

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院 博士学位论文

高 In 组分 InGaAs 短波红外线列探测器技术研究

张可锋

指导教师 龚海梅 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 2009.4 论文答辩日期 2009.5

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 _____

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，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 responsibility 由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

学位论文使用授权说明

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

经指导教师审核，本学位论文属于保密，密级为：_____。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：

年 月 日

指导教师签名：

年 月 日

摘要

本论文围绕高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器（响应波长扩展至 $2.4\mu\text{m}$ ）的制备和器件物理进行了深入的研究。通过对器件制备工艺的优化和结构设计优化，国内首次制备了正照射和背照射 256×1 元 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 线列焦平面光敏芯片，小光敏元背照射 660×1 元 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 线列焦平面光敏芯片，以及它们与读出电路互连后的焦平面组件。为航天遥感用高 In 组分 InGaAs 线列焦平面的研制奠定了技术基础。本论文的主要结论总结如下：

1. 对同质结和异质结两类光敏芯片进行了对比分析，得出由 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 作帽层及缓冲层外延材料制备的异质结器件，其性能要明显的优于由 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 作帽层及缓冲层外延材料制备的同质结器件。其中，异质结器件的探测率和响应率室温可以达到 $6\sim 7\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 和 $1.6\sim 1.7\text{A/W}$ ，非均匀性小于 6%，280K 时探测率可以达到 $1\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 以上。
2. 对器件 p 型电极的欧姆接触进行了初步研究。经过 450°C 、30 s 退火后， p^+-InP 与 Au/Zn/Au 接触电极的比接触电阻可以降低到 $10^{-6}\Omega\text{cm}^2$ ； $\text{p}^+-\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 与 Ti/Pt/Au 的接触电极经过 460°C 、30 s 退火后，其比接触电阻 $\rho_c \approx 7.5\times 10^{-3}\Omega\text{cm}^2$ ； $\text{p}^+-\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 与 Ti/Pt/Au 的接触电极，经过 480°C 、30 s 退火后，其比接触电阻 $\rho_c \approx 6.2\times 10^{-3}\Omega\text{cm}^2$ 。三种 P 型电极经过适当的退火处理后，基本上都能实现较好的欧姆接触。
3. 首次采用了阳极氧化方法实现了对高台面器件的钝化。发现通过调节电解液的 PH 值，可以改变氧化物介质薄膜的组分。通过 AES 分析可以得到，在 PH 为 9 的 KOH/乙二醇电解液中生成的氧化物薄膜中，宽禁带的 As_2O_3 和 Ga_2O_3 的含量明显增大，更有利于提高氧化物薄膜的钝化效果。
4. 研究分析了外延材料参数对器件性能的影响。特别是对于吸收层厚度和掺杂浓度的参数选择上，需要在暗电流和量子效率之间进行权衡。考虑焦平面组件的高非均匀性，可以通过增加吸收层的掺杂浓度，进一步降低器件的暗电流，从而降低器件的非均匀性。
5. 通过自行设计的一套测试结构，系统研究了器件图形的各项设计参数对器件性能的影响。对于正照射台面型 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器而言，整个台面的面积将决定器件的结区特性，如优值因子、暗电流、噪声等；通过对暗电流密度和器件周长面积比的分析，得到器件的侧面漏电流相对于其整个暗电流可以忽略不计，即器件的暗电流主要来源于器件的体内暗电流；器件的响应信号不仅取决于光敏感区的面积，而是与整个台面的面积成比例；以及在具有相同的台面面积时，在一定的合理范围内探测器的性能与器件的具体形状无关。

6. 在正照器件的研制基础上，制备了背照射 256×1 元线列焦平面光敏芯片，以及小光敏元背照射 660×1 元线列焦平面光敏芯片。背照射光敏芯片的性能与正照射芯片的性能相当，通过把光敏芯片与读出电路互连后对焦平面的分析，发现焦平面组件的非均匀性很差，分析原因是由于高 In 组分光敏芯片本身的暗电流较大，而且读出电路存在一个 $\pm 3\text{mV}$ 的输入失调，两者共同造成了焦平面组件很高的非均匀性。通过研究分析提出了进一步降低焦平面组件非均匀性的优化方案。

关键词：InGaAs；短波红外探测器；空间遥感；焦平面；测试结构

Technical study on higher indium content InGaAs linear SWIR focal plane arrays

Abstract

Zhang Kefeng (Microelectronics and solid electronics)

Directed by Professor Gong Heimei

This dissertation mainly focused on the higher indium content $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ linear focal plane arrays (FPAs) detector (cutoff wavelength extended to $2.4\mu\text{m}$). By the optimization of the processing techniques and device structural parameters, a series of front side illuminated and backside illuminated 256×1 , 660×1 extended wavelength $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ mesa FPAs were fabricated and their performances were investigated in detail. This work is important base for research of higher indium content InGaAs linear FPAs used for space borne remote sensing. The main results achieved in this dissertation could be summarized as follows:

1. Using heterojunction structure with $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ as buffer layer and capping layer and using homojunction structure with $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ as buffer layer and capping layer, two kinds of higher indium content $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ photodetectors were fabricated. The performance of these InGaAs photodetectors were compared and analyzed. The heterojunction photodetectors have higher performance than homojunction photodetectors. At room temperature, the heterojunction detector has $1.6\sim 1.7\text{A/W}$ peak responsivity. The peak detectivity of the heterojunction detector is $6\sim 7 \times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, and its non-uniformity is under 6%. The peak detectivity achieve above $1 \times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ at 280K.
2. The electrical property of the metal contacts to p-type III-V compound semiconductors was studied. The specific contact resistance of Au/Zn/Au contacts to p-type InP achieves $10^{-6}\Omega\cdot\text{cm}^2$ underwent 450°C rapid thermal annealing in ambient nitrogen for 30 s. For the Ti/Pt/Au contacts to p-type $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, the specific contact resistance is about $7.5 \times 10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}^2$ after 460°C for 30 s thermal annealing. The specific contact resistance of Ti/Pt/Au contacts to p-type $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ achieves $6.2 \times 10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}^2$ underwent 480°C rapid thermal annealing in ambient nitrogen for 30 s. After optimized heat treatment the contacts of the metal/p-type III-V compound semiconductors became perfectly Ohmic contacts.
3. For the first time, the thin oxide films by electrochemical anodization on the mesa type $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ photovoltaic detectors were investigated. The different component of the oxide films can be obtained by varying PH value of the electrolyte. The AES profiles of these oxides layers indicate that the higher content of wider bandgap As_2O_3 and Ga_2O_3 in oxide films were achieved in a 0.1mol/L KOH /propylene glycol electrolyte electrolyte at PH of 9. This is very

significance for improving the performance of the passivation layer.

4. The relation between the parameter of the epitaxial material and the performance of the detectors was investigated. For the dark current and responsivity, the compromise for the doped concentration and thickness of the absorption layer must be made. The lower dark current can be achieved by a higher doped concentration of the absorption layer, which is very significant for weakening the non-uniformity of the FPAs module.
5. The performance of front-illumination mesa structured $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ photodetectors with different area and perimeter of the PN junction was compared and analyzed. The relation between the performance of the detectors, such as dark current, noise, signal, detectivity, zero-bias resistance area (RoA), and the parameter of the design size and shapes for the detectors was discussed. For the mesa structured $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ photodetectors, the total area of the mesa is a key effect factor for the characteristic of the $\text{p}^+\text{-n}^+\text{-n}^+$ heterojunction. According to relation of the dark current density and perimeter/area ratio, the dark current mainly roots in bulk current, which means the sidewall leakage current is of negligible value.
6. Based on the research achievement of the front side illuminated InGaAs FPAs, the backside illuminated 256×1 elements and 660×1 elements $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ FPAs were successfully fabricated. The equal performance of the front side illuminated and backside illuminated detectors achieved by our technical process. However, the dark current in higher indium content (extended) $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector is many orders of magnitude greater than that for lattice-matched detector, especially, for the pixel-to-pixel variations of the capacitive transimpedance amplifier circuit (CTIA), result in variation of the actual bias voltages applied to the diodes by $\pm 3\text{mV}$ (input-offset voltage). This produces considerable dark-output non-uniformity across the arrays.

Key words: InGaAs; SWIR detector; remote sensing; FPAs; test configuration

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
目录.....	V
第一章 绪论.....	1
1.1 引言	1
1.2 红外辐射及大气窗口	3
1.3 红外探测器简介	4
1.4 高温工作的 InGaAs 探测器.....	5
1.5 InGaAs 探测器其它的优点.....	6
1.6 InGaAs 材料的发展和研究现状.....	8
1.7 InGaAs 探测器的发展和研究现状.....	10
1.7.1 大面阵和长线列 InGaAs 焦平面的发展和研究现状	10
1.7.2 波长扩展及多色 InGaAs 焦平面的发展和研究现状	11
1.7.3 InGaAs 雪崩 (APD) 二极管探测器	13
1.7.4 InGaAs 量子阱及量子点探测器的发展和研究现状	13
1.7.5 InGaAs CCD 器件.....	15
1.8 航空遥感用 InGaAs 探测器焦平面的发展和研究现状.....	15
1.9 InGaAs 焦平面面临的问题和发展趋势.....	16
1.10 本论文的研究背景、目的及主要内容	18
第二章 高 In 组分 InGaAs 外延材料的基本表征	20
2.1 引言	20
2.2 材料表面形貌的表征	21
2.2.1 材料的外延结构和表面形貌.....	21
2.2.2 材料表面和侧面的扫描电镜表征.....	22
2.2.3 材料的原子力显微镜表征.....	24
2.3 X 射线能谱分析 (EDAX)	25
2.4 材料的双晶 XRD 表征.....	27
2.5 本章小结	28
第三章 P 型电极欧姆接触及表面钝化工艺研究	29
3.1 金属-半导体的欧姆接触	29
3.1.1 机理.....	29
3.1.2 表征.....	29
3.1.3 比接触电阻的测量.....	31
3.2 III-V 族材料化合物/金属的欧姆接触.....	32
3.2.1 p-InP 与 Au/Zn/Au 的欧姆接触	33
3.2.2 p-In _{0.8} Ga _{0.2} As 与 Ti/Pt/Au 的欧姆接触	36
3.2.3 p-In _{0.8} Al _{0.2} As 与 Ti/Pt/Au 的欧姆接触.....	37
3.2.4 欧姆电极的 LBIC 方法表征.....	38
3.3 表面钝化	40
3.3.1 阳极氧化/SiO ₂ 双层钝化研究	41

3.3.2 阳极氧化/SiO ₂ 双层钝化薄膜的优化	43
3.4 本章小结	45
第四章 测试结构芯片设计与测试结果分析	46
4.1 引言	46
4.2 光伏型探测器的工作原理	46
4.3 InGaAs 探测器的特性参数	48
4.4 测试结构芯片设计和芯片的制备	52
4.5 芯片的测试及结果讨论	53
4.5.1 芯片的 I-V 特性分析	53
4.5.2 芯片的噪声和响应信号	54
4.5.3 芯片的优值因子和探测率	55
4.6 信号、暗电流和噪声与台面关系的进一步研究	56
4.7 本章小结	60
第五章 线列器件制备及性能分析	61
5.1 台面型线列器件的工艺流程	61
5.2 正照射高 In 组分 In _{0.8} Ga _{0.2} As 探测器的性能测试分析	62
5.2.1 缓冲层和帽层为 In _{1-x} Ga _x As 的同质结器件性能分析	62
5.2.2 缓冲层和帽层为 In _{1-x} Al _x As 的异质结器件性能分析	73
5.2.3 同质结器件与异质结器件的性能对比分析	81
5.3 背照射高 In 组分 In _{0.8} Ga _{0.2} As 光敏芯片及焦平面的性能测试分析	83
5.3.1 背照射高 In 组分 In _{0.8} Ga _{0.2} As 光敏芯片的性能分析	83
5.3.2 焦平面测试模块的性能分析	85
5.4 本章小结	91
第六章 全文总结与建议	92
6.1 全文总结	92
6.2 建议	93
参考文献	95
攻读博士学位期间发表的论文	103
致 谢	105

