩大现象抑制研究	32
2.4.1 器件结构设计	33
2.4.2 环形遮盖电极对光敏元扩大的抑制.....	34
2.4.3 保护环工作状态对环形电极的抑制作用.....	35
2.4.4 保护环与光敏元间距对光敏元扩大的抑制.....	36
2.4.5 浅隔离槽对光敏元扩大的抑制.....	42
2.5 保护环结构 256×1 线列器件的制备	44
2.6 ZnO 固态扩散源开管扩散研究.....	50
2.6.1 器件制备工艺流程.....	50
2.6.2 扩散成结的表征及器件性能分析.....	50
2.7 本章小结	54

参考文献:	55
第三章 平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器技术研究	57
3.1 引言	57
3.2 InP/ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结构中 Zn 元素的扩散机制	57
3.2.1 扫描电容显微技术	57
3.2.2 扩散实验	59
3.2.3 扩散实验结果及讨论	60
3.3 InP 盖帽层材料器件的研制	63
3.3.1 InP 盖帽层材料器件的制备	63
3.3.2 长波扩展探测器变温光电性能	64
3.4 InAsP 盖帽层材料器件的研制	70
3.5 本章小结	75
参考文献:	76
第四章 台面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器制备与性能分析	78
4.1 引言	78
4.2 探测器芯片制备工艺	78
4.3 探测器芯片性能抽测	80
4.3.1 探测器芯片 I-V 特性	80
4.3.2 探测器芯片变温信号噪声特性	83
4.3.3 探测器芯片光谱响应特性	84
4.4 探测器焦平面性能测试	84
4.5 本章小结	87
参考文献:	87
第五章 全文总结与展望	88
5.1 全文总结	88
5.2 展望	89
攻读博士学位期间发表的论文及申请的专利	92
致 谢	94

第一章 引言

红外辐射是位于可见光与微波之间的电磁辐射，波长范围在 $0.75\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ 之间，对应光子能量 $1.65\text{eV}\sim 1.2\text{meV}$ 。一般来说红外辐射具有以下特征：

(1) 人眼不可见，这使得红外辐射很适于安全应用，但同时也增大了测试以及光学系统设计的难度；

(2) 小能量，红外辐射能与分子的振动能量处于同一量级，使其可用于分子的鉴别；

(3) 长波长，这意味着红外辐射散射小，在各种介质中有着较好的透过率；

(4) 所有绝对温度高于 0K 的物体均会辐射红外能，红外辐射能量由物体的温度和表面条件决定。不同的物体会发射出不同的红外射线，例如，正常体温的人体（ $310\text{K}/37^\circ\text{C}$ ）发射出的红外能量峰值波长在 $10\mu\text{m}$ 。红外辐射的这些特征使其能够广泛应用在工业、农业、医药、科学、通讯以及空间遥感等领域。

表1.1 各种红外辐射源^[1]

Table 1.1 Different infrared radiation sources^[1]

辐射类型	产生方法	材料	辐射源事例	波长 (μm)
热辐射	电流加热的电阻	钨	红外灯泡	1-2.5
		镍铬合金 铬铝电热丝	电热器	2-5
		SiC	碳化硅电阻加热元件	1-50
		陶瓷	能斯脱灯丝	1-50
	其他功率源加热的二次热源	金属（不锈钢等）	鞘式加热器	4-10
		陶瓷	IRS灯	4-25
			辐射喷嘴	1-20
	放电加热	碳	碳弧灯	2-25
冷辐射	气体放电	汞	汞灯	0.8-2.5
		铯 氙	氙灯	
受激辐射	激光反应	二氧化碳	CO_2 激光器	9-11
		GaAs化合物	InGaAsP激光器	1.1-1.5
		铅化合物	PbSnTe激光器	6-7

1.1 红外探测器的应用^[1]

1.1.1 光功率计

红外探测器可用于测量光强度，例如用于光纤通讯以及激光测量。光纤通讯系统可分为短、中、长距离通讯系统。对于长距离光纤通讯系统，一般采用透射损耗小的 $1.3\sim 1.5\mu\text{m}$ 波段的红外光进行传输，可以利用InGaAs PIN光电二极管进行探测。

1.1.2 LD监控

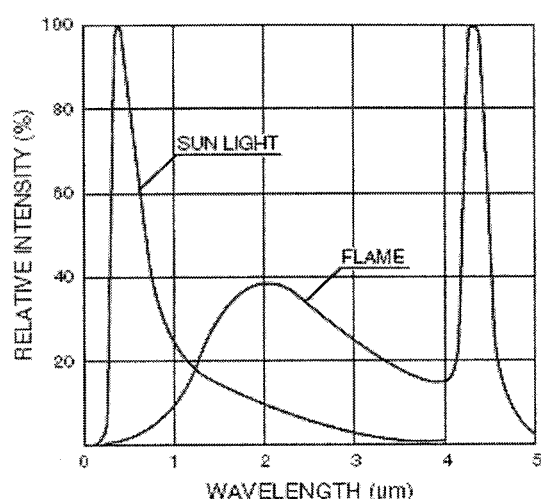


图 1.1 火焰的发射谱^[1]
Fig.1.1 Emission from flames^[1]

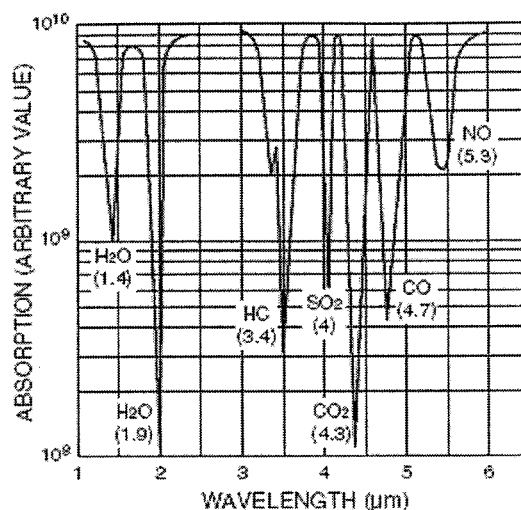


图 1.2 气体吸收谱^[1]
Fig.1.2 Gas absorption spectra^[1]

激光二极管(LD)输出能量以及发射波长会随着温度的变化而变化。为了稳定LD, 一般会采用功率自动控制装置(APC)。APC一般有两种方法: 一种是监控LD输出光脉冲的积分量, 另一种是监控输出光脉冲的峰值。在进行光脉冲峰值监控时常常需要快速响应的探测器, 在短波波段一般采用InGaAs PIN探测器, 对于长波激光则采用InAs或InSb探测器。

1.1.3 火焰探测

火焰探测器一般用于探测火焰发出的光辐射以及火焰燃烧方式。如图1.1所示, 火焰发出的光谱分布可从紫外直到红外区域。一般采用PbS光导探测器探测红外光, 采用PbSe及热释电探测器探测4.3μm波长的光辐射^[1]。

1.1.4 湿度探测

大气中的水汽吸收一般发生在1.1μm, 1.4μm, 1.9μm以及2.7μm, 这些波长的光束和参考光照射在物体上(如植物, 煤层等), 利用湿度分析计接收由物体上反射或透射过的光, 通过计算光束与参考光束的比值, 可以测量物体的湿度。InGaAs 光电二极管和PbS光导探测器非常适用于湿度探测^[1]。

1.1.5 气体分析

图1.2为各种气体的特征吸收谱, 由图可知, 不同的气体对于不同波长的红外辐射的吸收相差很大, 因此可以利用气体对红外辐射的吸收作用来测量气体的浓度。一般有色散法和非色散法两种。色散法通过从光源中分离出红外辐射, 利用物体对红外光的吸收作用来分析物体的成分和质量。非色散法则仅仅测量物体的吸收特性, 但应用更加广泛。例如, 非色散红外气体分析计一般用于测量汽车尾气(CO, HC, CO₂)、通风测量(CO₂)、排放控制(CO, SO₂, NO₂)、燃料泄漏(CH₄, C₃H₂)等等^[1]。

1.1.6 红外成像器件

红外成像器件经历了一、二、三代的发展，第一代器件采用单个探测器件，需要光学系统绕XZ轴旋转成像，第二代器件采用线列探测器，光学系统仅仅需要沿Z轴进行扫描，第三代器件采用面阵探测器，光学系统不再需要进行扫描，如图1.3所示^[1]。

1.1.7 空间遥感

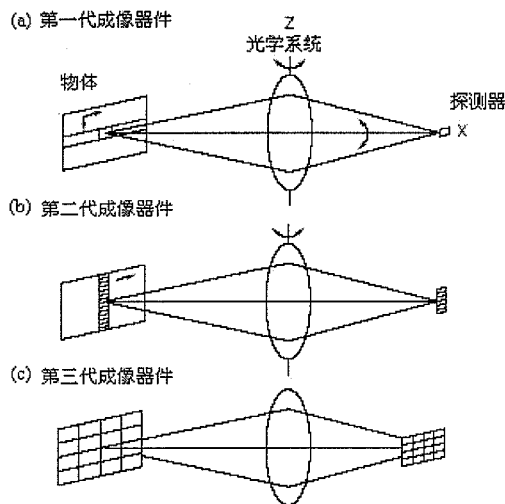


图 1.3 红外成像器件原理图^[1]

Fig.1.3 Schematic diagram of infrared imaging device^[1]

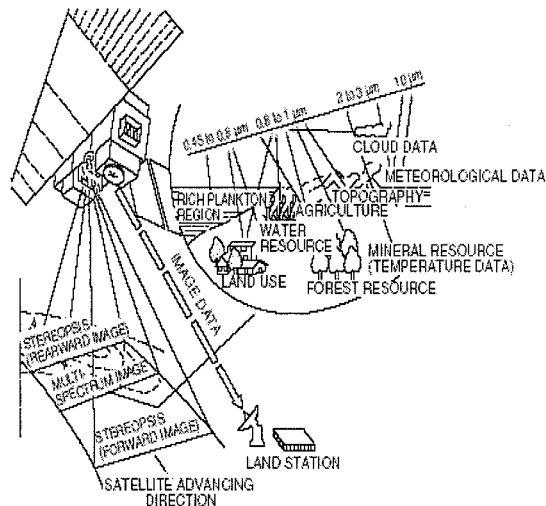


图 1.4 资源探测卫星系统^[1]

Fig.1.4 Optical system for resource detection^[1]

空间中不同的物体所发射或反射的光都会带有不同的信息，这些信息一般取决于波长。通过对每一个波长进行测量，就可以获得物体的详细信息。红外辐射能够使我们获得更多的信息，如，固体和液体的表面温度，气体的温度和种类等等。随着空间遥感在卫星以及飞机上的广泛应用，我们已经能够获得大量的信息，如陆地和海洋温度、大气中气体浓度等。这些信息被广泛用于气象观测、环境污染监控、资源探测等等^[1]。

1.1.8 分类设备

利用有机物本身的特征吸收波长可以将农作物从土块和石子中分离出来。InGaAs PIN 光电二极管及PbS光导探测器可用于这种分类。这些探测器也可以通过探测温度、发射率、透过率的差异来对工厂传送带上的物品进行分类。

1.1.9 分光光度计

傅立叶变换红外(FT-IR)分光光度计的应用越来越广泛，FTIR分光光度计中，由双光束干涉仪产生的干涉信号经过傅立叶变换而分解为光谱。这种方法主要有以下特征：(1)可对多光谱成分进行同时探测，具有很高的信噪比；(2)采用激光光源，具有很高的波长精度；(3)采用亮度低红外光光源和高灵敏度的探测器。用作FTIR分光光度计核心器件的红外探测器必须具有以下特征：(1)宽的光谱响应范围；(2)高的灵敏度；(3)足够大的有效面积以保证光学系统的

亮度；(4)宽的频带；(5)在各入射光亮度级上保持良好的线性。热探测器一般被用于 $2.5\sim 25\mu\text{m}$ 波段范围，需要进行高灵敏度、高响应速度采样时，则采用MCT光导探测器和InSb光伏探测器。

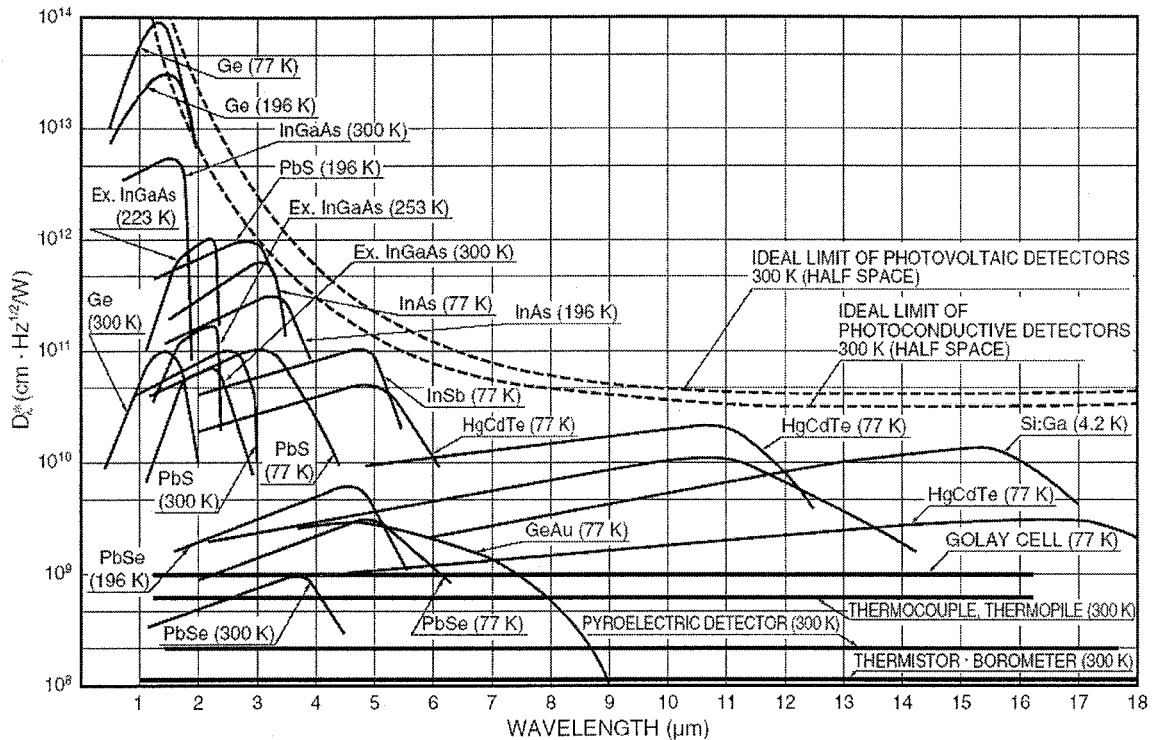
1.2 红外探测器的分类

红外探测器按其工作原理主要可分为热探测器和光子探测器两大类^[1]。热探测器受到红外辐射后温度随之升高，并且伴随着入射辐照功率的变化，元件的温度发生变化。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。元件的温度变化由吸收的热辐射能量引起，与红外辐射波长没有关系。热探测器不需要制冷，但是其响应速度慢，探测能力低。红外光子探测器接受红外辐射后，光子把材料的束缚态电子激发成传导电子，引起电信号(引起材料电导变化或产生光生电压)输出，信号大小正比于所吸收的光子数。红外光子的能量大小必须能达到足以激发束缚态电子，才能起这种激发作用，所以红外光子探测器的光谱响应有选择性，只对短于某一特定波长(截止波长)的红外辐射有响应。红外光子探测器响应速度快，噪声低，灵敏度高，探测器灵敏度与工作温度有关，一般来说，除了在近红外波段的探测外，光子探测器都需要制冷以便进行精确测量。红外探测器的种类见表1.2，其响应范围见图1.5。

表1.2探测器的类型及其特征^[1]

Table 1.2 Classification and characteristics of detectors^[1]

Table 1.2 Classification and characteristics of detectors							
探测器类型			探测器示例	光谱响应范围 μm	工作温度 K	典型探测率cmHz ^{1/2} /W	
热 探 测 器	温差电偶，热电堆 电阻辐射热测定计 铬电池 热释电探测器		Golay辐射计， 电容传声器， PZT， TGS， LiTaO	取决于探测器 的窗口材料	300	D [*] _(λ,10,1) =6×10 ⁸	
					300	D [*] _(λ,10,1) =1×10 ⁸	
					300	D [*] _(λ,10,1) =1×10 ⁹	
					300	D [*] _(λ,10,1) =2×10 ⁸	
光 子 探 测 器	本征型	光导型	PbS	1~3.6	300	D [*] _(500,600,1) =1×10 ⁹	
			PbSe	1.5~5.8	300	D [*] _(500,600,1) =1×10 ⁸	
			InSb	2~6	213	D [*] _(500,1200,1) =2×10 ⁹	
			HgCdTe	2~16	77	D [*] _(500,1000,1) =2×10 ¹⁰	
		光伏型	Ge	0.8~1.8	300	D [*] _(λp) =1×10 ¹¹	
			InGaAs	0.7~1.7	300	D [*] _(λp) =5×10 ¹²	
			Ex.InGaAs	1.2~2.55	253	D [*] _(λp) =2×10 ¹¹	
			InAs	1~3.1	77	D [*] _(500,1200,1) =1×10 ¹⁰	
			InSb	1~5.5	77	D [*] _(500,1200,1) =2×10 ¹⁰	
			HgCdTe	2~16	77	D [*] _(500,1000,1) =1×10 ¹⁰	
	非本征型			Ge: Au	1~10	77	D [*] _(500,900,1) =1×10 ¹¹
				Ge: Hg	2~14	4.2	D [*] _(500,900,1) =8×10 ⁹
				Ge: Cu	2~30	4.2	D [*] _(500,900,1) =5×10 ⁹
				Ge: Zn	2~40	4.2	D [*] _(500,900,1) =5×10 ⁹
				Si: Ga	1~17	4.2	D [*] _(500,900,1) =5×10 ⁹
				Si :As	1~23	4.2	D [*] _(500,900,1) =5×10 ⁹

图1.5 各探测器的探测率特性^[1]Fig.1.5 Detectivity characteristics for various infrared detectors^[1]

此外，红外光子探测器还可以分成以下几种：光电导型红外探测器，光伏型红外探测器以及光磁电型红外探测器^[2]。光电导型红外探测器受红外光激发，导带电子增加，因而电导率增加，在外加偏压作用下引起电流增加，增加电流大小与光子数成比例。光导探测器又称光敏电阻。应用最多的光导红外探测器有：PbS、PbSe、InSb、HgCdTe等；光伏型红外探测器基本部分是一个PN结二极管，红外光激发的电子和空穴在PN结势垒被区分开，积累在势垒两边，形成光生电动势，电动势大小与光子数成比例。光伏红外探测器主要有：InSb、HgCdTe、PbSnSb、InGaAs、InGaAsSb等；光磁电型红外探测器由红外激发的电子和空穴在材料内部扩散过程中，受到外加磁场的作用，使正、负电荷分开，在材料侧面积累，有电路时会有电信号产生。光磁电红外探测器主要有：InSb、HgCdTe等。但由于需要在探测器芯片上加磁场，结构比较复杂，应用较少。

1.3 短波红外及InGaAs探测器

实际应用中，红外辐射一般要在大气中传播相当远的距离才能到达探测系统，因此，必须考虑空气对红外辐射的影响。红外辐射在空气中传播时会发生反射、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^{[3][4]}，它们都有与其物质分子结构相对应的特

征吸收谱线, 对某些波长的红外辐射产生强烈的吸收使传播的能量受到损失, 而对另外一些红外辐射谱线不产生吸收, 透射率很高。大气对红外辐射吸收比较少的波段被称为“大气窗口”吸收带。图1.6所示为海平面上约2公里的水平路径所测得的大气透过曲线。由图可知, 红外辐射有三个主要的“大气窗口”为1-3 μm , 3-5 μm 和8-14 μm 波段^[5], 所以红外探测器也主要工作在这三个波段内。

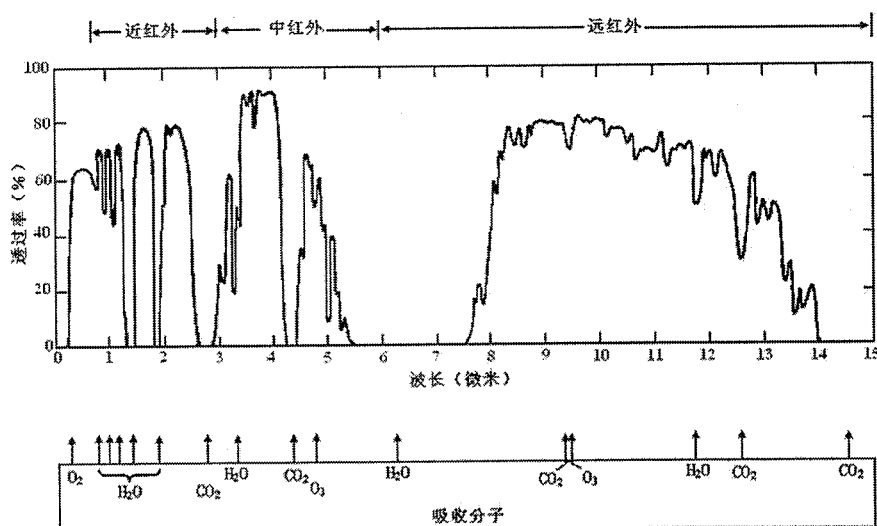


图1.6 海平面上大气透过曲线

Fig.1.6 Atmospheric transmission on sea surface

红外辐射三个“大气窗口”中的1-3 μm 波段属于近红外波段, 也称为短波红外, 工作在该波段的红外探测器在许多领域都有很重要的应用, 如夜视、红外成像、雷达、测距、光纤通信、温度测量、汽车尾气监控等方面。此外, 由于很多物质在该波段具有独特的光谱特性, 因此该波段的红外探测器在空间对地探测如了解资源分布、土壤水分监测、大气成分分析、农作物估产等方面有着重要地应用。

1.3.1 InGaAs 探测器的优势

应用于在1-3 μm 波段的红外探测器材料有HgCdTe, InAs, InSb, InGaAs等, 由于HgCdTe材料制备短波探测器时, Hg组分非常大, 且材料合成时温度要求很高, 产生的Hg蒸汽压高且难以控制, 材料分凝现象严重, 因此材料生长的难度大^[6]。而InAs与InSb材料禁带宽度很小, 使得室温下器件的暗电流很大^[7]。由HgCdTe, InAs与InSb制作的探测器都需要低温制冷以抑制热噪声的影响, 使得红外探测系统复杂, 成本很高。三元化合物 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 是III-V 族的赝二元系半导体材料, 随着组分x变化, 其禁带宽度在0.35-1.43eV范围内变化, 可覆盖1-3 μm 红外波段^[8]。InGaAs是直接带隙材料, 具有较高的电子迁移率及良好的稳定性和抗辐照性能, 并且有更成熟的材料生长和器件工艺技术可以利用, 因此可期望探测器具有更佳的表现, 特别是在较高的工作温度及强辐照环境下。In_{0.53}Ga_{0.47}As和InP材料可以做到完全晶格匹配, 因

此可以在InP衬底上生长出高质量的外延层，制备出性能优良的器件， $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 禁带宽度0.75eV，对应截止波长 $1.7\mu\text{m}$ ，该波段的InGaAs红外探测器广泛应用于光纤通讯领域。过去的二十多年来，在光纤通讯需求的推动下，InGaAs材料外延和器件技术有了很大的发展^[9]。

1.3.2 长波扩展的 InGaAs 探测器

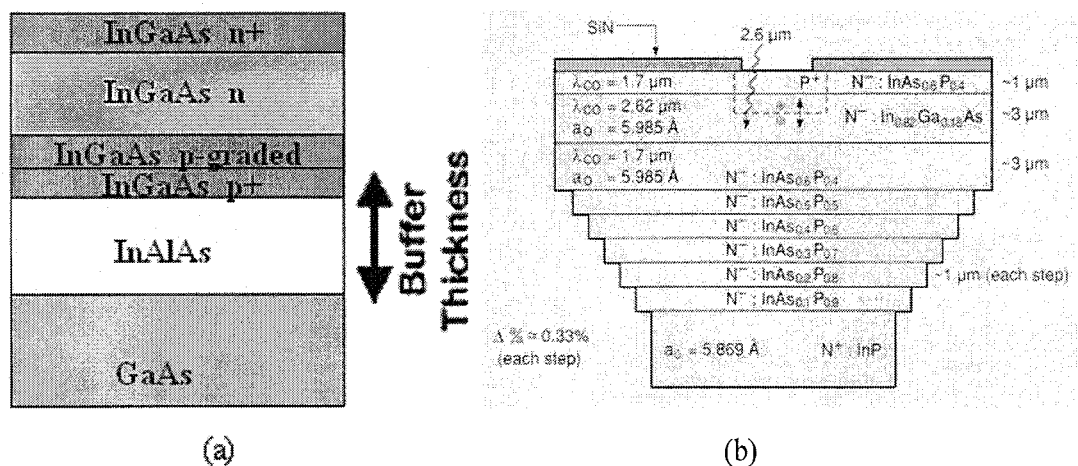


图1.7 长波延伸InGaAs探测器
Fig.1.7 Long wavelength extended InGaAs detector

一般来说，InGaAs探测器长波方向的截止波长为 $1.7\mu\text{m}$ ，但是在许多实际应用中，需要探测器的截止波长向长波扩展。比如探测农产品水分需要 $1.9\mu\text{m}$ 的探测器，“LIDAR”系统中需要 $2.05\mu\text{m}$ 的探测器。为了使InGaAs探测器的探测波段延伸到长波长范围，人们做了大量的工作^[9-13]。L.Zimmermann^[14,15]等人采用厚度为 $5\mu\text{m}$ 的InAlAs缓冲层在GaAs衬底上生长出In含量为78%的InGaAs 256×320 的台面型焦平面短红外探测器，其响应波段为 $1.35 \sim 2.35\mu\text{m}$ ，峰值响应度达 0.68 A/W ，外量子效率可达55%(无增透膜)如图1.7(a)所示。美国传感器无限公司在InP衬底上通过采用厚度达 $8\mu\text{m}$ 的InAsP缓冲层，将器件的截止波长扩展至 $2.6\mu\text{m}$ ，-1V时，器件暗电流为 $0.9\mu\text{A}$ ，峰值响应度为 1 A/W ，量子效率达70%，图1.7(b)^[16]。

1.3.3 短波长增强的 InGaAs 探测器

一般来说，InGaAs探测器光谱响应在 $0.9 \sim 1.7\mu\text{m}$ ，而在实际应用中，人们希望InGaAs探测器不仅可用于短波红外波段成像，而且还可以在可见甚至紫外波段成像。常用的方法是减小InP盖帽层或者衬底的厚度。Indigo Systems Corporation 的J. Barton 发展了一种工艺^[17]，可使InGaAs探测器的光谱响应延伸至 350nm ，响应率在短波方向得到有效增强，见图1.8(a)。美国传感器无限公司也采用类似方法获得短波扩展的InGaAs探测器，见图1.8(b)^[16]。

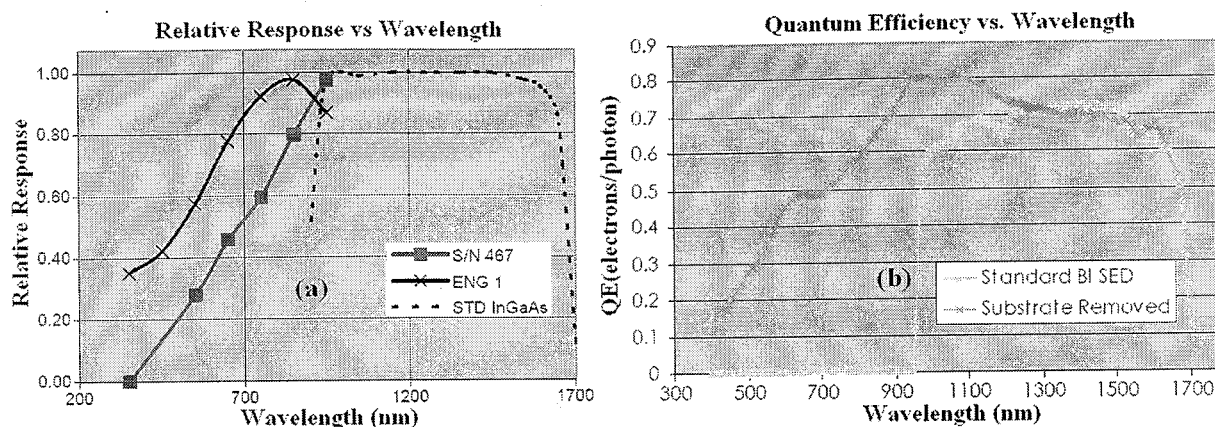


图1.8 短波增强InGaAs红外探测器

Fig.1.8 Short wave enhanced InGaAs IR detector

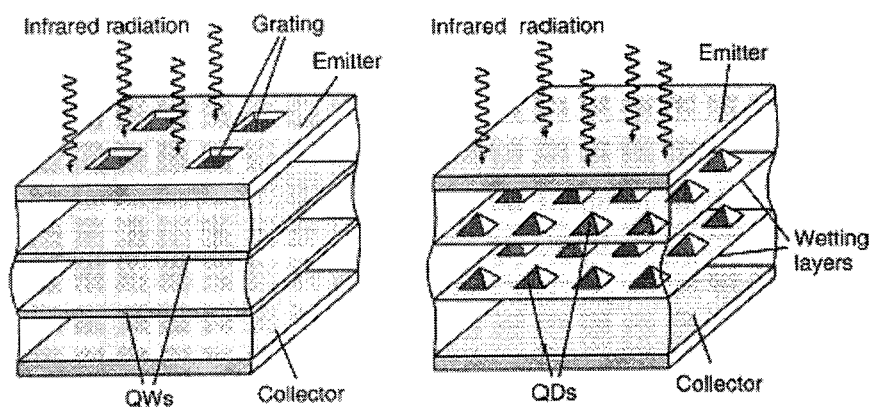


图 1.9 量子阱和量子点结构示意图

Fig.1.9 Schematic illustration of quantum wells and quantum dots

1.3.4 量子阱探测器

由于InGaAs量子阱红外探测器(QWIP)的本征光电流反应速度快,所以它有很大的应用前景,倍受人们关注。InGaAs量子阱焦平面可用于中长波红外成像,另外量子阱焦平面还可用于夜视等商业应用。如图1.9中所示,InGaAs量子阱探测器一般采用InGaAs和GaAs的周期结构。S. Steinkogler等利用分子束外延的方法在<100>方向的半绝缘GaAs衬底上生长了这种结构。每个有效区包括20个周期,每个周期由47.5nm的非掺杂GaAs和4.4nm的掺硅的 $\text{In}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$ 量子阱组成^[18]。

土耳其中东技术大学的研究小组利用MBE制备了 640×512 元InP/ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 量子阱焦平面^[19-20],探测器和读出电路混成连接,并实现了成像。77K温度下,平均噪声等效温差为40mK。80K温度, -1V偏置下,峰值响应度为0.28A/W,峰值探测率达到 $2.5 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

1.4 InGaAs红外探测器国内外研究与应用现状

国外对于InGaAs红外焦平面器件的研究起步较早,许多制备厂商都已经拥有非常成熟的系列产品,例如美国Goodrich(下属的传感无限公司)的LC及LE系列, Judson的J系列,日本滨

松公司的G系列,比利时XenICs公司的Xlin及Xeva系列等,另外,美国Indigo、Aerius Photonics公司和波音Spectrolab公司以及法国的Thomson和Sofradir公司都有相关产品的报道。上述公司在InGaAs红外焦平面器件的研发和生产领域拥有雄厚的技术实力,而近年来,在一些相关项目的资助下,这些公司InGaAs焦平面探测器的性能得到了很大的提升。

国内也有许多研究机构从事InGaAs探测器的研究工作,例如中科院的半导体所,上海微系统所,武汉电信器件公司等,但他们主要致力于器件材料生长方面的研究,所研制的探测器也主要应用于光纤通讯,重点方向是提高器件的带宽和速度。对于InGaAs焦平面探测器的研究,目前国内主要有重庆光电技术研究所和上海技术物理研究所,其中重庆光电技术研究所主要致力于平面型面阵焦平面探测器的研究,现在已有相关产品,而上海技术物理研究所主要研究台面及平面型线列焦平面探测器,目前也已拥有相关的系列产品。

1.4.1 国外研究现状

(1) 美国Goodrich (SUI)公司

作为一家专业研制锑铟砷探测器的研究机构,Goodrich下属的传感无限公司(SUI)具有雄厚的研发实力,已经形成一系列的探测器产品,其产品性能在国际上也一直处于领先地位。从上世纪90年代到该世纪初,该公司已经相继成功研制出 128×128 、 320×240 、 640×512 、 1024×1024 、 1280×1024 规模的焦平面探测器。目前,该公司可以提供高性能的常规和向短波方向延伸256元、512元和1024元InGaAs线列焦平面和 128×128 元、 320×240 元、 640×512 元和 1280×1024 元面阵焦平面以及延伸至 $2.6 \mu\text{m}$ 的256元线列焦平面产品。图1.10为该公司生产的部分探测器芯片和线列焦平面产品。

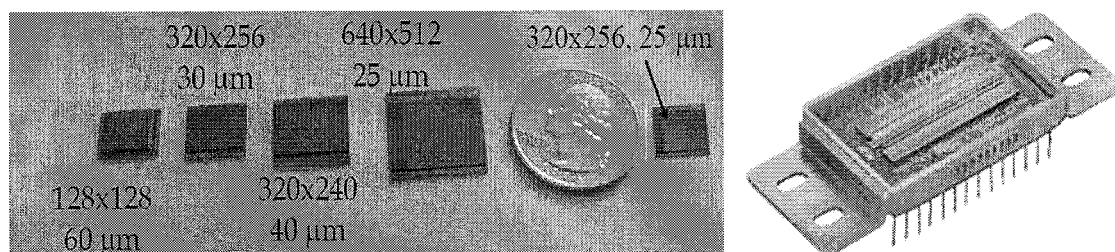


图 1.10 SUI 的部分探测器芯片和线列焦平面
Fig.1.10 InGaAs detector products from Sensors Unlimited, Inc.

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^[21],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)。而且,随着近期DARPA(Defense Advanced Projects Agency), NASA, the US ARMY, Air Force Research Labs等一系列研究计划的资助,其锑铟砷焦平面探测器的性能得到了极大的提高^[22],他们已

经成功在3英寸及4英寸的InGaAs外延片上制备了背照射式1280×1024的阵列焦平面器件，响应波长为0.9~1.7 μm ，光敏元中心距缩减为15 μm ，并且通过InGaAs材料以及器件工艺流程的优化，探测器暗电流密度 $<1\text{nA}/\text{cm}^2(10^\circ\text{C})$ ，峰值探测率 $1.5\times 10^{13}\text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}(295^\circ\text{C})$ ，他们认为，其焦平面器件采用平面扩散成结工艺，由于光吸收层内光生载流子的漂移及扩散作用，入射光产生的载流子会完全被光敏元吸收，从而达到100%的填充因子，而且焦平面器件也会具有很高的灵敏度。

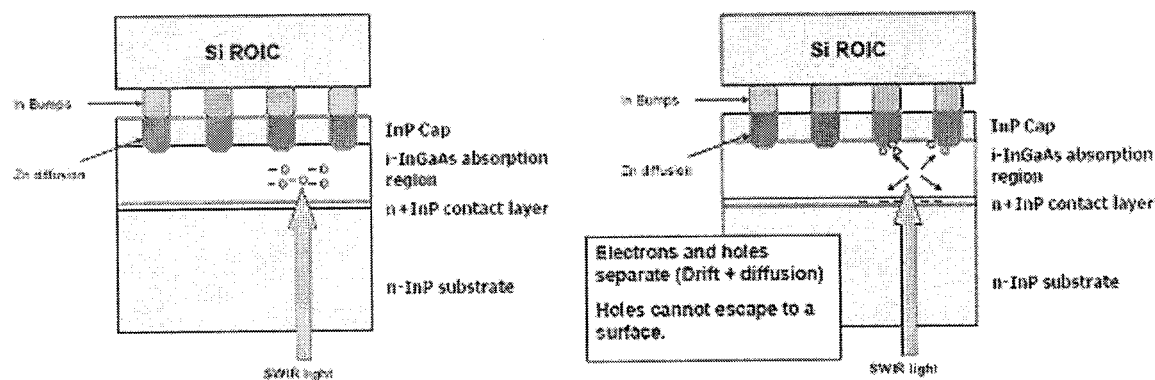


图1.11 填充因子为100%的平面型焦平面器件
Fig.1.11 Planar type InGaAs FPA with 100% fill factor

Goodrich公司在进行InGaAs焦平面探测器研制的同时，对于InGaAs基红外相机的研制也取得了很大的进展。1994年，传感无限公司的128×128元焦平面红外相机的重量为3.5kg，集成度为3pixels/g，2004年，该公司的S.Huang报道的320×256元焦平面商用微型短波红外相机，光敏元中心距25 μm ，相机重量小于70g，集成度1000pixels/g，功耗小于1.3W；而到2008年，该公司的商用红外相机所用的InGaAs焦平面为640×512元，光敏元中心距25 μm ，相机重量小于100g，集成度3000pixels/g，功耗小于2.5W，如图1.12，1.13所示^[23]。近期^[24]，Goodrich宣布参与DARPA MISI(Micro-Sensors for Imaging)计划，根据该计划，该公司的红外相机的InGaAs焦平面探测器要达到10000pixels/g的集成度，光谱响应范围0.4~1.7 μm ，能够在白天及夜间条件下对100m距离的物体进行成像，成像系统能够在四节“AA”电池的支撑下至少工作4小时，预计其1280×1024规模的InGaAs成像模块重量 $<10\text{g}$ ，功耗 $<0.5\text{W}$ ，包括组件封装、成像透镜及电路，以用于该计划中所需的单兵SWIR成像系统，如图1.14，1.15所示。

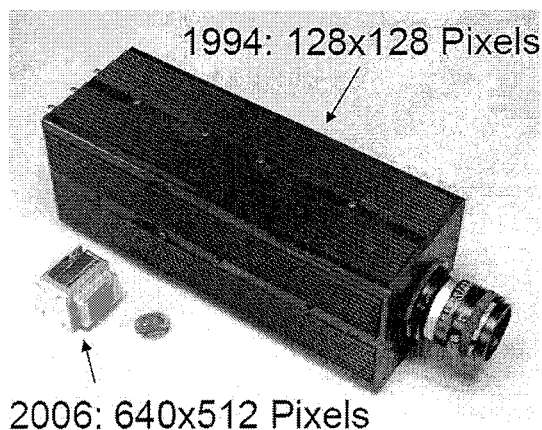


图1.12 Goodrich公司研制的InGaAs红外相机
Fig.1.12 InGaAs infrared camera from Goodrich

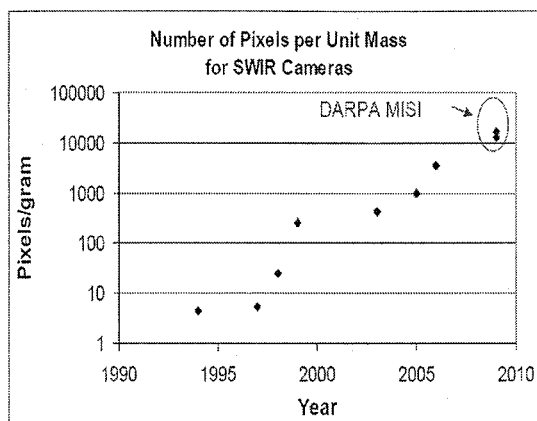


图1.13 DARPA MISI计划对短波红外相机的要求
Fig.1.13 Number of pixels per unit mass for SWIR cameras

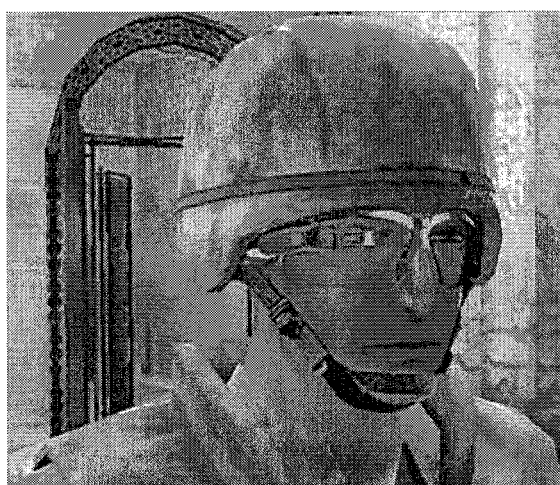


图1.14 DARPA计划中所需单兵成像系统
Fig.1.14 Head-mounted SWIR imaging system for DARPA's MISI program

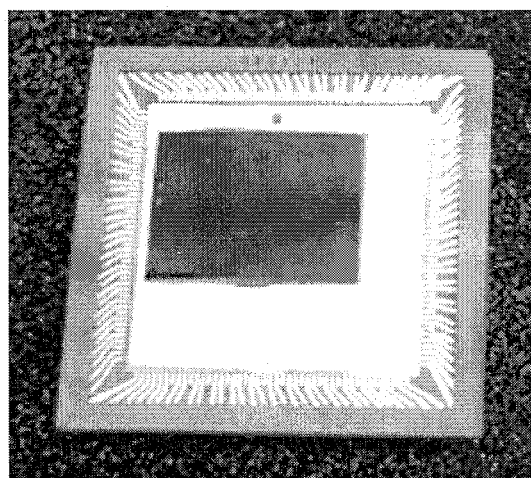


图1.15 DARPA MISI计划中1280×1024 FPA的读出电路
Fig.1.15 1280×1024 MISI ROIC

(2) 美国Aerius Photonics公司

Aerius Photonics公司成立于2004年，该公司研制的InGaAs探测器主要应用于天文观测，这就需要探测器具有良好的暗电流性能，因此在暗电流优化方面做了很多的工作^[25]，他们的InGaAs器件主要采用平面型结构。通过材料结构的优化以及工艺流程的优化来降低器件的暗电流，材料结构的优化主要集中在InGaAs吸收层与InP盖帽层及缓冲层的界面特性上，而工艺流程的优化则主要集中在扩散成结过程以及表面钝化上。首先，通过材料结构的优化设计，成功将器件在20°C时的暗电流密度从18 nA/cm²(-0.1V)降至8.4 nA/cm²(-0.1V)。然后，通过制备测试结构器件，对器件暗电流特性进行研究，研究表明，器件暗电流主要来自器件表面，根据研究结果对器件工艺流程中的扩散成结及表面钝化进行了优化，从而将器件在7°C时的暗电流密度降至<1nA/cm²(-0.1V)。

在前期器件暗电流优化工作的基础上，他们成功研制出1024×1024元的平面型InGaAs焦平

面器件, 器件光敏元中心距为 $18\text{ }\mu\text{m}$, 单个光敏元电容小于 35 fF , 并将焦平面器件与Teledyne Scientific公司的读出电路HAWAII-1RG互连(该电路可以进行长时间积分以满足对天体成像的需要), 应用在天文成像上, 取得了良好的效果。图1.16所示为所用InGaAs相机及Si CCD相机(2148×1472 像素级别)对猎户座星云的成像效果对比图(其中, 图中所用InGaAs相机的积分时间为 20 s), 由图可知, 采用InGaAs相机可获得更多的天体信息。

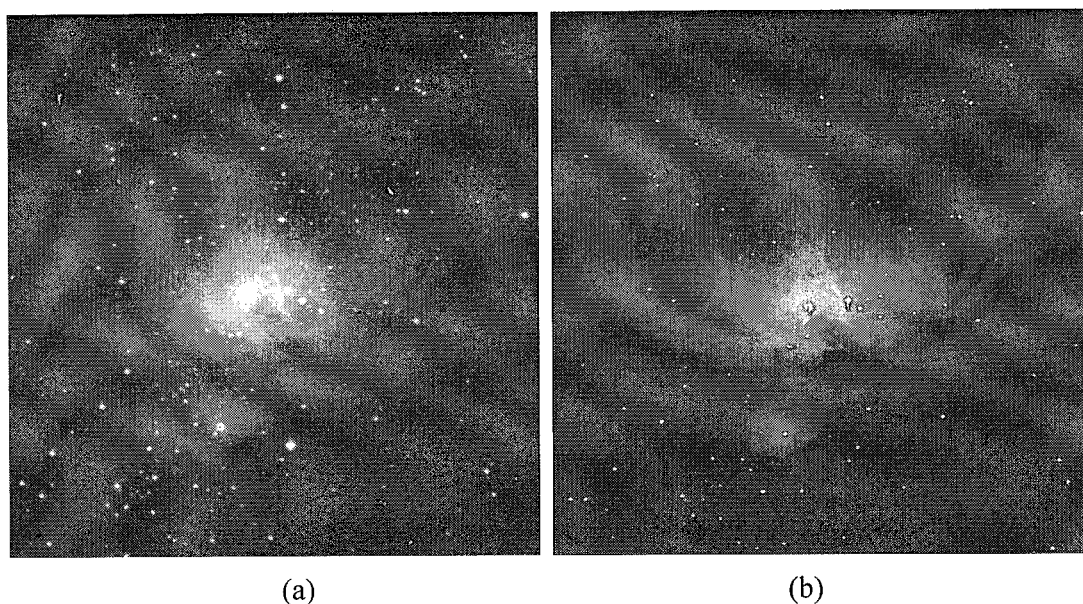


图1.16 InGaAs相机及Si CCD相机对猎户座星云的成像效果对比图(a)InGaAs(b)Si基CCD
Fig.1.16 Pictures of the Orion Nebula taken by InGaAs cameras and Si CCD (a)InGaAs(b)Si CCD

近期, 该公司又研制出 1280×1024 元的平面型InGaAs焦平面器件, 器件暗电流密度在 $7^\circ\text{C}(280\text{ K})$ 时 $<1\text{ nA}/\text{cm}^2$ 。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^[26]。

(3)比利时XenICs公司

目前, XenICs公司的 128 元、 256 元和 512 元线列焦平面以及 320×256 元焦平面已经商品化, 截止波长分别为 $1.7\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 的器件在室温下的探测率分别达到了 $7.5\times 10^{12}\text{ cmHz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$ 、 $5\times 10^{11}\text{ cmHz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$ 和 $8\times 10^{10}\text{ cmHz}^{1/2}\text{ W}^{-1}$, R_0A 值分别为 $10^6\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $2700\Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 $150\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。XenICs找到了一种安全地除去InP基底的方法, 通过引入一种InGaAsP刻蚀阻挡层到外延基底中, 再用HCl湿法刻蚀有选择性的刻蚀掉InP。从而将探测器芯片的厚度从 $125\text{ }\mu\text{m}$ 减至 $5\text{ }\mu\text{m}$, 使得InGaAs焦平面器件的波长响应范围扩展至 $0.4\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$, 并制备了 320×256 的焦平面器件, 器件光敏元中心距 $20\text{ }\mu\text{m}$, 主要应用于高光谱探测^[27]。

近期, XenICs公司公布了其最新产品Xlin-1.7-1024扫描型线列InGaAs探测器, 光敏元数 1024 , 器件响应波段 $0.9\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$, 光敏元中心距 $12.5\text{ }\mu\text{m}$, 这是目前所报道的光敏元中心距最小

的线列InGaAs器件^[28]。

(4)美国Raytheon及波音Spectrolab公司

基于DARPA 的PCAR(Photon Counting Array)计划的资助, 2008年, 美国波音Spectrolab公司通过优化材料外延结构及器件结构成功制备了高量子效率、低暗电流密度的 1280×1024 元的InGaAs焦平面器件, 光敏元尺寸为 $15 \times 15 \mu\text{m}^2$, 器件在280K温度下, 暗电流密度低于 1 nA/cm^2 , 室温下, 峰值($1.55 \mu\text{m}$)响应率达到 1.08 A/W ^[29]。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短波红外成像系统^[30]。

(5) 美国Judson公司

2008年, Herry Yuan等报道了该公司红外探测器的研究进展^[31], 根据报道, 该公司产品包括常规、短波方向延伸和向长波方向延伸的 320×256 元InGaAs焦平面, 光敏元尺寸为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 。所用外延材料的由MOCVD方法生长、器件采用平面Zn扩散工艺制备。常规InGaAs焦平面的响应波段为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 器件结构和铟柱的扫描电镜照片分别如图1.17所示。器件在 $1.35 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段的量子效率在 $80\% \sim 85\%$ 之间, 有效像元为 99.8% 。目前, 该公司也已经开始研制 1280×1024 规模的常规InGaAs焦平面器件, 光敏元尺寸为 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 。向短波方向延伸的InGaAs焦平面器件采用衬底移除技术制备, 响应波段为 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$, $-65^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ 温度范围内, 器件在 $0.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 响应波段内的量子效率最低为 40% 。常规及短波延伸焦平面器件均可在室温及一级热电制冷条件下工作。向长波方向延伸InGaAs焦平面的响应波段为 $1.4 \sim 2.6 \mu\text{m}$, 采用InAsP作为缓冲层和盖帽层, 器件的峰值量子效率优于 80% , 由于InAsP缓冲层的窗口效应, 当制冷至 -65°C 时, 响应波段变为 $1.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$, 长波延伸器件采用了四级热电制冷器。另外, 该公司还公布了大光敏元线列器件, 响应波段 $0.8 \sim 1.8 \mu\text{m}$, 规模为 16×1 及 32×1 , 光敏元尺寸 $500 \times 1000 \mu\text{m}^2$, 光敏元间距 $10 \mu\text{m}$ ^[32]。

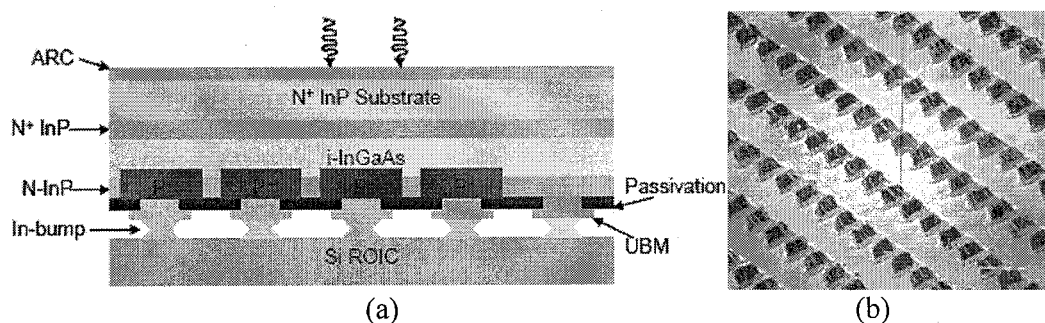


图 1.17 InGaAs 器件结构(a)和铟柱的扫描电镜照片(b)

Fig.1.17 Cross-section of $1.7 \mu\text{m}$ InGaAs FPA structure (a) and SEM photo of InGaAs 2D array with In-bumps (b) at Judson

(6) 日本Hamamatsu公司

日本Hamamatsu公司也是高性能非制冷红外光电探测器及其附件产品的制造商之一。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)上就采用了由该公司生产的G8180-256W 型延伸波长焦平面器件, 响应波段为 $0.94\sim 2.4\ \mu\text{m}$ ^[33]。目前该公司产品主要有以下几种^[34]: 1)短波增强型InGaAs探测器组件, 该类器件主要为单元, 光敏元直径 $1\sim 3\text{mm}$, 响应波段 $0.5\ \mu\text{m}\sim 1.7\ \mu\text{m}$; 2)长波延伸InGaAs探测器组件, 该类器件也主要为单元, 光敏元直径 $0.3\sim 3\text{mm}$ 不等, 长波截止波长可分别达到 $1.9\ \mu\text{m}$ 、 $2.1\ \mu\text{m}$ 和 $2.6\ \mu\text{m}$; 3)常规波段InGaAs探测器组件, 光敏元直径 $0.3\sim 5\text{mm}$ 不等, 响应波段 $0.9\ \mu\text{m}\sim 1.67\ \mu\text{m}$, $0.9\ \mu\text{m}\sim 1.7\ \mu\text{m}$; 4)线列成像探测器组件, 是将线列探测器芯片、热电制冷器和CMOS读出电路耦合在一起, 器件的响应波段为 $0.9\ \mu\text{m}\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 或 $0.9\ \mu\text{m}\sim 2.6\ \mu\text{m}$, 探测器规模有128元、256元、512元和1024元, 光敏元尺寸为 $50\times 500\ \mu\text{m}^2$ 或 $25\times 500\ \mu\text{m}^2$, 以及响应波段为 $0.9\ \mu\text{m}\sim 1.7\ \mu\text{m}$, 光敏元尺寸 $450\times 1000\ \mu\text{m}^2$ 的 16×1 元大光敏元线列器件。该公司还推出了响应波段为 $0.9\ \mu\text{m}\sim 1.7\ \mu\text{m}$, 光敏元尺寸为 $50\times 50\ \mu\text{m}^2$ 的256元成像焦平面和光敏元尺寸为 $25\times 25\ \mu\text{m}^2$ 的512元线列成像焦平面。

1.4.2 国内研究现状

近期, 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, 器件增透膜为 SiN_x 。探测器通过In柱倒焊与Si基CMOS读出电路互连。室温下, 器件平均峰值探测率 $6\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。在可见度500m的条件下, 实现对3km远建筑物的成像, 取得了较好的成像效果, 如图1.18所示^[35]。

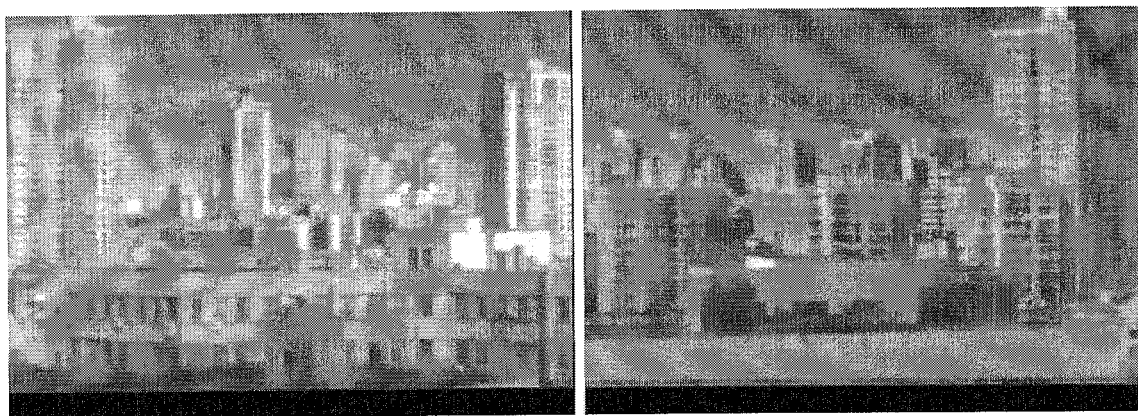


图1.18 可见度500m的条件下对3km远建筑物的成像效果图

Fig.1.18 images of targets about from 3km away, even under the visibility of 500m

中科院上海微系统所的研究人员在InP衬底上利用MBE方式, 采用 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 作为缓冲层生长出n-on-p型高In组分InGaAs材料, 并制备了波长扩展至 $2.0\ \mu\text{m}$ 及 $2.4\ \mu\text{m}$ 的InGaAs探测器, 在290 K时两种探测器典型 R_0A 值分别为 $760\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 及 $104\ \Omega\cdot\text{cm}^2$, 室温下探测器峰值探测率分别为 $1.3\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 及 $6.5\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ^[36]。

上海技术物理研究所研制的台面型 256×1 正照射InGaAs焦平面探测器芯片的峰值响应率达到 1.09 A/W ，室温下响应截止波长为 $1.71\text{ }\mu\text{m}$ ，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% ；台面型 256×1 元背照射InGaAs线列焦平面探测器，探测器芯片的峰值响应率为 0.95 A/W ，组件的峰值探测率为 $4.5\sim 6\times 10^{11}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，响应非均匀性 $3.5\%\sim 5\%$ ；台面型 512×1 元背照射InGaAs探测器组件的平均峰值探测率为 $6.13\times 10^{11}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，响应不均匀性为 3.71% ^[37]。

1.4.3 InGaAs 短波红外焦平面器件发展趋势

任何红外探测器件的发展与红外成像系统的发展是分不开的，目前，红外成像系统已经进入第三代，包括制冷和非制冷焦平面器件在内的三种第三代红外探测器现在已经基本得以确认^[38-40]：

- 1) 可以多波段工作的高性能、高分辨率的制冷成像器件；
- 2) 中、高性能的非制冷成像器件；
- 3) 低成本、一次性使用的非制冷成像器件。

根据上述要求，合适的第三代红外探测器件就需要满足：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。

通过分析国际InGaAs焦平面探测器的发展现状及国内对InGaAs焦平面器件需求，可以发现，今后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。采用焦平面器件,可以更好地满足系统的要求，同时也有利于简化系统结构、降低成本。在向更大规模的凝视型焦平面、多色探测器发展的中，长波器件已达到 640×480 元的规模，中、短波器件达到了 2048×2048 的规模。今后，为提高系统的性能，InGaAs红外成像探测器将向更大面阵和甚长线列的大阵列方向发展。从前文可知，目前，Goodrich^[22]、Aerius Photonics^[25]、Boeing Spectrolab^[29]等公司都已经拥有 1280×1024 规模的InGaAs焦平面器件，器件的光敏元中心距也由 $20\mu\text{m}$ 减小为 $15\mu\text{m}$ ，根据2009年，DARPA-PCAR-III期计划，光敏元中心距要进一步减小至 $10\mu\text{m}$ ，而目前，XenICs公司公布的最新产品，Xlin-1.7-1024扫描型线列InGaAs探测器的光敏元中心距已经减小为 $12.5\mu\text{m}$ ^[28]。

(2) 低暗电流低噪声焦平面探测器。随着红外成像系统对功耗、系统质量以及成本等方面的要求越来越高，非制冷探测器已经成为一个发展趋势，这样对于器件暗电流噪声的要求也越来越高，降低暗电流噪声已经成为一个研究热点。从前文可知，在DARPA PCAR计划的资助下，Goodrich^[22]及Boeing Spectrolab公司^[29]在降低器件暗电流等方面做了许多的工作，并成功的将暗电流密度降低至 $<1\text{ nA/cm}^2$ (280K, -0.1V)。Aerius Photonics公司^[25]也通过努力将焦平

面器件暗电流降至同样的水平。

(3) 探测器芯片与读出电路的单片集成。背照射式大规模阵列InGaAs焦平面器件通过In柱与Si基读出电路的连接已经成为一种主流的互连方式，这极大的简化了红外成像探测器的结构，便于器件焦平面化。而随着半导体材料及器件制备技术的日益成熟，单片集成InGaAs焦平面阵列的研制也有了很大的突破。早在1992年，德国Siemens Research Laboratories的J. G. Bauer等人，采用离子注入及台面腐蚀相结合的技术成功研制了单片集成的InGaAs/InP PIN结型场效应晶体管 (JFET) 焦平面探测器^[41]。2001年，美国喷气推进实验室JPL (Jet Propulsion Laboratory)与传感器无限公司合作研制出用于成像的4×4元单片式InGaAs有源像素传感器短波红外焦平面阵列，响应波段0.5~2.5 μm ^[42]。

(4) 多波段工作。多波段工作的焦平面探测器可以获取更丰富、更精确、更可靠的目标信息。随着材料生长以及器件制备的发展，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。

1994年，Dong-Su Kim等制备了一种可响应三个波长的铟镓砷焦平面器件，这种器件包含具有三种不同In组分的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 吸收层，响应截止波长分别为1.65 μm ($\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$)、2.07 μm ($\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$)和2.64 μm ($\text{In}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$)，吸收层之间通过 $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ 缓冲层相隔以减少晶格失配带来的暗电流，通过对不同吸收层选择性的腐蚀和扩散在各层上独立地制备p-n结以得到不同响应波段的器件^[43]。

而随着InGaAs材料生长技术的日益成熟，向长波延伸的InGaAs焦平面器件性能得到了很大的改善，器件的响应波长已经拓展至2.6 μm ，国内外的相关研究机构都已经具有了相对成熟的产品。

近几年，对于可见光方向延伸的InGaAs焦平面的研究开始成为热点。国外很多公司都有向短波方向延伸的InGaAs焦平面产品，例如，美国Goodrich、Judson公司，比利时XenICs公司，日本Hamamatsu公司等。目前，一般采取的制备工艺是将InP衬底层进行减薄以减小InP材料对可见光波段的吸收，而达到向短波拓展的目的。例如，XenICs通过引入一层InGaAsP刻蚀阻挡层到外延基底中，再用HCl选择性刻蚀掉InP衬底层，使得InGaAs焦平面器件的波长响应范围扩展至0.4~1.7 μm 。2008年，美国Missile Defense Agency的P. Esfandiari等报道了一种衬底转移技术^[44]，首先将InGaAs/InP材料贴在双面抛光的宝石片上，采用腐蚀方法完全去除InP衬底，再采用台面成型工艺制备芯片，最后倒装互连，如图1.19所示。这种制备技术可提供可靠的衬底，且由于宝石衬底在可见光和近红外波段是透明的，并不会影响器件在可见光及近红外波段的响应，但是器件制备过程采用的是台面成型工艺，造成器件的暗电流较大，

影响了器件性能，这种技术还需要进行改进。

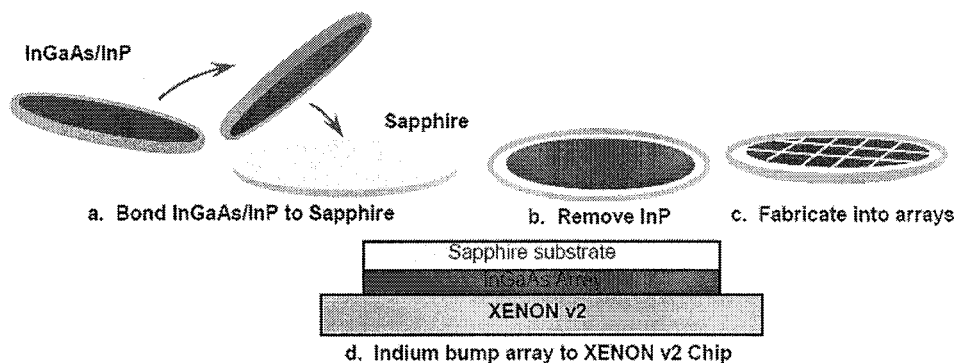


图1.19 InGaAs焦平面制备的衬底转移技术流程图

Fig.1.19 Epitaxial transfer of InGaAs to sapphire substrate for VIS-NIR FPAs

随着人们对1~3 μm 波段探测需求的增加，InGaAs焦平面器件的研究进入了一个飞速发展阶段，材料生长技术不断成熟，器件性能不断提高，生产规模不断变大，成本不断的降低，其应用领域也在不断拓展，这些都为我们提供了极好的发展机遇。但是，对比国内外对于InGaAs焦平面器件的研究现状可以发现，无论从焦平面器件规模、器件种类，还是焦平面性能上来看，国内与国外都还存在很大的差距，要缩小这种差距，从器件材料的生长到器件结构优化以及器件制备工艺流程等方面都有大量的工作进行。

1.4.4 InGaAs 器件研制中存在的问题

从器件的工艺制备角度来讲，根据前文分析，无论是常规波长还是长波扩展的InGaAs探测器，目前国际上通常采用的是Zn扩散成结工艺，采用平面结构可以比较容易获得高性能的器件，但是平面型器件光敏元的定义比较困难，光敏元之间存在一定的串音，串音的存在会严重影响器件的成像质量，人们为了减小串音，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^[45,46]，这样对于器件结构的设计就比较重要；平面型器件的扩散成结一般要经历高温过程，如何精确控制扩散温度并保持扩散过程的稳定性就异常重要，另外，掺杂元素需要一定的激活效率才能完成扩散成结过程，特别是在长波扩展外延材料中，晶格失配的存在会造成掺杂元素激活效率低下，给器件的制备带来一定的困难，这样平面型长波扩展器件对外延材料的要求就比较高；而台面型器件是通过刻蚀台面来实现对器件进行隔离的，器件的光敏元即是器件的台面，很容易进行光敏元的定义，且由于对相邻单元进行了物理隔离，可以有效地抑制串音，对于台面刻蚀成型技术，干法刻蚀特别是ICP刻蚀技术具有刻蚀速率稳定、选择比高、各向异性、损伤小、大面积刻蚀均匀等优点，可以获得很高的深宽比及良好的刻蚀表面形貌，在In基材料的刻蚀中得到了广泛的应用^[47,48]，而随着器件规模的增大、光敏元间距的减小，ICP干法刻蚀的优势将会表现的更加明显。

1.5 本论文的研究目的和主要内容

本文以研制高性能InGaAs线列探测器为核心, 针对现有器件制备工艺存在的问题进行了研究, 优化并发展了器件制备的部分关键工艺环节。第一章回顾了红外技术和探测器的发展, 概述了短波红外及InGaAs焦平面探测器的研究现状及发展趋势; 第二章主要对平面型器件的部分关键工艺流程及器件结构进行了优化设计, 研究了不同结构器件的串音, 研究了平面型器件光敏元扩大现象的抑制技术, 采用优化的器件工艺及结构研制了光谱仪用256×1元线列InGaAs探测器, 并针对常规闭管扩散工艺中存在的工艺复杂、重复性较差等缺点, 对平面型器件的开管扩散工艺进行了初步的研究; 第三章对平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器进行了探索性研究, 利用扫描电容显微技术(SCM)及二次离子质谱(SIMS)技术研究了Zn掺杂元素在晶格匹配及晶格失配外延材料中的扩散机制, 然后采用InP及InAsP作为盖帽层的异质结构外延材料制备了平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器, 并对其性能做了初步的分析研究; 第四章采用感应耦合等离子体ICP刻蚀台面成型工艺制备了背照射式N-on-P型640×1元线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器芯片, 截止波长2.4 μm , 并对探测器芯片与读出电路互连后焦平面器件的性能进行了研究; 第五章是全文总结及展望。

参考文献:

- [1] Hamamatsu Characteristics and use of infrared detectors Nov. 2004 1-43
- [2] 郝国强 InGaAs红外探测器器件与物理研究 博士研究生学位论文
- [3] C.Joseph. "Passive infrared detection: theory and application". Kluwer academic publishers, 1999:225
- [4] Antoni Rogalski. Infrared detectors, Poland: Warsaw, 1999:6
- [5] 梅遂生, 杨家德 光电子技术, 北京: 国防工业出版社, 1999
- [6] 黄杨程 空间遥感用InGaAs短波红外探测器 红外 2004 (3): 10-18
- [7] J. Christopher Dries, Milind R. Gkhale, Stephen R. Forrest Extended wavelength InGaAs detectors-Recent progress in new materials for bandgap wavelengths $\lambda_g > 1.65\mu\text{m}$ (invited) IEEE 740-471
- [8] G.H.Olsen, A.M.Joshi, V.S.Ban, et al. Multiplexed 256 element InGaAs detectors for 0.8~1.7 μm room-temperature operation, SPIE, 1988,972:279-285
- [9] G.H.Olsen, A.M.Joshi, V.S. Ban, Current status of InGaAs detector arrays for 1-3 μm [J], SPIE, 1991, 1540: 596-605
- [10] M. DHondt, I. Moerman and P. Demeester, Dark current optimization for MOVPE grown 2.5 μm wavelength InGaAs photodetectors [J], Electron. Lett., 1998, 34(9): 910-912
- [11] P. Merken, L. Zimmermann, J. John, G. Borghs, et al, Extended-wavelength InGaAs-on-GaAs infrared focal-plane array[J], Electron. Lett., 2002, 38(12): 588-590
- [12] Yonggang Zhang, Yi Gu, Cheng Zhu, Guoqing Hao, et al, Gas source MBE grown wavelength extended 2.2 μm and 2.5 μm InGaAs PIN photodetectors[J], Infrared Physics & Technology, 2006, 47: 257-262

- [13] A. M. Joshi, G. H. Olsen, S. Mason, M. J. Lange, and V. S. Ban, Near-infrared (1-3um) InGaAs detectors and arrays: crystal growth, leakage current and reliability[J], SPIE, 1993, 1715: 585-593
- [14] P. Merken, L. Zimmermann, J. John et al. Extended-wavelength InGaAs-on-GaAs infrared focal-plane array Electronics Letters 2002, vol.38 No.12 588-590
- [15] Lars Zimmermann, Joachim John, Stefan Degroote et al. Extended wavelength InGaAs on GaAs using InAlAs buffer for back-side-illuminated short-wave infrared detectors. Applied Physics Letters 2003 Vol.82 No.17:2838-2840
- [16] Martin H. Ettenberg, Imaging in the Shortwave Infrared: Seeing Beyond the Visible. SUI www.sensorsinc.com
- [17] Theodore R. Hoelter, Jeffrey B. Barton, Extended short wavelength spectral response from InGaAs focal plane arrays[J], SPIE, 2003, 5074: 481-490
- [18] S. Steinkogler, H. Schneider, R. Rehm. Time-resolved electron transport studies on InGaAs/GaAs-QWIPs[J], Infrared Physics & Technology, 2003, 44: 355-361
- [19] O.O.Cellek, S. Ozer, C. Besikci, High Responsivity InP-InGaAs Quantum-Well Infrared Photodetectors: Characteristics and Focal Plane Array Performance[J], IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(7): 980-985
- [20] O. O. Cellek, S. Ozer, C. Besikci, Assessment of large format InP/InGaAs quantum well infrared photodetector focal plane array[J], Infrared Physics & Technology, 2005, 47: 115-118,
- [21] Alan Hoffman, Todd Sessler, Joseph Rosbeck, David Acton, Megapixel InGaAs Arrays for Low Background Applications[C]. Proc. of SPIE 2005, 5783: 32-38
- [22] Peter Dixon, Navneet Masaun, Michael Evans, John Ueng-McHale, John Trezza, Martin E ttenberg, Monolithic planar InGaAs detector arrays for uncooled high sensitivity SWIR imaging[C] Proc. of SPIE 2009. 7307: 730706-1-12
- [23] Timothy Bakker, Devon Turner, Jesse Battaglia Development of a miniature InGaAs camera for wide operating temperature range using a temperature-parameterized uniformity correction[C] Proc. of SPIE 2008. 6940:69400K-1-9
- [24] J. Battaglia, M. Blessinger, M. Enriquez, M. Ettenberg, M. Evans, K. Flynn, M. Lin, J. Passe, M. Stern, and T. Sudol An uncooled 1280×1024 InGaAs focal plane array for small platform, shortwave infrared imaging[C]. Proc. of SPIE, 2009. 7298:72983C-1-8
- [25] Michael MacDougal, Jon Geske, Chad Wang, Shirong Liao, Low Dark Current InGaAs Detector Arrays for Night Vision and Astronomy[C] Proc. of SPIE 2009, 7298:72983F-1-10
- [26] http://www.aeriusphotonics.com/prod_ingaas.html
- [27] Jan Vermeiren, Urbain Van Bogget, Guido Vanhorebeek, Jonas Bentell, Peet Verbeke and Thierry Colin Low-noise, fast frame-rate InGaAs 320 x 256 FPA for hyperspectral Applications[C] Proc. of SPIE 2009. 7298:72983N-1-7
- [28] <http://www.xenics.com/>
- [29] Joseph Boisvert, Takahiro Isshiki, Rengarajan Sudharsanan, Ping Yuan, Performance of Very Low Dark Current SWIR PIN Arrays[C] Proc. of SPIE 2008. 6940:69400L-1-8
- [30] David Acton, Dr. Michael Jack, Todd Sessler Large format short wave infrared (SWIR) focal plane array

- (FPA) with extremely low noise and high dynamic range[C] Proc. of SPIE 2009, 7298:72983E-1-13
- [31] Henry Yuan, Gary Apgar, Jongwoo Kim, Joyce Laquindanum, FPA Development: from InGaAs, InSb, to HgCdTe[C] Proc. of SPIE 2008. 6940: 69403C-1-11
- [32] <http://www.judsontechnologies.com/>
- [33] <http://events.eoportal.org/presentations/182/9323.html>
- [34] <http://sales.hamamatsu.com/en/products/solid-state-division/ingaas-pin-photodiodes.php>
- [35] Gao xin-jiang, Tang zun-lie, Zhang xiu-chuan, Chen yang, Jiang li-qun, Cheng hong-bing Short wave infrared InGaAs focal plane arrays detectors: the performance optimization of photosensitive element[C] Proc. of SPIE 2009, 7383:73832S-1-9
- [36] Yonggang Zhang , Yi Gu, Zhaobing Tian, Aizhen Li, Xiangrong Zhu, Kai Wang Wavelength extended InGaAs/InAlAs/InP photodetectors using n-on-p configuration optimized for back illumination[J]. Infrared Physics & Technology 2009,52:52-56
- [37] 顾聚兴, 第三代红外成像器[J]红外, 2002, 9: 30-32
- [38] Gabby Sarusi, QWIP or other alternative for third generation infrared systems[J], Infrared Physics & Technology 2003,44:439-444
- [39] A. ROGALSKI, New materials systems for third generation infrared photodetectors [J] opto-electronics review 2008,16(4):458-482
- [40] 唐恒敬, 台面型InGaAs短波红外线列探测器技术研究[D], 中国科学院上海技术物理研究所, 2009.
- [41] J. G. Bauer, H. Albrecht, L. Hoffmann, D. Romer, and J. W. Walter Locally Ion-Implanted JFET in an InGaAs/InP p-i-n Photodiode Layer Structure for a Monolithically Planar Integrated Receiver OEIC[J] IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 1992,4(3):253-255
- [42] Quiesup Kima, Michael J. Langeb, Chris J. Wrigleya, Thomas J. Cunninghama, and Bedabrata Pain Two-dimensional Active Pixel InGaAs Focal Plane Arrays[C], Proceedings of SPIE 2001,4277:223-228
- [43] Dong-Su Kim, Stephen R.Forrest, *et al*, A three wavelength infrared focal plane array detector element [J], IEEE Photonics technology letters, 1994, 6(2): 235-238.
- [44] P. Esfandiari, P. Koskey, K. Vaccaro, W. Buchwald, F. Clark, B. Krejca, C.Rekeczky, and A.Zarandy Integration of IR Focal Plane Arrays with Massively Parallel Processor[C] Proc. of SPIE 2008, 6940:69402E-1-8
- [45] Michael J. Lange, Successful detector design is a game of give and take, Photonics Spectra, 2005
- [46] Byung Jun Park, Jongwan Jung, Chang-Rok Moon, Sung Ho Wang, Yong Woo Lee et al, "Deep trench isolation for crosstalk suppression in active pixel sensors with 1.7 μ m pixel pitch", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46, No. 4B, 2007, P2454-2457
- [47] J ie L, Andreas L, Fow-sen C, et al. Smooth and vertical sidewall InP etching using Cl₂ /N₂ inductively coupled plasma[J]. J. Vac. Sci. Technol. B. , 2004, 22 (2) : 510 – 512
- [48] Maeda T, Lee J W, Shul R J, et al. Inductively coupled plasma etching of III - V semiconductor in BCl₃ based chemistries, InP, InGaAs, InGaAsP, InAs and AlInAs [J]. App l. Sur. Sci. , 1999, 143: 183 - 190

第二章 平面型常规波长 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器关键工艺技术研究

2.1 引言

按器件结构, $\text{InP}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ p-i-n探测器一般可分为台面和平面型两类, 其主要区别在于pn结的制备工艺。台面型器件是在原位掺杂的p-i-n⁺结构的外延材料上通过刻蚀隔离槽对相邻的器件进行隔离, 这种方式的优点是重复性比较好, 工艺简单, 相邻单元器件之间的串音比较小, 缺点是隔离槽的刻蚀使得器件侧面失去保护, 器件的暗电流和噪声特性变差; 而平面型器件则是采用n-i-n⁺结构外延材料, 通过对n型InP层进行p掺杂得到, 优点是器件的pn结埋于InP层中, 这样就减小了器件钝化的困难, 使得器件的暗电流和噪声相对较小。目前, 国际上的InGaAs线列和面阵探测器通常采用这种Zn扩散平面结构。但是平面扩散成结工艺较为复杂, 且随着阵列器件规模的增大, 器件光敏元中心距缩小, 相邻光敏元之间存在一定的串音, 因此, 平面型器件对于器件结构的设计要求较高。

吴小利博士对于平面型常规波长 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器已经做了一定的研究, 其工作主要是器件制备工艺的优化、器件pn结的表征等^[1]。本章在此基础上做了进一步的研究, 主要的内容有: 通过器件部分关键环节的优化, 提高了器件工艺的可控性及器件性能; 研究了不同结构器件的串音, 为器件结构的优化提供了一种思路; 通过器件结构的优化设计, 对平面型器件光敏元扩大的现象进行了抑制; 根据优化的器件工艺及器件结构制备了光谱仪用长线列平面型InGaAs器件; 针对常规闭管扩散工艺中存在的工艺复杂、重复性较差等缺点, 对平面型器件的开管扩散工艺进行了初步的研究。

2.2 常规波长 InGaAs 探测器扩散成结工艺的优化

平面型 InGaAs 器件的工艺流程主要包括: (1) 扩散掩膜生长; (2) 腐蚀开扩散孔, 闭管扩散; (3) p 电极生长; (4) SiO_2 电极退火阻挡膜生长; (5) p 电极退火; (6) 腐蚀开电极通孔, 加厚电极生长; (7) 背面抛光; (8) 背电极生长^[1]。平面型 InGaAs p-i-n 探测器主要的电学结构是一个 pn 结, pn 结的制备及保护是平面型器件工艺流程中最关键的环节之一。平面型器件 pn 结的制备主要是通过高温扩散方式形成的, 对于高温扩散过程的控制直接关系到器件 pn 结的性能, 而 pn 结的钝化保护对于提高器件性能也具有非常重要的作用, 本节主要对高温扩散过程的控制及 pn 结钝化保护的工艺环节进行研究。

2.2.1 扩散成结工艺扩散温度的优化

平面型 InGaAs 器件制备过程中, 首先在晶片上淀积一层扩散掩膜, 并打开扩散窗口, 然

后将晶片与扩散源密封在高真空的石英玻璃管中, 预备进行扩散。扩散时, 将石英管置于石英载物舟中, 石英舟首先在扩散炉炉腔的预热区预热一段时间, 然后将其以一定速度推入恒温区进行扩散, 到达扩散时间后将石英舟拉出, 取出石英管并将其置入冷水中淬火, 完成扩散成结过程。在该过程中, 主要通过对扩散温度及扩散时间的控制来控制 pn 结的深度, 石英舟和石英管升温时间的长短对该过程影响很大, 而这个升温过程是不可避免的, 应该尽量缩短这个升温过程, 实验过程中主要通过固定石英舟从预热区到达恒温区的时间, 并减小石英舟的质量来缩短该升温过程。

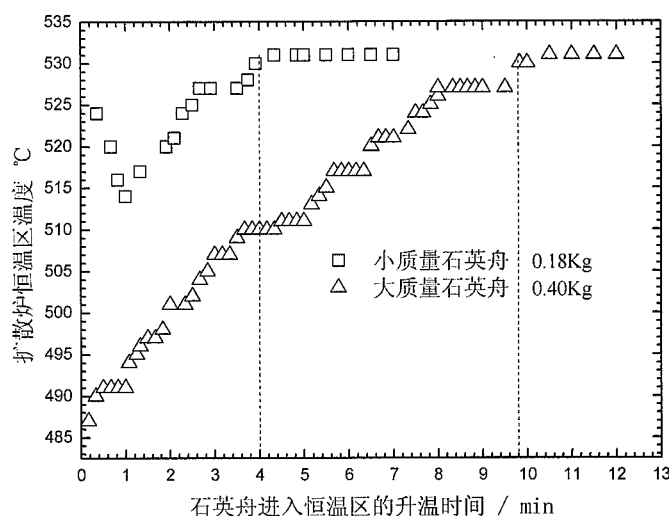


图 2.1 不同质量的石英舟由预热区进入恒温区后恒温区的升温曲线图

Fig. 2.1 Time dependent temperature variety for the quartz boat with different mass

如图 2.1 所示, 设定恒温区扩散温度为 530℃, 采用大质量的石英舟(约 0.4Kg)时, 用 1 分钟时间将石英舟从预热区(200℃)推入恒温区, 恒温区的温度会急剧下降至 486℃, 然后需要约 10 分钟时间才能到达所设定的扩散温度, 10 分钟是常用的扩散时间, 这必然会影响到扩散成结过程。而换用小质量的石英舟(约 0.18Kg)后, 也采用相同的速度将石英舟推入恒温区, 恒温区温度会下降至约 514℃, 然后在 4 分钟时间内升至设定温度, 从而会极大的提高该工艺环节的可控性。如果降低扩散温度而延长扩散时间则可进一步缩短升温时间对扩散成结过程的影响。

2.2.2 扩散掩膜优化

对于平面型 InGaAs 器件来说, 器件的 pn 结是通过扩散方式形成的, 在进行扩散时, 由于掺杂元素的横向扩散, 实际的扩散结要比扩散孔的面积大, 使得实际 pn 结的边缘处于扩散掩膜之下, 如图 2.2 所示。扩散掩膜同时也起到对结边缘的钝化作用, 而对于平面型 InGaAs 器件来说, 结边缘的电场会远大于结内部的电场, 这样对结边缘的钝化显的更加重要。InGaAs 探测器研制过程离不开对器件的表征, 而器件的 I-V 特性是探测器件重要的电学特性, 是光伏器

件最重要的表征手段之一^[2-3]，它可以在很大的程度上对器件工艺的优劣进行评价，国内外学者也经常利用I-V特性来对InGaAs探测器的性能进行评价^[4-5]。

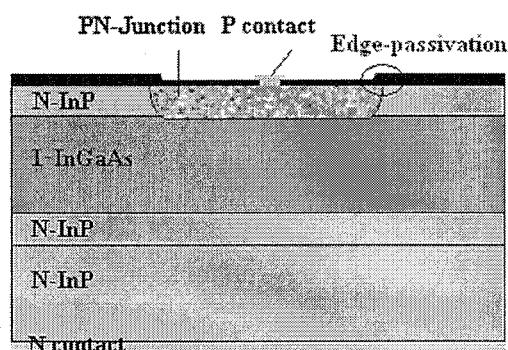


图 2.2 平面型 InGaAs 器件的截面示意图

Fig. 2.2 Cross section scheme for planar type InGaAs detector

为了研究平面型器件扩散掩膜对器件性能的影响，采用 SiO_2 及 SiNx 作为扩散掩膜制备了两种器件。实验所用的NIN型 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 外延材料购自EPI Works公司，利用MOCVD技术在掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 的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 ($n > 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)，厚度为 $2.5 \mu\text{m}$ 与InP晶格匹配掺Si的n- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层 ($n \approx 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)；厚度为 $1 \mu\text{m}$ 掺Si的N-InP窗口层 ($n \approx 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$)。外延片经过清洗、扩散掩膜生长、腐蚀开扩散孔、闭管扩散、表面钝化和电极生长等工艺制备出平面型InGaAs探测器，结构如图2.2所示，为进行性能对比，在器件制备过程中，分别采用 SiO_2 (磁控溅射方式) 及 SiNx (PECVD方式) 作为扩散掩膜制备两种器件，器件的表面钝化均采用 SiO_2 (磁控溅射方式) 薄膜，其他工艺保持一致。器件扩散区均为方形，面积分别为 $2.9 \times 10^{-5} \text{cm}^2$ 、 $9.6 \times 10^{-5} \text{cm}^2$ 、 $2.1 \times 10^{-4} \text{cm}^2$ 、 $3.9 \times 10^{-4} \text{cm}^2$ 。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，采用Keithley236可编程电流-电压测试仪测试其I-V曲线。