第一章 绪论

本章首先简要回顾了红外辐射和各类红外探测器，在此基础上重点介绍了短波红外 InGaAs 探测器阵列的发展和现状，从与其它类型红外探测器的对比分析中，评述了 InGaAs 短波红外探测器的优越性和发展 InGaAs 探测器的重要性和必要性。最后介绍了本文工作的重要意义，点出了论文的主要内容。

1.1 引言

对于地球和其它星体的遥感应用，有许多重要的科学测量工作需要在短波红外（1.0 μm ~3.0 μm SWIR）波段内进行。这些波段之所以重要，其主要原因：1、短波红外波段是重要的大气窗口；2、短波红外波段为许多重要的科学测量工作提供了一个特别多产的谱区。从中可以获得太阳的基本自然辐照；许多材料在此谱区具有独特的光谱特征，如一些分子键振动频率如岩石、矿物中含的氢氧根^[1]，农作物含的H₂O，空气中的CO₂、NH₃、H₂S、N₂O 等^[2]，图1.1.1显示了O-H、C-H、C-O、C=O和N-H等功能键在红外波段的吸收^[3]。

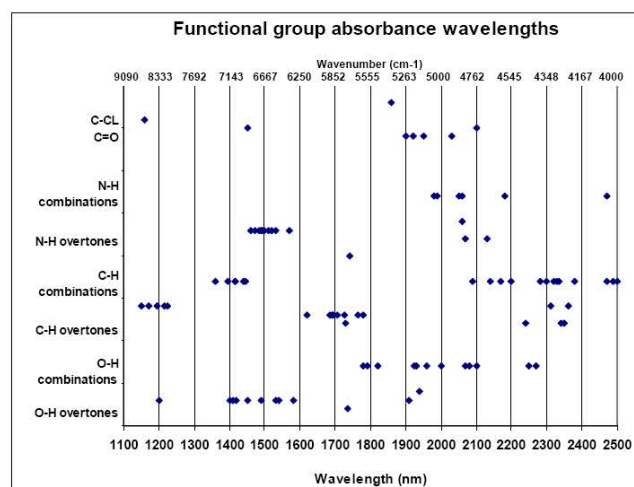


图1.1.1 O-H、C-H、C-O、C=O和N-H等功能键在红外波段的吸收

Fig 1.1.1 The main SWIR absorbance wavelengths associated with the molecular vibrations of the diatomic functional groups of O-H, C-H, C-O, C=O, and N-H

另外，一些高温物体如飞机和火箭的发动机喷口、导弹尾焰等的红外辐射能量也集中在该波段内。因而短波红外波段在空间遥感领域中有着重要的应用，工作在该波段的红外焦平面在如气象预报、环境监测、资源分布、农作物估产和灾情防治等众多重要领域中有着广阔的应用前景。

应用于 1 μm ~3 μm 波段的红外探测器材料包括 HgCdTe、InSb、PtSi 以及 InGaAs 等（图 1.1.2 为 InGaAs 探测的几个典型应用波段），但 HgCdTe、InSb 和 PtSi 等探测器一般都需要某

种程度的制冷，不是探测器需要制冷就是光学系统需要制冷，或者两者都需要制冷。对于一些需要制冷的探测器来说，制冷的必要性是由于器件的基本物理性质所决定的，对于光学系统来说，制冷是为了减少其发射的信号，也就是所谓的“仪器背景”。在短波红外波段中，仪器背景问题往往并不严重，因此在仪器的设计中就只需考虑探测器的制冷。表 1.1 列出了常用的四种探测器制冷器技术。

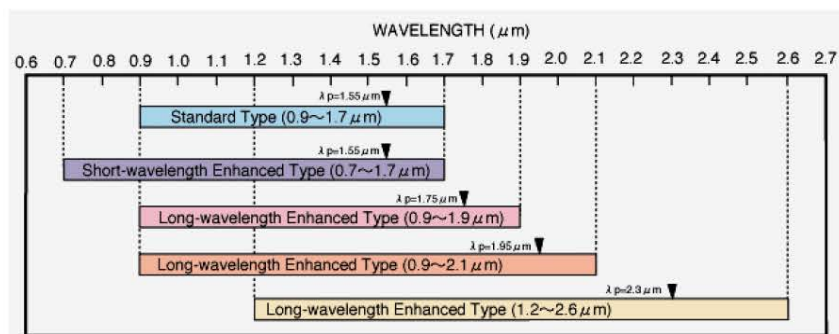


图 1.1.2 InGaAs 探测器的几个典型应用波段
Fig 1.1.2 Typical spectral response of InGaAs detector

表 1.1.1 探测器的制冷技术

Tab 1.1.1 The typical refrigeration technique for IR detector

制冷技术	温度	质量
辐射器	>80K	3~10kg
储存制冷剂	>4K	>50kg
机械制冷器	>50K	3~50kg
热电制冷器	>180K	<1kg

所用的制冷器在航天遥感等方面都表现出一个明显的缺点，即它们有一定的质量和体积，使得其在航天遥感等方面的应用受到限制。另一方面，制冷器的安装也增加了整个仪器的装配复杂性，以及一些难以解决的问题，例如玷污、振动、可靠性和寿命等。相比其它类型的制冷器，热电制冷器的尺寸特别小，而且坚固可靠（无机械部件和玷污问题），对于体积和质量受到限制的仪器来说，它是一个较好的选择对象。显然，取消制冷器或采用热电制冷器将明显地提高仪器的可靠性，延长仪器的使用寿命。

近年来，InGaAs/InP 双异质结体系广泛用于先进的光电子和电子技术。采用与 InP 晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料制备的室温工作探测器，其截止波长约为 $1.7\mu\text{m}$ ，它们在光通信等领域已得到了广泛应用，并已充分证明了其优异的性能。高 In 组分的 InGaAs 探测器，即所谓的波长扩展的 InGaAs 探测器，其响应波长可以扩展到 $1.7\mu\text{m}\sim 3.0\mu\text{m}$ ，相对于工作在同一波段其它类型的探测器，高 In 组分的 InGaAs 探测器具有可在室温或热电制冷环境下工作、高均匀性、高量子效率和高灵敏度等优点。因此 InGaAs 探测器是小型化、低成本和高可靠性的短波红外探测系统的最佳选择。所以长线列和面阵 InGaAs 焦平面探测器逐渐被用于空间遥感领域，以及夜视、遥感系统、红外成像制导、光电对抗等领域^{[4]-[7]}。

1.2 红外辐射及大气窗口

任何物质（体），其内部的带电粒子都是处于不断运动状态的。当物体具有一定温度，即物体温度高于热力学温度 0K 时，它就会不断地向周围进行电磁辐射^[8]。物体的自发辐射，在常温下主要是红外辐射。红外辐射俗称红外线或红外光，它是人眼看不见的光线，具有强烈的热作用，故又称为热辐射。

物体的红外辐射（热辐射）特性主要由物体的温度决定，温度越高，辐射出来的红外线越多，红外辐射的能量就越强。物体的红外辐射特性是红外光电传感器的基础。

在红外技术中，为便于对不同波长的红外光进行研究，一般将红外辐射分为四个区域：近红外（波长 $\lambda=0.76\sim 3\mu\text{m}$ ），中红外（波长 $\lambda=3\sim 6\mu\text{m}$ ），中远红外（波长 $\lambda=6\sim 20\mu\text{m}$ ），远红外（波长 $\lambda=20\sim 1000\mu\text{m}$ ）。所谓远或近，是指红外辐射在电磁波谱中距离可见光的远、近，靠近可见光的为近红外区。

红外辐射和电磁波传播一样，也有被传输介质吸收和散射等现象，使辐射能量在传输过程中逐渐衰减。大气是红外辐射的主要传输介质。组成大气的主要气体是氮（ N_2 ）、氧（ O_2 ）、氢（ H_2 ）、氩（ Ar ），共约占总体积的 99.9% 左右，其它气体仅占总体积的 0.1% 左右。而 N_2 、 O_2 、 H_2 、 Ar 是空气中对称的双原子分子，它们在红外线的传输过程中不会引起分子电荷的振荡（或者说在振动时不引起电偶极矩的变化），因而不吸收 $15\mu\text{m}$ 以下的红外线，即不会造成红外辐射在传输过程中的衰减^[8]。

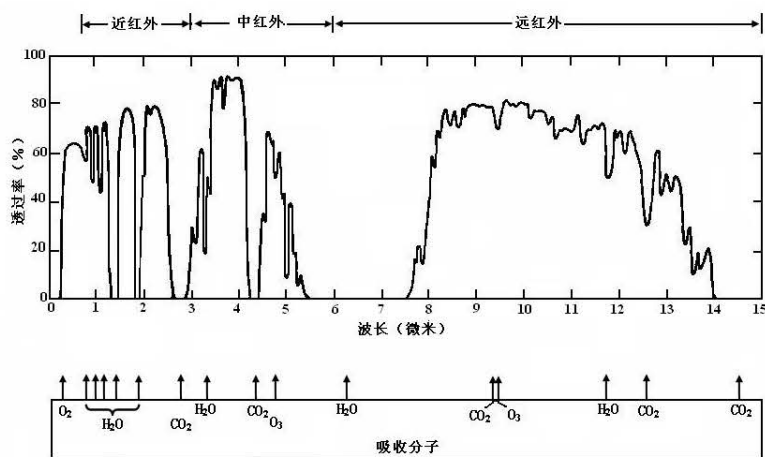


图 1.2.1 大气对红外光的透射

Fig. 1.2.1 Transmission of atmosphere to infrared

图 1.2.1 给出了太阳光谱通过 1 海里 (=1.853 公里) 的水平路径上大气的透过合成曲线^[9]，图中下面部分表示了水蒸汽、二氧化碳和臭氧分子所造成的吸收带。从该图可以看出，红外辐射在通过大气层时被分割成几个波段，即在各种气体（尤其是 H_2O 和 CO_2 ）吸收较弱的波段，红外线才能透过大气层向远方传播，这些高透过区域称之为大气窗口。近、中、远红外

波段的大气窗口有: $0.95\sim 1.05\mu\text{m}$ 、 $1.15\sim 1.35\mu\text{m}$ 、 $1.5\sim 1.8\mu\text{m}$ 、 $2.1\sim 2.4\mu\text{m}$ 、 $3.3\sim 4.2\mu\text{m}$ 、 $4.5\sim 5.1\mu\text{m}$ 和 $8\sim 13\mu\text{m}$ 。有时我们也粗略地认为地球大气有 $1\sim 3\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 三个大气窗口。这三个大气窗口对于从事红外光谱研究、红外技术应用和研究尤为重要, 一般红外仪器或红外系统的工作波段都在这三个窗口之内。

1.3 红外探测器简介

红外探测器是把投射到器件上的红外辐射能转变为其它形式的能量, 多数情况下转变成电能的器件, 它是红外系统的“心脏”。

红外探测器分为光子探测器和热探测器两大类, 前者又有内光电效应和外光电效应之分。在内光电效应中, 光所激发的载流子仍滞留在材料的内部。根据载流子引起光生电动势的大小, 或材料电导率的变化值, 就可以测定被吸收的光子数。外光电效应是入射光子使吸收光的物质表面发射电子的效应, 也称光电子发射效应。

热探测器是利用固体或气体物质的某些物理性质对温度敏感的特性来探测电磁辐射的。例如, 高莱管利用气体受热膨胀的原理, 测热辐射计利用电阻随温度变化的现象, 测辐射热电偶利用温差电效应以及热释电探测器利用自发极化随温度升降而发生变化。上述温度变化, 可以通过敏感元件的某种电参数的温度关系或其它办法转变成容易测量的电信号, 因此热探测器属于无选择性探测器。即对不同波长的单位入射功率, 有相同的输出信号, 但其光谱响应仍受窗口材料所限。热探测器通常在室温下即可正常工作。