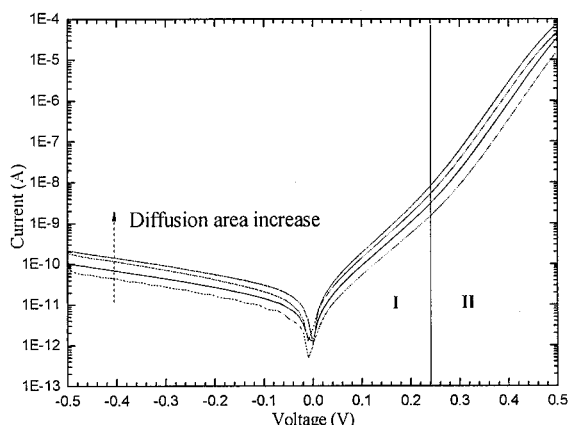


图 2.3 SiO_2 扩散掩膜器件的 I-V 特性曲线
Fig.2.3 I-V characteristics for detectors with SiO_2 diffusion mask

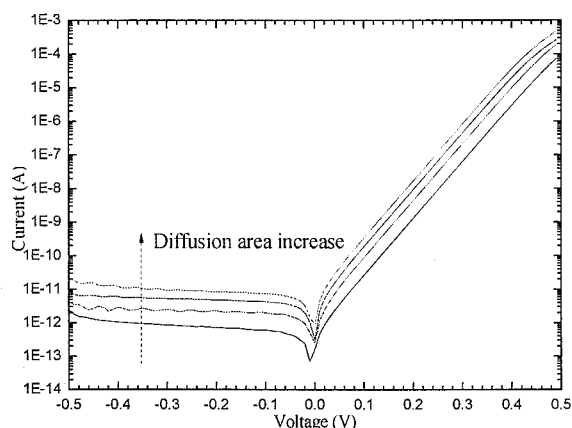


图 2.4 SiNx 扩散掩膜器件的 I-V 特性曲线
Fig.2.4 I-V characteristics for detectors with SiNx diffusion mask

图 2.3 及图 2.4 所示为采用 SiO_2 及 SiN_x 作为扩散掩膜制备的两种器件的 I-V 特性曲线, 由图可知, 随着扩散区面积的增大, 器件的电流明显变大。对于 SiO_2 扩散掩膜制备的器件, 其正向 I-V 关系曲线明显分为两个区域, 而 SiN_x 扩散掩膜器件的正向 I-V 关系曲线基本保持一致。

这种现象与二极管器件的电流成分有关。一般来说, 二极管器件的正向电流的主要成分为扩散电流及产生-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^[6]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

式中: I_0 为反向饱和电流, K 为 Boltzman 常数, T 为器件温度, n 为理想因子, 由电流机制决定, 对于由扩散电流支配的器件, n 取 1, 由产生-复合电流决定的器件, n 取 2, 如果 n 介于 1 和 2 之间则为两种电流的共同作用。对公式(2.1)进行变换, 得到:

$$\ln I = \ln I_0 + \left(\frac{q}{nKT} \right) V \quad (2.2)$$

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 曲线的线性部分进行拟合得到理想因子 n 。

图 2.5 所示为对 SiN_x 扩散掩膜器件的正向 $\ln(I)$ - V 特性曲线按照(2.2)式进行拟合的结果, 随着扩散区面积的增大, 拟合所得理想因子的值分别为: 0.996、0.998、0.996、0.996, 几种器件的理想因子都非常接近 1, 说明对于采用 SiN_x 作为扩散掩膜的器件, 其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。

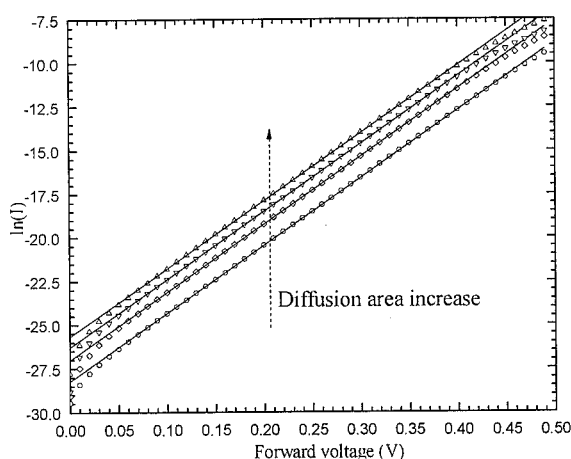


图 2.5 SiN_x 掩膜器件的正向 $\ln(I)$ - V 特性曲线
Fig.2.5 Forward voltage vs $\ln I$ with SiN_x diffusion mask

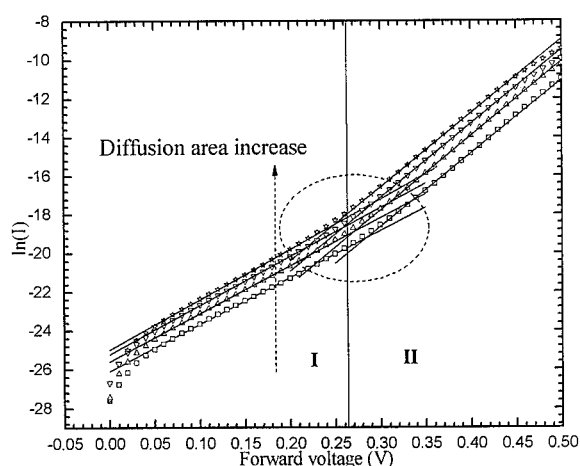


图 2.6 SiO_2 掩膜器件的正向 $\ln(I)$ - V 特性曲线
Fig.2.6 Forward voltage vs $\ln I$ with SiO_2 diffusion mask

对 SiO_2 扩散掩膜器件的正向 $\ln(I)$ - V 特性曲线按照(2.2)式进行拟合的结果如图 2.6、图 2.7 所示, 在区域 I, 随扩散区面积的增大, 所得理想因子分别为: 1.601、1.564、1.533、1.500, 介于 1 与 2 之间, 说明该区域的电流成分包括产生-复合电流及扩散电流。在区域 II, 随扩散区面积的增大, 所得理想因子分别为: 1.020、1.006、1.014、1.012, 几种器件的理想因子都非常接近 1, 说明在该区域的正向电流成分主要为扩散电流。

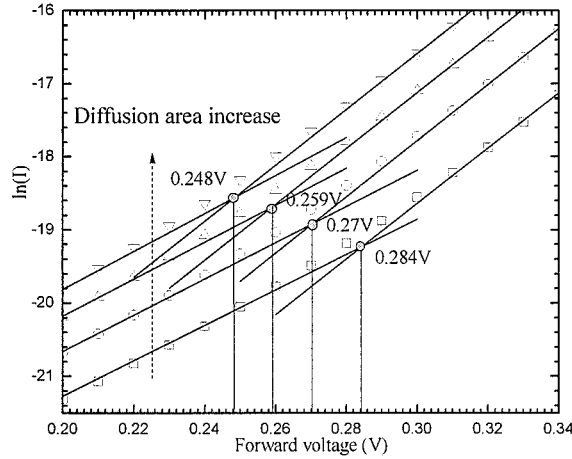


图 2.7 SiO_2 扩散掩膜器件的正向 $\ln(I)$ - V 特性曲线
Fig.2.7 Forward voltage vs $\ln I$ for detectors with SiO_2 diffusion mask

随着扩散区面积的增大, 两个电流区域的电压拐点如图 2.7 所示, 分别约为: 0.284V、0.270V、0.259V、0.248V, 逐渐减小, 对应区域 I 中器件理想因子也是逐渐变小的, 说明, 随着面积的增大, 扩散电流成分是增多的。由于器件的面积与器件的周长存在着密切关系, 可以通过分析器件电流密度与器件面积周长比的方式, 研究出现上述情况的原因。

器件暗电流的来源可以分为两部分, 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, 与扩散区面积成正比的电流主要有器件体内电流和表面电流(可归结为体电流), 而与器件周长成正比的电流主要是边缘的漏电流, 这样, 器件暗电流可以写为^[7]:

$$I = J_B A + J_s P \quad (2.3)$$

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 为边缘漏电流密度, 那么器件的暗电流密度可表示为:

$$J = \frac{I}{A} = J_B + J_s \frac{P}{A} \quad (2.4)$$

由(2.4)式可知, 器件暗电流密度由常数项 J_B 以及变量 $J_s \frac{P}{A}$ 组成, 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。

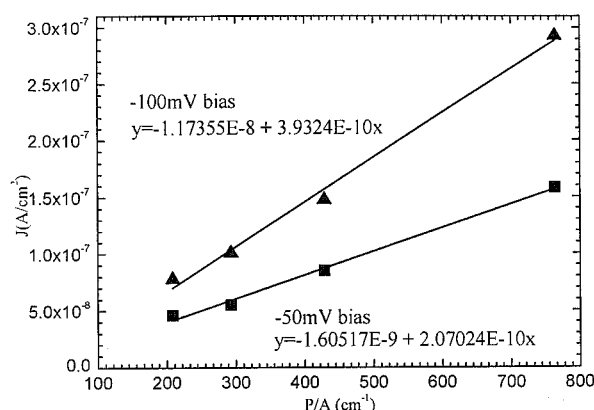


图 2.8 SiO₂ 掩膜器件 P/A 与电流密度的关系
Fig.2.8 P/A vs current density with SiO₂ diffusion mask

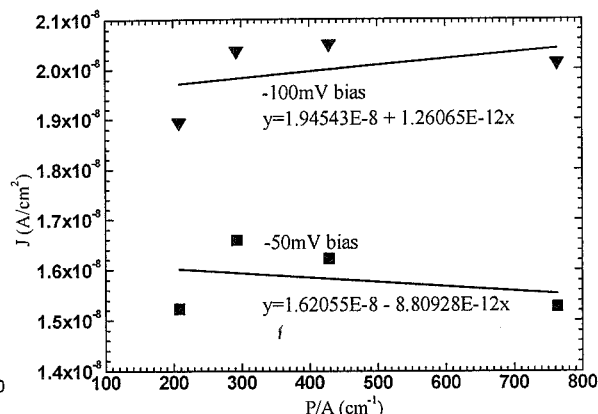


图 2.9 SiNx 掩膜器件 P/A 与电流密度的关系
Fig.2.9 P/A vs current density with SiNx diffusion mask

图 2.8 所示为在 -0.1V 及 -0.05V 反向偏压下, SiO₂ 扩散掩膜器件 P/A 与器件电流密度的关系, 可知, 该种器件的暗电流密度与器件的 P/A 值成线性关系, 说明其边缘漏电流在暗电流中占了较大的水平, -0.1V 反向偏压下其暗电流密度为 80~300nA/cm²。而由图 2.9 可知, 对于 SiNx 扩散掩膜器件来说, 其暗电流密度与器件的 P/A 值并没有直接的联系, 说明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)。另外, 室温下, -0.1V 反向偏压下, SiNx 扩散掩膜器件的暗电流密度约为 20nA/cm², 已经非常接近 Boeing 公司相同条件下 13.5nA/cm² 的水平^[5], 说明采用该种方式制备的 InGaAs 器件能够获得良好的性能。

通过对比两种扩散掩膜器件的 I-V 特性曲线可知, 采用 PECVD 方式生长的 SiNx 薄膜的钝化效果要优于采用磁控溅射方式生长的 SiO₂ 薄膜, 对器件结边缘良好的钝化可有效地减小边缘的产生-复合效应, 从而减小产生-复合电流, 这也可以解释图 2.6 及图 2.7 中出现的正向 I-V 特性曲线出现分区现象, 而随着器件扩散区面积的增大, 器件的 P/A 会逐渐减小, 这样降低与器件边缘产生-复合效应相关的电流成分在总暗电流中的比例, 从而产生图 2.7 中两个电流区域电压拐点逐渐减小的现象。

2.3 器件串音研究

对于阵列探测器来说, 当入射光照向其中的一个光敏元时, 在其他光敏元上应该不会产生响应, 但实际应用中并不是这样, 其他光敏元上或多或少都会有所响应, 这就产生了所谓的“串音”。串音产生的因素有很多, 对于组件来说, 来自封装时窗口的反射及管壳内壁的散射光, 图 2.10 所示, 这是光的因素, 对于单纯的器件来说, 来自器件材料界面处的反射等, 这也是光的因素; 光生载流子的横向扩散效应也会造成串音, 这种扩散效应受材料参数 (如扩散长度) 和器件结构参数 (如光敏元间距、外延层厚度、以及器件制备技术如平面结构或台面结构) 的影响很大, 另外, 还有相邻光敏元之间的电容耦合效应等, 一般认为这都是电的因素, 电串音一般在串音中占到较大的比重。但总体上, 很难对器件的光串音及电串音进行区分,

所以,测量时一般会将二者综合进行分析^[8],本节主要对不同结构的探测器芯片的串音进行研究。

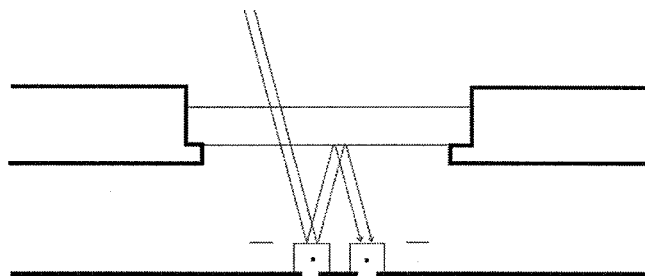


图 2.10 由于窗口反射造成的器件串音

Fig.2.10 Cross-talk of the neighbor pixels arising from reflection of the detector window

2.3.1 串音测试系统

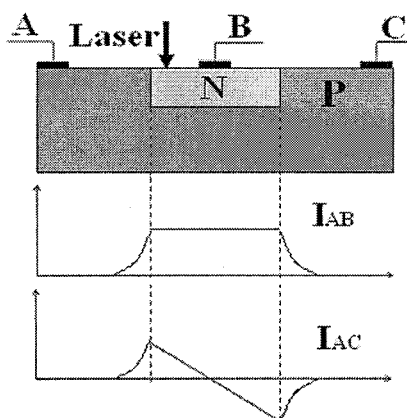


图 2.11 LBIC 信号原理图

Fig.2.11 Schematic illustration of signal by LBIC

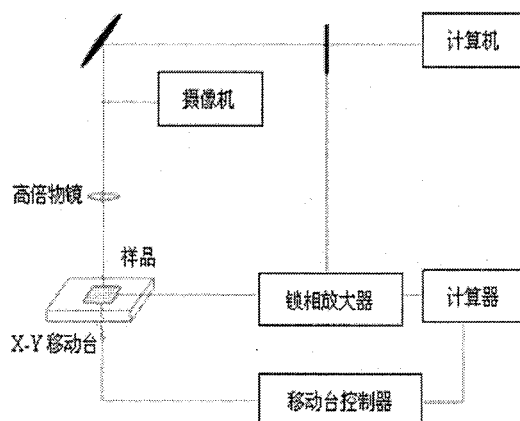


图 2.12 LBIC 测试系统

Fig.2.12 Measurement system of LBIC

激光束诱导电流技术(LBIC)是一种高效、非破坏性的,用来研究材料空间结构和电活性区域以及缺陷的光学方法,也是器件串音测试中常用的一种方法。该方法的原理是基于 1956 年 Wallmark 发现的水平光伏效应(LPV),即当 pn 结受到不均匀光照时,会在平行于 pn 结方向产生电场,其大小和方向与 pn 结的类型、光照的波长、强度和位置有关。在 1980 年代末由美国的 Rockwell 公司率先将该项技术应用于碲镉汞焦平面器件的均匀性和盲元检测方面^[9]。在样品的两边各做一个欧姆接触的电极,然后用一束低功率的激光束聚焦在样品的特定区域产生电子-空穴对。通过观察两侧电场的变化,可以确定电活性的杂质、缺陷簇和材料的不均匀性等。利用 LBIC 技术可以测试 pn 结结深、载流子的扩散长度及均匀性等,还可以分析表面状况等因素对器件特性的影响,是一种很有用的无损测试分析工具, LBIC 信号产生的机理如图 2.11 所示。激光束在 pn 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_{AB} ;若连接 A 和 C 电极,光生载流子扩散到空间电荷区边缘后被分离,电子向 n 区移动,空穴留在 p 区,由于电子的迁移率比

空穴高，考虑 n 区的导电性比 p 区好，可看成等势体，电子能不断地在 n 区内快速地趋于均匀分布，致使光入射点之外的各点电势偏离平衡状态，n 区中的电子重新注入 p 区，产生水平电场，产生如图所示的激光束诱导电流 I_{AC} ，水平电场方向与光斑位置有关，图中所示的方向为光斑在图中的位置时所产生。

目前，实验室现有的 LBIC 测试系统是 SEMILAB 公司的 Micro LBIC 系统测试，系统所用的脉冲激光波长 980nm，频率 1kHz，激光束斑直径 5 μ m，由于该波长靠近 InGaAs 器件的短波截止端(900nm)，而器件的串音一般会随着波长的增大而增大，为避免测试光的波长对测试结果的影响，在器件串音测试时首先采用了自己搭建的串音测试系统。

如图 2.13 所示，串音测试系统所用的激光光源为商用的带有单模尾纤的半导体激光器，其中心波长为 1310nm，靠近 InGaAs 探测器的峰值波长。半导体激光器由直流稳压电源供电，通过调节稳压电源的电压可以控制半导体激光器的输出功率，激光器发出的光由单模光纤耦合输出。单模光纤输出端直径 9 μ m。待测探测器封装在杜瓦中，并固定在二维电控精密位移平台上以实现扫描测量。激光器输出端固定在手动精密位移平台上，以调整光纤输出孔与待测器件之间的距离，使光纤出射孔尽量靠近待测器件表面，因此近似认为测试光束的直径也为 9 μ m。测量时，将其中一元的信号引出，并经电流放大器(SR570)放大，后由数字示波器读出，光纤与探测器相对平移，测量激光束照射在器件不同位置时待测器件的响应。测试过程中，调整好光路后，利用遮光罩将整个系统密闭，以减小环境杂散光对测试的干扰。该处器件的串音定义为：

$$Crosstalk_{UDT} = I_C / I_{UDT}$$

为方便进行比较，对上式进行变换：

$$F = 10 \log(I_C / I_{UDT}) \quad (2.5)$$

其中， I_C 为激光束在不同位置时待测器件的响应， I_{UDT} 为激光束照射在待测器件上时待测器件的响应。

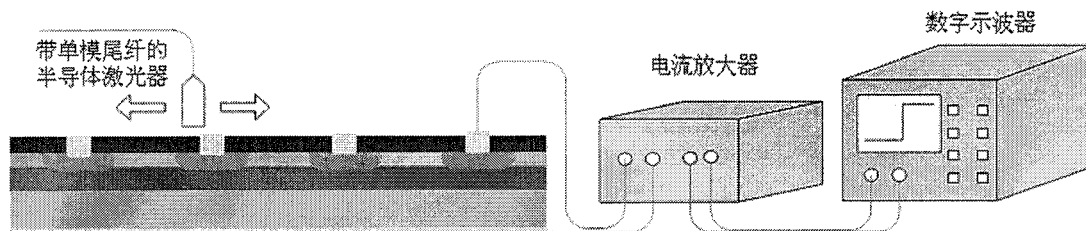


图 2.13 串音测试系统的搭建

Fig.2.13 Schematic system for measuring crosstalk in InGaAs detector arrays

2.3.2 器件结构

InGaAs 探测器串音测试采用了三种器件结构, 平面型、深台面型及浅台面型, 如图 2.14 所示。平面型器件采用闭管 Zn 扩散技术制备而成, 深台面及浅台面器件均采用干法刻蚀+湿法修复制备, 区别在于深台面器件的隔离槽将吸收层完全刻蚀(台面高度约 $3.1\mu\text{m}$), 而浅台面器件只是部分刻蚀 InGaAs 吸收层(台面高度 $1.5\mu\text{m}$), 三种器件的所用材料参数如表 2.1 所示。

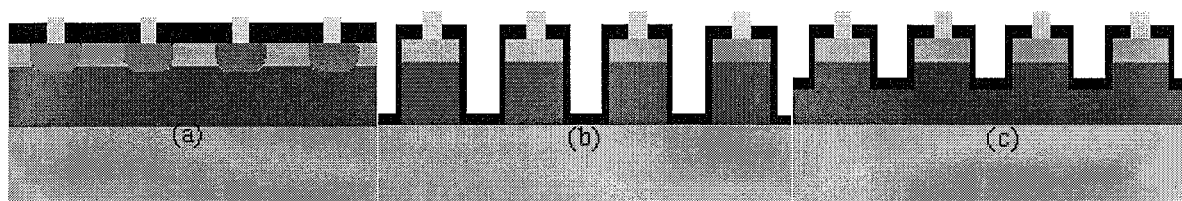


图 2.14 串音测试所用的三种结构 InGaAs 器件的截面示意图

Fig.2.14 Three types of InGaAs array cross sections for crosstalk measurement (a) Planar-type (b) Deep mesa type (c) Shallow mesa type

表 2.1 三种结构器件所用外延材料的参数

Table 2.1 Parameters of the epitaxial materials for these three detector arrays

	平面型 MOCVD		深台面型 MBE		浅台面型 MBE	
	厚度	掺杂浓度	厚度	掺杂浓度	厚度	掺杂浓度
InP	$1\mu\text{m}$	N 型 $5\text{E}16$	$0.5\mu\text{m}$	P 型 $>2\text{E}18$	$0.5\mu\text{m}$	P 型 $>2\text{E}18$
InGaAs	$2.5\mu\text{m}$	N 型 $5\text{E}16$	$2.5\mu\text{m}$	N 型 $2\text{E}16$	$2.5\mu\text{m}$	N 型 $2\text{E}16$
InP	$0.5\mu\text{m}$	N 型 $>2\text{E}18$	$1\mu\text{m}$	N 型 $>2\text{E}18$	$1\mu\text{m}$	N 型 $>2\text{E}18$
InP	$600\mu\text{m}$	N 型 $2\text{E}18$	$300\mu\text{m}$	半绝缘	$300\mu\text{m}$	半绝缘

由表可知, 所用外延材料的参数存在较大的差异, 在进行比较时难以从材料参数进行比较, 只能从器件结构上进行定性的研究。三种器件的俯视图如图 2.15 所示, 器件设计光敏元尺寸 $105\times 105\mu\text{m}^2$, 间距 $95\mu\text{m}$, 深台面及浅台面器件的公用电极均为图中所示的“H”型电极, 平面型器件的公用电极背面电极, 由于相邻单元之间的距离较大, 所搭建的测试系统的精度完全可以满足测试要求。

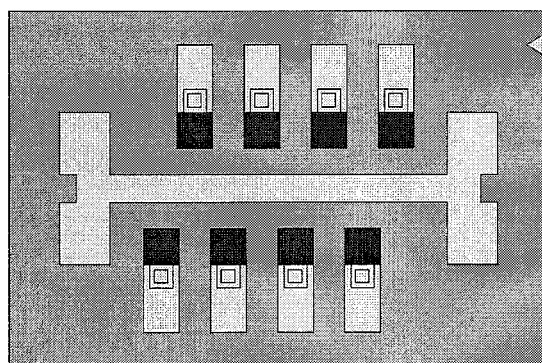


图 2.15 串音测试所用 InGaAs 器件的俯视图

Fig.2.15 InGaAs detector array used for cross-talk measurement

2.3.3 器件结构对器件串音的影响

图 2.16 所示为三种结构的 InGaAs 器件的串音测试结果, 由图可知, 对于平面型 InGaAs

器件, 当测试光束照在所测光敏元(中心位置 $1350\mu\text{m}$)上时, 在其光敏元内响应是一致的, 达到峰值。而随着光束远离该光敏元, 该元的响应开始逐渐降低, 在其相邻光敏元处(中心位置 1150 、 950 、 $750\mu\text{m}$), 响应达到极小值, 而在光敏元之间的位置, 待测器件的响应出现几个小的峰值, 且随着光束与待测光敏元距离的增大, 峰值逐渐降低, 响应的极小值也逐渐降低, 如图 2.16(a)所示。这个结果与传感器无限(SUI)公司在其平面型器件上采用相同方法获得的趋势是一致的, 如图 2.17 所示^[10]。

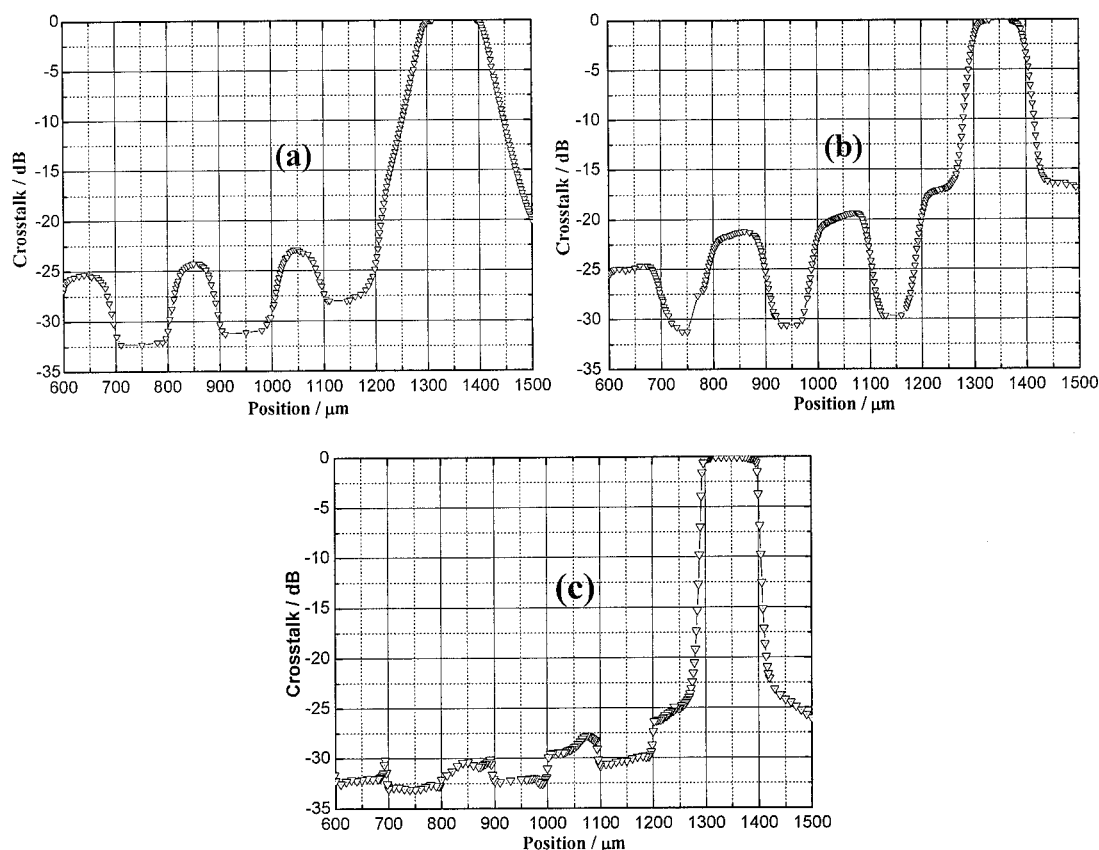


图 2.16 三种结构器件的串音测试结果 (a)平面型 (b)深台面型 (c)浅台面型

Fig.2.16. The crosstalk of the InGaAs detector arrays vary with the distance between the incident laser spot and the measured pixel (a) planar detector arrays (b) deep mesa detector arrays (c) shallow mesa detector arrays

而对于深台面型 InGaAs 探测器, 当测试光束照在所测光敏元(中心位置 $1350\mu\text{m}$)上时, 在其光敏元内响应是一致的, 达到峰值。而随着光束远离该光敏元, 该元的响应出现一个突降, 且在两光敏元之间出现一个信号响应“平台”, 在其相邻光敏元处(中心位置 1150 、 950 、 $750\mu\text{m}$), 响应达到极小值, 而在光敏元之间的位置, 待测器件的响应出现几个大的响应峰值, 且随着光束与待测光敏元距离的增大, 峰值逐渐降低, 响应的极小值也逐渐降低, 但峰-谷值相差很大, 如图 2.16(b)所示。浅台面结构探测器情况与深台面结构器件测试结果相似, 但是相邻光敏元之间的响应峰值很小, 所对应的峰-谷值相差也很小, 如图 2.16(c)所示。

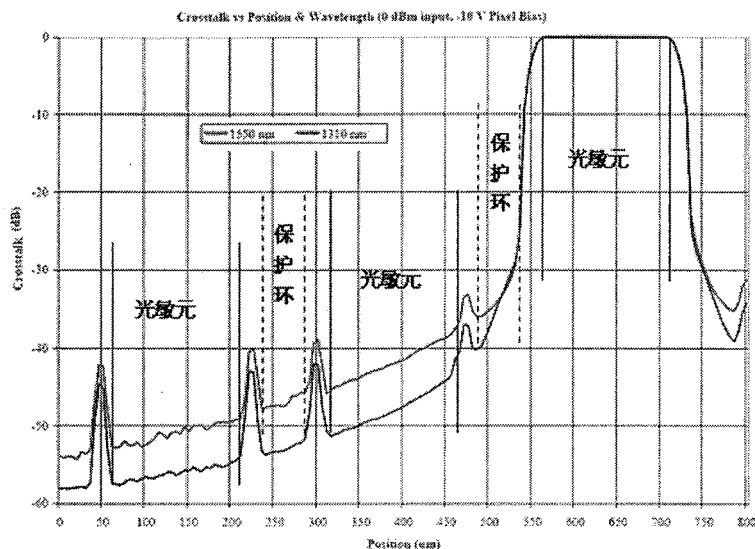
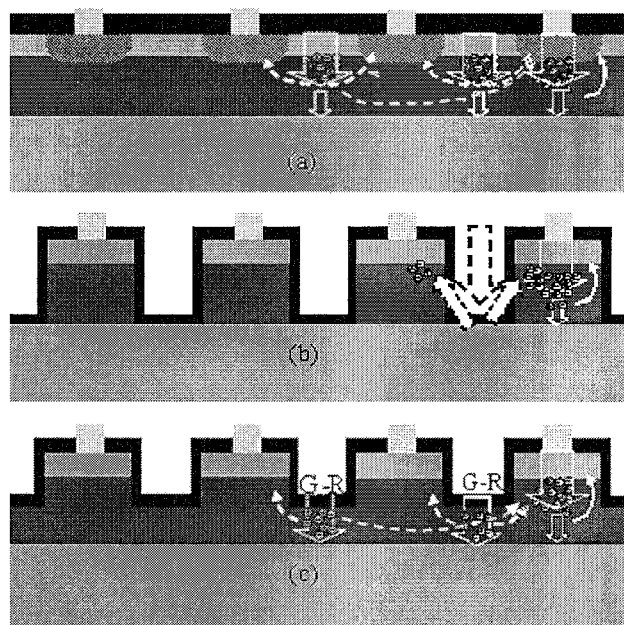
图 2.17 传感器有限公司平面型器件串音测试图^[10]Fig.2.17 Crosstalk scheme of InGaAs detector arrays with guard-ring from Sensor Unlimited Company^[10]

图 2.18 三种结构器件串音的机理

Fig.2.18. The cross section of the crosstalk model for different InGaAs detector arrays structure (a) Planar detector arrays (b) Deep mesa detector arrays (c) Shallow mesa detector arrays

对于平面型探测器(限于探测器芯片)串音的产生机理, 目前普遍接受的一个解释是器件内吸收层材料光生载流子的横向扩散效应^[8,10-12], 当光束照射在待测器件上时, 由于 pn 结内建电场的作用, 几乎所有的光生载流子会被电场分离而被电极收集, 光束照射在光敏元之间时, 此处并没有电场作用, 光生载流子会自由扩散到达临近的 pn 结而被收集, 随着激光束远离待测器件, 光生载流子需要运动更长的距离才会被收集, 使得待测器件的响应会逐渐降低, 如图 2.18(a)所示。另外一个可能的原因是, 入射光束并不能被吸收层材料完全吸收, 对于

1310nm 波长的光, 在通过 2.5 μm 的 InGaAs 吸收层后仍然会有约 10% 的剩余(300K 下 In_{0.53}Ga_{0.47}As 对 1310nm 波长光的吸收系数约 10000cm⁻¹), 这部分光会被器件内部的界面层反射而引起串音。

对于深台面型器件, 由于相邻光敏元之间的吸收层材料被完全刻除, 入射到该处的光会受到衬底 InP 材料的散射到达相邻光敏元, 从而造成光敏元之间较大的响应“平台”, 如图 2.18(b)所示。而对于浅台面型器件, 相邻光敏元之间的吸收层材料被部分刻蚀, 剩余的材料仍然会吸收入射光而产生光生载流子, 在靠近浅隔离槽的表面, 由于在制备过程中不可避免会产生大量的缺陷形成缺陷态, 这样大部分光生载流子会在此处被复合, 剩余的一部分会自由扩散而被邻近的 pn 结收集, 形成串音, 如图 2.18(c)所示, 这种现象与同质结器件的现象正好相反^[13]。

根据上述分析, 可以得出以下初步的结论:

(1) 由于 pn 结对周围光生载流子的侧向收集作用, 使得器件有效光敏元扩展, 这会造成器件有效光敏元的定义困难, 而且相邻光敏元之间区域的光生载流子的横向扩散也应该是器件串音的一个很大的来源, 平面型器件串音的抑制也就归结为如何抑制器件光敏元的扩大。而由图 2.16(a)可知, 器件的串音会在相邻的光敏元处达到一个极小值, 说明可以通过在器件周围制备保护环结构来对器件的串音进行一定的抑制, 并对器件的光敏元进行定义, 可以在光敏元 pn 结制备时同时完成这种结构, 并不会增加工艺的复杂性, 实际上, 这也是在串音抑制中最常用的方法^[14];

(2) 台面型器件比较容易对光敏元进行定义, 对于抑制光敏元扩大具有良好的效果。但深台面器件相邻光敏元之间存在很大的串音, 而浅台面器件光敏元之间的串音则很小, 因此可以考虑采用浅隔离方式抑制串音。但是, 浅隔离槽的制备会增加工艺步骤, 增大工艺的复杂性, 在采用这种工艺时要仔细控制工艺流程。

2.4 光敏元扩大现象抑制研究

平面型铟镓砷探测器具有暗电流小、探测率高、寿命长等优点, 由上节研究结果可知, 它也具有一些不可避免的缺点: 光敏元扩大造成光敏元定义困难, 而光敏元的扩展也是光敏元之间串音的重要来源, 这些都限制了铟镓砷探测器的应用。与台面型器件不同, 平面型器件的有效光敏元并不仅仅是扩散形成的 pn 结, 结周围一定距离内的光生载流子也会被 pn 结收集, 从而造成器件有效光敏元的扩大。随着焦平面阵列的发展, 器件光敏元尺寸不断减小, 使得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^[8,10]。一般来说, 造成平面型光伏器件光敏元面积扩大的原因主要有三个: 工艺因素造成的扩散孔尺寸扩大(光刻

误差,扩散孔腐蚀等);离子扩散和注入的过程中造成的掺杂元素的横向扩展;pn 结对结外围载流子侧向收集作用。一般来说,通过对器件制备工艺环节的控制可以减小工艺因素的影响,而离子扩散和注入造成的横向扩展一般是一个小量,可以忽略不计。因此,影响平面型器件有效光敏元扩大的主要因素来自 pn 结对结外围载流子的侧向收集。器件光敏元面积的扩大会给器件的结构设计带来困难,而 pn 结对外围载流子的侧向收集作用则会造成阵列器件调制传递函数(MTF)的降低,从而严重影响阵列器件的成像质量。因此,对平面型铟镓砷器件光敏元扩大抑制技术的研究具有重要的现实意义。

2.4.1 器件结构设计

在充分考虑造成平面型光伏器件光敏元面积扩大的三个主要因素的基础上,对器件的结构进行了如下修正:减小扩散孔的尺寸,从而给开扩散孔时对扩散掩膜的侧向钻蚀、闭管扩散时掺杂元素的横向扩散以及 pn 结对侧面光生载流子的收集效应留有余量;在器件光敏元周围通过采用同步扩散的工艺形成保护环;在光敏元周围制备环形遮盖电极对光敏元进行定义,遮盖电极内环尺寸与光敏元期望尺寸一致。

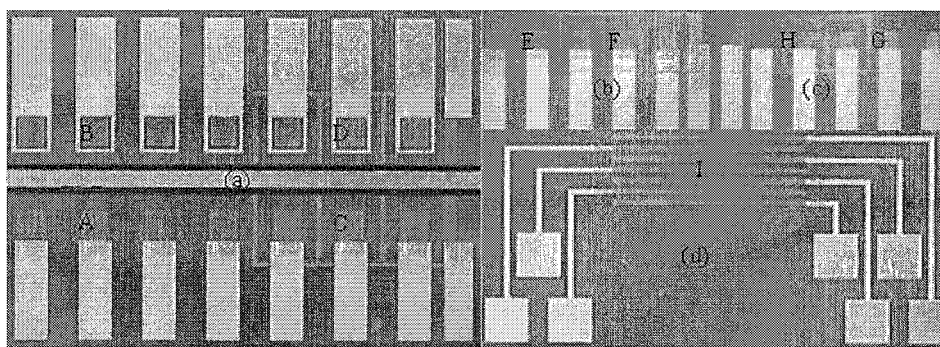


图 2.19 器件俯视图
Fig.2.19 Plan form of the device

表 2.2 器件结构
Table 2.2 Designed detector structure

编号	扩散孔(μm^2)	环形遮盖电极(μm)	保护环(μm)	
			宽度	与光敏元间距
A	80×90	×	×	×
B		10	×	×
C		×	10	55
D		10	10	55
E	40×45	×	×	×
F		×	5	27.5
G	30×40	×	×	×
H		×	10	30
I	10×500	×	10	10

所制备器件共有四组,如表 2.2 所示:(1)光敏元扩散孔尺寸 $80 \times 90 \mu\text{m}^2$,期望有效光敏元尺寸为 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$,器件有四种,A 无任何附加结构,B 宽度为 $10 \mu\text{m}$ 的环形遮盖电极,C

宽度为 $10\mu\text{m}$ 的保护环, 保护环距扩散孔 $55\mu\text{m}$, D 宽度为 $10\mu\text{m}$ 的环形遮盖电极和宽度为 $10\mu\text{m}$ 的保护环, 保护环距扩散孔 $55\mu\text{m}$, 如图 2.19(a) 所示; (2) 扩散孔尺寸 $40\times 45\mu\text{m}^2$, 期望有效光敏元尺寸为 $50\times 50\mu\text{m}^2$, 器件有两种, E 无任何附加结构, F 宽度为 $5\mu\text{m}$ 的保护环, 保护环距扩散孔 $27.5\mu\text{m}$, 如图 2.19(b) 所示; (3) 扩散孔尺寸 $30\times 40\mu\text{m}^2$, 期望有效光敏元尺寸为 $50\times 50\mu\text{m}^2$, 器件有两种, G 任何附加结构, H 宽度为 $10\mu\text{m}$ 的保护环, 保护环距扩散孔 $30\mu\text{m}$, 如图 2.19(c) 所示; (4) 扩散孔尺寸 $10\times 500\mu\text{m}^2$, 两光敏元间距 $10\mu\text{m}$, 标记为 I, 如图 2.19(d) 所示。

由于结构设计中, 光敏元间距较小, 自己搭建的系统的精度 ($>9\mu\text{m}$) 已经不能满足要求, 因此在本节中, 器件光敏元的光响应特性测试均采用 SEMILAB 公司的 Micro LBIC 系统, 系统所用的脉冲激光波长 980nm , 频率 1kHz , 激光束斑直径 $5\mu\text{m}$, 扫描步进可选。为了不同结构器件的对比方便, 所有器件的 LBIC 信号响应测试图都进行了归一化等值处理。

2.4.2 环形遮盖电极对光敏元扩大的抑制

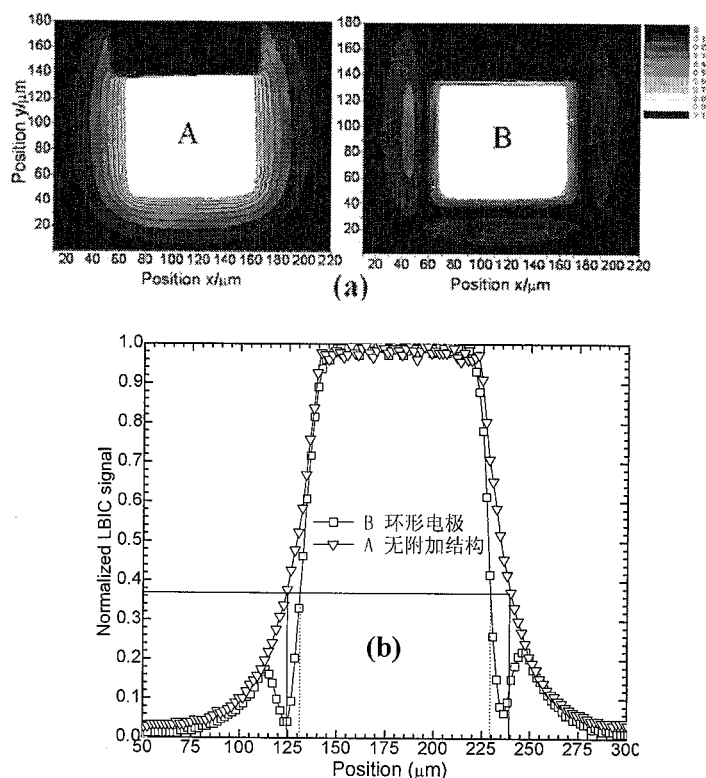


图 2.20 环形遮盖电极对光敏元扩大的抑制作用
Fig.2.20 The suppression of photoactive area increase by using circle covering contact

通过对比图 2.20 中器件 A、B 的 LBIC 响应等值曲线图可知, 当器件没有任何附加结构时, 器件扩散孔周围区域也对器件的信号有贡献, 使得有效光敏元明显向周围扩展。在器件扩散孔周围覆盖环形遮盖电极之后, 由于遮盖电极的反射阻挡作用, 器件有效光敏元明显被限制, 说明环形遮盖电极对于器件光敏元的定义具有明显的效果, 一般取平面型器件光敏元边缘响应为最大值 $1/e$ 的位置为器件实际光敏元面积, 如图 2.20(b) 所示, 器件光敏元由无任

何附加结构时的 $115\mu\text{m}$ 减小为加入环形遮盖电极后的 $98\mu\text{m}$ ，基本接近光敏元的期望值。说明小扩散孔与环形遮盖电极的组合可以有效的减小器件有效光敏元的扩大。

而未被遮盖电极覆盖的外围区域仍然有响应，可以通过加宽环形电极来减小外围响应，但是在大规模阵列器件中，光敏单元器件间距很小，环形电极并不能被无限加宽，而且环形电极是通过反射光信号来达到目的，在实际应用中会产生杂散光，从而给组件封装带来困难，限制了环形遮盖电极的应用。需要采用其他的手段来抑制器件光敏元的扩大现象。

2.4.3 保护环工作状态对环形电极的抑制作用

如图 2.21 可知，对于器件 F，保护环与器件光敏元间距 $27.5\mu\text{m}$ 时，保护环处于短接或者悬空状态对器件光敏元扩大现象的抑制效果差别不大，说明此时保护环与器件光敏元的距离仍然过大，如果想提高保护环的效果，保护环应该处于短接状态，且应该进一步减小二者之间的距离。

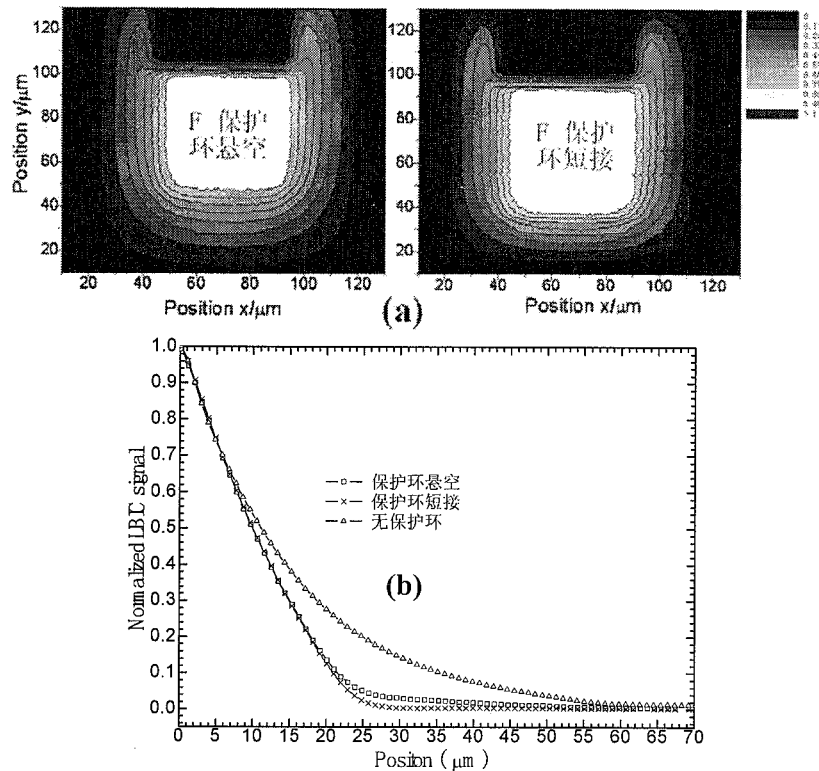


图 2.21 器件 F 保护环不同工作状态对光敏元扩大的抑制作用

Fig.2.21 Suppression of photoactive area increase by guard-ring under different conditions for detector structure F

当保护环与器件光敏元间距 $10\mu\text{m}$ ，如果器件 I 相邻两元处于悬空状态，那么由于载流子的横向扩散，光照射在两光敏元上产生的光生载流子也会被器件 I 收集，如图 2.22(a) 上图所示，而将器件 I 上方相邻的一个单元用作保护环并短接，那么该单元附近的大部分光生载流子会被导走，从而限制了器件 I 在该方向上的载流子收集，抑制了光敏元扩大现象，如图 2.22(b)

所示。

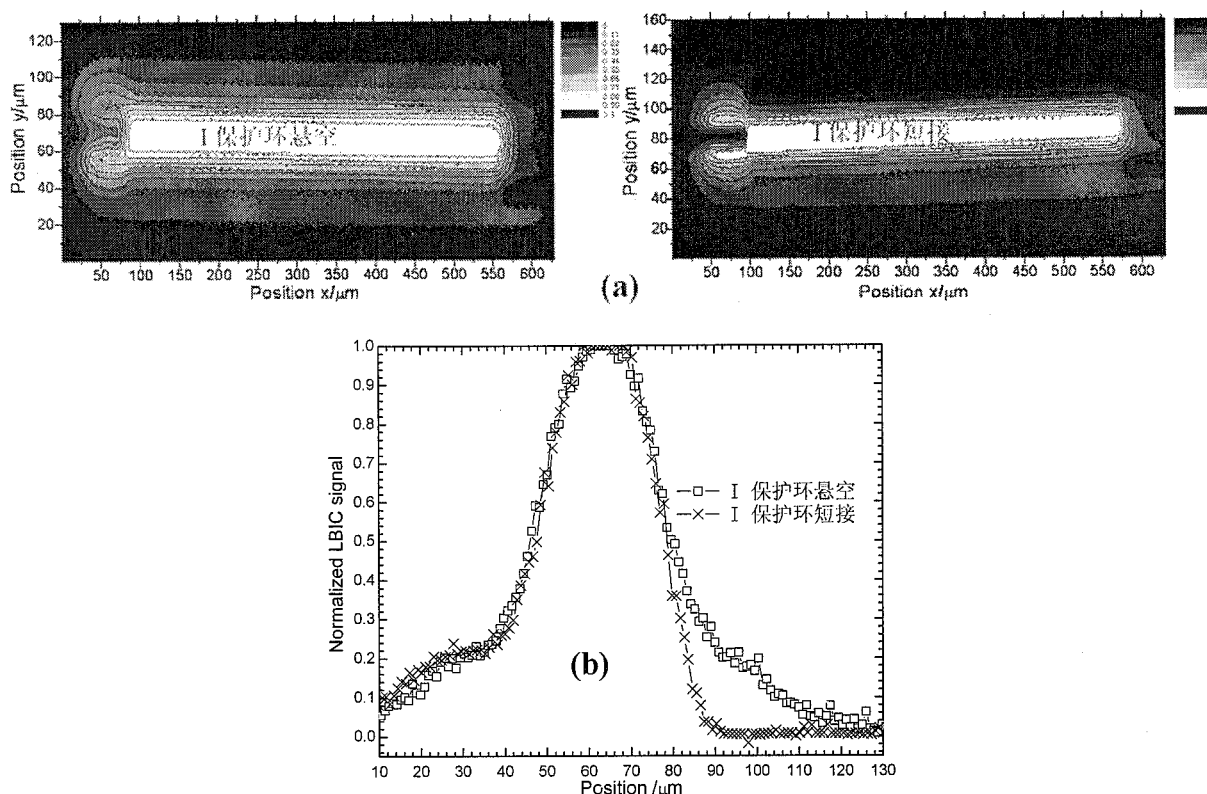


图 2.22 器件 I 保护环不同工作状态对光敏元扩大的抑制作用

Fig.2.22 Suppression of photoactive area increase by guard-ring under different conditions for detector structure I

2.4.4 保护环与光敏元间距对光敏元扩大的抑制

图 2.23(a)所示为器件 C、F、H 的保护环短接时与相对应器件 A、E、G 的 LBIC 响应等值曲线图,通过对比可知,保护环的引入可以在一定程度上对光敏元的扩大进行抑制,在距离器件光敏元 $55\mu\text{m}$ 处加入的保护环对器件有效光敏元扩大现象的抑制作用并不明显,这主要是因为保护环距离器件光敏元太远,并不能有效收集光敏元周围的载流子。当保护环与器件光敏元的距离减小至 $30\mu\text{m}$ 、 $27.5\mu\text{m}$ 时,器件的光响应明显被有效的限制在一个方形的区域内。这是因为当保护环短接时,保护环对其周围光生载流子的侧向收集有效减小了器件光敏元的侧向收集作用,从而有效抑制器件有效光敏元的扩大现象。

将保护环与器件光敏元的距离减小至 $10\mu\text{m}$ 时,如图 2.23(a)中器件 I 的 LBIC 响应等值曲线图所示,将图 2.19(d)中器件 I 上方相邻的一个单元用作保护环并短接,那么器件 I 靠近该单元的大部分光生载流子会被导走,从而有效限制了 I 在该方向有效光敏元的扩大。

随着保护环与器件光敏元之间距离的减小,器件光敏元扩大的值也会变小,如图 2.23(b)所示,取平面型器件光敏元边缘响应为最大值 $1/e$ 的位置为器件实际光敏元面积,当二者间距分别为 $55\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 、 $27.5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 时,器件的光敏元分别扩大了约 $17\mu\text{m}$ 、 $12.8\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$ 、

$8\mu\text{m}$ 。

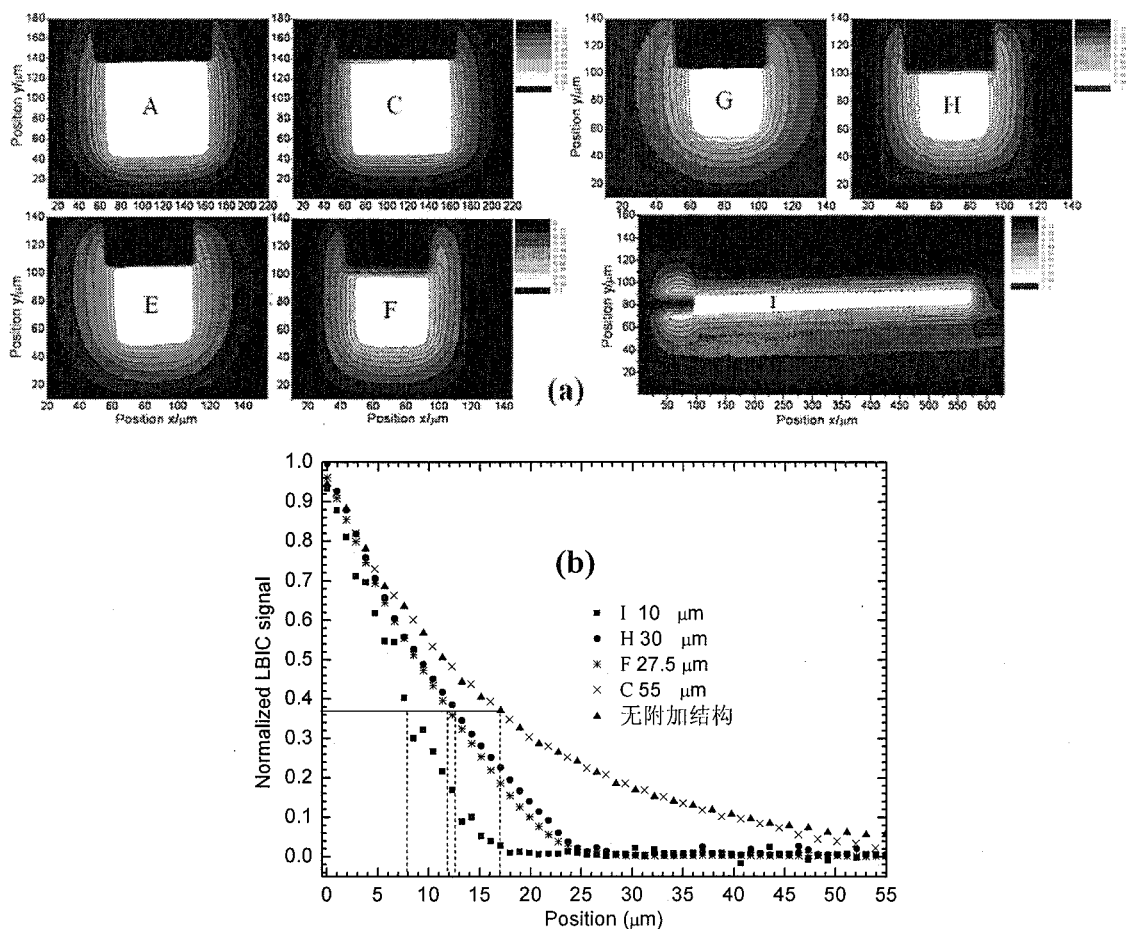


图 2.23 保护环与光敏元间距对光敏元扩大的抑制作用

Fig.2.23 Suppression of photoactive area increase by using guard-rings with different distance from photoactive area

为了更精确地研究保护环与器件光敏元之间距离和器件有效光敏元的扩大值之间的关系，本节对造成平面型器件有效光敏元面积扩大的三个可能因素进行了更细致的分析。以图 2.24 所示的光敏元周围带有保护环结构的平面型 InGaAs 器件为例进行分析。

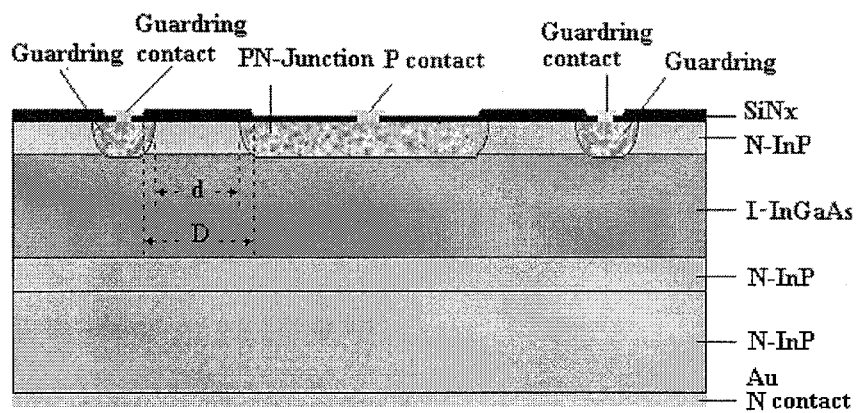
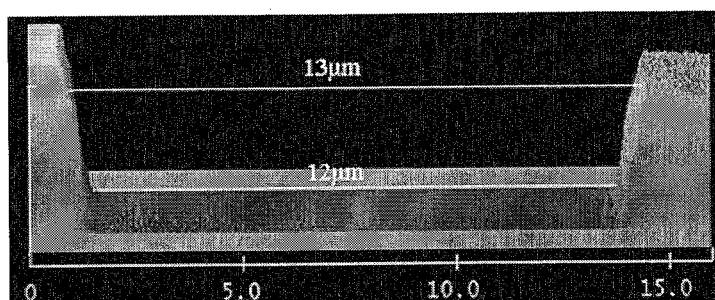


图 2.24 光敏元周围带有保护环结构的平面型 InGaAs 器件的截面示意图

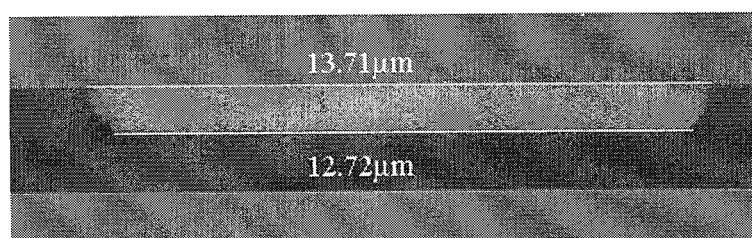
Fig. 2.24 Cross section scheme for planar type InGaAs detector with guard-ring around

(1) 扩散窗口的影响:

图 2.25 设计宽度为 $10\mu\text{m}$ 的 SiN_x 扩散窗口的 AFM 测试图Fig. 2.25 AFM scheme of the SiN_x diffusion window with a designed width of $10\mu\text{m}$

器件开扩散窗口时一般采用湿法腐蚀的方式, 由于所用的腐蚀液为各向同性, 这样, 在纵向腐蚀的同时也会造成光刻胶阻挡层下的侧向钻蚀, 如图 2.25 所示, 对于设计宽度为 $10\mu\text{m}$ 的 SiN_x 扩散窗口, 在腐蚀后, 其窗口形成倒梯形结构, 窗口上部宽约 $13\mu\text{m}$, 底部宽约 $12\mu\text{m}$ 。这样无形之中会使得器件的光敏元扩大约 $2\mu\text{m}$ 。

(2) 扩散成结过程掺杂元素横向扩散的影响:

图 2.26 设计宽度为 $10\mu\text{m}$ 的扩散结的 SCM 测试图Fig. 2.26 SCM scheme of PN junction with a designed junction width of $10\mu\text{m}$

对于设计宽度为 $10\mu\text{m}$ 的扩散孔, 由于制备工艺因素的影响, 扩散窗口会变大从而造成器件的光敏元扩大, 在此基础上, 扩散成结过程中, 掺杂元素在进行纵向扩散的同时也会产生横向的扩散, 目前, 扫描电容显微镜(SCM)已经成功应用到 InP/InGaAs 异质结构的横向掺杂分析中^[15-16], 这里采用了 SCM 对 pn 结的宽度进行测试分析。由 SCM 测得的 pn 结宽度如图 2.26 所示, 该处的 pn 结也可以近似视为一个梯形结构, 上部宽度约 $13.71\mu\text{m}$, 底部宽度约 $12.72\mu\text{m}$ 。因此, 扩散窗口的侧向钻蚀及掺杂元素的横向扩散共同影响造成器件的光敏元扩大约 $3\mu\text{m}$ 。

(3) pn 结对周围载流子的侧向收集效应:

设计器件保护环与扩散孔边缘之间的设计距离分别为 10 、 15 、 20 及 $25\mu\text{m}$, 由前述分析可知, 二者之间的实际距离约为 7 、 12 、 17 及 $22\mu\text{m}$ 。利用 LBIC 测试系统对器件光响应特性进行了测试, 如图 2.27 所示, 保护环与扩散孔边缘设计间距分别为 10 、 15 、 $20\mu\text{m}$ (对应实际间距 7 、 12 、 $17\mu\text{m}$), 以及无保护环器件的光响应特性图, 测试时保护环 p 电极与器件公共电

极短接。由图 2.27 可知, 在加入保护环结构后, 器件的响应明显被限制在一个有限的区域内, 这样器件的有效光敏元尺寸就可以精确定义了。

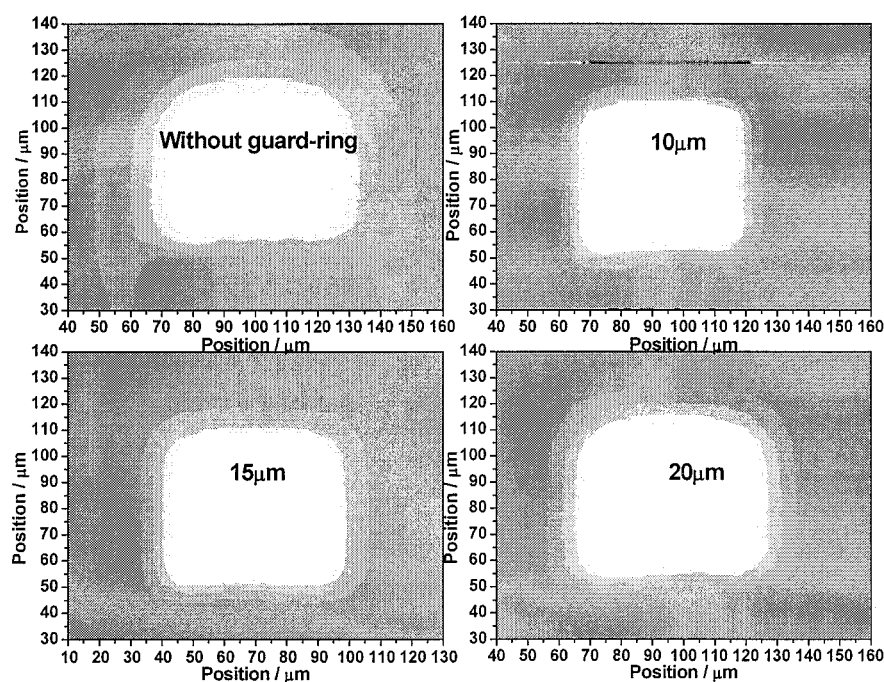


图 2.27 LBIC 测得器件的光响应特性灰度示意图
Fig.2.27 LBIC signal gray isoline maps of the detectors

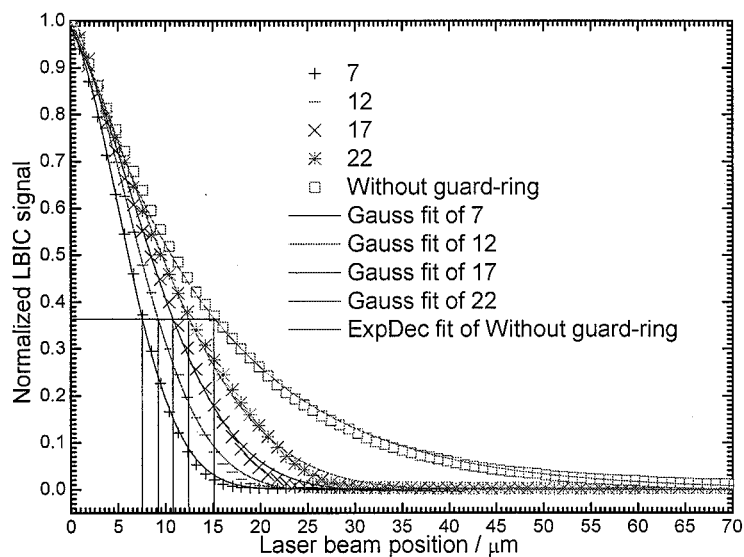


图 2.28 不同保护环与扩散孔边缘间距器件边缘的归一化 LBIC 信号衰减曲线
Fig.2.28 Normalized LBIC signal near the edge of the PN junction varying the laser beam position for different guard-ring to PN-junction distance

图 2.28 所示为不同保护环与扩散孔边缘间距器件边缘的归一化 LBIC 信号衰减曲线, 一般来说, 无附加结构的平面型器件的 LBIC 信号和测试光束及 pn 结边缘距离之间满足下列指数衰减关系式^[17]:

$$I_{LBIC}(x) = A + I_0 e^{-x/L} \quad (2.6)$$

其中, I_{LBIC} 、 x 、 L 、 I_0 和 A 分别为器件 LBIC 信号、测试光束及 pn 结边缘距离、光生载流子扩散长度、信号的比例常数和曲线拟合常数。对于无保护环结构的器件, pn 结周围的光生载流子会自由扩散, 到达 pn 结而被收集, 从而对器件信号产生贡献, 如图 2.28 所示, (2.6) 式与无保护环结构的器件的实验测试曲线符合良好, 此时拟合获得的扩散长度约为 $14.44\mu\text{m}$, 因可以认为器件有效光敏元扩大了 $14.44\mu\text{m}$ 。

但是, 在器件周围加入保护环结构以后, 测试光束照射在保护环周围时, 该处的光生载流子会部分被保护环收集, (2.6) 式将不再适用。在对带有保护环结构器件的 LBIC 信号测量曲线进行拟合时发现, 测量值与高斯分布关系式符合良好, 如图 2.28 所示。

$$I_{LBIC}(x) = A + \frac{I_0}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-2(x-x_c)^2/w^2} \quad (2.7)$$

其中, I_{LBIC} 、 x 、分别为器件 LBIC 信号、测试光束及 pn 结边缘距离。 w , x_c 分别为保护环-结边缘的设计距离和 LBIC 信号最大处的光斑位置, I_0 and A 均为曲线的拟合常数, $I_0/w\sqrt{\pi/2}$ 也为常数。一般取信号衰减为峰值的 $1/e$ 时测量光束的位置为器件光生载流子的扩散长度(光敏元扩大值), 而对于特定的器件材料, 其光生载流子的扩散长度一般为一定值, 因此, 该处的“扩散长度”应为器件的“等效扩散长度”, 可定义为:

$$L^* = x_c + w/\sqrt{2} \quad (2.8)$$

表 2.3 根据高斯分布拟合计算获得与实验测得的有效扩散长度的比较

Table 2.3 Comparison of Gauss fitting diffusion length and measured value

Actual guard-ring to PN junction distance / μm	Gauss fitted L^* / μm	Experiment position LBIC signal reduced to 1/e of peak value / μm	Difference between the experiment and fitted value
7	7.488	7.633	0.145
12	8.962	9.374	0.412
17	10.780	11.023	0.243
22	12.450	12.586	0.136

根据式(2.7)对图 2.28 中的测量曲线进行拟合, 并由(2.8)式计算获得各器件的光生载流子有效扩散长度分别为 7.488、8.962、10.780 及 $12.450\mu\text{m}$, 与器件实际保护环-结边缘间距之间的关系如图 2.29 所示:

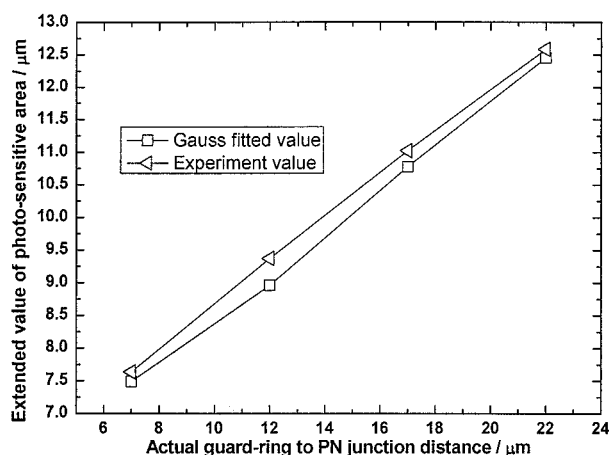


图 2.29 器件光敏元扩大测量值及拟合值与实际保护环-结边缘间距之间的关系

Fig.2.29 Measured and fitting value of photo carrier diffusion length VS guard-ring to PN junction distance

由图 2.28 可知,若取信号衰减为峰值的 $1/e$ 时测量光束的位置为器件光生载流子的扩散长度(光敏元扩大值),那么实验测得的有效扩散长度与根据高斯分布拟合计算获得的有效扩散长度之间基本一致,如表 2.3 所示,说明高斯分布基本符合带有保护环结构的器件。

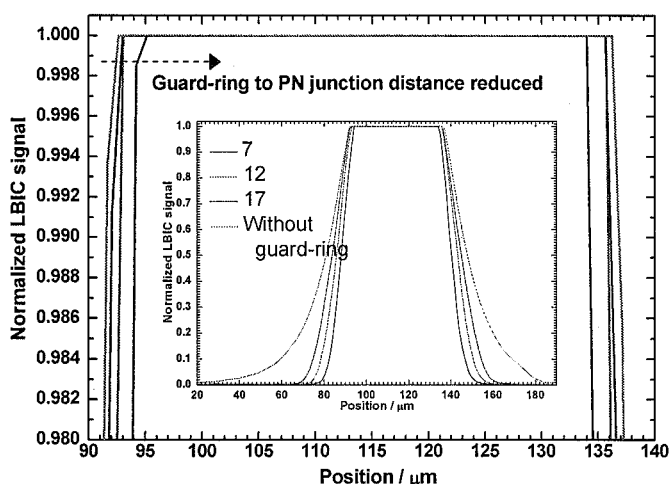


图 2.30 器件光敏元的归一化 LBIC 信号

Fig.2.30 Normalized LBIC signal for detectors without and with different guard-ring to PN junction distance

由图 2.29 可知,器件等效扩散长度与实际保护环-结边缘间距之间的基本成线性关系,但是,随着二者之间距离缩小至系统测量精度($5\mu\text{m}$),此时测量值已经不再准确,可以根据高斯分布进行大体计算。由以上数据可知,在大规模的阵列式器件中,随着光敏元中心距的减小,如果还要继续使用保护环结构器件,保护环与光敏元之间的距离应该越小越好,但是,在器件结构设计时所遵从的一个原则是,任何结构的引入不能以牺牲器件 pn 结本身的信号为代价。如图 2.30 所示,当器件的保护环与光敏元之间的距离减小至 $7\mu\text{m}$ 时,器件 PN 结的响应区域已经比没有保护环的器件的 pn 结减小了约 $4\mu\text{m}$,那么在器件结构设计时,器件保护环与光敏元之间的距离应该以 $7\sim 12\mu\text{m}$ 为宜。

2.4.5 浅隔离槽对光敏元扩大的抑制

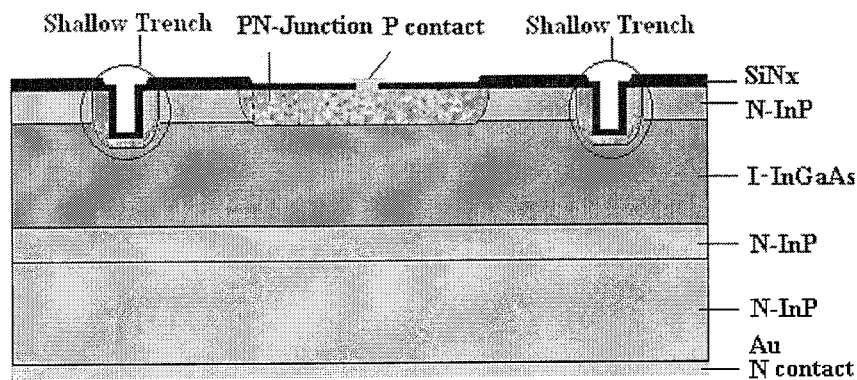


图 2.31 光敏元周围带有浅隔离槽结构的平面型 InGaAs 器件的截面示意图
Fig. 2.31 Cross section scheme for planar type InGaAs detector with shallow trench around

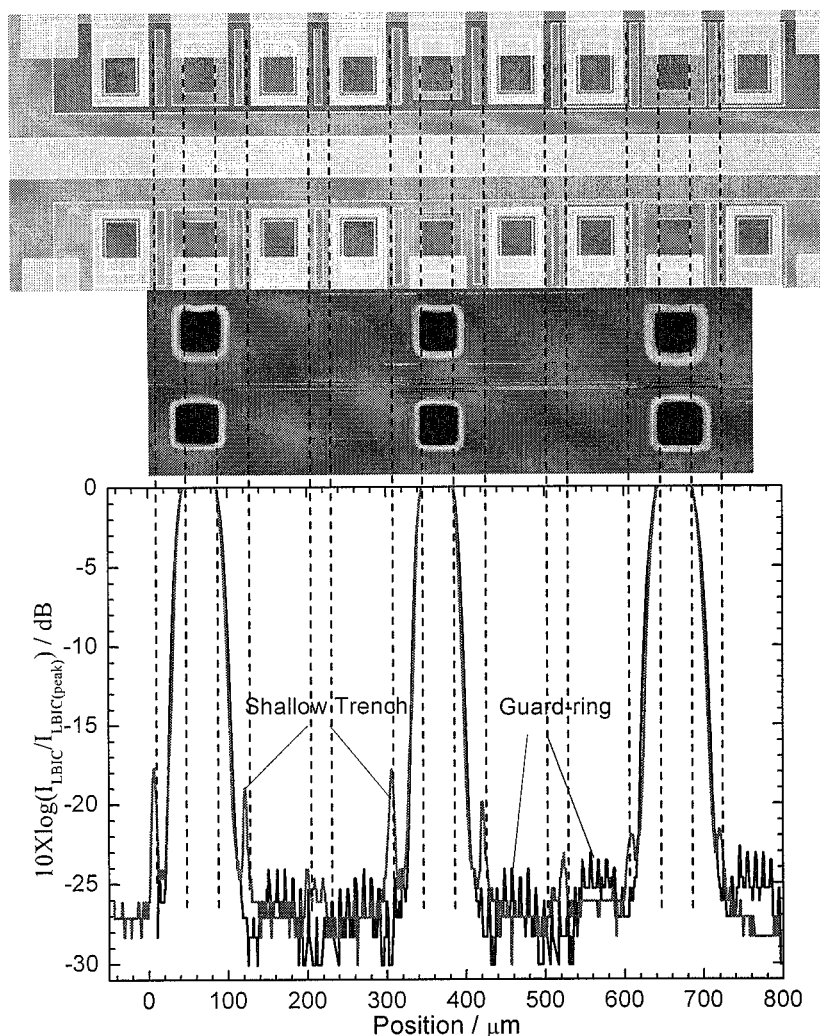


图 2.32 保护环结构及浅隔离槽结构对光敏元扩大抑制效果比较
Fig.2.32 Comparison of suppression effects for guard-ring and shallow trench structures around the pixel

在平面型器件中，有时也会在器件光敏元周围制备浅隔离槽来实现对器件光敏元扩大进行抑制而达到对光敏元定义的目的。在进行器件制备时，本文也采用湿法腐蚀工艺制备了带

有浅隔离槽结构的平面型器件，槽深度约 $1.5\mu\text{m}$ ，并且在浅隔离槽区域也进行了 Zn 元素的扩散，形成浅隔离槽与保护环一体化的隔离结构，如图 2.31 所示。

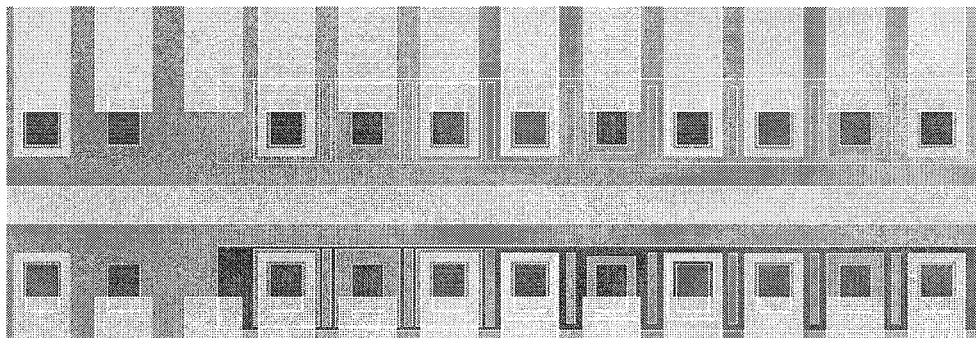
保护环结构与浅隔离槽结构器件的 LBIC 响应对比如图 2.32 所示。器件结构的上半部分为保护环结构，下半部分为浅隔离槽与保护环一体化的结构。利用 LBIC 系统对器件进行了对比测量，保护环及隔离槽与光敏元的扩散孔之间的设计距离是一致的，从左至右分别为 15、10、 $20\mu\text{m}$ ，相邻光敏元的中心距 $100\mu\text{m}$ 。为方便对比，对器件的 LBIC 进行了转化，转化公式为：

$$I(x) = 10 \times \log(I_{\text{LBIC}} / I_{\text{LBIC}}(\text{peak})) \quad (2.8)$$

由图 2.32 可知，两种器件结构对光敏元扩大的抑制效果基本是相当的。对于保护环结构的器件，由于保护环的收集作用，两光敏元之间区域的响应达到最小值，但是相邻光敏元对器件的信号有一定的贡献。而对于隔离槽结构的器件，在隔离槽区域，出现一个响应峰值，且随着隔离槽与光敏元间距的增大，响应峰值呈现下降趋势，这应该与该处测量光束的反射有关，但相邻光敏元对器件信号的贡献受到一定的抑制。因此在隔离槽制备过程中应进一步减小槽的深度以到达更好的抑制效果。

表 2.4 各种结构器件的黑体响应特性

Table 2.4 Black-body response characteristics for different detector structures

扩散孔 面积 40×45 (μm ²) 光敏元面积取 50×50 (μm ²)	电极区 扩散成结区 隔离槽+保护环区 未扩散区 												
	距离 μm	5			20	20	20	10	10		15	15	15
	隔离槽+保护环 mV	1.39	1.60			1.21	1.10	1.00	1.05		1.00	1.11	1.01
量子效率%	99.2	114			86.4	78.7	71.7	75.5		71.7	79.4	72.3	
峰值响应 A/W	1.24	1.43			1.08	0.98	0.90	0.94		0.9	0.99	0.90	
保护环 mV	1.36	1.65		1.10	1.39	1.19	1.02	1.10		1.10	1.35	1.10	
量子效率%	96.8	118		78.7	99.2	84.8	73	78.7		78.7	96	78.7	
峰值响应 A/W	1.21	1.48		0.98	1.24	1.06	0.91	0.98		0.98	1.2	0.98	

为验证各种器件结构对器件有效光敏元扩大的抑制效果,对所制备器件的黑体信号进行了测试,器件的扩散孔面积均为 $40 \times 45 \mu\text{m}^2$,器件信号测试条件为:黑体出射孔与器件距离 15cm、测试时环境温度 300K、黑体温度 900K、黑体出射孔径 5mm、电流放大器档位 10^{-7}A/V 、带宽 80Hz,测试结果与器件结构的对比如表 2.4 所示。由测试结果可以得出如下结论:

隔离槽+保护环器件的黑体信号明显小于保护环器件的黑体信号,可能原因:隔离槽位置也进行了扩散,形成与保护环一体的结构,另外,采用湿法腐蚀方式开隔离槽,侧面的钻蚀以及扩散过程都使得隔离槽与光敏元之间的距离比设计距离要小,这样与单纯的保护环结构相比,该种附加结构对器件光敏元周围光生载流子的收集作用更加明显,从而减小了器件的信号。

当保护环结构,或者隔离槽+保护环结构与光敏元的距离选择适当时,不需要环形遮盖电极,器件的量子效率即可处于正常范围,在正式器件结构中可以不采用环形遮盖电极。

2.5 保护环结构 256×1 线列器件的制备

通过在器件光敏元周围引入保护环结构可以有效地对光敏元进行定义,并在一定程度上抑制相邻光敏元之间的串音。本节采用保护环结构,并利用优化的器件制备工艺研制了光谱仪用 256×1 元长线列器件,器件俯视图见图 2.33(a),局部放大图见图 2.33(b),其中光敏元扩散孔面积 $25 \times 500 \mu\text{m}^2$,相邻光敏元中心距 $50 \mu\text{m}$,在相邻两光敏元之间引入保护环结构,保护环宽度 $5 \mu\text{m}$,保护环与光敏元设计间距为 $10 \mu\text{m}$ 。光敏元 P 电极双边引出,器件保护环也由电极引出,器件的 N 公共电极生长在背面,保护环电极与器件公共电极短接,以对器件光敏元进行定义并隔离。通过对器件相邻的三元进行 LBIC 测试可知,图 2.33(c)所示,器件光敏元边缘定义清晰,达到了对器件光敏元进行有效定义的目的。

表 2.5 抽测器件的黑体信号及噪声性能

Table 2.5 Black-body signal and noise characteristics of the tested detectors

管脚	A10	A8	A7	A6	B3	B4	B5
信号 / A	6×10^{-10}	6×10^{-10}	6×10^{-10}	6×10^{-10}	6×10^{-10}	6×10^{-10}	6×10^{-10}
噪声 / A	9.1×10^{-15}	9.5×10^{-15}	9.2×10^{-15}	9.5×10^{-15}	9.0×10^{-15}	9.0×10^{-15}	9.1×10^{-15}
黑体探测率 $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$	1.33×10^{10}	1.27×10^{10}	1.31×10^{10}	1.27×10^{10}	1.34×10^{10}	1.34×10^{10}	1.33×10^{10}