表 1.3.1 红外探测器的类型及其特性

Tab.1.3.1 Types of infrared detectors and their characteristics

Type		Detector	Spectral response (μm)	Operating temperature (K)	$D^*(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W})$
Thermal type	Thermocouple · Thermopile	Golay cell, condenser-microphone PZT, TGS, LiTaO ₃	Depends on window material	300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 6 \times 10^8$
	Bolometer			300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 1 \times 10^8$
	Pneumatic cell			300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 1 \times 10^8$
	Pyroelectric detector			300	$D^*(\lambda, 10, 1) = 2 \times 10^8$
Quantum type	Intrinsic type	PbS PbSe InSb HgCdTe	1 to 3.6	300	$D^*(500, 600, 1) = 1 \times 10^9$
			1.5 to 5.8	300	$D^*(500, 600, 1) = 1 \times 10^9$
			2 to 6	213	$D^*(500, 1200, 1) = 2 \times 10^{10}$
			2 to 16	77	$D^*(500, 1000, 1) = 2 \times 10^{10}$
	Photovoltaic type	Ge InGaAs Ex. InGaAs InAs InSb HgCdTe	0.8 to 1.8	300	$D^*(\lambda p) = 1 \times 10^{11}$
			0.7 to 1.7	300	$D^*(\lambda p) = 5 \times 10^{12}$
			1.2 to 2.55	253	$D^*(\lambda p) = 2 \times 10^{11}$
			1 to 3.1	77	$D^*(500, 1200, 1) = 1 \times 10^{10}$
	Extrinsic type	Ge : Au Ge : Hg Ge : Cu Ge : Zn Si : Ga Si : As	1 to 5.5	77	$D^*(500, 1200, 1) = 2 \times 10^{10}$
			2 to 16	77	$D^*(500, 1000, 1) = 1 \times 10^{10}$
			1 to 10	77	$D^*(500, 900, 1) = 1 \times 10^{11}$
			2 to 14	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 8 \times 10^9$
		2 to 30	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$	
		2 to 40	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$	
		1 to 17	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$	
		1 to 23	4.2	$D^*(500, 900, 1) = 5 \times 10^9$	

光子探测器属于选择性探测器, 单位入射功率仅对具有足够能量的光子有响应, 即存在一长波限。在小于长波限工作时, 光电信号随波长的增长而增大。超过长波限后, 光信号迅速下降到零。因此, 光子探测器的光谱响应不及热探测器宽, 但前者有较高的灵敏度和较快的响应时间。一般来说, 长波限处于紫外、可见或短波红外 ($1\sim 3\mu\text{m}$) 波段时, 探测器可直

接在室温下工作。当波长限在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 时,则需要冷却到干冰温度,即 195K 。如果要探测器延伸到 $8\sim 14\mu\text{m}$ 或更长的波段时,则需要冷却到液氮温度,即 77K 或更低温度^[10]。表 1.3.1 为当前主流的几种红外探测器及其特性。

器件的性能以及正确的使用,将直接影响红外系统的灵敏度和测量的精度。后面几节将简要地介绍 $1\sim 3\mu\text{m}$ 波段的 InGaAs 光伏探测器。图 1.3.1 为当前主流的几种红外探测器的响应光谱及探测率。

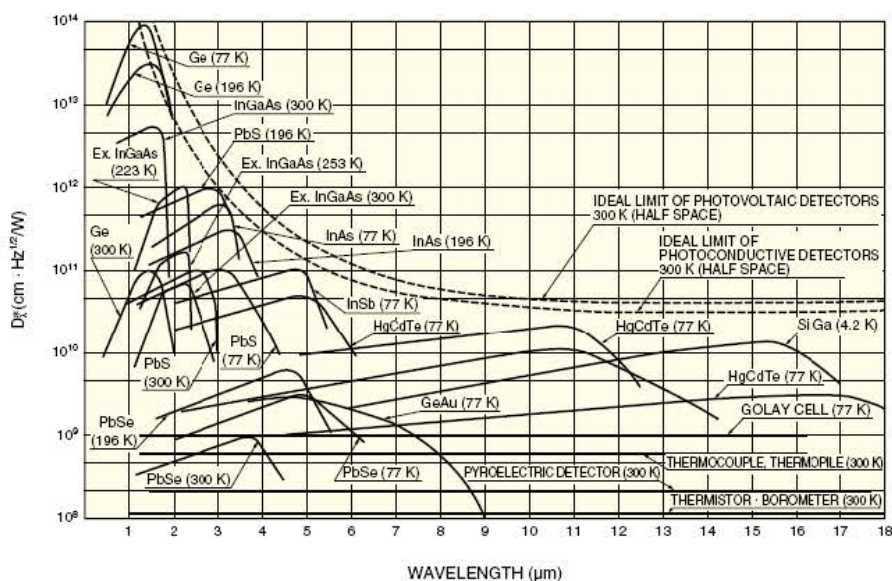


图 1.3.1 典型红外探测器的响应光谱

Fig.1.3.1 Spectral response characteristic of various infrared detectors

1.4 高温工作的 InGaAs 探测器

从前面引言部分的讨论可以看出,能在较高的工作环境温度下工作的红外探测器具有明显的优点。在覆盖短波红外谱区的红外仪器中,制冷只是用来减少探测器的暗电流。来自仪器的背景光子信号几乎可以忽略不计,光学系统无需制冷。在这种低背景环境中,焦平面的灵敏度最终取决于光电二级管的零偏动态阻抗与光敏面面积的乘积(优值因子 R_oA)。在此波段中最常用的探测器是 InSb 和 HgCdTe 光伏探测器。由于 InSb 的带隙小 ($E_g=0.23\text{eV}$),它需要制冷到 80K 以下,必须滤除波长在 $3\mu\text{m}$ 以上的辐射。对于 HgCdTe 探测器在 10^{11} 光子/ cm^2 那样低的背景下,工作温度约为 150K 可以满足背景限制(BLIP)。如图 1.4.1 所示,在相同的工作温度和相同的响应波段 InGaAs 探测器的 R_oA 值比碲镉汞(HgCdTe)材料高 1~2 个数量级,信噪比可提高 3~10 倍,也就是说在暗电流相同的情况下,InGaAs 探测器的工作温度可比 HgCdTe 探测器高 70K 左右,这就使得高探测率的 $1.7\mu\text{m}$ 的 InGaAs 探测器可在室温工作,而 $2.5\mu\text{m}$ 的 InGaAs 探测器只需要热电制冷的工作环境。

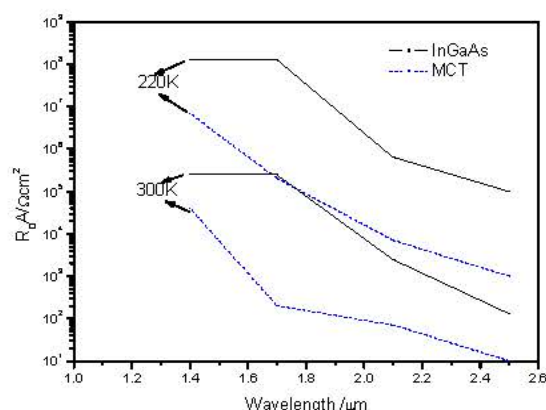
图 1.4.1 不同温度下 InGaAs 和 HgCdTe 探测器的 R_0A 值随截止波长的变化曲线

Fig.1.4.1 The zero bias resistance-area product R_0A of InGaAs and HgCdTe detector at different temperature and cut-off wavelength

1.5 InGaAs 探测器其它的优点

在设计成背面照射的结构中, 红外焦平面的短波响应一般受限于探测器列阵的衬底。对于碲镉汞探测器来说, CdTe 衬底截止短于 $0.8\mu\text{m}$ 的波长。许多遥感使命要求同时对可见光和红外波长进行采样。这样的要求导致使用多个焦平面、复杂的光学系统、冗余的信号链路以及寄存图像所需的后处理技术。能够同时响应可见光和短波红外波段的探测器焦平面取消了这些约束, 从而构成简单得多、紧凑得多的仪器。能提供极好的红外响应和良好的可见光响应的 InGaAs 探测器已经被制备成功并在工程中进行实验应用。图 1.5.1 所示为一种可同时响应可见光和短波红外的 InGaAs 探测器的响应光谱, 可以看到其良好的量子效率延伸至可见波段。其实现方法可以通过对衬底 (InP) 进行减薄或者在像元上用外延方法沉积一层覆盖层等工艺, 这些进展的结果将实现一种能响应 $0.5\mu\text{m}$ 以下至 $2.5\mu\text{m}$ 波段、具有高量子效率的 InGaAs 焦平面, 对于许多遥感应用来说, 这是一种非常理想的器件。

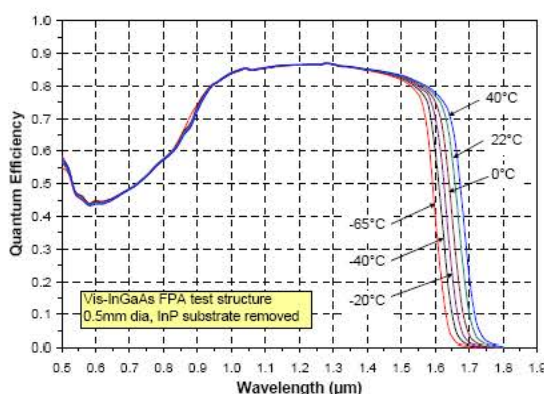


图 1.5.1 同时响应可见和短波红外的 InGaAs 探测器的响应光谱

Fig.1.5.1 The spectral QE vs. wavelength at different temperatures measured for a backside illuminated Vis-InGaAs test photodiode (0.5mm dia)

根据现有的报道, 将读出电路与探测器焦平面集成在一起的方式有两种: 一种是将探测

器焦平面与硅读出电路通过 In 柱等互连，即混合集成焦平面如图 1.5.2 所示；另一种是将读出电路与探测器做在同一个片子上，即单片集成焦平面如图 1.5.3 所示。

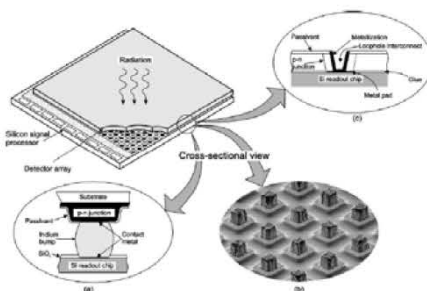


图 1.5.2 混合集成的探测器焦平面^[11]

Fig.1.5.2 Hybrid IR FPA with independently optimized signal detection and readout

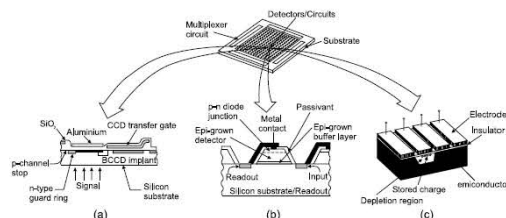


图 1.5.3 单片集成 HgCdTe 红外焦平面器件结构示意图^[11]

Fig.1.5.3 A photograph of Monolithic HgCdTe IR FPAs

在研制 InGaAs 探测器方面，一个令人鼓舞的前景是有可能制备出具有高探测器率的真正的单片短波红外焦平面。人们用硅把读出电路与光电探测器集成起来，但是在单片集成的碲镉汞红外探测器阵列上所作出的努力最多也只获得有限的成功。然而，基于 InGaAs 电路元件的研究工作表明，制备出高质量的元件是可能的。人们已经用 InGaAs 制成了高性能的结型场效应晶体管（JFET）和电荷耦合器件（CCD）。利用这些元件，由光电二极管和集成读出电路构成的红外焦平面是可行的。单片焦平面阵列具有某些超过混成结构的优点。焦平面的尺寸已不再因需要考虑同硅读出电路芯片的热匹配等问题而受到限制，可以实现与硅 CCD 相似的甚大规模传感器，钢丘焊接过程以及把探测器阵列与读出电路拼合起来所需的所有其它处理工艺过程都可以取消了。单片传感器的成本将大大低于用碲镉汞等制成的混成阵列。Abhay M. Joshi 等人设计并制备出 256 元和 512 元硅基 InGaAs 单片红外探测阵列^[11]，把 InGaAs 光电探测器与高密度复杂的 CMOS 读出电路共同集成在硅衬底上，可探测短红外波段 $1\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ 。在室温下，光敏元面积为 $40\times 40\mu\text{m}^2$ 和 $80\times 80\mu\text{m}^2$ 时， R_{0A} 分别为 $40\Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 $45\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。为了把 InGaAs 探测器和硅技术集成在一起，他们通过在硅上限制生长面积和生长环境的“选择”外延的方法，在硅衬底上生长出高质量的 InGaAs 外延层，图 1.5.3 为单片硅基 InGaAs 短波红外探测器结构。为了克服 InGaAs 与 Si 的晶格失配大的困难，在两层中间生长一层 GaAs 缓冲层。

最后，InGaAs 红外焦平面阵列的可制造性远远的大于碲镉汞混成阵列。导致这种可能性

的因素有几个。首先，III-V 材料的生长已经拥有了多种成熟先进的技术，InGaAs 材料的生长可采用的技术包括：分子束外延 (MBE)、金属有机化合物化学气相淀积(MOCVD)、氢化物输运气相外延(VPE)、液相外延(LPE)以及原子层外延 (ALE)。对混有砷化合物的量子阱结构的不断研究为生长精密界定的外延 InGaAs 层 (具有受控掺杂和低背景杂质) 提供了广泛的经验基础。如前所述，InGaAs 红外焦平面阵列的研发将获益于容易获得的技术和为光电子集成电路工业研制的设备。InGaAs 探测器的另一个优点是 III-V 衬底材料的较高质量和较好坚固性等性能，使得这种器件的产量增长将远远的大于 II-VI 材料。

当用于短波红外的碲镉汞技术获益于波长更长的大量军用资源时，由于人们也渐渐的承认 InGaAs 的优点超过其它半导体，基于具有雄厚资金的光电子集成电路 (OEIC) 工业的支持，InGaAs 红外焦平面也获得了快速增长。

1.6 InGaAs 材料的发展和研究现状

目前国际上普遍采用外延方法，在 III-V 衬底材料 (InP 和 GaAs) 上生长 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 外延材料。三元化合物 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 是 III-V 族的赝二元系直接带隙半导体材料，具有闪锌矿立方晶格结构。当 In 的含量 x 从 $x=0$ (纯 GaAs) 至 $x=1$ (纯 InAs) 连续变化时，这种材料的带隙也从 $E_g=1.43\text{eV}$ 至 $E_g=0.35\text{eV}$ 连续变化，对应的截止波长也相应的从 $0.87\mu\text{m}$ 到 $3.5\mu\text{m}$ 连续变化。由于阻挡热生电子-空穴对的势垒较小，在任何给定的温度处，器件的暗电流都随着 E_g 的减小而增加，这为设计人员提供了一个在截止波长和暗电流之间进行折衷的方法，通过选择适当的 In 组分含量，可以为特定的应用优化器件。表 1.6.1 给出了 InP 和 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 的材料参数，从表中可以得到当 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 外延材料的 In 组分为 0.53 时， $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 外延材料和 InP 衬底具有相同的晶格常数，所以一般把 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 外延材料分为晶格匹配材料 ($x=0.53$ 和 InP 衬底) 和晶格失配材料。

然而，上述的折衷方式还存在一个很大的困难，当 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 体系中 In 组分的含量改变时，InGaAs 的晶格常数也发生了变化。图 1.6.1 给出了部分 III-V 化合物及其合金的禁带宽度和晶格常数的关系。由图可知为使 InGaAs 探测器的截止波长向长波方向拓展 ($\lambda_c > 1.7\mu\text{m}$)，就需要增加 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 材料中 In 的组分含量使材料的禁带宽度相应减小，从而使响应波长向长波方向扩展。由 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 三元组分的晶格结构可知，当 In 的含量 $x > 0.53$ 时，外延材料 ($\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$) 与衬底材料 (InP) 的晶格将不再匹配，而且两者之间的晶格失配随 In 含量的增加而增大，这样就会在外延层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 中引入位错，形成很多的缺陷，严重影响材料的性能。为了有效地抑制晶格失配对外延材料性能带来的影响，从而防止探测器性能的劣化，就必须引入合适的缓冲层结构。现在国际上普遍采用的缓冲结构主要有以下三种方案：1) 选用 In 组

分渐变的 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 为缓冲层^{[12][13]}, 2) 选用 In 组分线性变化 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 为缓冲层^{[14][15]}, 3) 选用组分突变的 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 为缓冲层^{[16][17]}。

表 1.6.1 InP、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 、 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 和 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 在 300 K 时的材料参数

Table 1.6.1 Basic parameters of InP, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ and $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ at 300 K

参数	InP	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$
晶格结构	闪锌矿 ⁺	闪锌矿 ⁺	闪锌矿 ⁺	闪锌矿 ⁺
晶格常数(Å)	5.8687	5.8687	5.9773	6.0583-0.405x
禁带宽度(eV)	1.344	0.75	0.51	$0.324+0.7x+0.4x^2$
低频介电常数	12.5	13.9	14.56	$15.1-2.87x+0.67x^2$
高频介电常数	9.61	11.6	12.0	12.3-1.4x
本征载流子浓度(cm^{-3})	1.3×10^7	8.4×10^{11}	8.2×10^{13}	
电子迁移率($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	≤ 5400	≤ 12000	≤ 1992	$40-80.7x+49.2x^2 \times 10^3$
空穴迁移率($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	≤ 200	≤ 300	≤ 269	
有效导带态密度(cm^{-3})	5.7×10^{17}	2.1×10^{17}	1.34×10^{17}	$2.5 \times 10^{19} [0.023+0.037x+0.003x^2]^{3/2}$
有效价带态密度(cm^{-3})	1.1×10^{19}	7.7×10^{18}	6.82×10^{18}	$2.5 \times 10^{19} [0.41+0.1x]^{3/2}$
电子的有效质量(m_0)	0.08	0.041	0.0305	$0.023+0.037x+0.003x^2$
轻空穴有效质量(m_0)	0.089	0.052	0.0372	$0.026+0.056x$
重空穴有效质量(m_0)	0.6	0.45	0.43	$0.41+0.1x$

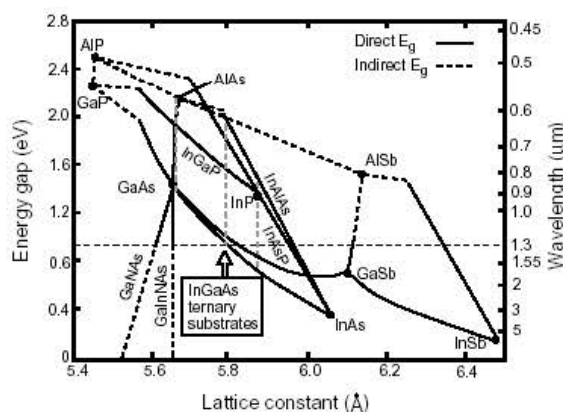


图 1.6.1 部分 III-V 化合物及其合金的禁带宽度和晶格常数的关系

Fig.1.6.1 Lattice parameter vs. energy gap (RT values) for various III-V compounds and their alloys

A.M.Joshi 等人对 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 为缓冲层的外延材料结构进行了详细的研究, 图 1.6.2 为外延材料的结构图, 并提出了四点优化建议^[18]:

- (1) 缓冲层采用组分突变的界面结构
- (2) 每两个相邻近的缓冲层之间的晶格失配控制在 0.13%
- (3) InGaAs 吸收层的掺杂浓度控制在 $1 \sim 5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$
- (4) 材料生长完后进行热循环退火处理, 进一步减小位错。

Joachim John 等人在利用分子束外延 (MBE) 在 GaAs 衬底上生长高 In 组分的 InGaAs 外延材料^[19], 其缓冲层采用了 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 为缓冲层, 有效地抑制了 In 组分 InGaAs 外延层与衬底 (GaAs) 之间 5.5% 的晶格失配。A.Sacedón 等人研究了利用 In 组分线性变化 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$

为缓冲层^[20], 在 GaAs 衬底上生长高 In 组分 InGaAs 外延层。

在国内对高 In 组分 InGaAs 探测器的研究还比较少, 中科院上海微系统所张永刚等, 对在 InP 衬底上利用 MBE 方法生长高 In 组分 InGaAs 材料进行了详细的研究^[21], 他们尝试选用了 In 组分渐变的 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 作为缓冲层和 In 组分线性变化 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 作为缓冲层两种方案, 并得到了具有较高性能的两英寸高 In 组分 InGaAs 外延材料; 中科院长春光机所利用两步生长法在 InP 衬底上利用 MOCVD 也成功的制备了具有一定性能的高 In 组分 InGaAs 外延材料; 中科院上海技术物理研究所对高 In 组分的 InGaAs 探测器器件物理和制备工艺, 进行了详细的研究, 并成功制备出具有较高性能的长线列 (256×1 元、660×1 元) 高 In 组分 InGaAs 探测器芯片。

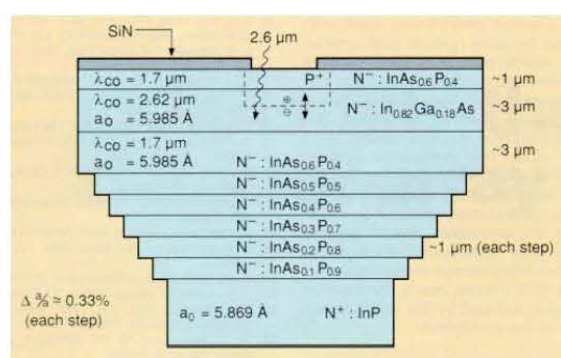


图 1.6.2 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 为缓冲层的外延材料结构

Fig.1.6.2 Schematic cross-section of the extended wavelength InGaAs photodiode with $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ buffer layer

1.7 InGaAs 探测器的发展和研究现状

早期 InGaAs 探测器的研究主要针对于光纤通信系统用的高频器件^[22]。InGaAs 探测器可覆盖石英光纤在 1.31 μm 和 1.55 μm 低损耗和低色散窗口, 由于其良好的性能已普及应用在光纤通信系统中, 在当前的信息时代中发挥着重要作用。随着 InGaAs 材料生长和器件技术的快速进展使得人们已经研制出能响应不同波段、不同结构和不同用途的 InGaAs 阵列探测器。近几年 InGaAs 探测器的主要研究进展表现为如下几点:

1.7.1 大面阵和长线列 InGaAs 焦平面的发展和研究现状

2005 年在 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) MANTIS 项目资助下美国传感无限公司成功研制了, 用于低背景系统用 1280×1024 元和 1024×1024 元 InGaAs 焦平面^[23], 每一像元大小为 20 μm ×20 μm , 它们的优值因子 (RoA) 分别为: 1024×1024 元焦平面在 256K 时, $RoA=1.5\times 10^7\Omega\cdot\text{cm}^2$, 1280×1024 元焦平面在 280K 时, $RoA=8\times 10^6\Omega\cdot\text{cm}^2$; 在 DARPA PCAR 项目的资助下, 2008 年美国波音公司的 Spectrolab 子公司报道了, 他们研制的 1280×1024 元的 InGaAs 焦平面^[24], 图 1.7.1 为探测器单元的结构示意图和使用的两英寸的 InGaAs/InP PIN 外延片。制备的焦平面在 280K、100mV 的偏压下暗电流为 0.7nA/cm², 响应

率大于 $1A/W$ 。2003 年印度发射的资源卫星 (IRS-P6) 的高级广角传感器 (AWiFS) 均采用了 $1024 \sim 6000$ 元 InGaAs 长线列焦平面器件^[25]。

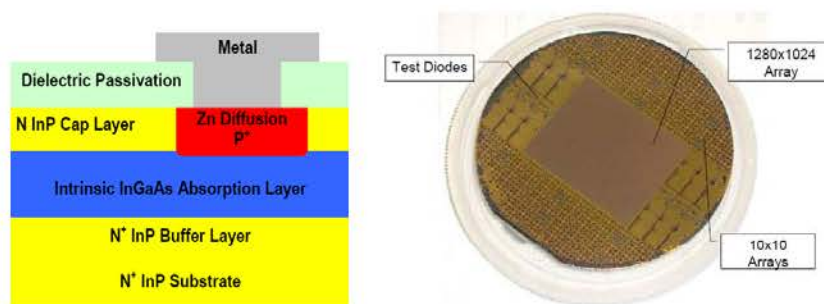


图 1.7.1 波音公司的 InGaAs 焦平面探测器单元的结构示意图和所使用的两英寸的 InGaAs/InP PIN 外延片
Fig.1.7.1 A cross section of the InGaAs/InP PIN and photograph of a processed 2" InGaAs/InP wafer of Boeing Company