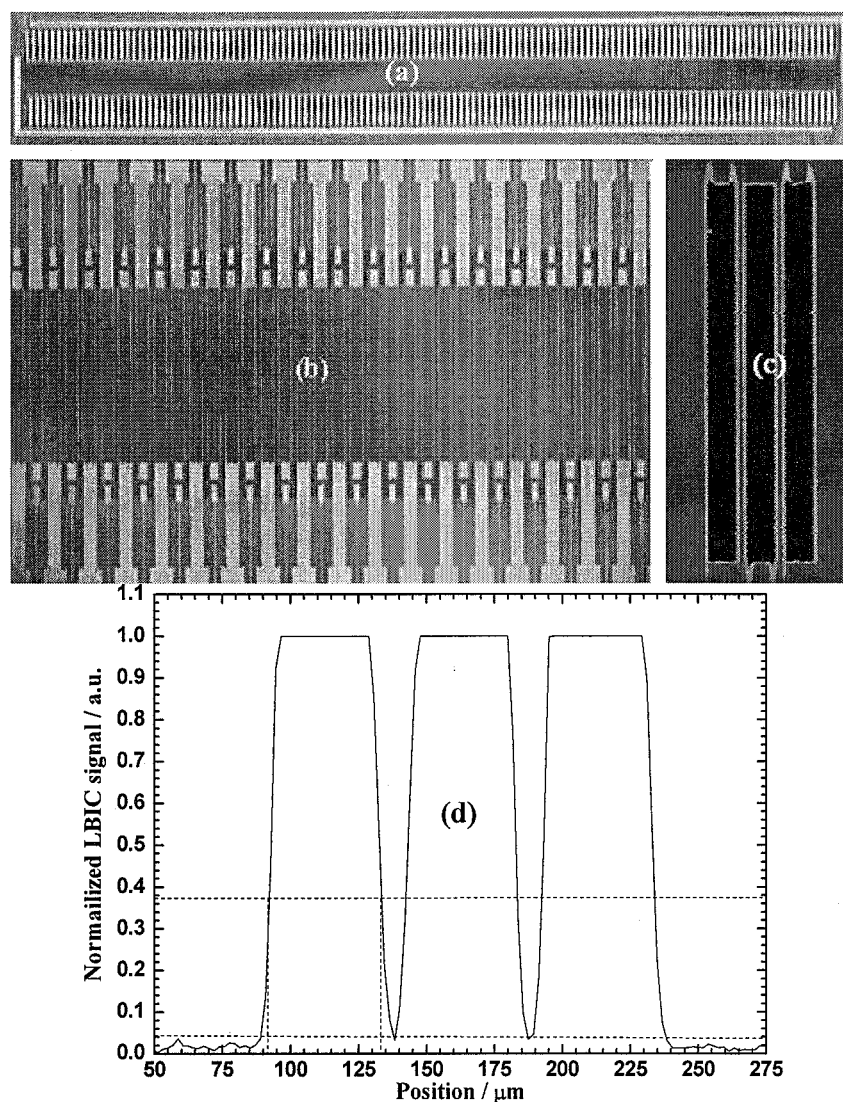


图 2.33 附有保护环结构的 256×1 元长行列 InGaAs 器件 (a) 行列器件整体俯视图 (b) 行列器件局部放大图 (c) 相邻三元器件的 LBIC 测试图 (d) 器件的归一化 LBIC 信号曲线
 Fig.2.33 The 256×1 linear InGaAs detector array with guard-ring structure (a) planform of the whole detector array (b) local photograph of the detector array (c) LBIC scheme of three neighbor pixels (d) the normalized LBIC signal for the three pixels in (c)

图 2.34 所示为所制备器件的抽测 I-V 特性曲线, 由图可知, 抽测元均匀性良好, 器件的平均优值因子 $R_0 A > 1 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 在室温下, -0.1V 反向偏压下暗电流密度均在 $23\text{nA}/\text{cm}^2$ 左右, 与前面所述的 $20\text{nA}/\text{cm}^2$ 一致, 说明器件工艺具有良好的重复性。

对抽测元的黑体信号及噪声性能进行测试, 黑体出射孔与器件距离 16cm 、测试时环境温度 300K 、黑体温度 900K 、黑体出射孔径 5mm 、带宽 80Hz , 取器件实际光敏元面积 $40 \times 500 \mu\text{m}^2$ (LBIC 信号下降至最大值的 $1/e$ 时光敏元的尺寸), 测试结果如表 2.5 所示。 300K 温度, 器件的典型光谱响应曲线如图 2.35 所示, 器件 G 因子约 91, 抽测的器件芯片的平均黑体探测率约 $1.31 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 平均峰值探测率约为 $1.19 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

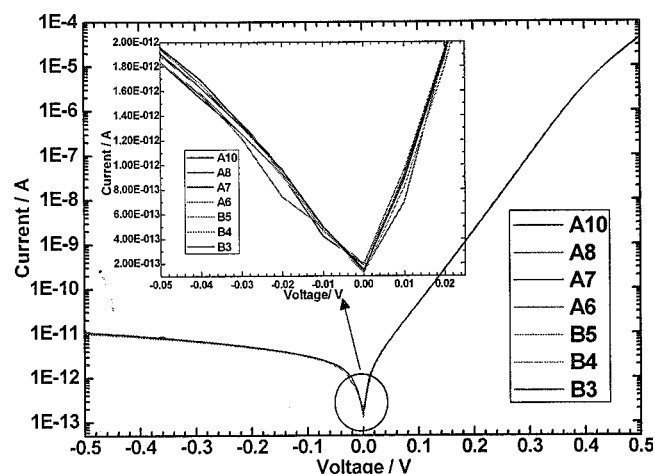


图 2.34 器件抽测 I-V 特性曲线

Fig.2.34 I-V characteristics for the measured detectors

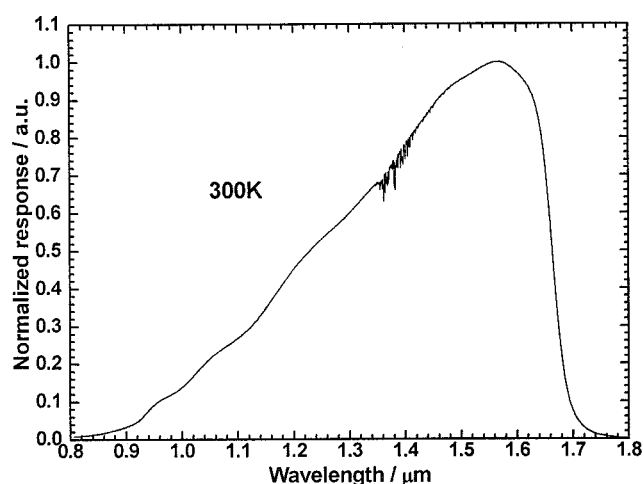


图 2.35 300K 温度下抽测器件归一化光谱响应

Fig.2.35 Normalized response of the tested detector at 300K

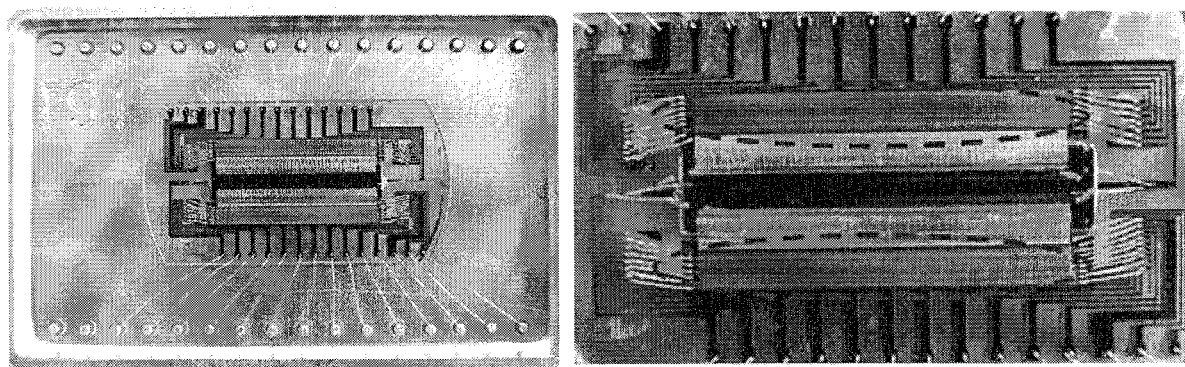


图 2.36 与读出电路互连后焦平面器件照片

Fig.2.36 Photographs of the planar InGaAs FPA with ROIC and detector chip

图 2.36 所示为与读出电路互连后焦平面器件的照片，光敏芯片 P 电极与两路 128 元读出电路互连，读出电路的输入级采用 CTIA 式运放积分型，焦平面探测器封装在双列直插的金

属管壳中,在进行焦平面性能测试时焦平面组件置于屏蔽盒内。焦平面测试条件:室温 300K, 900K 黑体光源,黑体出射孔距离焦平面 75cm,黑体出射孔径 5mm。

焦平面的信号电压表示为^[18]:

$$V_s = I_{\text{int}} T_{\text{int}} A_v / C_{\text{int}} \quad (2.10)$$

其中, T_{int} 为积分时间, C_{int} 为积分电容, A_v 为电路增益, I_{int} 为积分电流, 包括光电流 I_s 和芯片暗电流 I_{dark} 两部分。即焦平面的信号电压包括光信号和暗信号两部分,二者都与焦平面的积分时间成正比关系。

焦平面的峰值探测率表示为:

$$D_{\lambda_p}^* = GD_{bb}^* = \frac{GV_s 4L^2 \sqrt{1/2t_{\text{int}}}}{V_n \sigma (T_B^4 - T_0^4) d^2 \sqrt{A_D}} \quad (2.11)$$

其中 D_{bb}^* 为黑体探测率, V_s 为信号电压, V_n 为噪声电压, L 为黑体和探测器距离, t_{int} 为积分时间, σ 为斯忒藩常数 $5.673 \times 10^{-12} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)$, T_B 为黑体温度, T_0 为调制盘温度, d 为黑体辐射孔径, A_D 为探测器的面积。

焦平面器件的“盲元率”定义为焦平面中的无效像元占总像元数的百分比^[18], 用 N_{ef} 表示, “盲元”包括“死像元”和“过热像元”。其中, “死像元”定义为 <0.5 倍平均信号电压的像元, 用 d 表示, “过热像元”定义为 >1.5 倍平均信号电压的像元, 用 h 表示, 则“盲元率”为:

$$N_{ef} = \frac{d+h}{N} \times 100\% \quad (2.12)$$

其中 N 为总像元数。

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值与平均响应率的百分比, 用焦平面的信号电压可表示为^[18]:

$$U_{V_s} = \frac{1}{V_s} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_s(i) - \bar{V}_s)^2} \quad (2.13)$$

$V_s(i)$ 为第 i 个像元的信号电压, $\bar{V}_s$ 为个像元的平均信号电压。

如图 2.37 左图所示, 所测 256 元器件存在 15 个“盲元”, “盲元率”为 5.86%。存在“盲元”的主要原因应该是生长 SiO_2 钝化膜后, 在进行 P 电极退火时, 由于器件应力的存在造成钝化膜破裂造成了盲元, 但是在高倍显微镜下对相应的单元进行比对时, “盲元”所对应的光敏元并没有发现气泡的存在, 进一步的原因需要从更微观的尺度分析, 而且对于器件表面钝化膜的生长条件的研究也需要深入。右图为剔除“盲元”后焦平面的信号, 其不均匀性约为

1.65%，均匀性良好。

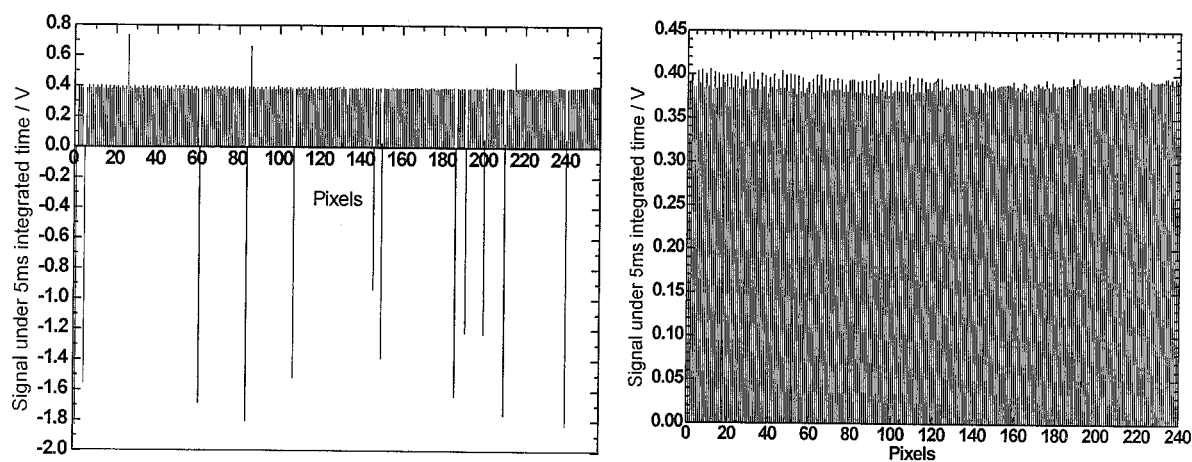


图 2.37 5ms 积分时间下焦平面的信号
Fig.2.37 The FPA signals at 5ms integrated time

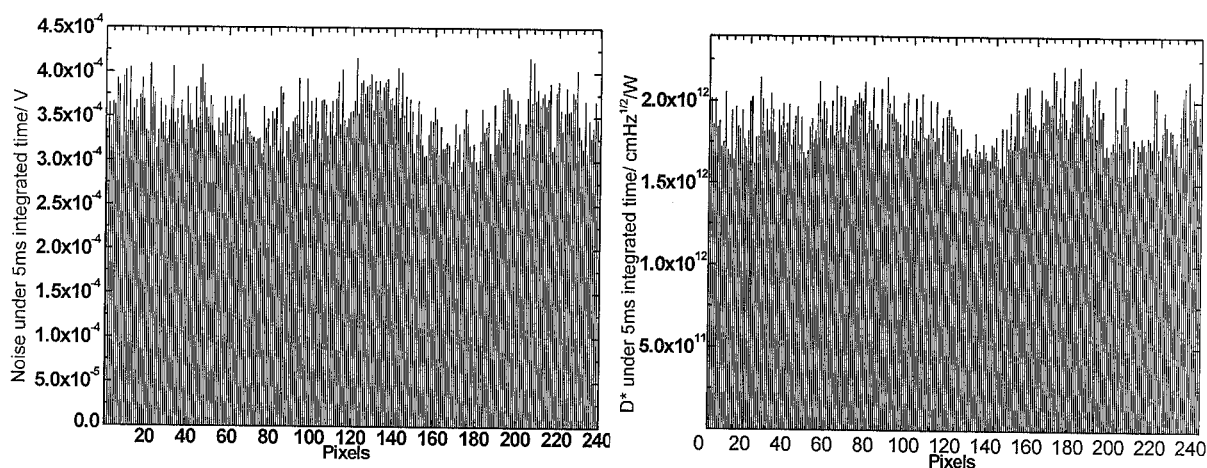


图 2.38 5ms 积分时间下焦平面的噪声及峰值探测率
Fig.2.38 FPA noise and peak detectivity under 5ms integrated time

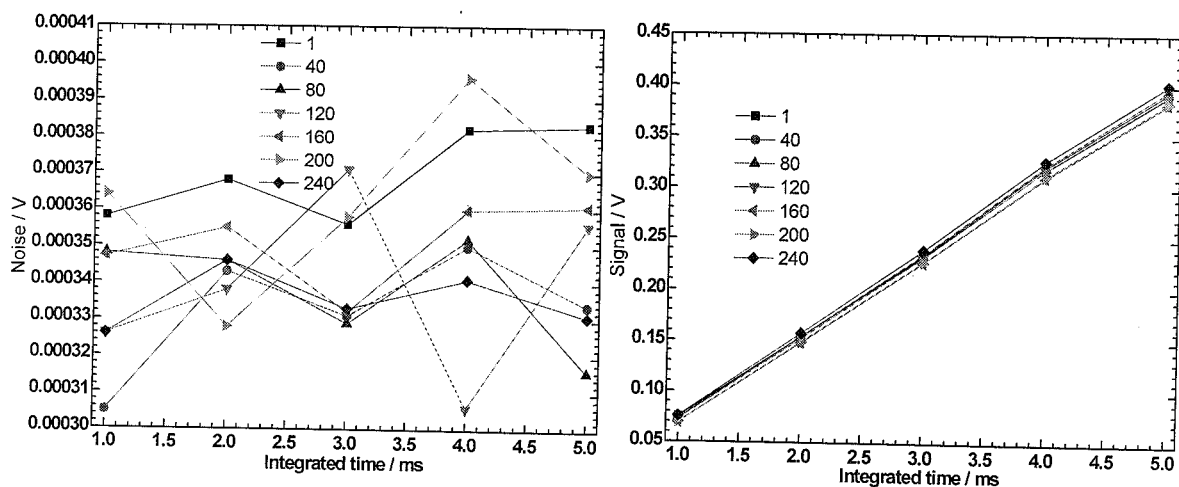


图 2.39 不同积分时间下焦平面的噪声及信号的变化
Fig.2.39 Integrated time dependent noise and optical signal for the FPA

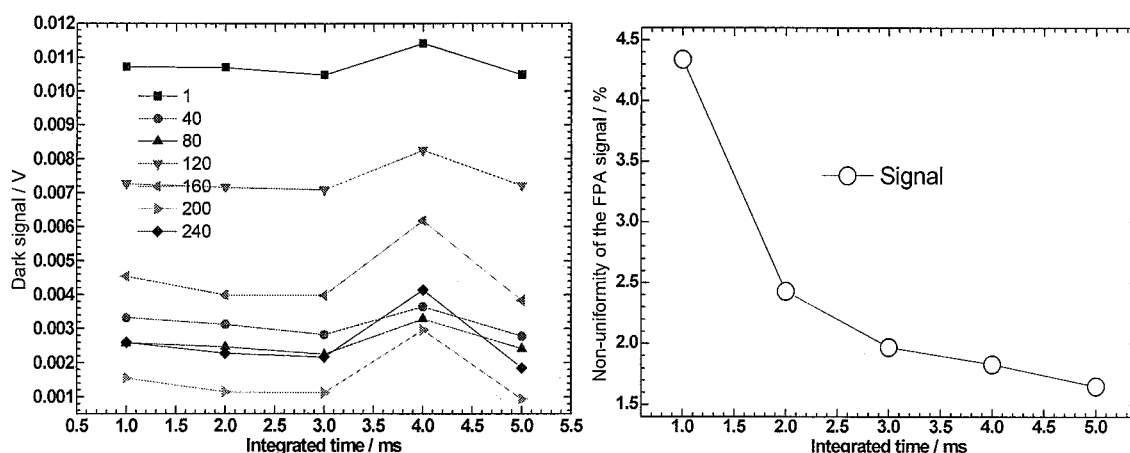


图 2.40 不同积分时间下焦平面的暗信号及信号不均匀性的变化
Fig.2.40 Integrated time dependent dark signal, and non-uniformity of the optical signal for the InGaAs FPA

图2.38所示为5ms积分时间内,剔除“盲元”后焦平面的噪声值,各像元噪声值起伏较大,也造成各像元的峰值探测率起伏较大。焦平面器件的噪声一般由两部分组成,探测器芯片的噪声以及读出电路的噪声,读出电路的噪声是随机分布的,随着积分时间的变化对焦平面噪声的贡献总和为零,探测器芯片的噪声随着积分时间的增大会对焦平面噪声有所贡献,如图2.39左图所示,随着积分时间增大,焦平面器件的噪声与积分时间并没有明显的对应关系,说明该焦平面的噪声受探测器芯片影响较小,噪声主要来源于读出电路。这样,就可以通过适当的延长积分时间来达到增大焦平面探测率的目的。

在该积分时间内,焦平面的平均峰值探测率约为 $1.87 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$,与探测器芯片的峰值探测率($1.19 \times 10^{12} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)基本相当。由图2.39可知,随着积分时间的变长,焦平面的噪声变化很小,而信号则线性增大,因此,可以通过延长焦平面的积分时间来增大焦平面的峰值探测率。而且,由图2.40右图可知,适当的延长积分时间可以在一定程度上提高焦平面信号的均匀性。

焦平面的暗信号一方面来源于CTIA读出电路反馈端的波动,考虑到CTIA式读出电路各单元的反馈端在探测器上加载的实际偏压是在0~3mV之间,在探测器上会产生0~0.1pA的暗电流波动,这会增加暗信号电流输出的非均匀性;另一方面来自InGaAs光敏芯片自身的暗电流,光敏芯片和CTIA式读出电路互连后,其光敏芯片本身暗电流对焦平面暗信号的贡献可以用公式 $V_{out} = I_{dark} T_{int} A_v / C_{int}$ 表达^[19],那么,焦平面暗信号随积分时间的变化趋势应该与其光信号的变化趋势保持一致,即,随着积分时间增大,暗信号线性增大,而该批次器件随着积分时间的增大,其暗信号保持不变,如图2.40左图所示,说明这个量级的暗电流在所用的积分时间内并不足以积累,而形成暗信号。

2.6 ZnO 固态扩散源开管扩散研究

平面型 InGaAs 器件的扩散成结方式主要有两种，开管扩散和闭管扩散。闭管扩散是常用的一种扩散方式，一般采用 Zn_3P_2 或 Zn_3As_2 作为扩散源，这种方式扩散均匀，对材料的损伤较小，对设备要求较低，但是扩散过程需要进行真空封管，这样就造成了扩散过程中的不确定性，而且受到石英管尺寸的限制，不能进行较大规模的器件制备，且大尺寸大质量的石英管在扩散中的升温过程也会严重影响扩散过程的可控性。开管扩散的扩散源有两种，一种为气态扩散源，如二乙基锌、二甲基锌等，这种扩散方式适合进行大规模的生产，小规模制备成本过高，并不适用于科学研究；另外一种为固态扩散源，如用匀胶、溅射等方法制备的薄膜扩散源等，这种方式制备工艺简单，但可控性较差。本节采用 ZnO 固态扩散源对开管扩散成结方式进行了初步的研究。

2.6.1 器件制备工艺流程

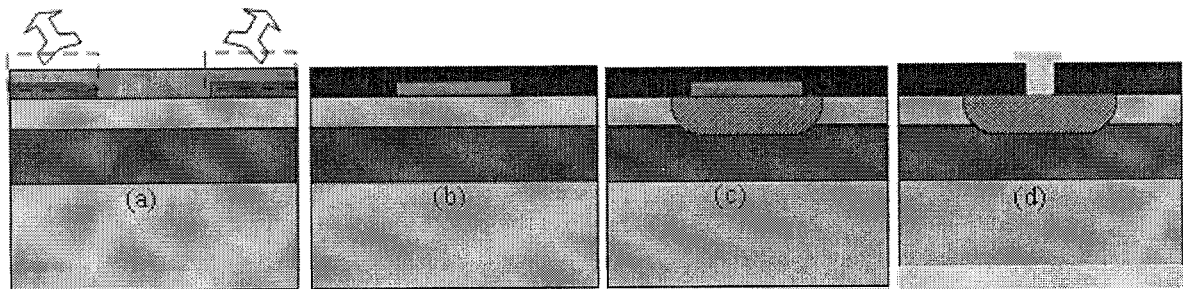


图 2.41 ZnO 源开管扩散工艺流程图(a)光刻胶剥离法生长 ZnO 扩散源 (b)生长扩散掩膜 (c) 开管扩散成结 (d)p、n 接触制备

Fig.2.41 The fabrication process for open-tube diffusion method (a) deposition of ZnO diffusion source with lift-off method (b) deposition of diffusion mask (c) PN-junction fabricated by open-tube diffusion (d) fabrication of p and n contact

图 2.41 所示为 ZnO 源开管扩散成结工艺的基本流程图，基本工艺步骤为：(1)在清洗之后的材料表面进行光刻形成扩散区域；(2)采用磁控溅射方式在材料表面溅射约 100nm 的 ZnO 薄膜；(3)光刻胶剥离方式形成扩散源区域；(4)生长 SiO_2 扩散掩膜；(5)在快速退火炉中进行开管扩散形成 pn 结域；(6)腐蚀去除扩散源；(7)器件表面钝化；(8)制备 pn 电极接触。为进行对比，实验过程中将材料分为两片，其中一片在生长 ZnO 扩散源之前首先在快速退火炉中在 N_2 气氛下进行了退火处理，温度为 300°C ，退火时间 30min，另一片不进行任何处理，两片材料的其他制备步骤完全相同。所制备的器件为八元小线列探测器，器件设计光敏元尺寸 $105 \times 105 \mu\text{m}^2$ ，间距 $95 \mu\text{m}$ 光敏元尺寸，其俯视图与图 2.26 相同。

2.6.2 扩散成结的表征及器件性能分析

如图 2.42 所示为在快速退火炉中，采用 540°C 、20min 扩散条件，扩散成结后器件结深度的 SCM 测试图，由图可知，这种开管成结方式完全可以成功实现材料的 p 型掺杂。由于扩

散时间较长, 扩散结已经深入 InGaAs 材料层, 在正式器件的制备过程中, 采用的扩散条件为 540°C 、15min。

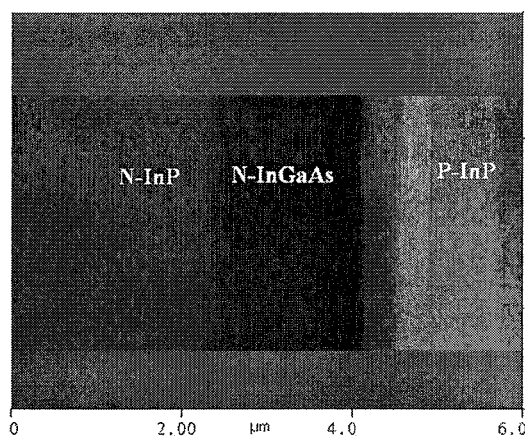


图 2.42 540°C 扩散 20min 后结深的 SCM 测试图

Fig.2.42 SCM schematic of the junction-depth with a diffusion temperature of 540°C for 20min

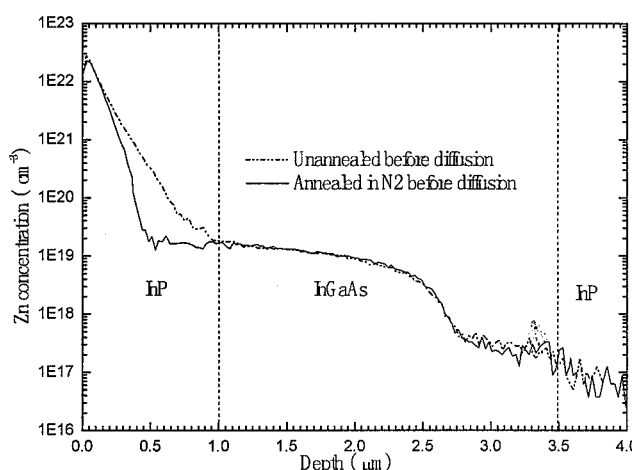


图 2.43 开管扩散后 Zn 元素随材料深度变化的 SIMS 测试图

Fig.2.43 SIMS profile of Zn concontration vs diffusion depth for open-tube diffusion

两种材料在快速退火炉中, 540°C 扩散 15min 后腐蚀去除 ZnO 扩散源, 然后利用二次离子质谱仪(SIMS)测量掺杂 Zn 元素的浓度随材料深度的变化, SIMS 测试图如图 2.43 所示。由图可知, 在靠近 InP 层的表面, 两种材料均形成富含 Zn 元素的薄层, 这与闭管扩散方式是不同的。这种现象应该与扩散过程中所用扩散源有关, 在该扩散过程中, 扩散源与材料直接接触, 加热时 ZnO 分解, Zn 元素会首先在 InP 表面富集, 然后在浓度梯度的作用下向材料内部扩散, 扩散完成后, 材料表面仍然会留有大量的 Zn, 而闭管扩散过程中, 扩散源与材料是不直接接触的, 扩散源会首先受热分解, 形成气态源, 再进行扩散, 扩散完成, 剩余气体会重新凝华变为固体, 而不会留在在材料表面。另外, 与未进行退火处理的材料不同, 在 N_2 气氛中进行退火处理的材料, 其 Zn 元素的分布在 InP 层内出现一个突降, 其可能原因是 N_2 退火

过程中, 在 InP 表面形成了一个富 N 层, 该层对 Zn 元素在 InP 中的富集有一定的抑制作用。

图 2.44 所示为两种材料所制备器件的 I-V 特性曲线, 可知, 经 N_2 退火处理的材料所制备器件的暗电流特性要优于未经任何处理的材料所制备的器件。经 N_2 退火处理的材料所制备器件的平均零偏压电阻 R_0 约为 $9.45 \times 10^8 \Omega$, 未经任何处理的材料所制备的器件的平均零偏压电阻 R_0 约为 $7.69 \times 10^8 \Omega$ 。图 2.45 所示为采用开管扩散方式制备的器件与采用闭管扩散方式制备器件(采用 SiO_2 扩散掩膜, 器件的零偏压电阻 R_0 约为 $3 \times 10^9 \Omega$)的 I-V 典型性能对比, 器件光敏元区面积均为 $105 \times 105 \mu m^2$, 电极区面积 $70 \times 70 \mu m^2$, 由图可知, 开管扩散方式制备器件的暗电流水平已经非常接近闭管方式器件, 而且, 经过 N_2 退火处理的器件的暗电流特性要优于未经任何处理的器件。

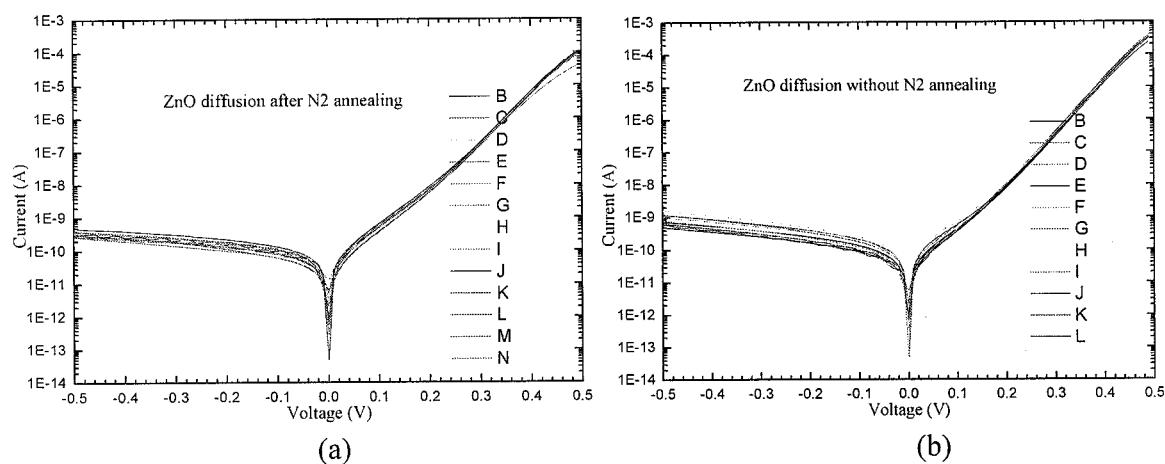


图 2.44 两种材料所制备器件的 I-V 特性曲线 (a) N_2 中退火处理材料 (b)未处理材料
Fig.2.44 I-V characteristics for the devices fabricated by two materials which were (a) annealed in N_2 atmosphere and (b) without any processing

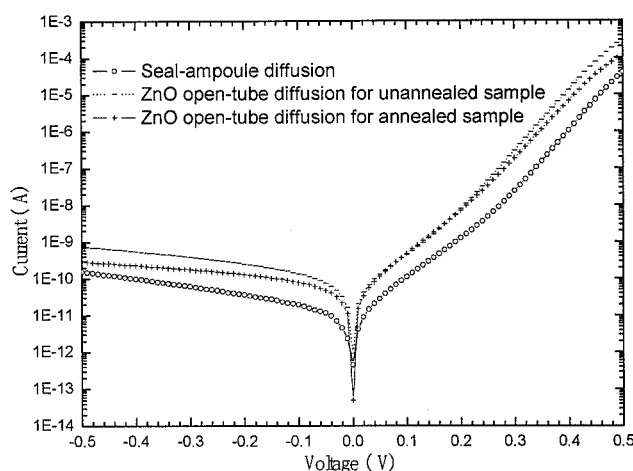


图 2.45 ZnO 开管扩散与闭管扩散制备的器件 I-V 特性
Fig. 2.45 I-V characteristics for the devices fabricated by open-tube diffusion and sealed-ampoule diffusion

图 2.46 为 77K 下, 两种材料的 PL 测试谱, 测试所用的激发光波长为 514.5nm。由图可

知, 对于未经过 N_2 处理的材料, 在经扩散后, 其 PL 谱线存在较多的“毛刺”, 说明测试过程中具有很大的噪声干扰, 这种噪声一般与材料内部的杂质有关, 由于扩散过程中所用扩散源为 ZnO , 在高温扩散过程中, Zn 元素与 O 元素都会产生由样品表面向内部的扩散, Zn 元素的扩散是我们所需要的, 但是 O 元素往往会在 InP 层内产生较多的杂质能级, 从而造成噪声的产生。而经过在 N_2 气氛中退火的材料, 其 InP 表面形成富 N 层, 该层对 O 元素的内扩散存在一定的阻挡作用, 从而会限制杂质能级的产生, 有效降低了 PL 测试中的噪声干扰。

扩散掺杂后 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料中的复合机制如图 2.47 所示, 对于扩散前在 N_2 中进行过退火处理的材料, 1.3eV 及 0.79eV 处的峰值分别对应盖帽层 InP 材料以及 P 型吸收层 InGaAs 材料导带底与受主能级之间的直接辐射复合, 对于与 InP 晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料, 在 77K 温度下, 其禁带宽度约为 0.81eV , 峰值发生“红移”的原因应该是由扩散掺杂过程中, 部分 Zn 元素已经深入 InGaAs 吸收层(如图 2.43 所示), 造成该部分 InGaAs 由弱 n 型转化为重 p 型, 在 PL 测试时, 吸收层 InGaAs 材料导带底与受主能级之间的直接辐射复合形成该峰值。而对于未进行退火处理的材料, 其盖帽层材料的 PL 峰值向低能量处“红移”, 且存在很多“毛刺”, 这种现象应该与高温扩散过程中 O 元素的内扩散引入的杂质能级有关。而对于两种材料, 在 InGaAs PL 峰值的高能量侧, 即约 $0.85\sim 0.95\text{eV}$ 范围内, 出现了多个峰, 经 N_2 退火的材料, 这些峰值相对较小。这应该与盖帽层 InP 材料中的杂质能级有关, 由于扩散的 O 元素主要集中在 InP 中, 会在 InP 中引入较多的杂质能级, 这些能级在 PL 测试中引入较多的辐射复合峰, 而经过 N_2 退火的材料, InP 表面的富氮层能够较好的抑制 O 元素的内扩散, 在一定程度上抑制这些杂质峰, 如图 2.46 所示。

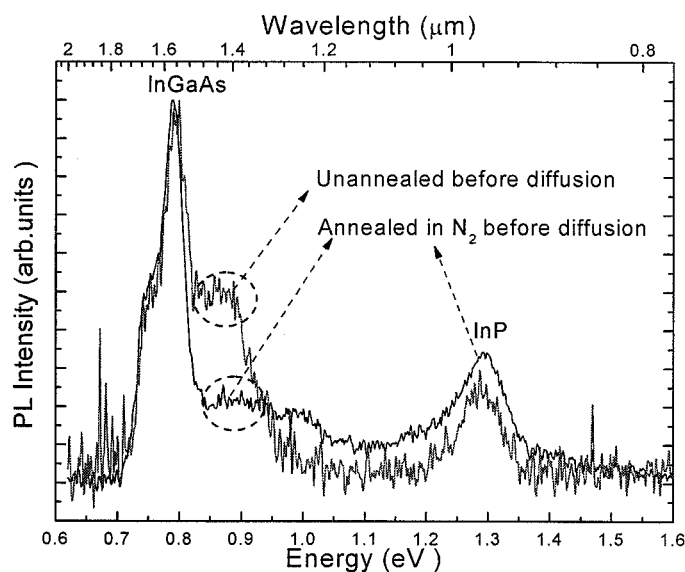
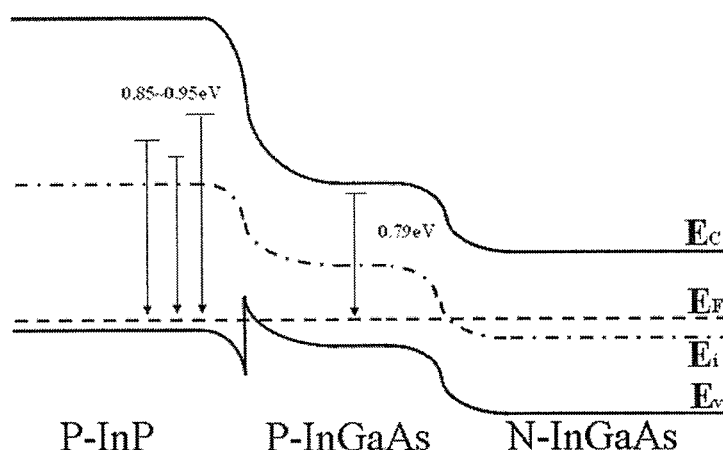


图 2.46 两种材料扩散后 77K 下的 PL 测试谱
Fig.2.46 Normalized PL for the two materials after diffusion at 77K

图 2.47 扩散掺杂后 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料中的复合机制示意图Fig.2.47 Recombination mechanisms in InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As after Zn doping

以上研究说明，采用开管方式也能够获得性能较好的平面型器件，但是器件工艺条件仍需要深入研究，需要研究的问题有：(1)选择更加合适的扩散源以减小杂质元素引入的复合能级；(2)选择钝化效果更好的扩散掩膜以降低器件暗电流水平；(3)选择更加合适的扩散设备以提高器件工艺流程的可控性。

2.7 本章小结

通过对扩散设备的优化，提高了器件工艺的可控性；对器件扩散掩膜进行优化，采用 PECVD 方式制备的 SiN_x 作为扩散掩膜，提高了器件的边缘钝化效果，成功将器件的暗电流密度由优化前的 100~300 nA/cm² 降至 ~20 nA/cm² (室温, -0.1 V 偏压下)，提高了器件性能；搭建串音测试系统，并研究了平面型、深台面型以及浅台面型三种不同结构器件的串音特性，发现浅隔离及保护环结构对器件串音具有良好的抑制效果，为器件结构的优化提供了一种思路；通过器件结构的优化设计，引入小扩散孔、保护环结构、浅隔离槽结构以及环形遮盖电极对平面型器件光敏元扩大的现象进行了抑制，取得了良好的效果，并采用 SCM、AFM 及 LBIC 测试技术相结合的方法研究了保护环结构对于光敏元扩大现象的抑制效果；根据优化的器件工艺及器件结构制备了带有保护环结构的光谱仪用线列 InGaAs 探测器，扩散孔面积 25×500 μm²，相邻光敏元中心距 50 μm，室温下，探测测器芯片暗电流密度在 -0.1 V 偏压下约为 23 nA/cm²，峰值探测率 > 1.00×10¹² cmHz^{1/2}/W，抽测器件的平均优值因子 R₀A > 1×10⁶ Ω·cm²，与读出电路互连后在 5 ms 积分时间下探测器焦平面的平均峰值探测率约 1.87×10¹² cmHz^{1/2}/W，响应不均匀性约为 1.65%；针对常规闭管扩散工艺中存在的工艺复杂、重复性较差等缺点，采用 ZnO 固态扩散源对平面型器件的开管扩散工艺进行了初步的研究，得到了性能较好的平面型 InGaAs 探测器，室温下，器件的平均优值因子 R₀A 已经达到 1.5×10⁵ Ω·cm²。

参考文献:

- [1] 吴小利 平面型 InGaAs 线列红外焦平面探测器技术研究 博士学位论文 2007
- [2] GOPAL V, GUPTA S, BHAN R K, et al. Isolating surface and bulk contributions in an HgCdTe junction diode [C]Proceedings of SPIE, 17th International Conference on Photo electronics and Night Vision Devices, 2003, 5126: 215- 222.
- [3] Tetyorkin V V, Rutkowski J, Rogalski A,et al. Characterization of p-on-n HgCdTe diffusion photodiodes [C] Proceedings of SPIE, Liquid Crystals: Mater ials Science and Applications, 1994, 2372: 382- 387.
- [4] HAO Guoqiang, ZHANG Yong !gang, LIU Tian !dong, et al. The dark current characteristics of InGaAs pin photodetectors [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2004, 25 (5): 341 – 344 (in Chinese)
- [5] FORREST S R, LEHENY R F, NAHORY R E, et al. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ photodiodes with dark current limited by generation-recombination and tunneling [J]. Applied Physics Letters, 1980, 37(3): 322- 325.
- [6] Robert F. Pierret, Semiconductor devices [M].2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [7] Joseph Boisvert, Takahiro Isshili, Rengarajan Suharasanan, et al, Performance of very low dark current SWIR PIN arrays[C] Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXIV, 2008, 6940: 69400L-1-69400L-8
- [8] Thomas J. Sanders and E. Lee Caraway, “Modeling and test of pixel crosstalk in HgCdTe focal plane arrays”, Proc. of SPIE Vol. 4369, 2001, P458-466
- [9] Redfern D A, Fang W, Musca C A, *et al*, Towards a laser-beam-induced-current test structure for the nondestructive determination of junction depth in HgCdTe photodiodes [J]. Conf. on Optoelectron and Microelectron Materials and Devices. IEEE Proc., 2000: 169-172
- [10] Application note of Goodrich, “Crosstalk limits in monolithic InGaAs photodiode arrays”, 2006, 1-4
- [11] C.A. MUSCA, J.M. DELL, L.FARAONE, J. BAJAJ, T.PEPPER, K.SPARIOSU, J.BLACKWELL, and C.BRUCE, “Analysis of crosstalk in HgCdTe p-on-n heterojunction photovoltaic infrared sensing arrays”, Journal of Electronic Materials, Vol.28, No.6, 1999, P 617-622.
- [12] Munizer Purica, Elena Budianu, Dana Cristea, A. Rusanu, “Investigation of optical crosstalk in monolithically integrated photodetectors arrays for multichannel detection systems”, IEEE, 1999, P503-506
- [13] Byung Jun Park, Jongwan Jung, Chang-Rok Moon, Sung Ho Wang, Yong Woo Lee et al, “Deep trench isolation for crosstalk suppression in active pixel sensors with $1.7\mu\text{m}$ pixel pitch”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46, No. 4B, 2007, P2454-2457
- [14] Michael J. Lange, Successful detector design is a game of give and take[J] Photonics Spectra, 2005, 39(4):70-77
- [15] Martin H.E., Michael J.L., Sugg A.R., et al, Zinc Diffusion in InAsP/InGaAs hetero structures, Journal of Electronic Materials 1999, 28 (12):1433-1439
- [16] Hao Yin, Tianxin Li, Wenjuan Wang, et al, Hao Yin, Tianxin Li, Wenjuan Wang, et al, Scanning capacitance microscopy investigation on InGaAs/InP avalanche photodiode structures: Light-induced polarity reversal, Applied Physics Letters, 2009,95, 093506-1
- [17] Vincent K.S.Ong, and Dethau Wu, Determination of Diffusion Length from Within a Confined Region with the Use of EBIC IEEE Transactions on Electron Devices, 2001, 48(2):332-337
- [18] 《红外焦平面测试评价技术研究》课题组, 焦平面探测器测试与评价[M], 中国科学院上海技术物理研究所, 1995

- [19] 李雪, 唐恒敬, 汪洋, 陈新禹, 龚海梅, 方家熊, 近红外 InGaAs 线列焦平面组件暗信号研究, 光学学报, 2009, 29(s1):377-381

第三章 平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器技术研究

3.1 引言

与 InP 晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器长波方向的截止波长为 $1.7\mu\text{m}$, 这种波长的器件广泛应用于光纤通讯领域, 但是在许多实际应用中, 需要探测器的截止波长向长波扩展。比如探测农产品水分需要 $1.9\mu\text{m}$ 的探测器, “LIDAR”系统中需要 $2.05\mu\text{m}$ 的探测器等等。目前, 国内长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器主要采用台面型结构, 台面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器已经达到了较高的性能。本章对于平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器进行了初步的探索研究, 实验所用的平面型外延材料由中科院长春光机所提供。首先研究了掺杂元素在晶格失配 $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 及晶格匹配 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 外延材料中的扩散机制, 然后采用 InP 及 InAsP 作为盖帽层的异质结构外延材料制备了平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器, 并对其性能做了初步的分析研究。

3.2 $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结构中 Zn 元素的扩散机制

PN 结是 InGaAs 光伏器件中最重要电学结构之一, 平面型 InGaAs 探测器的制备一般通过 Zn 扩散工艺在 n 型材料中进行 p 型掺杂形成, 掺杂元素的掺杂浓度与扩散深度, 特别是 pn 结的结深, 对光伏器件的量子效率有着至关重要的影响, 对这两个物理量的准确表征是 InGaAs 探测器工艺研究的关键。

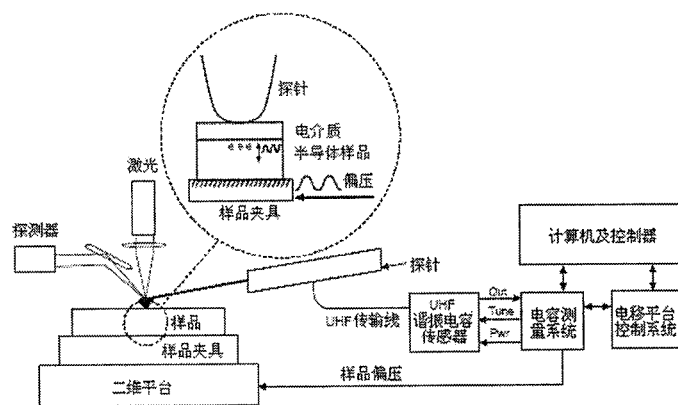
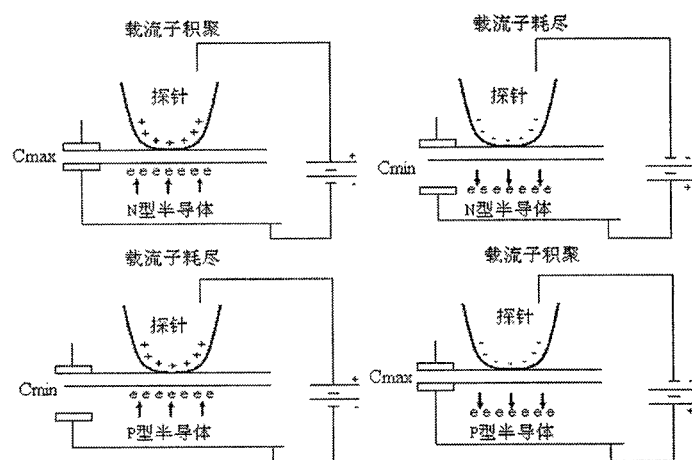
而当器件的响应波长向长波扩展时, 就需要改变吸收层材料的组分, 这样吸收层材料与衬底材料及盖帽层材料之间就很容易产生晶格失配, 晶格失配的存在会对器件工艺流程及器件性能产生很大的影响, 对于平面型器件制备流程中的高温扩散环节来说, 晶格失配的影响会更大。本节通过闭管扩散方式, 利用 Zn_3P_2 作为扩散源实现了 Zn 元素在晶格失配 $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 及晶格匹配 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 异质结构外延材料中的掺杂, 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。

3.2.1 扫描电容显微技术

在扩散工艺中, 对杂质分布的定量表征通常采用二次离子质谱(SIMS)^[1,2], 它可以准确地得到杂质在样品中的浓度分布曲线, 但是, SIMS 的测试需要制备较大面积的样品, 无法实现对微米量级的器件进行直接表征, 而且它只能得到样品在深度方向一维的表征结果。另外, SIMS 测得的为掺杂元素的扩散深度, 实际上掺杂过程中, 半导体中的掺杂元素并不会完全被激活, SIMS 测得的扩散深度并不一定是器件实际的 PN 结深度, 这时一般会采用电化学

CV(E-CV)法对材料的载流子分布进行测试,但E-CV测试需要样品的面积更大,需要特殊的腐蚀液,且测试复杂费时。扫描电容显微技术SCM(scanning capacitance microscopy)是一种重要的材料表征方法,是扫描探针显微镜SPM(scanning probe microscopy)的一种重要的扩展模式,它可以得到样品在纳米量级上的二维电学分布图,在制备完成的器件上即可进行SCM测试,而不需要额外进行大面积样品制备,因此,广泛应用于硅器件的电学性能研究中^[3-8]。

SCM测量系统如图3.1所示,样品与探针等效为一个MOS电容,通过对样品施加一个交变偏压,在样品与SCM针尖之间产生一个交变电场,电场的变化会引发探针下样品表面载流子的耗尽和积累,从而产生探测器与样品之间电容的变化,如图3.2所示。当针尖与样品相接触时,传感器、探针和针尖附近样品中的载流子构成谐振器,这样针尖和样品之间电容的变化将加载到传输线终端并改变系统的谐振频率,谐振频率的微小变化在谐振传感器输出信号中产生巨大变化,系统灵敏度约在 10^{-18}F 。SCM系统的测量精度跟所施加偏压、探针质量、探针与半导体样品之间电介质的质量和厚度,以及样品自由载流子浓度等因素都有着密切关系^[9]。

图 3.1 SCM 基本测试系统^[9]Fig.3.1 Basic SCM detection system^[9]图 3.2 交变电场引发载流子的积聚与耗尽^[9]Fig.3.2 Change from accumulation to depletion during SCM due to alternating electric field^[9]

SCM测试通常有两种测试模式：恒电容变化与恒电压变化，两种测试模式最终都得到样品电容对电压的变化率($\Delta C/\Delta V$)。测试值 $\Delta C/\Delta V$ 与载流子浓度 N 的定性关系可由图3.3说明：针尖与半导体之间构成的MOS电容(C_{MOS})是由表面氧化层电容 C_{OX} 和半导体电容 C_{S} 串联组成， C_{OX} 是固定电容，而 C_{S} 电容量在耗尽状态下随耗尽层厚度的变化而变化，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。

$$\Delta C = \varepsilon_{\text{OX}} [1 - \alpha N^{1/2} / (\varepsilon_{\text{OX}} / T_{\text{OX}} + \alpha N^{1/2})] / T_{\text{OX}} \quad \alpha = \sqrt{\varepsilon_{\text{S}} q / 2(V_{\text{bi}} - V_{\text{app}})} \quad (3.1)$$

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。

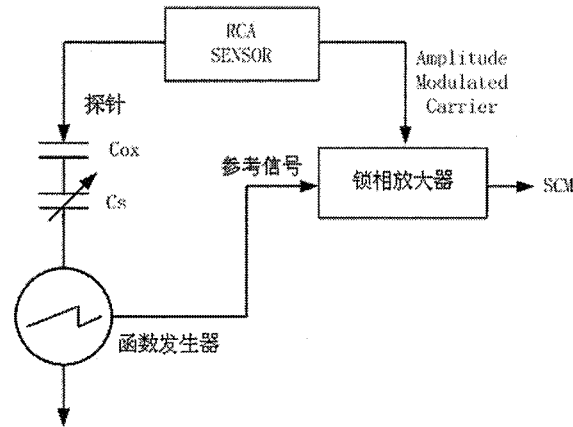


图 3.3 SCM 测试原理图
Fig.3.3 Measurement diagram of SCM

对于Si器件来说，由于材料处理技术的已经比较成熟，且材料通过自身氧化形成的 SiO_2 层是一种我们熟知的电介质材料，SCM在Si器件的表征方面也已成功得到了应用^[3-8]。而铟镓砷样品表面的氧化层也是通过半导体表面吸附空气中的氧而形成的，成分比较复杂，对氧化层厚度与介电常数的测试比较困难，这样利用SCM精确地对InGaAs材料进行表征是很困难的，目前，这方面的研究也比较少，但是这并不妨碍我们获得一些有参考价值的结果，如材料电学结构的分布、掺杂特性的大体分布、PN结深位置等。

3.2.2 扩散实验

扩散实验所用的晶格失配材料为NIN型 $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}/\text{InP}$ 结构，由长春光学精密机械与物理研究所提供，采用MOCVD生长方式，并利用两步生长法以解决衬底与外延材料的晶格失配问题，即首先在厚度为 $350\text{ }\mu\text{m}$ 、S掺杂的N型InP衬底上低温生长一层 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 材料，然后再高温生长一层 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 用作吸收层，材料的厚度为 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ ，掺杂浓度 $\sim 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ ，然后在吸收层材料上生长厚度为 $0.8\text{ }\mu\text{m}$ 的N型InP盖帽层材料，掺杂浓度 $\sim 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 。由于外延材料的吸收层与盖帽层材料之间无晶格渐变层，这样 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 与InP材料之间存在约2%的晶格失配度。晶格匹配材料为NIN型 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ 材料，在厚度为 $600\text{ }\mu\text{m}$ 的InP衬底上依

次生长厚度为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $2\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 的n型Si掺杂的InP缓冲层，厚度为 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $5\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 的n型Si掺杂的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层，以及厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$ 、载流子浓度为 $5\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 的n型Si掺杂的InP盖帽层材料。实验样品有两种，一种用 SiO_2 做扩散掩膜，带有图形，另一种为整片扩散，样品经过三氯甲烷、乙醚、丙酮、乙醇、MOS乙醇漂洗，去离子水冲洗，氮气吹干后，与 0.3g 用作扩散源的 Zn_3P_2 药品被一起封在真空石英管中，石英管体积约为 45 cm^3 、真空度约为 $5\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 。晶格失配材料选用的扩散条件为 525°C 5min、6min、7min、10min，晶格匹配材料选用的扩散条件为 530°C 8min、10min。扩散完成后，整片扩散的样品由SIMS进行测试，带有图形的样品经解理后由SCM进行测试。

3.2.3 扩散实验结果及讨论

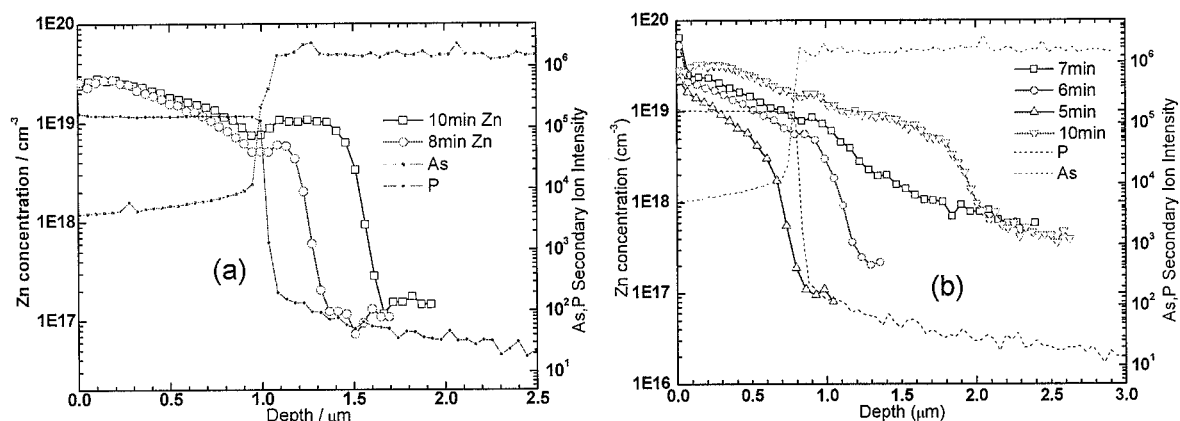


图 3.4 SIMS 测得 Zn 元素在材料中扩散深度随时间变化(a) 530°C 下晶格匹配 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (b) 525°C 下晶格失配 $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$

Fig.3.4 SIMS profile of Zn diffusion depth versus diffusion time in sample (a) lattice-matched $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ under 530°C .(b)lattice-mismatched $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ under 525°C

图 3.4(a)所示，在晶格匹配 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料中， 530°C 下，闭管扩散 8 min、10min，Zn 元素的扩散深度分别为 $1.30\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ ，Zn 元素在晶格匹配 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 界面上有明显的累积现象。图 3.4(b)所示，在晶格失配 $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 材料中， 525°C 下，闭管扩散 5 min、6 min、7 min、10min，Zn 元素的扩散深度分别约为 $0.80\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.30\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.70\text{ }\mu\text{m}$ 、 $2.20\text{ }\mu\text{m}$ ，Zn 元素在 $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 界面上的累积现象较弱，另外，根据 SIMS 测试，Zn 元素在晶格失配材料中的扩散速度远大于在晶格匹配材料中的扩散速度。一般来说，Zn 在 InP 材料中的扩散速度比在 InGaAs 材料中要高，这样，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 Zn 元素的累积现象并不明显^[2]。从图中可以看出，Zn 在晶格匹配材料中存在非常明显的扩散波前，这样就可以比较容易定义扩散深度，而晶格失配材料中 Zn 的扩散波前则不明显，使得扩散深度难以确认。

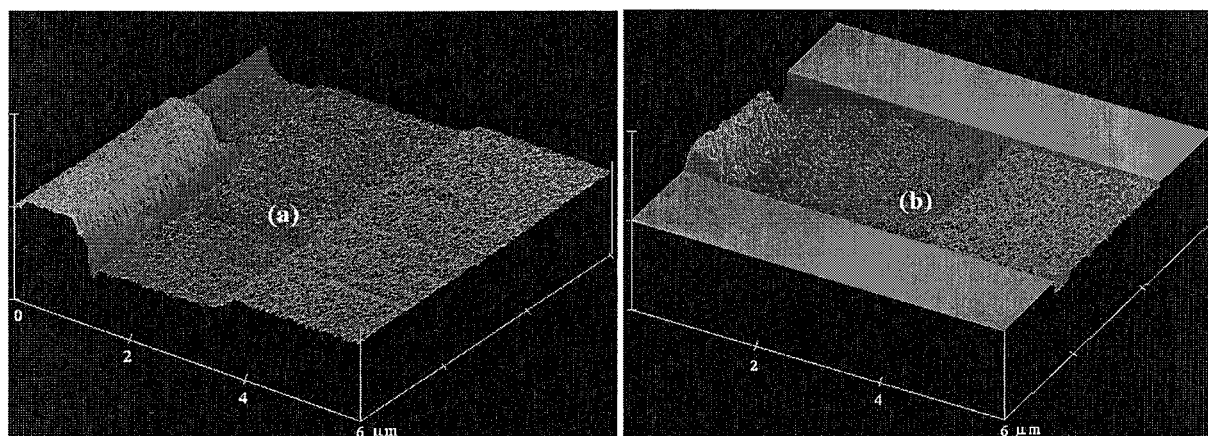


图 3.5 SCM 测得的材料横截面掺杂分布图(a)晶格匹配 530°C 8min (b)晶格失配 525°C 7min
Fig.3.5 Illustration of SCM cross-sectional dopant profiling geometry (a) 530°C 8min for $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ and (b) 525°C 5min for $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$

扫描电容显微镜 SCM 测量的是样品内载流子的分布,它可以很直观地给出样品在纳米量级上的二维电学分布图,如图 3.5 所示为恒电压模式下 SCM 测得的材料横截面掺杂分布图,图中可以非常明显地看出材料的掺杂的二维分布。对于 PN 结深度的确定,图 3.6 所示,图中可以很明显看出样品由三层材料组成,重 N^+ 掺杂的衬底 InP 层,轻 n 掺杂的 InGaAs 层以及扩散形成的 N 转 P 型 InP 盖帽层。SCM 测量获得图像的衬比主要来自探针与样品之间电容的变化,而电容的变化是不同偏压下载流子浓度的函数,一般来说,由交流偏压产生的电容变化幅度与载流子浓度大体上成反比关系。

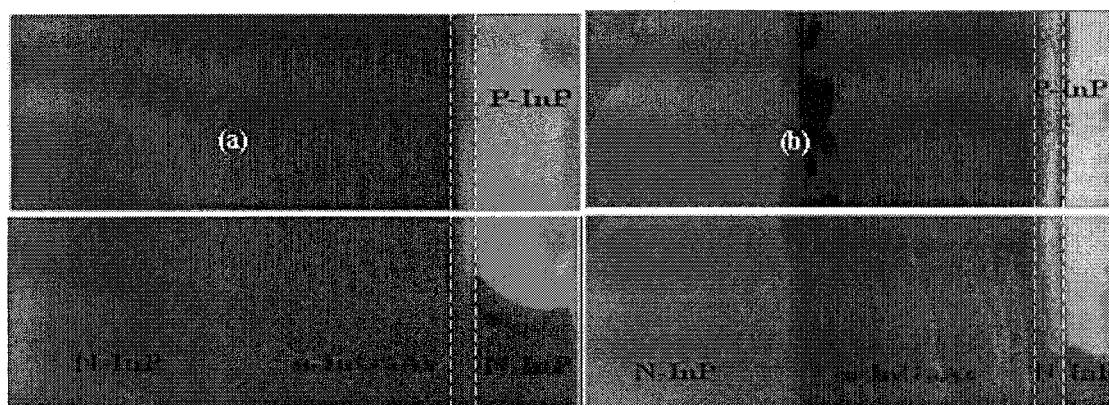


图 3.6 SCM 测得晶格匹配 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 及晶格失配 $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 材料中扩散结深
(a)晶格匹配材料 530°C 8min (b)晶格失配材料 525°C 7min
Fig.3.6 SCM measured junction depth in lattice-matched $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ and lattice-mismatched $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ (a)530°C 8min(b)525°C 7min

图 3.6 中所给出的颜色突变,表明了该区域载流子浓度的突变,这样就可以比较直观地对材料进行分析。对于晶格匹配材料,由于外延层材料质量良好,解理时可以获得光滑的解理截面,SCM 图像清晰、层次分明,可以比较容易地获得 pn 结位置,如图 3.6(a)所示。而图 3.6(b)中的 SCM 图像并不清晰,这主要是因为材料晶格失配较严重,解理时难以获得光滑的

解理截面，影响了系统的测试精度，要提高测试精度就需要对材料进行进一步处理，如解理面的精抛、磨角等。根据 SCM 图像的颜色衬比，测得晶格匹配 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料在 530℃ 下，闭管扩散 8min、10min，PN 结深度分别约为 1.26μm、1.41μm，晶格失配 InP/In_{0.82}Ga_{0.18}As 材料在 525℃ 下，闭管扩散 5 min、7 min、10min，pn 结深度分别为 0.58μm、1.18μm、1.60μm。

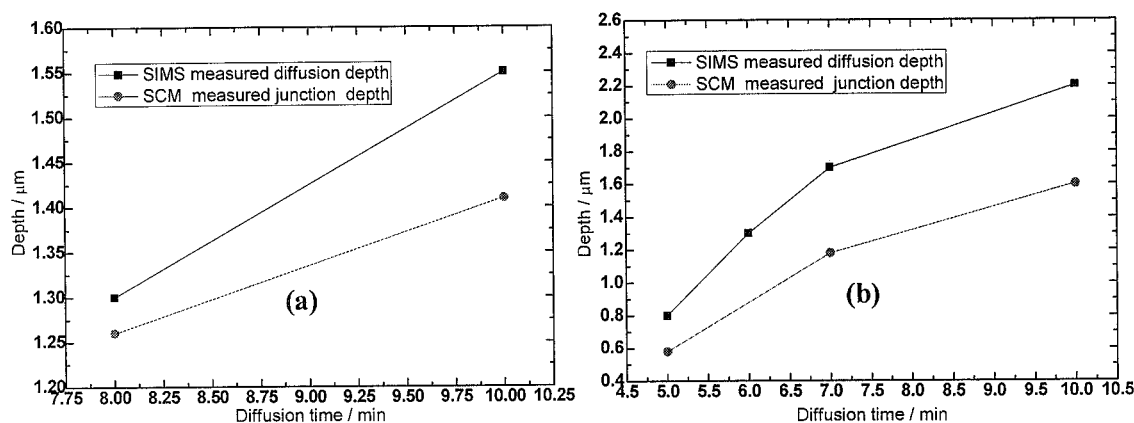


图 3.7 SIMS、SCM 测得材料中扩散深度及 PN 结深(a)晶格匹配 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As(b)晶格失配 InP/In_{0.82}Ga_{0.18}As

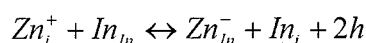
Fig.3.7 SCM and SIMS measured diffusion depth and junction depth in (a) lattice-mismatched InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As and (b) lattice-mismatched InP/In_{0.82}Ga_{0.18}As

表 3.1 SIMS 测得扩散深度与 SCM 测得 pn 结深度比较

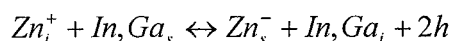
Table 3.1 Comparison of diffusion depth measured by SIMS and pn junction depth measured by SCM

材料类型	扩散时间(min)	SIMS 扩散深度(μm)	SCM 结深(μm)	差值(μm)
晶格匹配(530℃) InP/In _{0.53} Ga _{0.47} As	8	1.30	1.26	0.04
	10	1.55	1.41	0.14
晶格失配(525℃) InP/In _{0.82} Ga _{0.18} As	5	0.80	0.58	0.22
	7	1.70	1.18	0.52
	10	2.20	1.60	0.60

从 SIMS 测试曲线上看出在 InP 材料的表面 Zn 浓度较高，扩散以取代式扩散为主^[10]；在 InP 材料的内部 Zn 浓度较低，此时，Zn 以简单的替代-间隙(SI)模型进行扩散^[11]，此时 Zn 在 InP 中以三种形式存在：一是以离子化的受主 Zn⁻的形式取代 In 的位置；二是以非离子化的 Zn 原子的形式取代 In 的位置；三是以离子化的 Zn⁺的形式存在于间隙位置。其中间隙式的 Zn 较灵活，对扩散过程起决定性作用。当间隙原子在间隙位置之间移动时，占据 In 的晶格位置成为受主^[11]：



与 Zn 在其他 III-V 族化合物半导体中的扩散一样，其在 In_{0.53}Ga_{0.47}As 中的扩散同样遵循“kick-out”机制。Zn 以 Zn⁺的形式在 In_{0.53}Ga_{0.47}As 晶格中扩散，直至其挤出 In 或 Ga 使它们变成间隙原子并取代它们的主位置，这一过程可表示为^[12]：



即，扩散进入样品的 Zn 元素并不可能完全成为受主，只有成为间隙原子后才会对扩散过程起作用。

Zn 在两种材料中扩散深度与 PN 结深度的比较如图 3.7 所示，两种材料中 SCM 测得的 PN 结深度均比 SIMS 测得的 Zn 扩散深度小，这是由于 SCM 测试结果与材料的载流子浓度密切相关，而 SIMS 测量的是掺杂元素的浓度，实际应用中，只有一部分掺杂 Zn 元素是以间隙原子的形式存在。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，这样，SCM 测得的 pn 结深度必然会比掺杂元素扩散深度小。由表 1 可知，在晶格匹配材料中，PN 结深度与 Zn 元素扩散深度差别并不大，说明 Zn 元素在晶格匹配材料中的激活效率较高。而在晶格失配材料中，二者差值较大，在扩散 10 分钟时，差值已经达到 $0.6\mu\text{m}$ ，说明 Zn 元素在该种材料中激活效率非常低，这无疑增大了器件的制备难度，而未激活的 Zn 元素在晶格失配材料中所起的作用需要进一步研究。SCM 为我们研究 InGaAs 材料的二维电学特性提供了一种简单直观的方法，但是，SCM 对于 Zn 元素在 InGaAs 材料中掺杂机制的表征还仅仅是定性的，要获得定量结果还需要进一步研究，另外，SCM 测试结果的精确性还亟待提高。

3.3 InP 盖帽层材料器件的研制

3.3.1 InP 盖帽层材料器件的制备

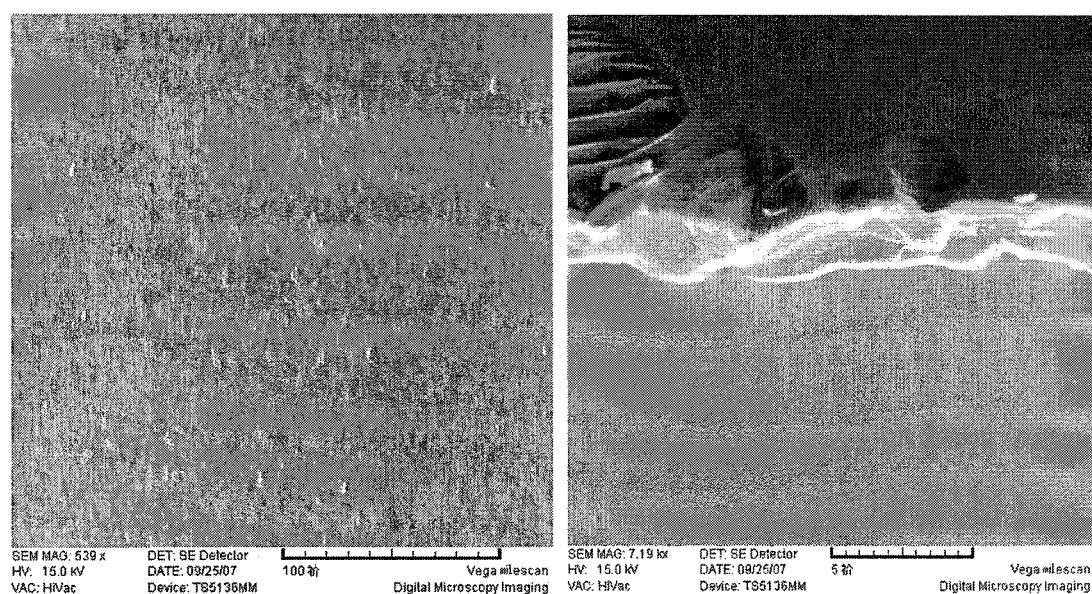


图 3.8 InP/ $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 外延材料表面(左图)及侧面(右图)SEM 形貌图

Fig.3.8 SEM micrographs of the top (left) and sidewall (right) for InP/ $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ epitaxial materials

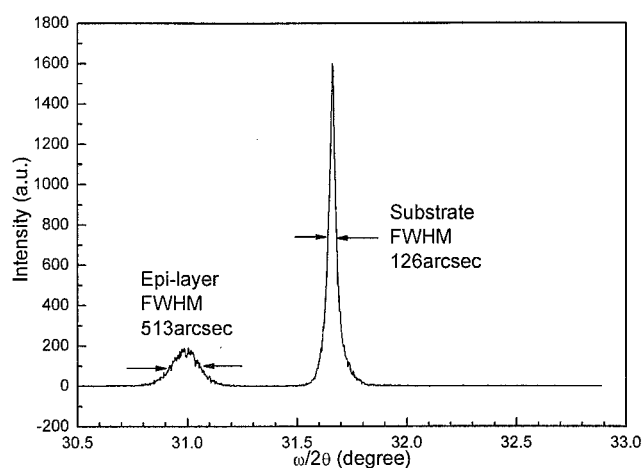


图 3.9 平面型外延材料的 x 射线衍射峰 (InGaAs 为缓冲层)
Fig.3.9 Measured XRD rocking curve of the plane type epitaxial material

器件制备所用的外延材料为 MOCVD 方式生长的 NIN 型 $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}/\text{InP}$ 结构。由于外延材料的吸收层与盖帽层之间无晶格渐变层, 这样 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 与 InP 材料之间存在约 2% 的晶格失配度, 会产生位错, 如图 3.8 所示, 从而对器件的性能产生影响。图 3.9 为该种外延材料的 XRD 测试结果, 在 $\omega=31.00^\circ$ 处的 Epi-layer 峰为 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 的晶格结构的衍射峰, 在 $\omega=31.66^\circ$ 处的 Substrate 峰为衬垫 InP 晶格结构的衍射峰, 其中 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 的晶格结构的衍射峰的 FWHM 为 513arcsec, 可以看出结晶度较差。

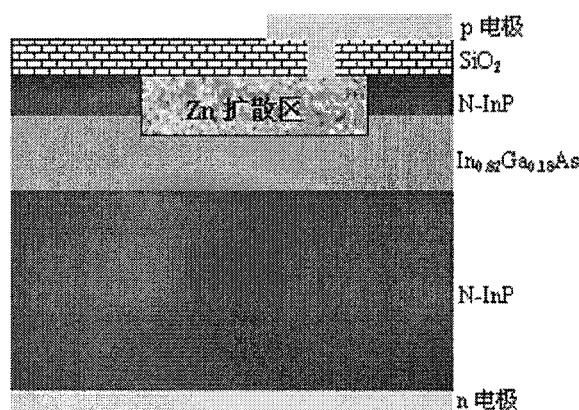


图 3.10 平面型 InGaAs 长波延伸器件结构示意图
Fig.3.10 Schematic illustration of planar-type long wavelength extended InGaAs detector

外延片经过清洗、扩散阻挡层生长、闭管扩散、器件表面钝化、p 电极生长、背面抛光及背面 n 电极生长, 从而获得平面型器件, 图 3.10 为所制备器件的截面示意图。实验所制备的单元器件光敏面尺寸约 $400 \times 400 \mu\text{m}^2$, 八元器件光敏面尺寸约 $105 \times 105 \mu\text{m}^2$ 。

3.3.2 长波扩展探测器变温光电性能

3.3.2.1 器件变温光谱响应特性

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的禁带宽度随温度及组分变化的关系式^[13]:

$$E_g(x, T) = E_g^{\text{InAs}}(0) - \alpha^{\text{InAs}} T^2 / (T + \beta^{\text{InAs}}) + [E_g^{\text{GaAs}}(0) - \alpha^{\text{GaAs}} T^2 / (T + \beta^{\text{GaAs}}) - E_g^{\text{InAs}}(0) + \alpha^{\text{InAs}} T^2 / (T + \beta^{\text{InAs}})]x - 0.475x(1-x) \quad (3.1)$$

由图3.11可知, 器件在300 K、86 K温度下的截止波长分别为2.55 μm 、2.35 μm , 对应材料In组分的理论值分别为 $x=0.81$ 、 $x=0.83$, 这与实验所用材料的In组分 $x=0.82$ 是一致的。

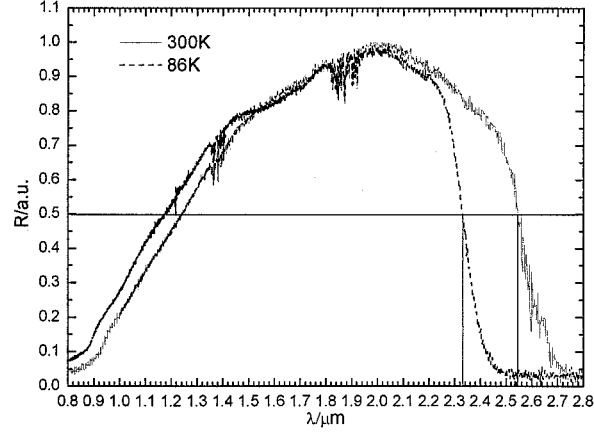


图3.11 室温与86K温度下器件的光谱响应

Fig.3.11 Spectral response of the detector under room temperature and 86K

3.3.2.2 器件变温 I-V 特性:

将制备好的器件封装在真空杜瓦瓶中, 抽真空后充入液氮, 待器件温度降低至液氮温度 (约 77K) 将液氮倒出, 让器件自然升温, 在升温过程中采用 Keithley236 可编程电流-电压测试仪测试其 I-V 曲线。测试过程中, 将封有器件的杜瓦放置在暗的金属屏蔽盒中, 以减少外界对器件的干扰。

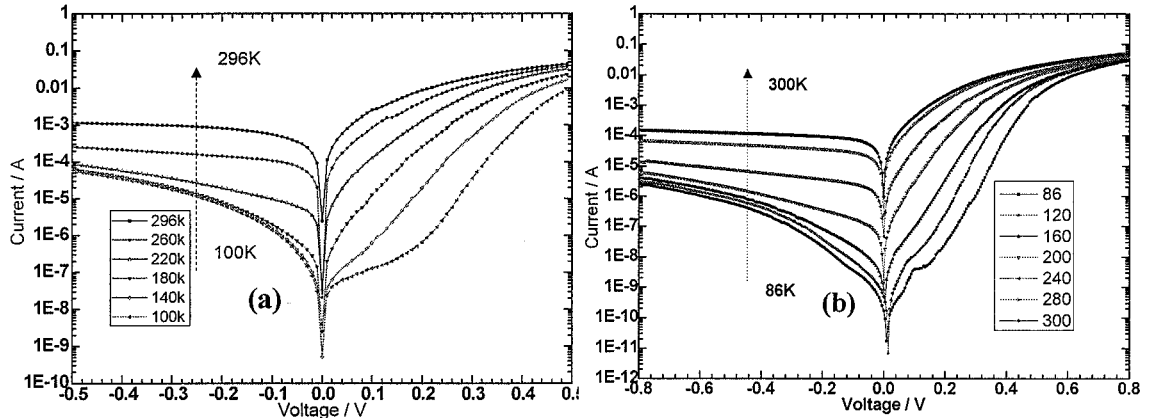


图 3.12 器件的变温 I-V 特性曲线(a)单元器件 (b)八元器件

Fig.3.12 Temperature dependent I-V characteristics for (a) single-pixel detector and (b) eight-pixel detector

探测器的暗电流主要包括扩散电流, 产生复合电流, 欧姆电流, 隧道电流等。

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^[14], 可以表示为:

$$I_{diff}^n = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{\tau_p} \right)^{1/2} \left(\frac{A}{N_d} \right) [\exp(\frac{qV}{kT}) - 1] \quad (3.2)$$

$$I_{dif}^p = qn_i^2 \left(\frac{D_n}{\tau_n}\right)^{1/2} \left(\frac{A}{N_a}\right) [\exp(\frac{qV}{kT}) - 1] \quad (3.3)$$

$$n_i(x, T) = 4.8327 \times 10^{15} \left[(0.41 + 0.09x)^{3/2} + (0.027 + 0.047x)^{3/2} \right]^{1/2} \times (0.025 + 0.043x)^{3/4} \\ \times [T^{3/2} e^{-E_g/2k_B T} (1 + 3.75/(E_g/k_B T) + 3.2812/(E_g/k_B T)^2 - 2.4609/(E_g/k_B T)^3)^{1/2}] \quad (3.4)$$

其中 I_{dif}^n , I_{dif}^p 分别为 n 区、 p 区向耗尽层的扩散电流, q 为电子电量, n_i 为本征载流子浓度, D_p 、 D_n 分别为 n 区空穴、 p 区中电子扩散系数, τ_p 、 τ_n 分别为 n 区空穴、 p 区电子的寿命, N_d 、 N_a 分别为 n 区及 p 区的掺杂浓度, A 是结面积, V 为探测器所加偏压。提高 p 区和 n 区的掺杂浓度可以有效地减小暗电流中的扩散电流成分。

产生-复合电流来源于势垒区热激发产生的载流子在电场作用下向势垒区两边的漂移运动。器件材料中的缺陷和杂质都会在禁带中产生深能级, 这些深能级能够捕获或发射载流子, 从而形成产生-复合电流, 产生-复合电流在耗尽区比较强, 可以由式(3.5)表示^[15]:

$$I_{gr} = \frac{qn_i A W}{\tau_{eff}} [\exp(\frac{qV}{2kT}) - 1] \quad (3.5)$$

τ_{eff} 是有效载流子寿命, 耗尽层宽度 $W = [2\varepsilon(V_b + V)/qN_d]^{1/2}$, ε 为 i 层介电常数, 内建电势差 $V_b = (kT/q) \ln(P_{p0}/P_{n0})$, P_{p0} 、 P_{n0} 分别为 p 区及 n 区空穴浓度。在施加偏压较小的情况下, $\exp(qV/2kT)$ 相对 1 是不能忽略的, 所以此时产生-复合电流中存在与偏压成指数关系的因子。而随着偏压的增大, $\exp(qV/2kT)$ 可以忽略, 由(3.5)式可知产生-复合电流与势垒区的宽度成正比。施加反向偏压后, 探测器的耗尽区展宽, 产生-复合电流增加。由于耗尽层宽度和 $V^{1/2}$ 成正比, 所以产生-复合电流和 $V^{1/2}$ 成正比。

隧道电流主要来源于载流子的隧道效应, 一般在探测器施加偏压较高时, 隧道电流将成为探测器暗电流的主要成分。隧道电流分为带-带间隧道电流和缺陷隧道电流, 当器件 p 区及 n 区掺杂浓度很高, 使得 pn 结的费米能级在结的两侧都进入能带时, 电子可借隧道效应, 从价带直接进入导带, 形成带-带间隧道电流, 也可称为直接隧道电流^[16,17]。间接隧道电流为价带电子借隧道效应进入禁带中的深能级杂质中心, 然后受热激发而进入导带, 形成通过 PN 结的电流, 这种电流也称为“陷阱辅助隧道电流”^[18,19]。直接隧道电流与间接隧道电流如(3.6)、(3.7) 式所示^{[15][20]}:

$$I_t^{b-b} = \gamma A \exp\left(-\frac{\Theta m_0^{1/2} E_g^{3/2}}{q E_m \hbar}\right) \quad (3.6)$$

$$I_t^t = C E_m V \exp\left(-\frac{\Theta m_0^{1/2} E_t^{3/2}}{q \hbar E_m}\right) \quad (3.7)$$

E_g 为禁带宽度, E_m 是耗尽层电场强度, $E_m = 2(V + V_b)/W$, $\Theta = \alpha(2m_e^*/m_0)^{1/2}$, α 决定于隧穿势垒的具体形状, C 为隧穿常数, E_t 为缺陷隧穿势垒, 参数 γ 决定于隧穿载流子的始态与终态, $\gamma = [(2m_e^*E_g)^{1/2} q^3 E_m V / 4\pi^2 \hbar^2]$, m_e^* 是导带电子的有效质量, m_0 是电子静止质量。从 (3.6)(3.7) 式可以看出隧道电流与禁带宽度 E_g 有强烈的依赖关系, 禁带宽度越小隧道电流越大, 且隧道电流与 $V^{3/2}$ 成正比。对于窄禁带半导体的 PN 结电流必须考虑隧道电流。

欧姆电流如式(3.8)所示^{[15][21]}:

$$I_{ohm} = \frac{V}{R_{eff}} \quad (3.8)$$

其中 R_{eff} 为有效电阻。 $R_{eff} = R_\infty \exp(\Delta E_a / kT)$, R_∞ 为常数, ΔE_a 为材料的激活能。

1. 正向电流

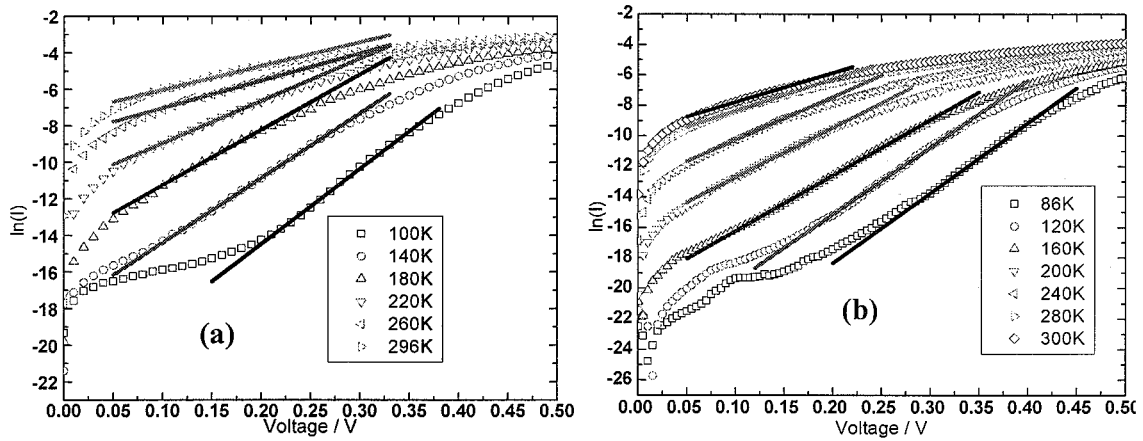


图 3.13 器件正向暗电流曲线(a)单元器件 (b)八元器件

Fig.3.13 Temperature dependent forward I-V characteristics for (a) single-pixel detector and (b) eight-pixel detector