1.7.2 波长扩展及多色 InGaAs 焦平面的发展和研究现状

1.7.2.1 向长波方向扩展的 InGaAs 焦平面 (高 In 组分 InGaAs 探测器)

前面 1.6 节对 $In_{1-x}Ga_xAs$ 材料体系进行了详细的介绍, 由此我们可以看出, 为使 InGaAs 探测器的截止波长向长波方向拓展 ($\lambda_c > 1.7\mu m$), 就需要增加 $In_xGa_{1-x}As$ 材料中 In 的组分含量使材料的禁带宽度相应减小, 从而使响应波长向长波方向扩展。对于高 In 组分的 InGaAs 外延材料, 为解决外延层与衬底之间的晶格失配问题人们做了大量的非常有意义的工作, 为高 In 组分 InGaAs 探测器的性能提高起到了决定性的作用。

1991 年 EPITAXX 公司的 G.H.Olsen 等人就成功制备了 512×1 元长线列波长延展至 $2.6\mu m$ 的 $In_{0.82}Ga_{0.18}As$ 探测器焦平面^[26], 使用了利用气相外延 (VPE) 法在 InP 上生长的外延材料, 缓冲层为组分突变的 $InAs_yP_{1-y}$, As 组分在每隔 $1\mu m$ 突变增加 0.1, 单个像元的为 $30\mu m \times 30\mu m$, 在 300K、-5V 偏压下探测器的暗电流为 $8 \times 10^{-8}A$, 探测器率达到了 $1 \times 10^{11}cmHz^{1/2}/W$ 。由他们研制的 1024 元 InGaAs 线列也被用在了欧洲空间局 (ESA) 新一代 ENVISAT 环境卫星上^{[27][28]}, 该卫星于 2002 年 3 月发射, 其核心的部件 SCIAMACHY 光谱仪中, 四个通道分别采用了 1024 元的 InP 基晶格匹配和波长扩展的 InGaAs 线列, 单元尺寸 $25\mu m \times 500\mu m$, 器件分别工作在 200K 和 150K 下, 这是波长扩展 InGaAs 探测器阵列首次在卫星遥感上的应用。2008 年 Judson 公司的 Hery Yuan 等人报道了他们制备的 320×256 元高 In 组分 InGaAs 探测器^[29], 其长波方向的截止波长为 $2.6\mu m$, 外延材料是采用 MOCVD 方法在 InP 衬底上生长的外延材料, 采用了扩散工艺制备的平面结器件, 采用了 4 级热电制冷。

1997 年 A.Krier 和 Y.Mao 报道了非制冷的 InAsSbP/InGaAs 结构的高 In 组分 InGaAs 探测器^[30], 响应波段为 $1.8 \sim 3.4\mu m$, 他们采用了 LPE 方法在 InAs 衬底上依次生长 $P^+ - In_{0.97}Ga_{0.03}As$ 的缓冲层 (厚度为 $15\mu m$)、 $ud - In_{0.97}Ga_{0.03}As$ 吸收层 (厚度为 $4\mu m$) 和 $n^+ - InAs_{0.36}Sb_{0.20}P_{0.44}$ 帽

层（厚度 $2\mu\text{m}$ ）。室温下的探测率为 $1.2 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

1.7.2.2 向短波方向扩展的 InGaAs 焦平面

1983 年 Paul P. Webb 和 G.H.Olsen 报道他们制备的响应波长扩展到可见光的 InGaAs 探测器（Vis-InGaAs 探测器）^[31]，采用了减薄 InP 衬底的方法，帽层 InP 要非常的薄 $\sim 0.1\mu\text{m}$ ，并覆盖了多层 AR coating 层，响应波段： $0.5\mu\text{m} \sim 1.7\mu\text{m}$ 。2008 年 Judson 公司的 Hery Yuan 等人报道了他们制备的 320×256 元 Vis-InGaAs 探测器^[29]，其响应波段为 $0.4\mu\text{m} \sim 1.7\mu\text{m}$ ，外延材料是采用 MOCVD 方法在 InP 衬底上生长的外延材料，采用了扩散工艺制备的平面结器件，衬底被去除。2008 年 P.Esfandiari 等人也报道了他们研制的 Vis-InGaAs 探测器^[32]，响应波段为 $0.4\mu\text{m} \sim 1.6\mu\text{m}$ ，同样采用了去除衬底的办法，图 1.7.2 为他们报道的器件基本制备工艺。

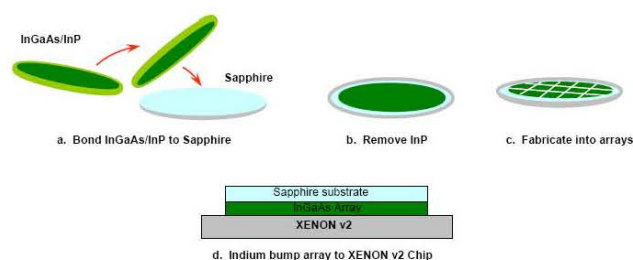


图 1.7.2 Vi-InGaAs 焦平面的基本制备工艺

Fig.1.7.2 Epitaxial transfer of InGaAs to sapphire substrate for VIS-NIR FPAs

1.7.2.3 多色焦平面

InGaAs 多色红外焦平面的应用在国外起步较早，欧洲环境卫星的大气分布扫描成像吸收光谱仪 (SCIAMACHY)（2002 年 3 月发射），其中 6、7、8 三个通道分别应用了三个独立的 InGaAs 探测器，其响应波段分别为： $1 \sim 1.75\mu\text{m}$ 、 $1.94 \sim 2.04\mu\text{m}$ 、 $2.265 \sim 2.380\mu\text{m}$ 三个波段，用于对 H_2O 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 和 N_2O 的探测。其缺点是它们为三个独立的焦平面，在所占体积、重量及系统的复杂程度上没有任何的优势。因此国外已展开对 InGaAs 集成多色焦平面的研究，2005 年 DARPA（Defense Advanced Research Projects Agency）为美国传感无限公司投资 4500 万美元，用于研制超低噪声（室温下暗电流密度 $< 2\text{nA}/\text{cm}^2$ ）的 1280×1024 元的 InGaAs 双色成像焦平面（已在 NASA 网站上展示出来，单元大小为 $12.5\mu\text{m} \times 12.5\mu\text{m}$ ）。InGaAs 双色焦平面可在无月光照射的情况下识别 450 米外的目标（图 1.7.3）；传感无限公司的 Gregory H.Olsen 等人已经研制出了 $1.0 \sim 2.5\mu\text{m}$ InGaAs 集成三色近红外探测器，响应波长分别截止到 $1.65\mu\text{m}$ 、 $2.07\mu\text{m}$ 、 $2.64\mu\text{m}$ 。2007 年，DARPA 又与该公司续约，资助其继续研究用于成像夜视系统的 InGaAs 焦平面阵列。另外，硅基和 GaAs 基 InGaAs 焦平面阵列的研究也取得了引人注目的成果。随着国内空间遥感领域的发展，对红外探测器的性能要求越来越高，国内开始注意并发展用于空间遥感领域的 InGaAs 红外焦平面，但 InGaAs 集成双色探测器的研制

在国内还尚属空白。



图 1.7.3 传感无限公司研制的 InGaAs 双波段焦平面的成像效果（无月光、距离 450 米）
Fig.1.7.3 The image capture on a dark (moonless night) using the VIS-NIR InGaAs FPAs at distances of approximately 450m

1.7.3 InGaAs 雪崩（APD）二极管探测器

雪崩探测器由于其很高的信噪比，可以进行单光子探测和三维探测等优点，InGaAs APD 也得到良好的发展。APD 结构的 InGaAs 光电探测器目前的性能指标已经达到较高水平，并且在光通讯领域得到了广泛应用，但由于其工作偏置电压较高，暗电流较大，为制备成集成焦平面探测器一直存在着一些困难。美国传感无限公司 Martin H. Ettenberg 报道了 128×128 元的 InGaAs APD 焦平面。图 1.7.4 为 InGaAs 探测器的结构示意图和原理图。

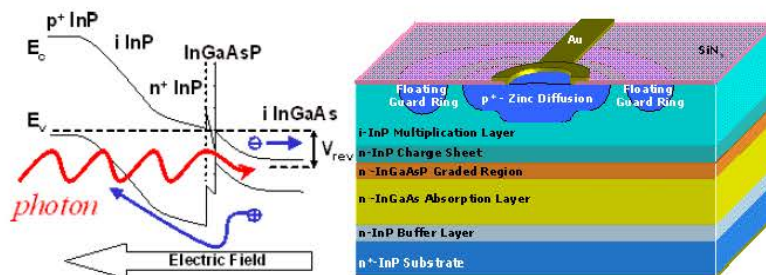


图 1.7.4 InGaAs (APD) 探测器的原理图和结构示意图
Fig.1.7.4 Energy band diagram of the device under reverse bias conditions and schematic cross-section of a planar InGaAs/InP APD

1.7.4 InGaAs 量子阱及量子点探测器的发展和研究现状

利用量子阱内的子带间跃迁进行红外探测概念的提出至今已有 20 多年的时间^[33]。随着材料外延技术的发展和人们对量子阱红外探测器 (QWIPs: quantum well infrared photodetectors) 器件物理的不断深入，近年来中远红外 QWIP 得到了迅猛发展。目前用 QWIP 制成的阵列器件部分性能参数甚至已超过了非常成熟的 HgCdTe 探测器，并开始逐渐应用于各种红外成像系统中，成为 HgCdTe 探测器强有力的竞争对手。

QWIP 是一种基于量子阱内子带间光吸收跃迁的红外探测器，工作波长通常在中红外和远红外波段。与普通的半导体探测器不同，QWIP 是一种单极型器件，其工作波长与材料的禁带

宽度无关, 而主要取决于势垒高度和量子阱的宽度。因此只要势垒能够提供足够的限制作用, 就可通过调整量子阱的阱宽实现不同波长的红外辐射探测。相比于HgCdTe等体材料, 采用 III-V 族半导体的QWIP具有均匀性良好, 成本低, 抗辐照, $1/f$ 噪声低, 波长可调整, 可实现多色探测等优点, 易于实现阵列化等优点。

1993 年美国 Bell 实验室的 C.G.Bethea 等人研制的 GaAs/AlGaAs 基 $8\text{-}14\mu\text{m}$ 128×128 元 QWIP 面阵, 60K 下 NEDT 小于 10mK , 探测率 $4.2\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}^{[34]}$ 。1997年NASA空气动力实验室的S.D.Gunapala等人采用束缚到准束缚态配置制成的截止波长 $15\mu\text{m}$ 的 128×128 面阵, 45K 下NEDT为 30mK , 55K 下探测率约 $1.6\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}^{[35]}$; $9\mu\text{m}$ 的 256×256 面阵, 70K 下NEDT为 $26\text{mK}^{[36]}$ 。1998 年, 他们又研制出了 640×486 的焦平面阵列, 77K 下峰值探测率达 $10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}^{[37]}$ 。2007年有多个小组相继对QWIP阵列研究成果进行报道, NASA空气动力实验室的S.D.Gunapala小组研制的中红外和远红外 1024×1024 QWIP FPA 器件具有良好的均匀性。前者 95K 下NEDT为 17mK , 后者 70K 下NEDT仅 $13\text{mK}^{[38]}$ 。土耳其的S.Ozer等人报道了 640×512 的InGaAs/InAlAs 中红外QWIP 面阵, 105K 下NEDT 达 $23\text{mK}^{[39]}$, 和 640×512 、截止波长 $9\mu\text{m}$ 的InGaAsP/InP QWIP面阵, 66K 下NETD达 46mK , 响应度大于 $1\text{A}/\text{W}^{[40]}$ 。NASA戈达德空间飞行中心的M.Jhabvala等人报道的 $8\text{-}12\mu\text{m}$ 采用波纹耦合的 1024×1024 GaAs/AlGaAs QWIP 焦平面阵可工作在 70K 左右, NETD约 $23\text{mK}^{[41]}$ 。

将量子点应用于光电器件的概念最早由东京大学的Y.Arakawa提出^[42]。由于量子点的三维尺寸与电子德布罗意波长可比拟, 因而对其中的载流子具有强的三维限制效应。由量子理论可知, 三维限制导致载流子能量的增加, 同时其体相的连续能级也会变成类似原子的分裂能级。量子点尺寸越小, 分裂的能级间距就越大。此外, 不同形状的量子点限制势不同, 也会对量子点的态密度和电子能级产生影响。

与量子阱探测器一样, QDIP 也是依靠光激发的子带间跃迁将基态电子激发到激发态或者连续态, 在外加电场下光电导增益产生光电流^[43]。由于量子点很薄, 因而为了提高光响应, 通常QDIP 中采用外延多层的量子点结构 ($10\sim 30$ 层)。QDIP 的暗电流主要由热激发电流、热辅助隧穿电流和隧穿电流三部分构成, 随着温度和外加偏压的增大, 器件的暗电流呈指数增加。

由于量子点的制备困难, 量子点光电器件很长时间上一一直停留在理论阶段。随着MBE 和MOCVD 等外延技术的进步, QDIP 近些年才得以快速发展。1996 年V.Ryzhii对QDIP 基本理论进行了研究, 预言了QDIP 的优越性^[44]。1997 年普林斯顿大学的K.W.Berryman 等人首次在实验上观察到量子点的光电导效应^[45], 随后世界上许多小组纷纷投入了QDIP 的研究,

器件的性能和工作温度逐步提高, 波长也不断扩展。如 1999 年日本东京大学的 S.W.Lee 设计的 Bound-to-Continuum 结构, 通过在有源区中引入调制掺杂的异质结构, 成功将 GaAs 基的 InAs 量子点探测器的响应度增大到 4.7A/W , 最高工作温度达 190K ^[46]。2001 年台湾国立大学的 S.F.Tang 等人在 InAs 量子点层上下分别加入 50nm 厚的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 势垒做为暗电流阻挡层, 器件 250K 下峰值探测器达到 $2.4 \times 10^8 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ^[47]。2003 年佛罗里达大学的 L.Jiang 等人通过加厚的 $\text{In}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ 量子点两侧的 GaAs 隔层 (60nm), 也有效抑制了器件的暗电流, 使得器件 260K 下仍能观察到光响应, 77K 下器件的响应度 0.22A/W , 峰值探测率也达到 $1.1 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ^[48]。2004 年南加州大学的 E.T.Kim 等人采用更小的 InAs 量子点和 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 帽层, 78K 下峰值探测率达到了 $3 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ^[49]。2005 年密歇根大学的 P.Bhattacharya 等人设计了一种双势垒阻挡层, 利用共振隧穿使光电流通过而将暗电流阻挡, 从而消除了单势垒结构阻挡暗电流同时降低了器件光响应的缺点, 将该结构用在 InGaAs QD 制成的隧穿量子点探测器 (T-QDIP) 300K 时暗电流密度仅 $1.55\text{A}/\text{cm}^2$, 280K 下器件的响应度 0.16A/W , 探测率达 $1.5 \times 10^7 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ^[50]。2007 年, 美国西北大学的 H.Lim 等人研制的 InP 基 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 阱中 InAs 量子点结构 (DWELL: 阱的插入有效的降低了量子点中基态能级, 因而该结构具有较小的热电离发射几率, 具有较小的暗电流^[51]) 结合调制掺杂技术, 120K 时峰值探测率达 $2.8 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 量子效率达 35% , 由于较低的暗电流和高的光响应, 器件在室温下仍有非常好的性能, 峰值探测率达 $6.7 \times 10^7 \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ^[52], 代表了 InP 基 QDIP 的最高水平。

1.7.5 InGaAs CCD 器件

晶格匹配的 InGaAs CCD 器件也已经有一些报道。对两种结构进行了调研。第一种是异质结构 CCD, 这是作为 InAlAs/InGaAs/InP 埋沟器件而制成的^[53]。第二种是二维电子气 (2DEG) InAlAs/InGaAs/InP 结构^[54]。这两种结构都呈现出比上述一些二极管列阵结构高的多的暗电流。所报道的异质结构 CCD 的传递效率在 13MHz 和 1GHz 频率处为 0.98 , 在 26MHz 处, 二维电子气 CCD 具有 0.995 的较高传递效率。较低的传递效率和高的暗电流表明 InGaAs CCD 技术仍处于萌芽状态。

1.8 航空遥感用 InGaAs 探测器焦平面的发展和研究现状

光通信用探测器的研究主要侧重器件的响应速度, 因此在对传统的 PIN 型结构优化的基础上, 相应发展出了如波导型 PIN 探测器、MSM 结构、APD、WG-APD、RCE-PIN 及 RCE-APD 等结构。而空间遥感及成像用的 InGaAs 探测器, 则更侧重于低噪声和高灵敏度特性的要求。因而降低器件暗电流, 提高器件的量子效率, 便成为研究的首要任务。

表 1.8.1 近年各国发射的搭载有 InGaAs 探测器的部分卫星及其参数

Table 1.8.1 Parameters of InGaAs Infrared Detectors on Satellites in recent years

国家	卫星	发射日期	载荷	通道号	波段(μm)	个数	元数	光敏面尺寸(μm)	工作温度(K)	制冷方式
印度	IRS-1C (资源卫星)	1997 9/29	LISS-3		1.55~1.70	1	2100	30		
法国	SPOT 4 (资源环境)	1998		1	1.55~1.70	1	3000	30 *30	273	
美国	EO1(ALI) (对地观测)	2000 12/21	LAC		0.89~1.60	3	256 *256		275	TE
俄罗斯	Meteor-3 M1(气象卫星)	2001 12/10	SAG -III	9	1.55 ± 0.015	1	1		300	TE
ESA	Envisat 1 (资源环境)	2002 03/01	SCIAM ACHY	6	1.0~1.75	1	1024	500 *25	200	Radi ative
				7	1.94~2.04	1			135	
				8	2.265~2.380	1			135	
法国	SPOT 5 (资源环境)	2002 05/04	Veget- ation	SWIR	1.58~1.75	1	3000	26		
				HRG	SWIR	1.58~1.75			1	
日本	ADEOS- II(对地 观测)	2002 12/14	GLI	SWIR	1.05~?	1	4*?		200	TE
					?~2.215	1	2*?			
ESA	Mars Express (MEX)	2003 06/02	SPIC AM	SIR	1.1~1.7	1	1		注: 火星探测	
ESA	SMART 1 (Moon)	2003 09/27	SIR		0.94~2.4		256 *256			
印度	IRS P6 (资源环境)	2003 10/17	LISS-3	B5	1.55~1.70	1	6000	13		
				AWiFS	B5	1.55~1.70	2	6000	13	
美国	MESSEN GER(Dis covery 8)	2004 08/03	MAS CS	VIRS	0.95~1.45	1	256		注: 水星探测	
美国	NOAA-18 (气象卫星)	2005 05/20	AVH RR-3	3a	1.58~1.64				300	
ESA	Venus Express (VEX)	2005 11/09	SPIC AV	SIR	0.25~1.7 Si/InGaAs	1	1	2400	注: 金星探测	
ESA	MSG-2 (气象卫星)	2005 12/21	SEVIRI	3	1.50~1.78	1	3			

国际上最早进行空间遥感用 InGaAs 探测器阵列研究的是法国 THOMSON 公司和美国 EPITAXX 公司。上世纪 80 年代中期, 法国 THOMSON 公司研制的 3000 元 InGaAs 线列(采用 10 个 300 元线列拼接而成)就被用在了 SPOT4 和 SPOT5 卫星上, 其地面分辨率达到 20 米^[55]。前面已经提到过的美国 EPITAXX 公司研制的 1024 元 InGaAs 线列也被用在了欧洲空间局(ESA)新一代 ENVISAT 环境卫星上^{[27][28]}, 其核心的部件 SCIAMACHY 光谱仪中, 四个通道分别采用了 1024 元的 InP 基晶格匹配和波长扩展的 InGaAs 线列, 单元尺寸 $25\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$, 器件分别工作在 200K 和 150K 下, 这是波长扩展 InGaAs 探测器阵列首次在卫星遥感上的应用。2000 年 11 月美国 NASA 发射的 EO-1 环境观测卫星, 其核心部件 LAC 上装有 3 个 256×256

元 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 光伏探测器面阵，像元尺寸为 $40\mu\text{m}$ ，工作波段 $0.9\text{-}1.6\mu\text{m}$ 。日本 2007 年发射的 SELENE 月球观测卫星，其上装有非制冷的 320×240 元的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 面阵，像元面积 $40\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}$ 。此外还有 NASA 的冰雪探测环境卫星 POSE、大气层检测卫星 TIMED；ESA 的 SMOS 科学卫星、SMART-1 卫星、MSG(Meteosat)系列卫星；印度的 INSAT 系列多用途卫星；俄罗斯的 Meteor-3M 系列气象卫星；加拿大的 CanX-2 卫星等。表 1.8.1 列出了近年各国发射的搭载有 InGaAs 探测器的部分卫星载荷及其参数。

1.9 InGaAs 焦平面面临的问题和发展趋势

显然，InGaAs 探测器技术的发展对应用于可见、近红外和短波红外探测器仪器的实现和微型化具有很大的影响。并在通讯、空间遥感等领域表现出了很大优势。但是 InGaAs 探测器也存在着一些问题，如欧空局环境卫星 (SCIAMACHY) 上的高 In 组分 InGaAs 线列探测器每年大约有 50 个像元失效^[50]，图 1.9.1 为 SCIAMACHY 上的高 In 组分 InGaAs 探测器的随着时间的失效演化。因此对于高 In 组分的 InGaAs 探测器的稳定性、抗辐照等特性还需要进一步的研究。当然，高 In 组分的 InGaAs 探测器列阵的发展和性能的提高，还主要取决于如何在高 In 组分材料的生长过程中控制由晶格失配引起的缺陷。虽然原理上 III-V 材料的生长要比 II-VI 三元材料的生长容易控制，但在 InP 和 GaAs 等衬底上外延生长高 In 组分 InGaAs 材料仍未达到像 $1.7\mu\text{m}$ 晶格匹配的 InGaAs 材料那样成熟。

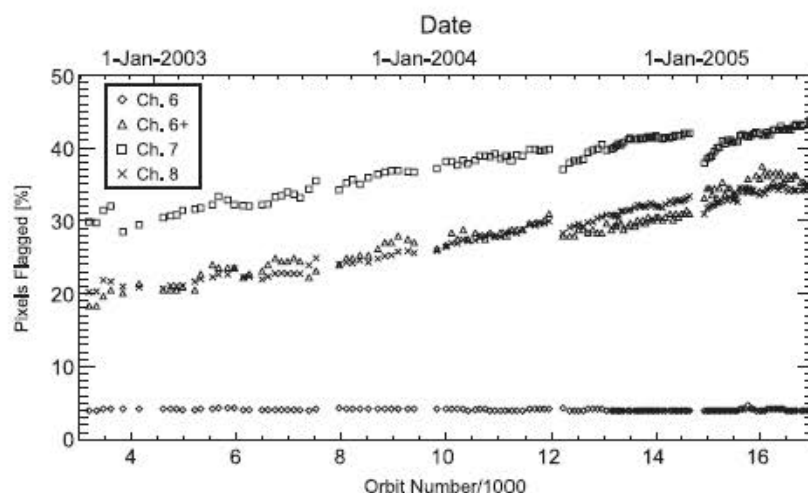


图 1.9.1 SCIAMACHY 上的高 In 组分 InGaAs 探测器的失效演化

Fig. 1.9.1 Evolution of the number of dead pixels for the InGaAs FPA's of SCIAMACHY's channels 6~8 (extended-wavelength InGaAs detectors)

在器件的制备工艺上，仍然有一些问题急需解决，如对于台面型器件，台面的无损的台面成型工艺，台面侧面的钝化以及光敏面上的增透膜的设计；对于平面结工艺，小光敏元、小间距的线列或面阵器件的扩散控制，光敏元之间的串音问题等。特别是对于晶格失配的高 In 组分器件单项工艺的优化就更显得重要和困难。