由图 3.13 可知, 降温能够明显抑制器件的暗电流, 改善器件的性能。根据公式(2.2), 对器件的正向电流进行拟合, 如图 3.13 所示, 对于单元器件, 温度由 100K 增加至 296K, 拟合所得器件的理想因子依次为: 2.82, 2.33, 2.11, 2.27, 2.96, 3.00, 均大于 2, 说明器件的正向电流基本以产生-复合电流为主。而对于八元器件, 温度由 86K 增至 300K, 拟合所得器件的理想因子依次为: 2.93, 2.19, 1.98, 1.77, 1.71, 1.97, 2, 器件的正向电流也基本以产生-复合电流为主。由于在正向偏压下, 随着偏压的增大, 器件的耗尽区宽度在减小, 耗尽区内产生-复合数目在减小, 那么该处的电流应该与耗尽区内的产生-复合中心无关。分析其原因, 由于晶格失配, 使得外延材料存在许多位错, 在材料内部存在大量缺陷, 这些缺陷在器件中则表现为产生-复合中心, 增大了产生-复合电流, 使其成为器件正向电流的主要成分。另外, 随着正向偏压的增大, 器件的电流有饱和的趋势, 这是因为器件的串联电阻较大, 在器件的

电流较大时，串联电阻表现出很明显的分压作用，延缓器件开启速度，降低器件响应。

2. 反向电流

一般来说，器件的反向电流的主要成分为扩散电流、产生-复合电流及隧道电流。

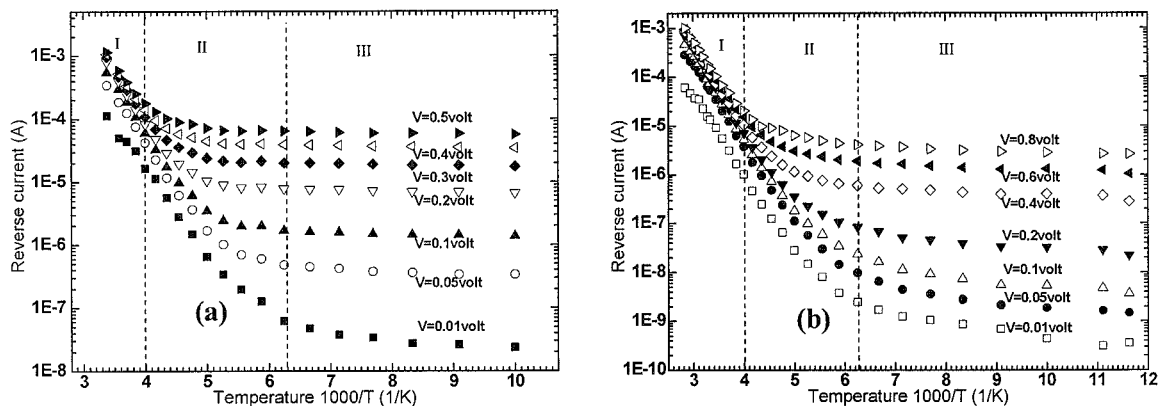


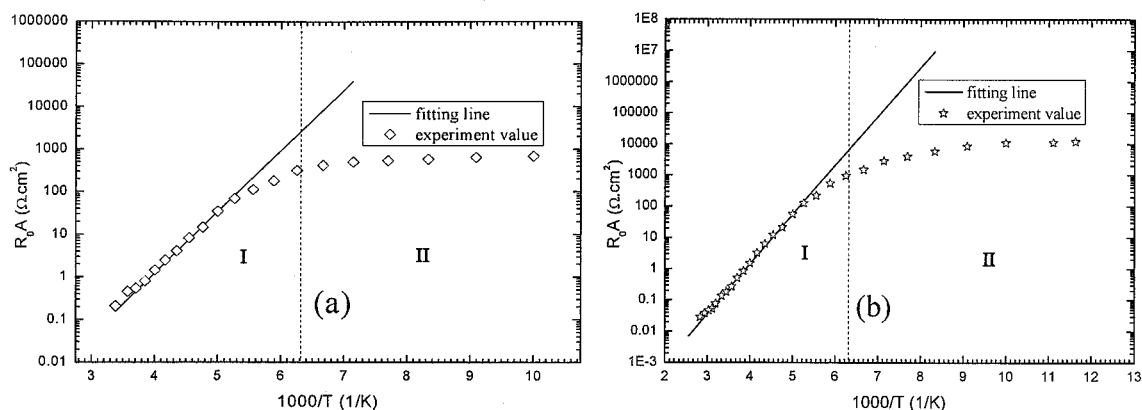
图 3.14 器件反向暗电流随温度及偏压的变化曲线(a)单元器件 (b)八元器件

Fig.3.14 Temperature dependent reverse I-V characteristics for (a) single-pixel detector and (b) eight-pixel detector

图 3.14 为平面型单元与八元器件的变温暗电流随所加反向偏压的变化曲线。器件的反向电流分布明显分为三个区域，在区域“I”，即近室温，不同偏压下，器件的反向电流变化不大，此时器件暗电流的主要成分为扩散电流及产生复合-电流。在区域“II”，随着温度的降低，本征载流子浓度下降迅速，根据公式(3.5)，本征载流子的浓度由 250 K 时的 $\sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 下降至 150 K 时的 $\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ，使得扩散电流与产生复合电流急剧下降，此时，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。在区域“III”，当温度低于 150 K 时，器件暗电流随温度的变化已经很小，接近一个恒定的值，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^[22,23]。

3. 优值因子 R_0A

R_0A 是探测器的一个重要参数，与探测器的探测率 D_{ip}^* 密切相关，因此 R_0A 的分析对探测器在低噪声，高灵敏度的应用中有重要的意义。关于MCT光伏探测器 R_0A 的研究比较多^[24-26]， R_0A 由探测器零偏压下结电流产生的各种噪声机制决定，一般认为对 R_0A 影响较大的电流机制主要包括：少数载流子的热扩散、耗尽区载流子的产生复合、缺陷隧道效应、带间隧道效应以及欧姆电流等。图3.15所示为单元及八元器件 R_0A 值随温度的变化曲线，图中可以很明显的看到两个区域：温度 $>158 \text{ K}$ 时， R_0A 与温度的倒数成指数关系，此时 R_0A 主要受耗尽区载流子的产生-复合影响，当温度继续降低时， R_0A 趋于一个定值，一般认为 R_0A 主要受“陷阱辅助隧穿效应”影响^[27-28]。

图 3.15 单元及八元器件 R_0A 随温度的变化(a)单元器件(b)八元器件Fig.3.15 Temperature dependent R_0A product for (a) single-pixel detector and (b) eight-pixel detector

一般认为产生-复合电流对 R_0A 的影响由下式表示：

$$R_{gr0}A_j = 2kT\tau_{gr}/(q^2n_iW) \quad (3.9)$$

其中， W 为耗尽层宽度， τ_{gr} 为产生-复合少数载流子寿命， A_j 为结面积。利用式(3.5)对200-300 K的 R_0A 特性进行拟合，图3.15中虚线部分所示，二者吻合良好。降温可以极大地提高器件 R_0A 值，但室温下， R_0A 约在 $0.1 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的水平，这主要是由于材料缺陷导致产生-复合电流较大的原因，与国外器件相比还有很大的差距^{[27][29]}。

3.3.2.3 探测率的温度响应特性

室温下，单元器件黑体探测率 $6.50 \times 10^7 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，峰值探测率 $5.90 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，八元器件黑体探测率 $4.20 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，峰值探测率 $3.80 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。随温度降低，器件探测率会出现一个先增大后减小的过程。T=210K时，出现拐点，在此温度下，单元器件黑体探测率 $1.70 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，峰值探测率 $1.70 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，八元器件黑体探测率 $9.40 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，峰值探测率 $9.40 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。通过适当降温可以在一定程度上提高器件的探测率，但还处于一个较低的水平^[18]，大光敏元器件的峰值探测率明显小于小光敏元器件的峰值探测率，这可以由器件的LBIC测试来解释，如图3.17所示。器件光敏元对光信号的响应非常不均匀，特别是对于大光敏元器件来说，如图3.17(b)，由于材料缺陷较多，在远离电极的区域光生载流子未到达电极即被复合，这部分光敏元对器件的光信号基本没有贡献，使得器件的信号小，而对器件的噪声却有一定的贡献，导致器件的信噪比较低：S/N~100，从而使得器件的探测率较低。因此，下一步的工作重点是对材料的生长进行优化，减小材料的晶格失配，以提高器件性能。

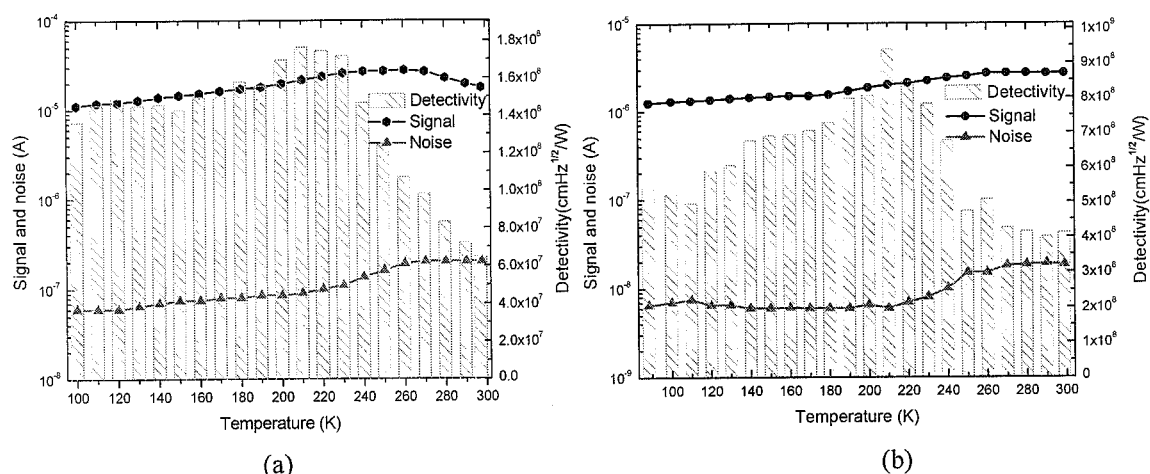


图 3.16 单元器件及八元器件信号、噪声及探测率随温度变化(a)单元器件(b)八元器件
Fig.3.16 Temperature dependent signal, noise and detectivity for (a) single-pixel detector and (b) eight-pixel detector

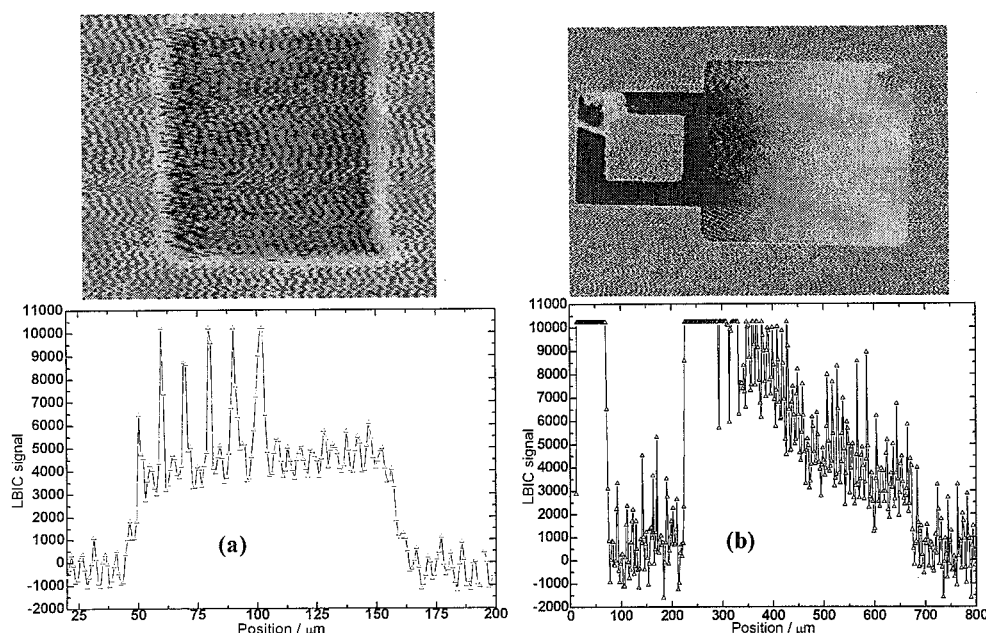


图 3.17 室温下单元器件及八元器件的 LBIC 测试 (a) 单元器件 (b) 八元器件
Fig.3.17 Room temperature LBIC schematic for (a) single-pixel detector and (b) eight-pixel detector

3.4 InAsP 盖帽层材料器件的研制

由上节可知, 如果直接采用 InP 作为盖帽层材料, 由于吸收层与盖帽层之间存在较大的晶格失配, 所制备器件的性能并不理想。若想提高器件性能, 就需要对外延材料的结构进行调整, 尽量减小材料的晶格失配, 材料结构调整后各层参数如图 3.18 所示。但是, 该批次材料的质量仍然欠佳, 图 3.19 为该批次材料的表面和侧面的扫描电镜照片, 外延材料表面存在大量的龟裂, 这些明显的龟裂会给器件的制备以及性能带来致命的影响。器件的制备采用 SiO_2 作为扩散掩膜, Zn_3As_2 作为扩散源, SiO_2 作为表面钝化膜, 扩散条件 500°C 扩散 12min。制备了八元器件, 光敏元扩散孔尺寸 $105 \times 105 \mu\text{m}^2$ 。所抽测器件 I-V 特性曲线如图 3.20 所示。可

知,器件的性能很差,抽测器件的平均优值因子约为 $0.19\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。说明材料的生长需要进一步优化。

$\text{InAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ 0.7 μm N(非掺)
$\text{In}_{0.77}\text{Ga}_{0.23}\text{As}$ 2.2 μm
InP 350 μm N^+ (掺 S)

CL8

图 3.18 实验所用 InAsP 盖帽层外延材料参数

Fig.3.18 Parameters of the epitaxial wafer with InAsP cap layer

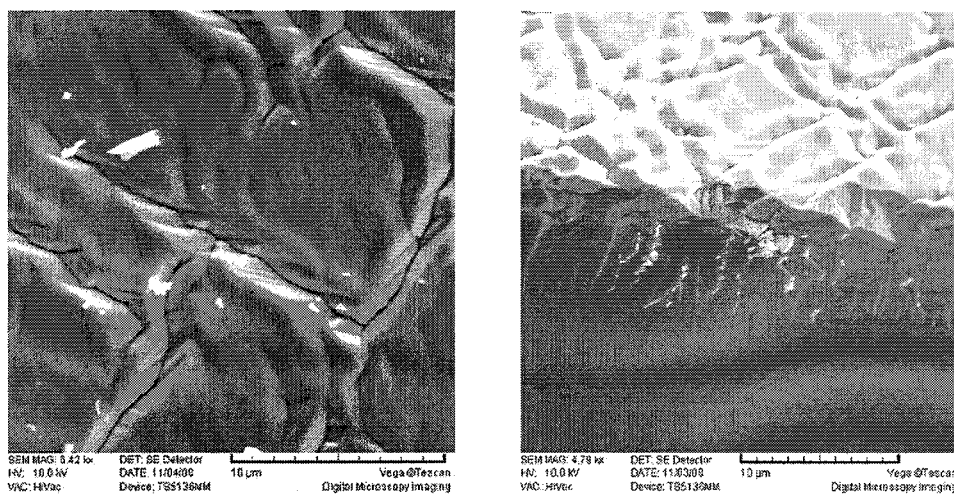


图 3.19 InAsP 为缓冲层和盖帽层的平面型外延材料正面(左)及侧面(右)的扫描电镜照片
Fig.3.19 SEM micrographs of epitaxial material with InAsP buffer layer (left: top, right: sidewall)

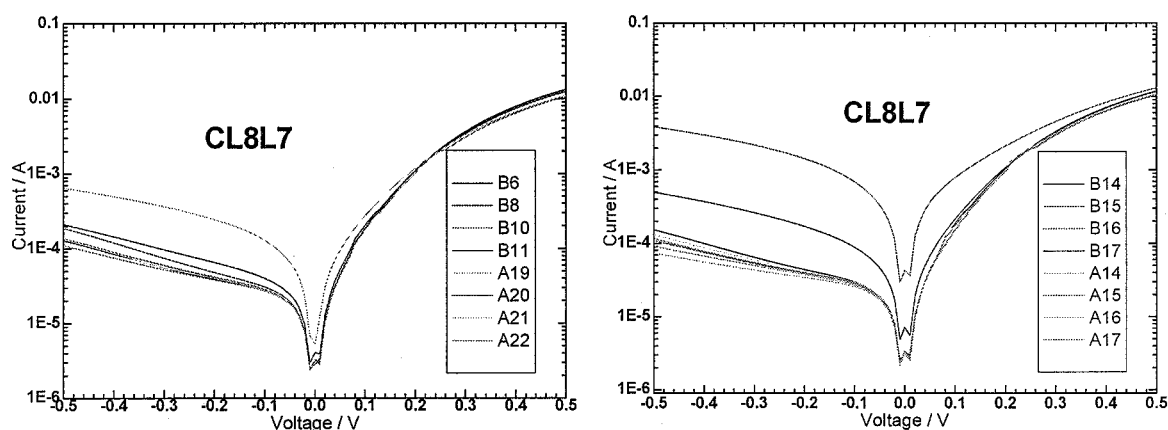


图 3.20 抽测器件的 I-V 特性

Fig.3.20 I-V characteristics of the measured devices

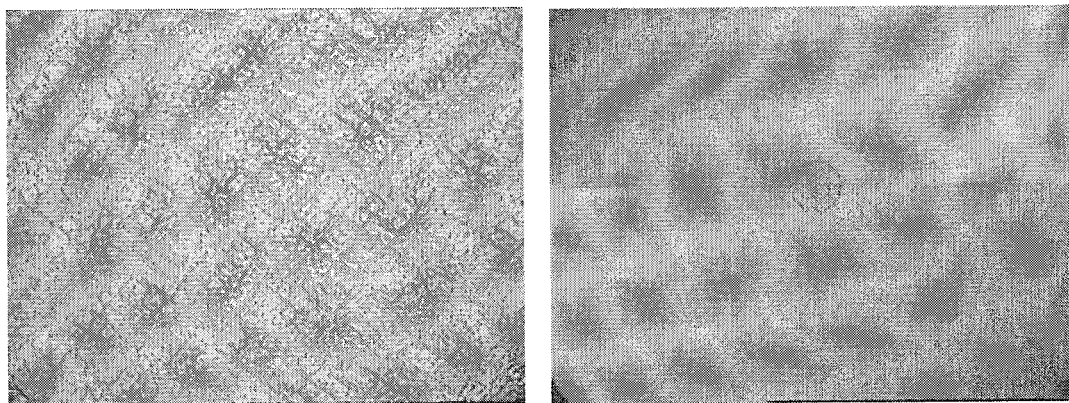


图 3.21 MOCVD 外延材料 CL8(左)及 CL11(右)的表面光学显微照片(1000×)

Fig.3.21 Photographs of MOCVD epitaxial material InAsP cap layer for CL8 (left) and CL11 (right) under 1000×

图 3.21 所示为 InAsP 盖帽层外延材料优化后表面形貌与优化前表面形貌的对比, 可知材料质量应该有了较大的改善, 表面的龟裂得以消除, 优化后外延材料各层参数如图 3.22 所示。

InAs _{0.6} P _{0.4} 0.9μm	N(非掺)
In _{0.81} Ga _{0.19} As 3.3μm	N(非掺) 5×10 ¹⁶ cm ⁻³
InP 350μm	N ⁺ (掺 S) >10 ¹⁸ cm ⁻³

CL11

图 3.22 实验所用 InAsP 盖帽层外延材料参数

Fig.3.22 Parameters of the epitaxial wafer with InAsP cap layer

该批次器件的制备采用 SiN_x 作为扩散掩膜, Zn₃As₂ 作为扩散源, SiO₂ 作为表面钝化膜, 扩散条件 530℃ 扩散 8min/10min。制备了 256 元的长线列器件, 光敏元扩散孔尺寸 25×500μm², 光敏元中心距 50μm, 器件 I-V 特性曲线如图 3.23 所示。

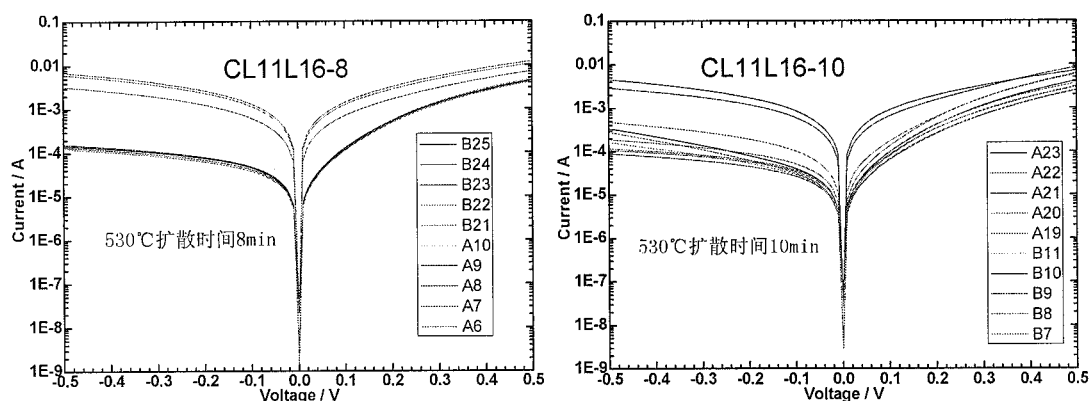


图 3.23 抽测器件的 I-V 特性

Fig.3.23 I-V characteristics of the measured devices

根据器件的 I-V 特性, 已经实现了器件 PN 结的制备, 但其性能仍然很差, 器件反向电

流与正向电流基本处于同一个数量级。两种扩散条件获得器件的性能基本一致，抽测器件的平均优值因子分别为 $0.17\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $0.22\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。要想提高器件性能，器件工艺及器件材料的研究都要进一步深入。

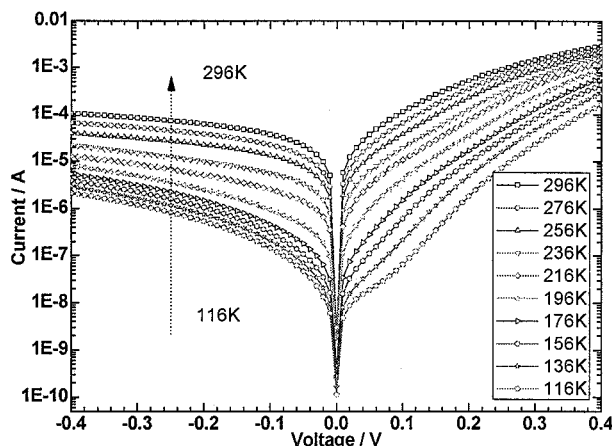


图 3.24 器件 B21 的 I-V 特性随温度的变化

Fig.3.24 Temperature dependent I-V characteristics of detector B21

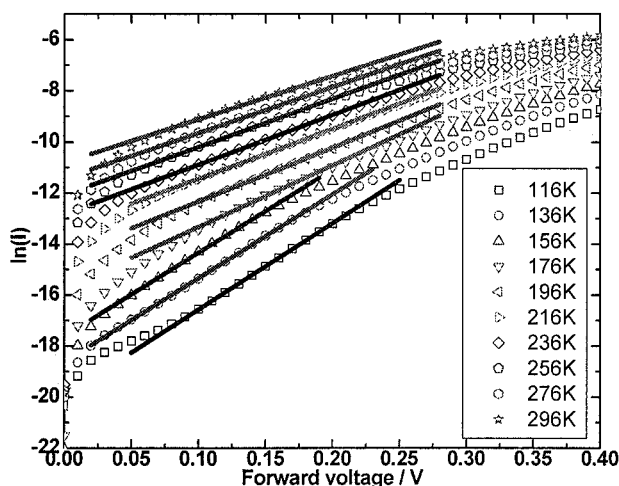


图 3.25.器件 B21 正向暗电流曲线

Fig.3.25 Temperature dependent forward I-V characteristics for detector B21

图 3.24 所示为器件 B21 的变温 I-V 特性曲线，随着温度降低，器件的暗电流明显出现下降，但下降至 200K 以后变化不再明显，此时，器件的反向电流受主要受偏压影响。

根据公式(2.2)，对器件的正向电流进行拟合，温度由 116K 增至 296K，拟合所得器件的理想因子分别为：2.95，2.59，2.26，2.72，2.8，2.74，2.52，2.41，2.35，2.32， $n > 2$ ，说明器件主要的暗电流成分依然为产生-复合电流。

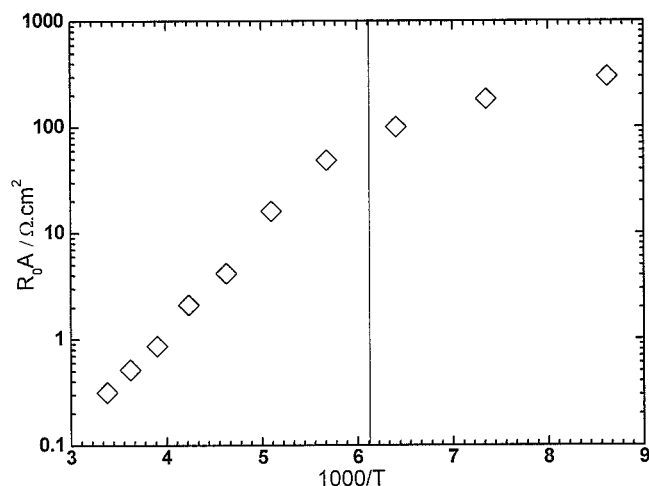
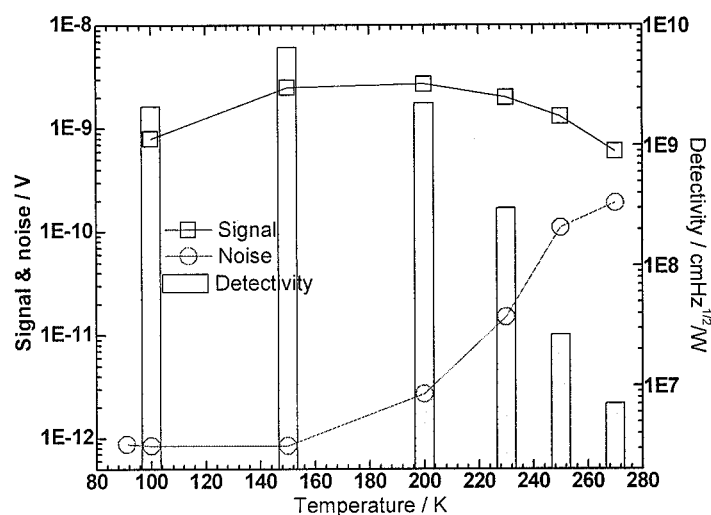
图 3.26 器件 B21 优值因子 R_0A 随温度的变化Fig.3.26 Temperature dependent R_0A product of detector B21

图 3.27 器件 B21 信号、噪声及黑体探测率随温度的变化

Fig.3.27 Temperature dependent black body signal, noise and detectivity of detector B21

图 3.26 为器件 B21 优值因子随温度的变化, 随着温度降低, 优值因子明显变大, 在温度低于 160K 以后, 增大趋势变缓, 这个趋势与图 3.27 中器件黑体探测率的变化基本一致。如图 3.27 所示, 随着温度降低, 器件黑体信号首先增大后降低, 在 200K 左右达到峰值, 而噪声首先下降迅速, 在 150K 以后变化趋缓, 而器件的黑体探测率在 150K 达到峰值, $6.59 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 其峰值探测率约 $8.30 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。器件的变温光谱响应如图 3.28 所示, 在制备过程中, 暂时未考虑器件的增透, 故器件峰值响应有所偏差, 对于器件的增透膜还需要进一步的优化。

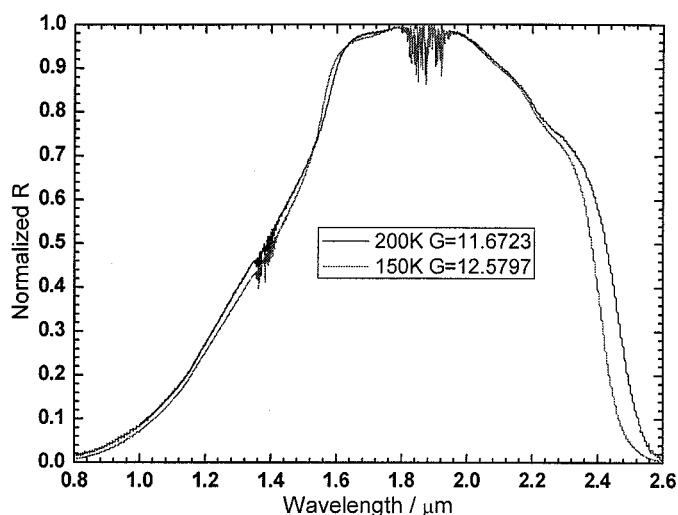


图 3.28 器件 B21 的归一化变温光谱响应曲线
Fig.3.28 Temperature dependent responsivity of detector B21

调整材料结构后, 器件性能有所提高, 但仍然处于较低的水平, 这一方面器件的制备工艺仍然需要优化, 如扩散条件、欧姆接触等, 另一方面, 材料的参数也需要调整, 如适当提高吸收层的掺杂浓度以减小耗尽区宽度, 进而减小器件的产生-复合电流等。

3.5 本章小结

本章首先研究了掺杂元素 Zn 在晶格失配及晶格匹配两种外延材料中的扩散机制, 两种材料中 SCM 测得的 PN 结深度均比 SIMS 测得的 Zn 扩散深度小, 这是由于 SCM 测试结果与材料的载流子浓度密切相关, 而 SIMS 测量的是掺杂元素的浓度, 实际应用中, 掺杂 Zn 元素并不能被完全激活, SCM 测得的 PN 结深度必然会比掺杂元素扩散深度小。在晶格匹配材料中, pn 结深度与 Zn 元素扩散结深度差别并不大, 说明 Zn 元素在晶格匹配材料中的激活效率较高。而在晶格失配材料中, 二者差值较大, 在扩散 10 分钟时, 差值已经达到 $0.6\mu\text{m}$, 说明 Zn 元素在该种材料中激活效率非常低, 这无疑增大了器件的制备难度。然后采用 InP 及 InAsP 作为盖帽层的异质结构材料制备了平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器, 对于 InP 盖帽层材料器件, 室温下, 单元器件黑体探测率 $6.50 \times 10^7 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 峰值探测率 $5.90 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 八元器件黑体探测率 $4.20 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 峰值探测率 $3.80 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。随温度降低, 器件探测率会出现一个先增大后减小的过程。T=210K 时, 出现拐点, 在此温度下, 单元器件黑体探测率 $1.70 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 峰值探测率 $1.70 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 八元器件黑体探测率 $9.40 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 峰值探测率 $9.40 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。对于 InAsP 盖帽层材料器件, 随着温度降低, 器件黑体信号首先增大后降低, 在 200K 左右达到峰值, 而噪声首先下降迅速, 在 150K 以后变化趋缓, 而器件的黑体探测率在 150K 达到峰值, $6.59 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 其峰值探测率约 $8.30 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

参考文献:

- [1] Yun I., Hyun K. S., Zinc diffusion process investigation of InP-based test structures for high-speed avalanche photodiode fabrication, *Microelectronics Journal* 2000,31: 635-639
- [2] Martin H.E., Michael J.L., Sugg A.R., et al, Zinc Diffusion in InAsP/InGaAs heterostructures, *Journal of Electronic Materials* 1999,28(12):1433-1439
- [3] Todd H., Albert K. H., Chris L., et al Capacitive effects on quantitative dopant profiling with scanned electrostatic force microscopes, *J. Vac. Sci. Technol. B* 1996,14(1): 457-462
- [4] Roger A., Bryant M., Michael Y., Junction metrology by cross-sectional atomic force microscopy, *J. Vac. Sci. Technol. B* 1996, 14(1):452-456
- [5] Kopanski J. J., Marchiando J. F., and Berning D. W., Scanning capacitance microscopy measurement of two-dimensional dopant profiles across junctions, *J. Vac. Sci. Technol. B* 1998,16(1):339-343
- [6] Buh G. H., Chung H. J., Yi J. H., et al, Electrical characterization of an operating Si pn-junction diode with scanning capacitance microscopy and Kelvin probe force microscopy, *J. Appl. Phys.*, 2001,90(1):443-448
- [7] Shikler R., Meoded T., Fried N., et al., Potential imaging of operating light-emitting devices using Kelvin force microscopy, *Appl. Phys. Lett.*, 1999,74,(20):2972-2974
- [8] Park S.E., Nauven N.V., Kopanski J.J., et al., Comparison of scanning capacitance microscopy and scanning Kelvin probe microscopy in determining two-dimensional doping profiles of Si homostructures, *J. Vac. Sci. Technol. B* 2006,24(1):404-407
- [9] Digital Instruments. Scanning Capacitance Microscopy (SCM) Support Note No.224 [Z] Santa Barbara, CA:Digital Instruments Inc. 1999, Rev D:1-26
- [10] A.Borghesi, G.Guizzetti, M.Patrini, et al *J. Appl. Phys.*, 1993, 74(4):2445-2449
- [11] A.van Geelen, T.M.F.de Smet, T.van Donge, et al *Journal of Crystal Growth*, 1998, 195:79-84
- [12] P.Ambree, A.hangleiter, M.H.Pilkuhn, etc. Acceptor diffusion across InGaAs/InP hetero-interfaces [J]. *Appl. Phys. Lett.* 1990,56(10): 931-933
- [13] Sjal Paul, J.B.Roy, and P.K. Basu Empirical expressions for the alloy composition and temperature dependence of the band gap and intrinsic carrier density in $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ [J] *Journal of Applied Physics* 1990, 69(2):827~829
- [14] F.K.Hopkins and J.T.Boyd. Dark current analysis of InSb photodiodes[J], *Infrared phys.* 1984(24):391-395
- [15] S.R.Forrest. Performance of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{AsyP}_{1-y}$ photodiodes with dark current limited by diffusion, generation recombination, and tunneling[J] *IEEE J. of Quantum Electron.*, 1981 (17):217-226.
- [16] W.W.Anderson. Tunnel current limitation of narrow bandgap infrared charge coupled devices[J], *Infrared Phys.* 1977(17):147-164
- [17] W.W.Anderson. Tunnel contribution to $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ and $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ p-n junction diode characteristics[J] *Infrared Phys.* 1980(20):353-361
- [18] J.Y.Wong. Effect of trap tunneling on the performance of long wavelength $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ photodiodes [J], *IEEE Trans. Electr. Dev.* 1980(ED-27):48-57
- [19] R.Muller. Photodiodes for optical communication, in *Advances in Electronics and Electron Physics*, edited by L.Marton and C.Marton, New York: Academic Press, 1981:189-308

- [20] R.Trommer and H .Albrecht. Confirmation of tunneling current via traps by DLTS measurements in InGaAs photodiodes[J], Jpn.J.Appl.Phys.,1983(22): L364-L366
- [21] S.R.Forrest, R.F.Leheney and R.E.Nahory. $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ photodiodes with dark current limited by generation-recombination and tunneling[J] Appl.Phys.Lett., 1980(37):322-324
- [22] M.D Hondt, I.Moerman and P.Demeester, Dark current optimization for MOVPE grown 2.5 μm wavelength InGaAs photodetectors [J], Electronics Letters, 1998,34:910-912
- [23] C.H.Kuan, R.M.Lin, and S.F. Tang, Analysis of the dark current in the bulk of InAs diode detectors[J], Journal of Applied Physics, 1996,80(9): 5454-5458
- [24] A.. Rogalski, Photovoltaic detectors in Infrared Photon Detectors[M] Bellingham, WA: SPIE, 1995, 56
- [25] V. Gopal, S. K. Singh, and R. M. Mehra, Analysis of dark current contributions in mercury cadmium telluride junction diodes[J], Infrared Physics & Technology, 2002, 43:317-326
- [26] V. Gopal, S. Gupta, R. K. Bhan, R. Pal, P. K. Chaudhary, and V. Kumar, Modeling of dark characteristics of mercury cadmium telluride n -p junctions[J], Infrared Physics & Technology, 2003,44:143-152
- [27] Lars Zimmermann, Joachim John, Stefan Degroote et al. Extended wavelength InGaAs on GaAs using InAlAs buffer for back-side-illuminated short-wave infrared detector [J]. Applied Physics Letters 2003, 82(17):2838-2840
- [28] 张永刚, 顾溢, 朱诚等, 短波红外 InGaAs/InP 光伏探测器系列的研制[J], 红外与毫米波学报, 2006,25(1):6-9
- [29] Ruud W.M. Hoogeveen, Ronald J. van der A, Albert P.H. Goede, Extended wavelength InGaAs infrared (1.0-2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere[J], Infrared Physics & Technology, 2001,42:1-16

第四章 台面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器制备与性能分析

4.1 引言

根据第三章的研究,目前,受到器件材料质量的限制,所研制的平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器的性能还处于比较低的水平,很难满足实际需求,与本课题组研制的台面型长波扩展器件的性能也存在较大的差距。张可锋博士对于台面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器已经做了大量的研究工作,其工作重点主要是如何走通器件工艺,对器件的 P 型电极接触、台面器件的钝化、同质结及异质结器件的制备和性能对比,以及外延材料参数与器件性能的关系等做了重点研究^[1],其台面成型工艺主要采用湿法腐蚀。本章的研究即是在其前期研究的基础上进行的,主要针对湿法腐蚀台面成型工艺存在的缺点,引入感应耦合等离子体 ICP(Inductive Coupled Plasma)刻蚀台面成型工艺,制备了背照射式 N-on-P 型 640×1 元线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器芯片,并对探测器芯片以及与读出电路互连后焦平面器件的性能进行了研究。

4.2 探测器芯片制备工艺

台面成型是台面型 InGaAs 器件制备工艺流程中非常重要的一环,一般来说,台面成型有两种方式:湿法腐蚀及干法刻蚀。湿法腐蚀是一种常见的化学刻蚀方法,操作简单,腐蚀过程对材料的损伤小,比较容易获得较高性能的器件。但是湿法腐蚀过程一般是各向同性的(纵向和横向都会产生腐蚀),这样就容易造成对台面侧壁的钻蚀,特别是对于晶格失配材料,由于材料的不均匀性,腐蚀过程很容易增大台面图形边缘的粗糙度,如图 4.1(a)所示,从而严重影响后续的器件工艺,也会影响线列器件的均匀性。随着器件尺寸的不断减小,湿法腐蚀的缺点变得越来越明显,此时就需要考虑引入干法刻蚀工艺。

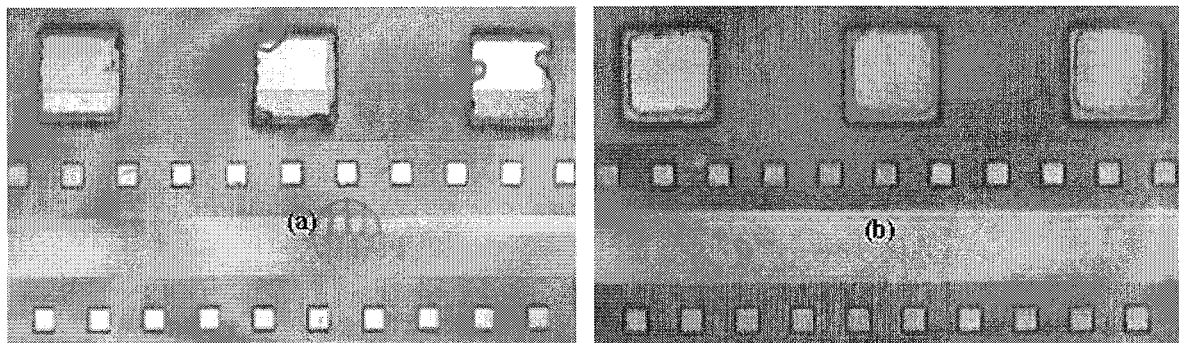


图 4.1 湿法腐蚀(a)及 ICP 刻蚀(b)台面图形显微照片

Fig.4.1 Photographs of the detector mesa for (a) wet-etching and (b) ICP dry-etching method

干法刻蚀主要是借助等离子体中粒子对材料进行轰击实现刻蚀,刻蚀过程一般是各向异性的,可以获得良好的图形保真度,ICP 刻蚀技术在 In 基材料的刻蚀中已经得到了成功的应

用^[2-3]，如图 4.1(b)所示，且刻蚀速率稳定，大面积刻蚀时各处均匀性良好。但是干法刻蚀过程基本都包括物理作用过程，如 Ar 离子刻蚀主要依靠 Ar^+ 的轰击作用实现刻蚀，ICP 刻蚀也需要加入适量的 N_2 或 Ar_2 气来增大刻蚀速率，这样，就必然会对材料产生损伤。因此，对于刻蚀损伤的消除是台面器件工艺流程中很重要的环节，要消除刻蚀损伤通常需要对材料进行腐蚀或者快速热退火等。