虽然晶格匹配的 $1.7\mu\text{m}$ InGaAs 探测器列阵可以被看作是一门成熟的技术，但它们目前需

要同硅读出电路混成起来才能作为焦平面投入应用。目前混成读出电路的噪声对焦平面性能的提高也起到了一定的限制, 以及采用 In 丘焊接也迫使焦平面只能采用背照方式。

总之, InGaAs探测器较其它类型的探测器在短波红外波段具有明显的优势, 但同时也存在一些问题。当今世界各个国家和研究机构在InGaAs探测器方面的最新研究动态主要集中在四个方面: 1) 继续提高器件性能, 向更大规模焦平面面阵和长线列发展; 2) 对高In组分InGaAs材料和探测器的进一步研究, 使InGaAs焦平面向长波方向扩展($1.0\mu\text{m}\sim 2.4\mu\text{m}$ 、 $2.6\mu\text{m}$ 、 $2.8\mu\text{m}$); 3) 将光谱响应范围向可见光扩展, 以求得到可同时响应可见($0.4\mu\text{m}\sim 0.75\mu\text{m}$)和近红外($0.75\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$)光谱范围的InGaAs焦平面探测器; 4) InGaAs量子阱、量子点和APD器件的发展。

1.10 本论文的研究背景、目的及主要内容

通过对红外探测技术和红外焦平面技术的回顾和发展现状的介绍, 可以看到当前红外探测技术正在高速发展, 并具备广阔的应用前景。发展红外探测技术, 关系到一个国家的国计民生。由于短波红外波段具有许多独特的特性和应用, 因而研究和下一代空间遥感用短波红外探测器阵列便显得尤为迫切和重要。

工作在短波红外波段的InGaAs探测器具有灵敏度高、暗电流低、响应速度快和可室温或近室温工作等优点, 以及InGaAs材料成熟的外延生长技术和良好的性能, 使得InGaAs探测器成为小型化、低成本和高可靠性的短波红外探测系统的最佳选择。目前国际上, 西方和欧洲等发达国家由InGaAs红外焦平面制成的各种红外光谱仪已逐渐应用于遥感卫星上。

当前国内空间遥感用的短波焦平面阵列虽然仍主要为HgCdTe器件, 最近几年国内也开始高度重视空间遥感用InGaAs探测器的研究和发展。其中, 中国科学院上海技术物理研究所、中科院上海微系统与信息技术研究所等对空间遥感用InGaAs探测器进行了大量的基础性的研究, 并取得了一定的研究成果。上海技术物理研究所所制备的, 响应波段在 $0.9\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$ 的InGaAs探测器焦平面已经取得了较高性能。目前国内空间遥感用高In组分的InGaAs长线列探测器(波长扩展的InGaAs长线列探测器)还属空白。因此, 为满足我国下一代空间遥感用短波红外探测器阵列的迫切需求, 上海技术物理研究所对空间遥感用高In组分的InGaAs长线列探测器进行了研究探索。

本论文结合实验室研究课题, 针对空间遥感用高In组分InGaAs光伏探测器(波长扩展到 $2.4\mu\text{m}$)及其线列焦平面的器件物理及关键工艺等开展了深入的研究, 主要工作包括以下几个方面: 一、对高In组分InGaAs外延材料进行了一系列的表征; 二、重点研究了台面成型、钝化层的优化以及欧姆接触电极等关键工艺; 三、对原型器件、焦平面进行室温和制冷环境下

的性能测试分析，为材料和器件制备工艺的优化提供依据；四、通过设计和制备的一系列测试结构对高In组分InGaAs探测器的各种器件物理机制进行了分析研究，为器件的版图设计、性能分析以及性能优化提供了有益的参考。

第二章 高 In 组分 InGaAs 外延材料的基本表征

本章简要地介绍了我们制备器件所采用的高 In 组分 InGaAs 外延材料 ($\lambda_c=2.4\mu\text{m}$)。通过扫描电镜、XRD、原子力显微镜等分析手段, 对外延材料进行了基本表征, 对材料的筛选提供有益的依据, 为下一步器件的制备提供参考。外延材料主要是由合作单位中科院上海微系统与信息技术研究所提供的利用气态源分子束外延生长技术 (GSMBE) 生长的原位掺杂的台面结外延材料, 和由中科院长春光学精密机械与物理研究所提供的利用金属有机化合物化学气相淀积(MOCVD)方法生长的平面结外延材料。

2.1 引言

第一章 1.6 节简要介绍了 InGaAs 外延材料及其发展现状。直接带隙的三元化合物 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 是 III-V 族的 II 元系半导体材料, 其能带结构如图 2.1.1 所示^{[57][58]}。如图 1.6.1 所示, $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 可由 InAs 与 GaAs 以任何配比形成, 其禁带宽度可在 InAs 的 0.35 eV 与 GaAs 的 1.43 eV 之间变化, 对应的截止波长分别为 $3.5\mu\text{m}$ 和 $0.87\mu\text{m}$, 很好的覆盖了 $1\sim 3\mu\text{m}$ 的大气窗口; 其晶格常数随 In 组分的增大而逐渐增大, 从 GaAs 的 5.6533Å 变化到 InAs 的 6.0583Å 。本章所表征的外延材料, 主要集中在采用 MBE 和 MOCVD 技术生长的 In 组分为 0.8 的高 In 组分外延材料 ($\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, $\lambda_c=2.4\mu\text{m}$), 其衬底均采用 InP 材料。

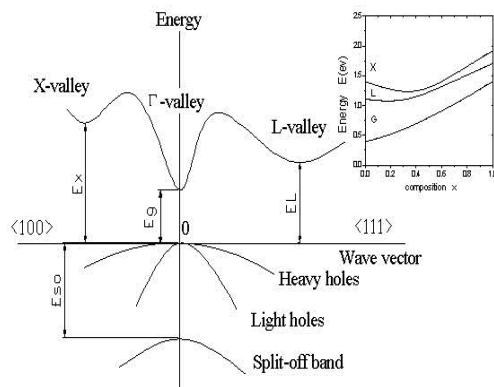


图 2.1.1 InGaAs 能带结构及 X、L、 Γ 随组分 x 变化关系
Fig.2.1.1 Band structure of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ and variation of X, L and Γ conduction band with composition

在 InP 衬底上生长高 In 组分的 InGaAs 外延材料, 其外延层和衬底之间的晶格失配可以从 Vegard 定律得出^[59], 对于 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 四元体系合金有:

$$a(x, y) = xy a_{\text{GaAs}} + x(1-y) a_{\text{GaP}} + (1-x)y a_{\text{InAs}} + (1-x)(1-y) a_{\text{InP}}$$

其中: $a_{\text{GaAs}} = 0.56536\text{nm}$, $a_{\text{GaP}} = 0.54512\text{nm}$, $a_{\text{InAs}} = 0.60590\text{nm}$, $a_{\text{InP}} = 0.58696\text{nm}$ 。

当 $x=0.2$ 时, $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 的晶格常数为: $a_0 = 0.59773\text{nm}$, 外延材料 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 与衬底 (InP) 之间的晶格失配为:

$$(a_{\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}} - a_{\text{InP}}) / a_{\text{InP}} = 1.83\%$$

$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 的禁带宽度为^{[27][28]}:

$$E_g = E_{g\text{GaAs}} - \frac{\alpha_{\text{GaAs}} T^2}{T + \beta_{\text{GaAs}}} + \left(E_{g\text{InAs}} - \frac{\alpha_{\text{InAs}} T^2}{T + \beta_{\text{InAs}}} - E_{g\text{GaAs}} + \frac{\alpha_{\text{GaAs}} T^2}{T + \beta_{\text{GaAs}}} \right) x - 0.475x(1-x)$$

其中: $E_{g\text{GaAs}} = 1.512\text{eV}$, $E_{g\text{InAs}} = 0.42\text{eV}$, $E_{g\text{InP}} = 1.35\text{eV}$, $\alpha_{\text{GaAs}} = 5.1 \times 10^{-4}\text{eV/K}$, $\alpha_{\text{InAs}} = 2.7 \times 10^{-4}\text{eV/K}$,
 $\beta_{\text{GaAs}} = 190\text{K}$, $\beta_{\text{InAs}} = 83\text{K}$ 。

当 $x = 0.2$ 时, $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 的禁带宽度为 $E_g = 0.51\text{eV}$

2.2 材料表面形貌的表征

2.2.1 材料的外延结构和表面形貌

原位掺杂的台面结外延材料,是在半绝缘S.I(001)InP衬底上采用MBE生长的 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 外延材料。表2.2.1和表2.2.2为材料的外延结构示意图,在InP半绝缘衬底上依次生长缓冲层、吸收层和帽层。其中缓冲层和帽层有两种外延结构,一种是组分渐变的 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 为缓冲层和 $\text{p}^+\text{-In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 为帽层,另一种是组分渐变的 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 为缓冲层和 $\text{p}^+\text{-In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 为帽层。两种材料的具体参数见表2.2.1和表2.2.2。

表2.2.1 InGaAs为缓冲层和帽层的外延材料参数

Table 2.2.1 The parameter of epitaxial material with InGaAs capping and grading buffer layer

外延结构	导电类型	掺杂物质及浓度 (cm^{-3})	外延层厚度 (μm)
$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ Capping layer	P^+	Be $\geq 2 \times 10^{18}$	0.55
$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ Absorption layer	n^-	Si $1, 3, 6 \times 10^{14}$	2.1
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ Grading buffer layer	n^+	Si $\geq 2 \times 10^{18}$	~3.0
InP Buffer layer	n^+	Si $\geq 2 \times 10^{18}$	0.5
InP Substrate	S.I	Fe $> 1 \times 10^7$	350 ± 20

表2.2.2 InAlAs为缓冲层和帽层的外延材料参数

Table 2.2.2 The parameter of epitaxial material with InAlAs capping and grading buffer layer

外延结构	导电类型	掺杂物质及浓度 (cm^{-3})	外延层厚度 (μm)
$\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ Capping layer	P^+	Be $\geq 2 \times 10^{18}$	0.6
$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ Absorption layer	n^-	Si $3, 5 \times 10^{14}$	1.5, 2.0
$\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ Grading buffer layer	n^+	Si $\geq 2 \times 10^{18}$	1.35~1.4
InP Substrate	S.I	Fe $> 1 \times 10^7$	350 ± 20

图 2.2.1 为原位掺杂台面结材料的光学显微镜表面照片(放大 50 倍),表面表现为明显的格纹状形貌,这是由于外延材料层与衬底材料之间的晶格失配引起的。

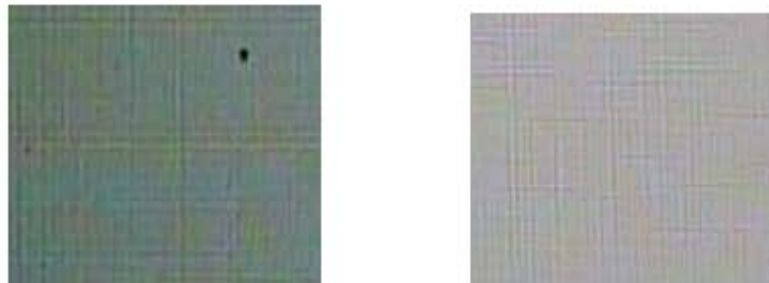


图2.2.1 台面型外延材料的光学显微镜照片

(左边为InGaAs为帽层和缓冲层的外延材料,右边为InAlAs为帽层和缓冲层的外延材料)

Fig 2.2.1 Photographs of mesa type epitaxial material with InGaAs(left) and InAlAs(right) capping and grading buffer layer

InGaAs 平面型外延材料的结构如图 2.2.2 所示, InP/In_{0.8}Ga_{0.2}As/InP NIN 结构是采用 MOCVD 技术在导电型 InP 衬底上外延生长的高 In 组分 InGaAs。平面型外延材料也有两种外延结构:一种是采用两步生长法,首先低温生长一层厚度为 2.8~3.2μm n⁻In_{0.8}Ga_{0.2}As 缓冲层,再高温生长吸收层,帽层采用 InP,另一种平面型材料是采用 InAsP 为缓冲层和帽层。