对于 ICP 刻蚀台面成型技术的研究，宁锦华^[4]已经进行了一定的工作，其工作重点是常规波长 InGaAs 外延材料 ($\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$) 及延伸波长 InGaAs 外延材料 ($\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$) 的感应耦合等离子体(ICP)刻蚀工艺研究，本节台面器件的制备采用了其部分研究结果，所采用的 ICP 刻蚀条件为： Cl_2 流量为 10SCCM， N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 130W，压强 4mTorr，样品台温度 170°C 时，背景 He 气压强 10Torr，刻蚀时间 4min，台面成型后表面及侧面形貌如图 4.2 所示。

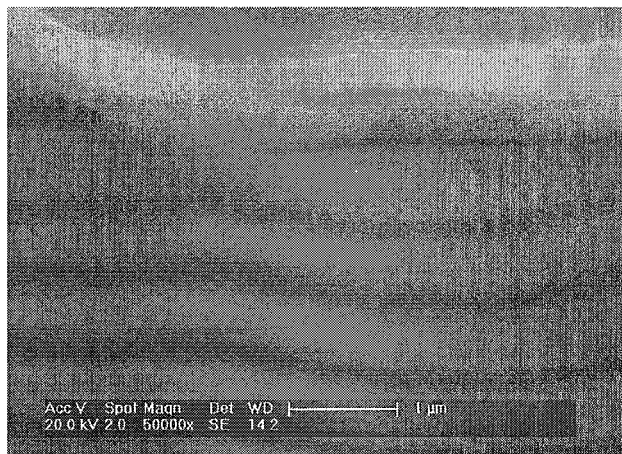


图 4.2 ICP 刻蚀延伸波长外延材料 SEM 形貌^[4]

Fig.4.2 SEM scheme of the long wavelength extended $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ epitaxial materials etched by ICP^[4]

背照射式 N-on-P 型 640×1 元线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器制备所用的材料由中科院微系统所提供，材料结构如表 4.1 所示。N-on-P 型台面器件的工艺流程如下：(1) 外延片清洗，采用四步清洗法，依次经过三氯甲烷、乙醚、丙酮和乙醇清洗，去离子水冲洗，氮气吹干；(2) PECVD 生长 ICP 刻蚀掩膜 SiN_x ；(3) 薄胶光刻，腐蚀形成掩膜图形，丙酮去胶；(4) ICP 刻蚀形成台面，选择性腐蚀 $\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ ，去除刻蚀损伤，腐蚀去除 SiN_x 掩膜；(5) PECVD 生长 SiN_x 钝化膜；(6) 光刻并腐蚀开 P、N 电极孔，丙酮去胶；(7) 光刻，电子束蒸发 $\text{Ti}/\text{Pt}/\text{Au}$ ，丙酮浮胶，快速退火实现 p 电极欧姆化；(8) 光刻，离子束溅射 Cr/Au ，加厚 P 电极，同时生长 N 电极，丙酮浮胶；(9) 光刻，厚胶剥离法生长 In 柱，甩厚胶保护；(10) 背面抛光，并生长 ZnS 增透膜；(11) 拉丝切割。将探测器芯片与抽测电路倒装焊后封装在真空杜瓦中测试探测器芯片性能，探测器芯片与读出电路倒装焊后封装在真空杜瓦中测试焦平面性能。

表 4.1 N on P 外延材料结构参数

Table 4.1 Parameters of N-on-P epitaxial materials

外延结构	导电类型	掺杂物质	厚度(μm)	浓度(cm^{-3})
$\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$	N^+	Si	0.25	1×10^{18}
$\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$	n^-	Si	2.0	4×10^{16}
$\text{In}_{0.78}\text{Al}_{0.22}\text{As-buf}$	P^+	Be	1.4	2×10^{18}
InP-substrate	S.I.	Fe	350	半绝缘

4.3 探测器芯片性能抽测

4.3.1 探测器芯片 I-V 特性

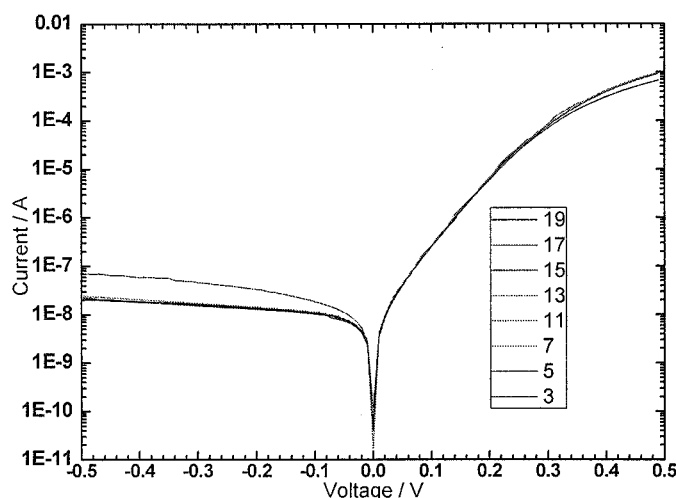


图 4.3 抽测器件 I-V 特性

Fig.4.3 I-V characteristics of the measured pixels

表 4.2 抽测器件的优值因子

Table 4.2 The R_0A products of the measured pixels

管脚	3	5	7	11	13	15	17	19
R_0 / Ω	2.44E6	2.74 E6	2.52 E6	2.55 E6	2.56 E6	2.78 E6	2.69 E6	2.68 E6
$R_0A / \Omega \cdot \text{cm}^2$	15.25	17.12	15.75	15.94	16	17.37	16.81	16.75

将探测器芯片与抽测电路互连，并封装在真空杜瓦瓶中，采用 Keithley236 可编程电流-电压测试仪测试其 I-V 曲线。共抽测 9 元，I-V 特性如图 4.3 所示，其中一元导通，其他各单元性能正常，但均匀性较差，而且器件的优值因子 R_0A 仍然处于一个较低的水平，如表 4.2 所示，与微系统所报道的结果($104\Omega \cdot \text{cm}^2$)还存在较大的差距(器件制备采用了湿法腐蚀台面成型工艺)^[5]。这可能是由 ICP 刻蚀过程中对材料产生的损伤所致，ICP 刻蚀完成后所用的湿法修复过程并没有完全去除刻蚀损伤，造成器件暗电流较大，影响了器件的性能，因此对于 ICP 刻蚀条件以及刻蚀损伤去除的研究仍然需要深入。

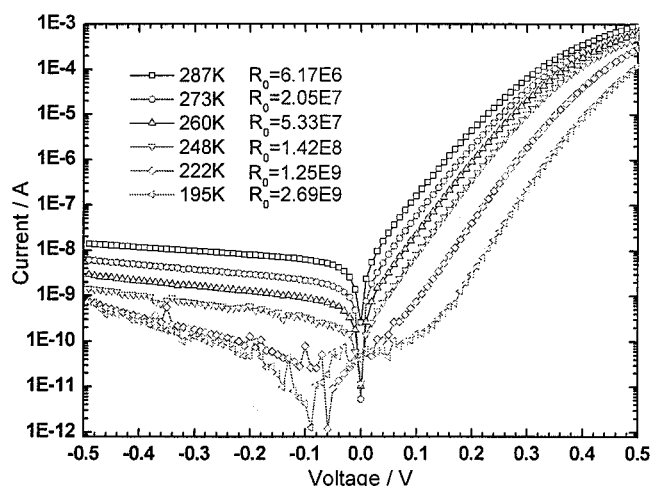


图 4.4 抽测 7#器件变温 I-V 特性

Fig.4.4 Temperature dependent I-V characteristics for detector 7#

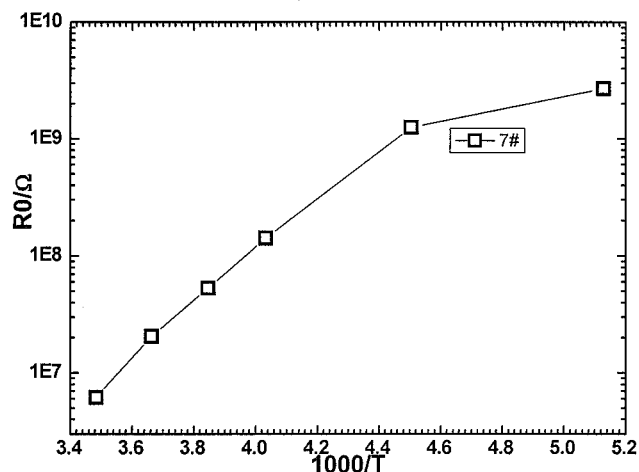
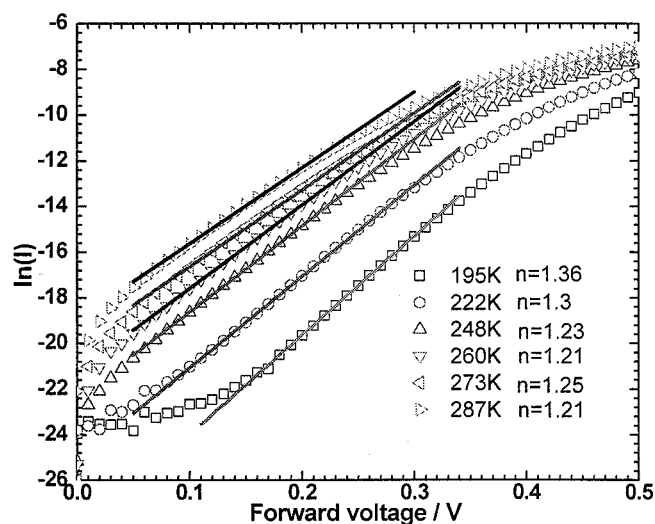
图 4.5 7#器件零偏压电阻 R_0 随温度的变化Fig.4.5 Temperature dependent R_0 for detector 7#

图 4.6 抽测器件正向 I-V 特性随温度的变化

Fig.4.6 Temperature dependent forward I-V characteristics for detector 7#

对其中一元 7# 进行变温 I-V 测试, 结果如图 4.4 所示, 降温可以明显降低暗电流, 当温

度由 287K 下降至 248K 时,器件的零偏压电阻提高了约两个数量级。当温度继续降低($\leq 222\text{K}$),器件的 I-V 曲线明显发生零点漂移,这是因为在该温度下器件的暗电流已经下降至与其噪声电流相当的水平(如图 4.8 所示),噪声的影响,造成测试的误差。根据公式(2.2)对不同温度下器件正向 $\ln(I)$ -V 曲线进行拟合,所得器件的理想因子分别为 1.36、1.30、1.23、1.21、1.25、1.21,介于 1 和 2 之间,如图 4.6 所示,说明该电压范围内,暗电流的主要成分为扩散电流和产生-复合电流,扩散电流成分较大。

对器件反向电流进行拟合,当所施加反向偏压较小时, $|V|$ 小于几个 kT/q ($|V| < 80\text{mV}$),暗电流与偏压成指数关系,根据产生-复合电流公式(3.5),如图 4.7 所示,在温度 287K、273K、260K 下,拟合所得理想因子 n 分别为: 1.88、1.78、2.10,接近 2,说明在该电压范围内,暗电流以产生-复合电流成分为主。而随着反向偏压的增大($|V| < 0.3\text{V}$),指数项 $\exp(qV/nkT)$ 与 1 相比较已经基本可以忽略,此时,根据产生-复合电流公式(3.5),暗电流与 $V^{1/2}$ 成正比,如图 4.7 所示,在温度 287K、273K、260K 下,拟合所得的幂指数分别约为 0.46、0.59、0.98,说明温度较高($> 273\text{K}$)时,器件在 $|V| < 0.3\text{V}$ 电压范围内,暗电流成分以产生-复合电流为主。

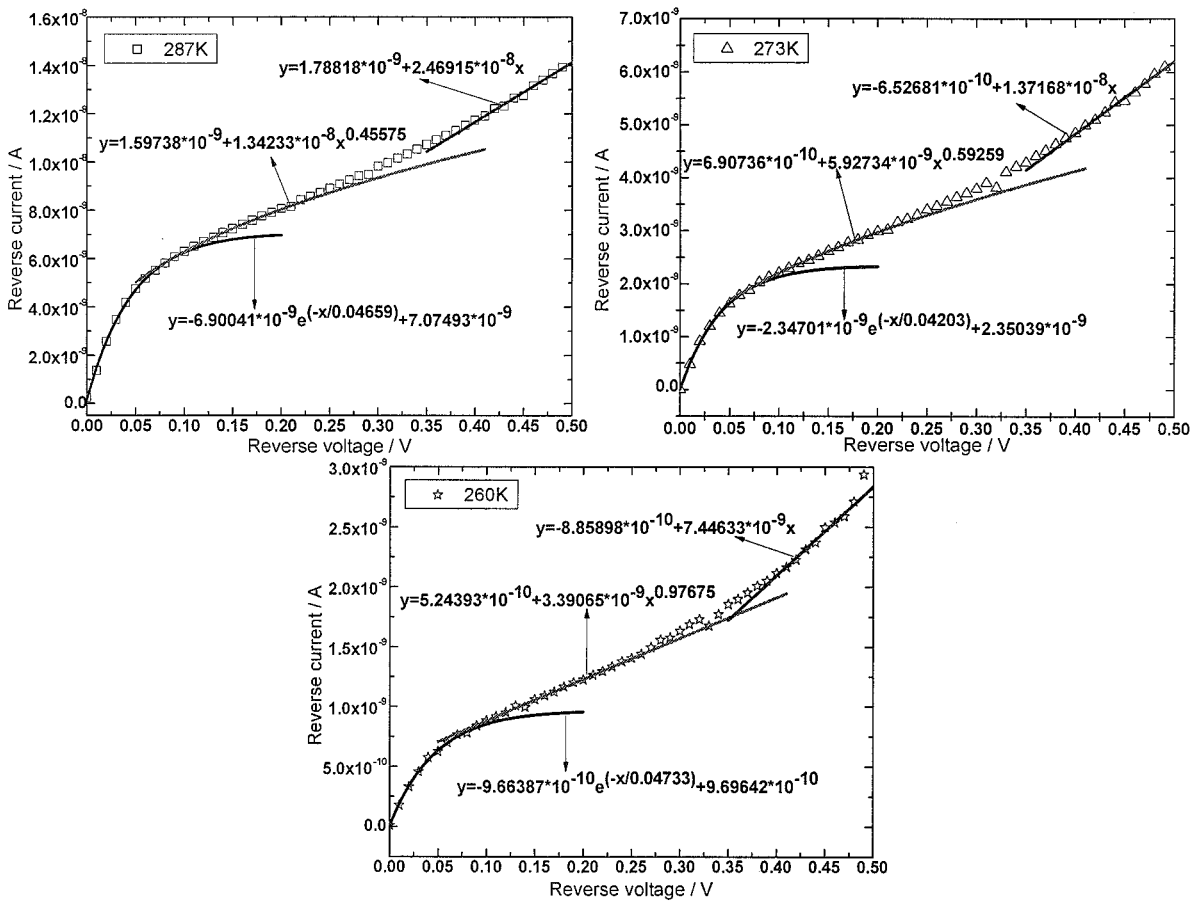


图 4.7 抽测器件反向 I-V 特性随温度的变化

Fig.4.7 Temperature dependent reverse I-V characteristics for detector 7#

当温度降至 260K 时, 电流成分又发生变化, 暗电流与电压基本成正比。而反向偏压继续增大, $|V| > 0.4\text{V}$ 时, 器件暗电流基本与偏压成正比, 对于三个温度下, 拟合所得比例系数分别为: 2.47×10^{-8} 、 1.37×10^{-8} 、 7.45×10^{-9} , 根据欧姆电流公式(3.8), 该比例系数应该为有效电阻 R_{eff} 的倒数, 拟合所得有效电阻分别为 4.05×10^7 、 7.29×10^7 、 1.34×10^8 , 这三个值与该电压范围内器件的动态微分电阻恰好相当, 那么该电压范围器件的暗电流成分应该以欧姆电流为主。

4.3.2 探测器芯片变温信号噪声特性

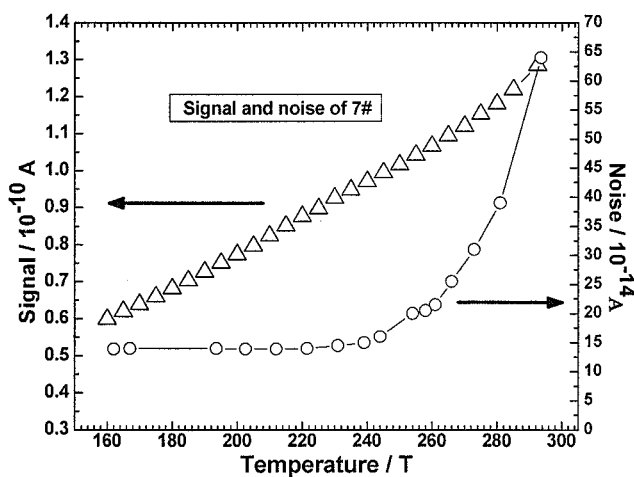


图 4.8 器件黑体信号及噪声随温度的变化

Fig.4.8 Temperature dependent noise and black-body characteristics of detector 7#

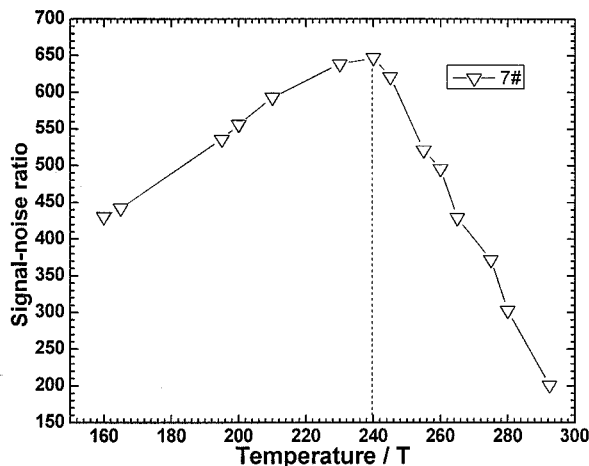


图 4.9 7#器件信噪比随温度的变化

Fig.4.9 Temperature dependent signal-to-noise ratio of detector 7#

图 4.8 所示为 7# 器件的变温黑体信号和噪声测试结果, 测试条件为室温 300K, 黑体温度 900K, 黑体孔径 5mm, 测试距离 15.2cm, 带宽 80Hz。随着温度的降低, 从 292K 到 100K 信号基本保持线性减小, 没有出现比较剧烈的波动; 而噪声则是先快速减小然后变化很小, 所得器件信噪比随温度的变化关系如图 4.9 所示, 随着温度的降低, 信噪比先增大后减小,

极大值对应的温度约为 240K。

4.3.3 探测器芯片光谱响应特性

图 4.10 所示为 7#器件的响应光谱随温度的变化曲线,随着温度的降低,器件的截止波长向短波方向移动,实验测得探测器的截止波长值与利用(3.1)式计算获得的 In 组分为 0.78 的材料截止波长值如表 4.3 所示,由表可知,二者基本保持一致。

表 4.3 器件及材料截止波长随温度的变化

Table 4.3 Temperature dependent cut-off wavelength of detector and material

温度 / K		157	185	220	250	273	287
截止波长 / μm	探测器截止波长	2.1786	2.2124	2.2727	2.3041	2.3419	2.3585
	材料截止波长	2.2351	2.2671	2.3117	2.3539	2.3887	2.4108
	二者比值	0.9747	0.9759	0.9831	0.9788	0.9804	0.9783

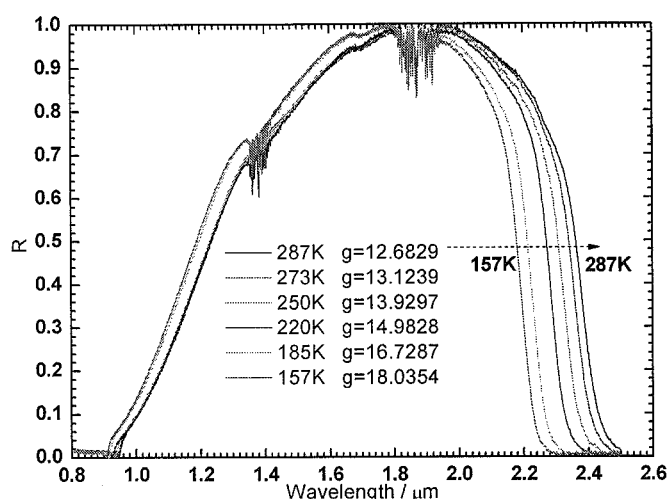


图 4.10 7#器件响应光谱随温度的变化

Fig.4.10 Temperature dependent spectral response of detector 7#

4.4 探测器焦平面性能测试

将探测器光敏芯片与 640×1 元的 CTIA 读出电路芯片通过 In 柱倒装到过渡电极板上,探测器芯片与倒装好的探测器焦平面照片如图 4.11 所示。将探测器焦平面封装在真空杜瓦瓶中,杜瓦瓶抽真空后采用液氮控制焦平面温度,利用焦平面性能测试系统对探测器焦平面性能进行测试,测试条件为,室温 300K,黑体温度 900K,黑体孔径 10mm,固定测试距离 30cm,时钟频率 20KHz。

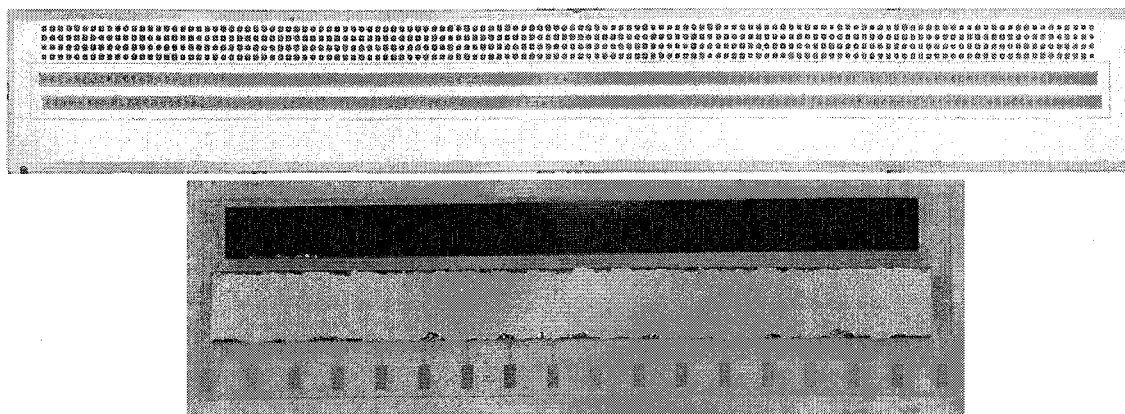
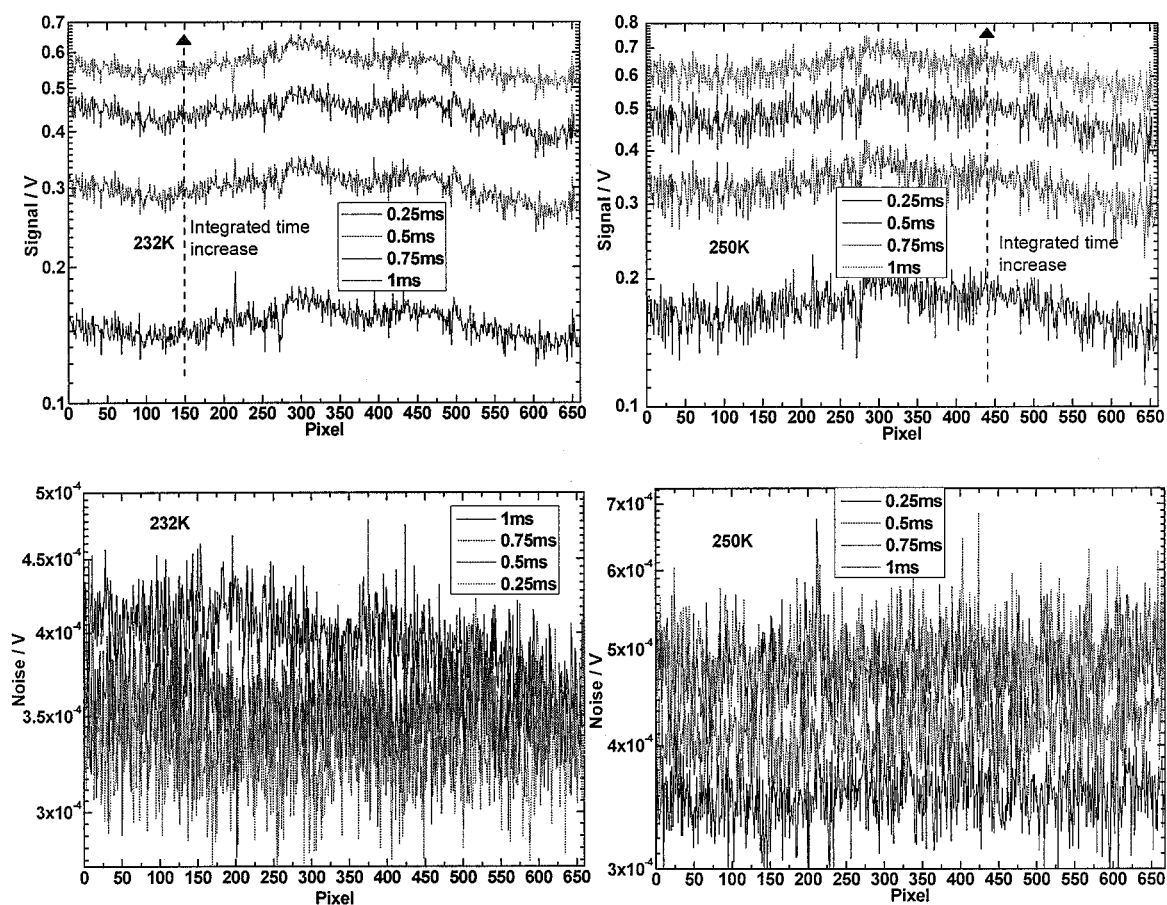


图 4.11 InGaAs 背照探测器光敏芯片及测试模块的照片

Fig 4.11 Photos of backside of illuminated InGaAs detector and measurement module

对于探测器焦平面来说，各像元的非均匀性直接关系到焦平面的成像质量，而各像元的非均匀性则受到焦平面工作温度、读出电路积分时间以及焦平面工作偏压等众多因素的影响。本节工作旨在通过对焦平面性能的分析研究，找出一个合适的工作条件，尽量发挥探测器焦平面的性能，以满足实际应用需求。



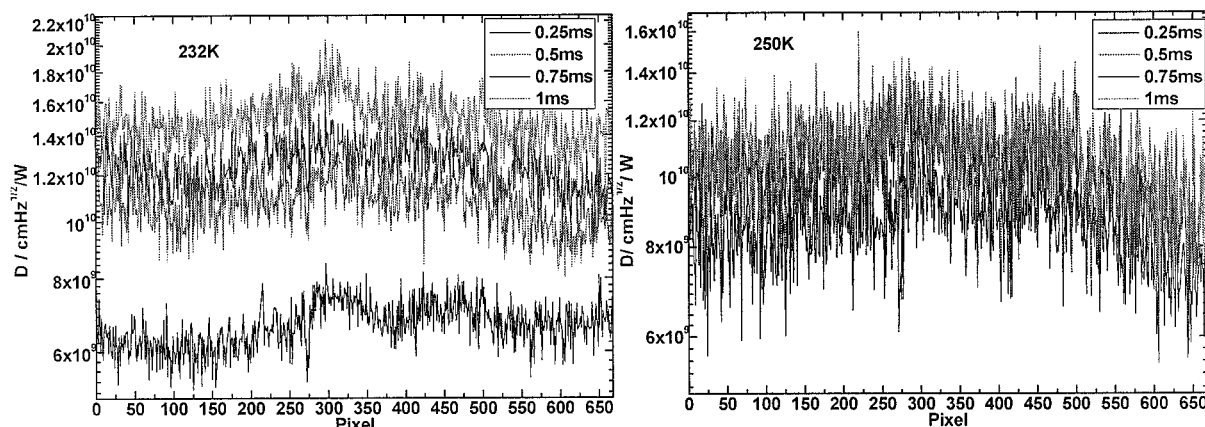


图 4.12 探测器焦平面性能随温度及积分时间的变化

Fig.4.12 Temperature and integrated time dependent characteristics of detector FPA

图 4.12 所示为焦平面各像元的黑体信号、噪声以及黑体探测率随工作温度及积分时间的变化图。由图可知，通过降低工作温度可以有效降低焦平面噪声，提高焦平面的性能。在 1ms 积分时间下，232K、250K、287K 工作温度对应焦平面器件的平均黑体探测率分别为： $1.50 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ， $1.11 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ， $5.60 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，对应的平均峰值探测率分别为： $2.16 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ， $1.55 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ， $7.10 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。温度 287K 时，焦平面各像元的信号表现出很大的异常，这应该与探测器芯片的暗电流有关，由图 4.4 可知，该温度下，探测器的暗电流为 nA 水平，与其信号处于同一量级，如图 4.7 所示，而 CTIA 电路的工作特性决定了探测器像元两端电压并不相同，使得像元工作过程中总会有一个随机的小偏压(或正或负)施加在探测器像元上，从而造成探测器暗信号的起伏，进而影响信号。随着温度的降低，探测器各像元的光信号会随之降低，但暗电流下降更快，对信号的影响减弱，使得焦平面各像元的信号性能得以改善。

表 4.4 所示为焦平面信号及探测率非均匀性随温度及积分时间的变化，由表可知，随着温度的降低，信号的非均匀性均会得到极大的改善。在温度 $\leq 250\text{K}$ 时，随着积分时间的增大，信号的非均匀性会有很大的改善。

表 4.4 探测器焦平面非均匀性随积分时间及温度的变化

Table 4.4 Temperature and integrated time dependent non-uniformity of detector FPA

温度/ K	非均匀性 / %			
	0.25ms	0.5ms	0.75ms	1ms
	信号	信号	信号	信号
287K	54.2	76.6	146.6	254
250K	19.7	12.1	10.1	8.587
232K	20	10.6	8.2	7.1

总体上来说，通过降低工作温度和适当的延长积分时间，探测器焦平面的性能会有很大的改善，例如，在 1ms 积分时间下，250K 工作温度下对应焦平面的平均峰值探测率已经达到

$1.55 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 基本能够满足实际需要, 但其均匀性还有待提高, 这就需要对探测器光敏芯片的制备工艺进一步优化, 以降低像元的暗电流水平。

4.5 本章小结

本章采用感应耦合等离子体 ICP(Inductive Coupled Plasma)刻蚀台面成型工艺, 在 N-on-P 型 $\text{In}_{0.78}\text{Al}_{0.22}\text{As}/\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ 材料上制备了背照射式 N-on-P 型 640×1 元线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器芯片, 室温下器件截止波长达到 $2.4 \mu\text{m}$, 抽测器件的优值因子约为 $16 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 对器件的变温特性研究表明, 通过降低工作温度可以有效降低探测器芯片的暗电流水平, 提高其信噪比, 在 240K 温度下探测器的优值因子可达 $\sim 1000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 信噪比可达 ~ 650 , 但探测器芯片的性能仍有待提高。而对探测器芯片以及与读出电路互连后焦平面的性能研究表明, 通过降低温度和适当的延长积分时间可有效改善焦平面性能, 在 1ms 积分时间下, 250K 工作温度下对应焦平面的平均峰值探测率已经达到 $1.55 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 焦平面信号非均匀性约为 8.59%, 232K 工作温度下对应焦平面的平均峰值探测率可达到 $2.16 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 焦平面信号非均匀性约为 7.10%。

参考文献:

- [1] 张可锋 高 In 组分 InGaAs 短波红外线列探测器技术研究 博士学位论文 2009
- [2] Jie L, Andreas L, Fow-sen C, et al. Smooth and vertical sidewall InP etching using Cl_2/N_2 inductively coupled plasma [J]. J. Vac. Sci. Technol. B., 2004, 22 (2): 510 – 512
- [3] Maeda T, Lee J W, Shul R J, et al. Inductively coupled plasma etching of III - V semiconductor in BCl_3 based chemistries, InP, InGaAs, InGaAsP, InAs and AlInAs [J]. Appl. Sur. Sci., 1999, 143: 183 - 190
- [4] 宁锦华 短波红外 InGaAs 探测器的台面成型技术研究 硕士学位论文 2009
- [5] Y.G.Zhang, Y.Gu, Z.B.Tian, K.Wang, A.Z.Li, X.R.Zhu, Y.L.Zheng, Performance of gas source MBE-grown wavelength-extended InGaAs photodetectors with different buffer structures, Journal of Crystal Growth, 2009, 311:1881–1884

第五章 全文总结与展望

5.1 全文总结

面向空间遥感应用的短波红外 InGaAs 阵列器件在气象预报、环境监测、资源分布、农作物估产、灾情防治等众多重要的领域有着广阔的应用前景。为了满足我国对于空间遥感用 InGaAs 红外焦平面的迫切需求，本论文对平面型及台面型 InGaAs 探测器的部分技术问题进行了研究，在降低平面型常规波长(1.7 μm)器件的暗电流水平、提高其探测率、改进器件串音特性等方面做了一定的工作，对平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器进行了初步的探索研究，并采用 ICP 刻蚀台面成型工艺研制了背照射式 N-on-P 型 640×1 元线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器。所取得的主要研究结果如下：

1. 平面型常规波长 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器的研制

(1) 通过减小扩散石英舟的质量，稳定了扩散成结条件，提高了扩散成结工艺的可控性及重复性。通过优化扩散掩膜，将磁控溅射方式生长的 SiO_2 扩散掩膜优化为采用 PECVD 生长的 SiN_x 薄膜，从而实现了探测器 PN 结边缘的钝化，有效地减小了平面型器件的暗电流水平。通过薄膜工艺优化，器件暗电流水平降低了一个数量级，室温下，-0.1V 偏压时，器件的暗电流密度由优化前的 $100\sim 300\text{nA}/\text{cm}^2$ 降低至优化后的 $\sim 20\text{nA}/\text{cm}^2$ 。

(2) 设计并搭建了阵列器件的串音测试实验装置，研究了平面型、深台面型以及浅台面型三种不同结构 InGaAs 器件的串音特性，研究表明浅槽隔离及保护环结构对器件串音具有良好的抑制效果，为器件结构的优化提供了一种思路。通过器件的结构设计，引入小扩散孔、环形遮盖电极、保护环以及浅隔离槽结构对正照射式平面型器件的光敏元扩大现象进行抑制，取得了良好的效果。并采用 AFM、SCM 以及 LBIC 相结合的方法定量地研究了在带有保护环结构的平面型器件中不同保护环与光敏元间距对光敏元扩大现象的抑制效果，引入保护环结构(保护环与光敏元扩散孔间距 $10\mu\text{m}$)后，光敏元扩大量由无保护环时的 $14.44\mu\text{m}$ 减小为 $7.49\mu\text{m}$ 。

(3) 采用优化的扩散工艺及保护环结构制备了光谱仪用低串音的 256×1 元线列 InGaAs 探测器，探测器光敏元的扩散孔面积 $25\times 500\mu\text{m}^2$ ，相邻光敏元中心距 $50\mu\text{m}$ ，室温下，探测器芯片暗电流密度在-0.1V 偏压下约为 $23\text{nA}/\text{cm}^2$ ，峰值探测率 $>1.00\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，与读出电路互连后在 5ms 积分时间下探测器焦平面的平均峰值探测率约 $1.87\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，响应不均匀性约为 1.65%。

(4) 针对常规闭管扩散工艺中存在的工艺复杂、重复性较差等缺点, 采用 ZnO 固态扩散源对平面型器件的开管扩散工艺进行了初步的研究, 得到了性能较好的平面型 InGaAs 探测器, 器件的平均优值因子 R_0A 已经达到 $1.5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

2. 平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器的研制

(1) 采用 SCM 及 SIMS 技术研究了掺杂元素 Zn 在晶格失配 $\text{InP}/\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 及晶格匹配 $\text{InP}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 两种外延材料中的扩散机制, 研究表明, 在晶格匹配材料中, PN 结深度与 Zn 元素扩散结深度差别并不大, Zn 元素在晶格匹配材料中的激活效率较高。而在晶格失配材料中, 二者差值较大, 在扩散 10 分钟时, 差值已经达到 $0.6 \mu\text{m}$, Zn 元素在该种材料中激活效率非常低, 从而增大了器件制备的难度。

(2) 采用 InP 及 InAsP 作为盖帽层的异质结构外延材料研制了平面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器。对于 InP 盖帽层材料的器件, 室温下, 单元器件的峰值探测率 $5.90 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 八元器件的峰值探测率 $3.80 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。T=210K 时, 器件峰值探测率达到最大, 单元器件的峰值探测率 $1.70 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 八元器件的峰值探测率 $9.40 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。对于 InAsP 盖帽层材料的器件, 随着温度降低, 器件黑体信号首先增大后降低, 在 200K 左右达到峰值, 而噪声首先下降迅速, 在 150K 以后变化趋缓, 而器件的峰值探测率在 150K 达到峰值, 约为 $8.30 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

3. 台面型长波扩展 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器的研制

(1) 采用感应耦合等离子体 ICP(Inductive Coupled Plasma)刻蚀台面成型工艺, 在 N-on-P 型 $\text{In}_{0.78}\text{Al}_{0.22}\text{As}/\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}$ 材料上制备了“品”字形结构的背照射式 N-on-P 型 640×1 元线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器芯片, 光敏元设计尺寸 $25 \times 25 \mu\text{m}^2$, 室温下器件截止波长达到 $2.4 \mu\text{m}$, 抽测器件的优值因子约为 $16 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。在 240K 温度下, 探测器芯片的优值因子 $\sim 1000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 信噪比 ~ 650 。

(2) 将 640×1 元线列 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器芯片与读出电路芯片互联, 对探测器焦平面的性能进行了研究。在 1ms 积分时间下, 250K 工作温度下对应焦平面的平均峰值探测率达到 $1.55 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 焦平面信号非均匀性约为 8.59%, 232K 工作温度下对应焦平面的平均峰值探测率达到 $2.16 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 焦平面信号非均匀性约为 7.10%。

5.2 展望

虽然本论文工作取得了一定的研究成果, 研究了 InGaAs 探测器制备过程中的几个问题, 但有些问题还没有得到充分的解决, 器件距离实用化还存在较大的差距, 仍有大量的研究工作需要开展。

1. 采用闭管扩散工艺大规模进行平面型器件的可行性研究。

优化器件制备工艺后,所制备的平面型InGaAs器件的性能已经有了很大的提高,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。如果要较多探测器芯片时,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。另外就是增大石英管的尺寸,以便进行大片流片,但石英管尺寸的增大往往会带来石英管质量的增大,进而延长扩散过程中样品的升温时间,造成扩散过程的可控性变差。石英管尺寸的变大还可能会造成样品不同区域扩散的不均匀性,进而影响器件性能的不均匀性。这些都是迫切需要解决的问题。

2. 开管扩散工艺的研究。

本文已经对采用ZnO作为固态扩散源的开管扩散工艺进行了初步的研究,器件性能与闭管扩散工艺制备的器件还存在一定的差距,但与目前的台面型器件相比还是有一定的优势,通过进一步的工艺设计研究,完全可以提高器件性能,需要研究的问题主要有:(1)扩散源的选择;(2)扩散损伤的消除;(3)扩散设备的优化;(4)扩散条件(扩散温度、时间)的优化;(5)扩散掩膜及表面钝化膜的进一步优化。

3. 带有保护环结构器件的进一步优化。

从研究结果上看,目前的保护环结构器件对于抑制平面型器件有效光敏元的扩散具有良好的效果,但仍然还存在一些问题,随着相邻光敏元中心距的进一步缩小,保护环与光敏元之间的距离必然会进一步减小,这样由于保护环需要PN电极短接甚至施加一定的偏压以正常工作,而器件一般工作在零偏压,这样保护环与邻近光敏元之间会存在一定的电势差,有可能会对器件的暗电流特性产生影响。目前的保护环结构还只是一个经验性的研究结果,对保护环结构器件性能的模拟计算将是一个重要且很有意义的研究课题。

4. 器件工艺流程的控制。

与台面型器件相比,平面型器件的工艺流程要经历高温环节,那么其他工艺环节的控制不当所带来的任何微小污染都会对器件的性能产生影响,因此,现有的工艺流程,特别是清洗环节需要重新进行设计,以尽量减小溶剂颗粒、晶片碎屑、光刻胶残留等污染物对器件工艺的影响。

5. 吸收层材料掺杂浓度的优化。

目前,所研制的平面型InGaAs器件的吸收层的掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,这并不是一个最优化的材料参数,对器件参数的模拟计算,从而获得一个优化的参数以进一步提高器件性能也是一个研究重点。

6. 对于长波扩展的平面型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器来说,目前存在主要问题应该还是外延材料的

优化,如何进一步降低材料的晶格失配以达到器件级外延材料的要求应该是一个研究的重点。而扩散成结过程如何提高掺杂元素的激活效率也是一个值得关注的问题。

7. 长波扩展的台面型 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器的ICP干法刻蚀损伤的消除。

目前,对于ICP刻蚀台面成型技术的研究还处于初级阶段,已进行的研究表明ICP台面成型工艺可以获得性能良好的台面型器件,但是还存在暗电流较大、均匀性较差等问题,这就需要对刻蚀过程进行深入研究,如ICP刻蚀速度的稳定、刻蚀损伤的消除等。另外,对于台面型器件来说,P电极的欧姆接触依然是一个难点。