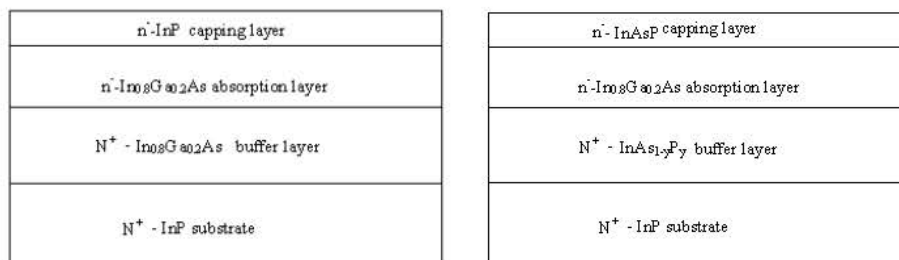


图2.2.2 平面型外延材料的结构示意图(左边为InGaAs为缓冲层、InP为帽层的外延材料,右边InAsP为帽层和缓冲层的外延材料)

Fig. 2.2.2 Schematic diagram of plane type epitaxial material with InGaAs (left) and InAsP (right) buffer layer



图2.2.3平面型外延材料的光学显微镜照片(左边为InGaAs为缓冲层、InP为帽层的外延材料,右边InAsP为帽层和缓冲层的外延材料)

Fig. 2.2.3 Photographs of plane type epitaxial material with InGaAs (left) and InAsP (right) buffer layer

平面结材料的显微镜表面照片(放大 50 倍),表面主要表现为明显的凹凸不平以及很弱的方格状形貌,这与采用 MBE 方法生长的台面型材料表现出了不同的表面形貌,后面的原子力显微镜将给出两者具体的粗糙度。

2.2.2 材料表面和侧面的扫描电镜表征

反射式光学显微镜虽然可以直接观察大块样品,但分辨本领、放大倍数、景深都比较低。扫描电子显微镜弥补了它的不足,是进行样品表面分析和研究的有效工具,尤其适用于比较粗糙的表面和显微组织的断面形态观察和研究。

在扫描电子显微镜中,由电子枪发射并经过聚集的电子束在样品表面作二维扫描,收集样品表面产生的二次电子或者被散射电子,其强度随样品表面特征而变,于是样品表面不同的特征按照顺序成比例地被转换为视频信号。高能电子与固体样品相互作用产生的物理信号,经过监测放大后皆可作为调制信号,在荧屏上获得能反映样品各种特征的扫描图像。

两种台面结材料的表面和侧面的扫描电镜照片如图 2.2.4 和图 2.2.5,可以看到两种材料均表现为格状规律凹凸不平的表面形貌,但采用宽禁带的 InAlAs 为缓冲层和帽层的材料要比

InGaAs 为缓冲层和帽层的外延材料的表面形貌更为平整，由位错造成的方格状形貌明显减弱；两种材料侧面 ((011) 面) 的扫描电镜图都可以明显的分辨出 PIN 多层外延结构，其中宽禁带的 InAlAs 为缓冲层和帽层的材料要比 InGaAs 为缓冲层和帽层的外延材料，各层之间的界面更加整齐，说明各外延层更加的整齐和均匀。

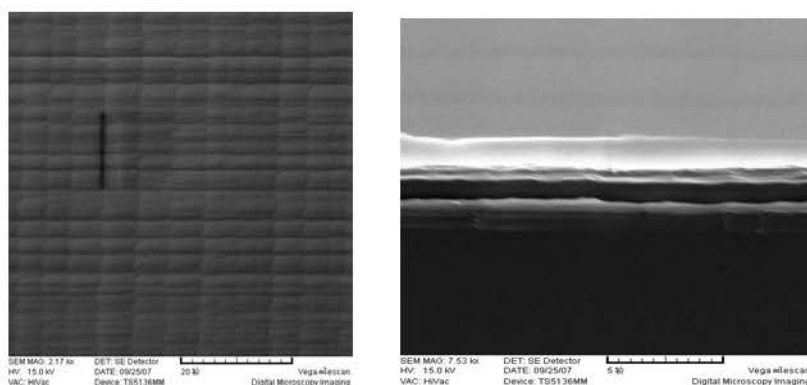


图 2.2.4 InGaAs 为缓冲层和帽层的外延材料的扫描电镜照片
(左侧为正面、右侧为侧面)

Fig.2.2.4 SEM micrographs of mesa type epitaxial material with InGaAs buffer layer
(left: top, right: sidewall)

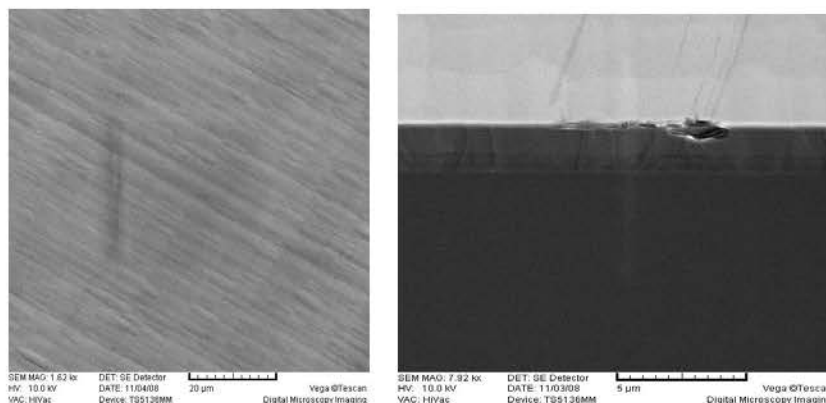


图 2.2.5 InAlAs 为缓冲层和帽层的外延材料的扫描电镜照片
(左侧为正面、右侧为侧面)

Fig.2.2.5 SEM micrographs of mesa type epitaxial material with InAlAs buffer layer
(left: top, right: sidewall)

图 2.2.6 和图 2.2.7 分别为两种平面结材料的表面和侧面的扫描电镜照片，两者所表现出的表面形貌明显不同，InAsP 为缓冲层的外延材料表现为龟裂状的形貌，其表面这些明显的龟裂对器件的制备以及性能将带来致命的影响。采用两步高低温生长法外延生长的 InGaAs 为缓冲层的外延材料表现出凹凸不平的表面形貌。从两种材料侧面的扫描电镜照片可以看到两者的衬底、缓存层、吸收层和帽层的分解面均不明显，没有表现出外延材料的多层结构。

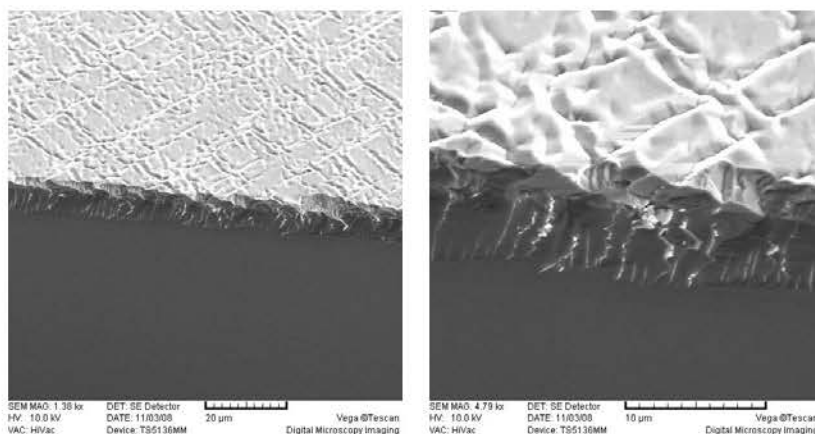


图 2.2.6 InAsP 为缓冲层和帽层的平面型外延材料的扫描电镜照片
(左侧为正面、右侧为侧面)

Fig.2.2.6 SEM micrographs of plane type epitaxial material with InAsP buffer layer
(left: top, right: sidewall)

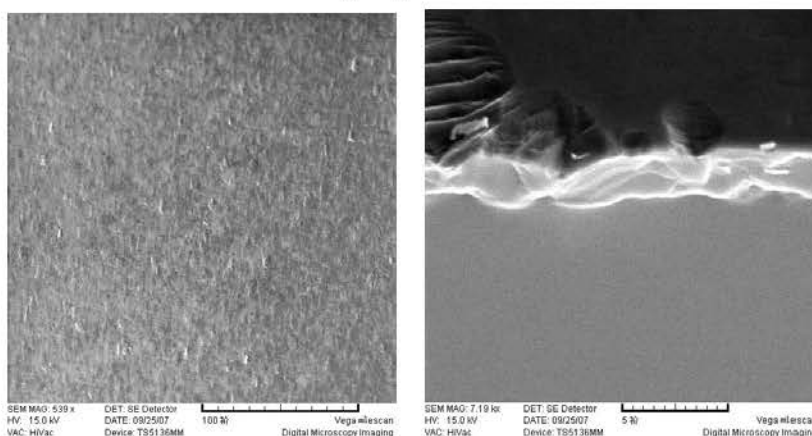


图 2.2.7 InGaAs 为缓冲层 / InP 为帽层的平面型外延材料的扫描电镜照片
(左侧为正面、右侧为侧面)

Fig.2.2.7 SEM micrographs of plane type epitaxial material with InGaAs buffer layer and InP capping layer
(left: top, right: sidewall)

2.2.3 材料的原子力显微镜表征

对台面型和平面型外延材料样品同时进行了原子力显微镜的测试，对样品的表面粗糙度进行评价。图 2.2.8 为台面型外延材料的表面 AFM 照片，其粗糙度小于 12nm。图 2.2.9 为两种平面型外延材料的表面 AFM 照片，其中采用 InGaAs 为缓冲层的外延材料的粗糙度大于 13nm，而采用 InAsP 为缓冲层的外延材料的粗糙度大于 100nm。从两类外延材料的 AFM 照片上可以看出，采用 MBE 生长的原位掺杂的台面型外延材料的表面粗糙度，要比采用 MOCVD 生长的平面型外延材料的表面粗糙度小。

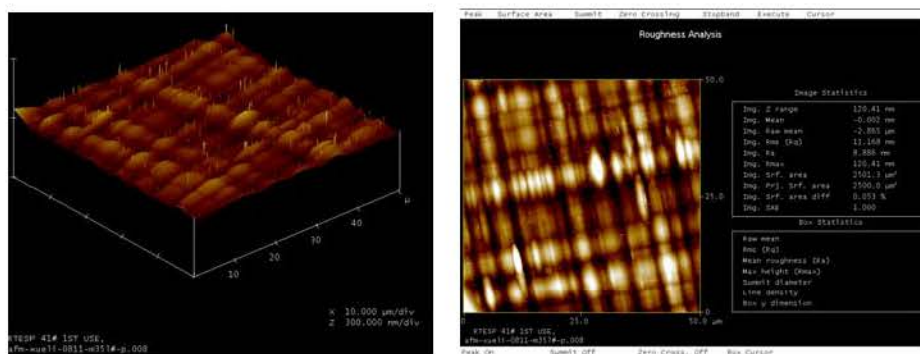


图 2.2.8 InAlAs 为缓冲层及帽层的台面型外延材料的原子力显微镜照片
Fig.2.2.8 AFM micrographs of mesa type epitaxial material with InAlAs buffer layer

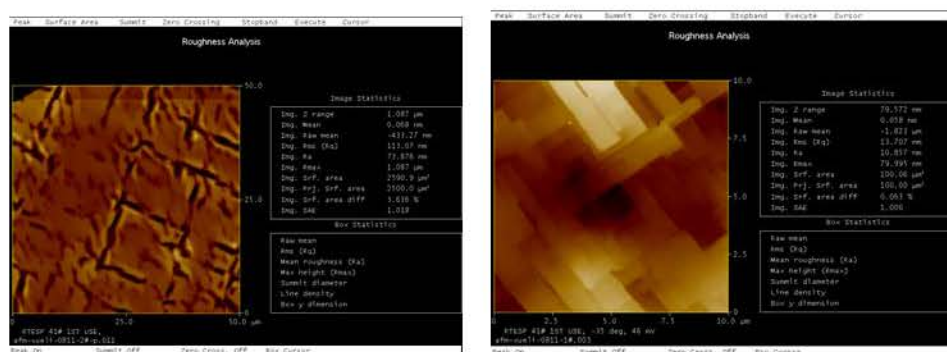


图 2.2.9 平面型外延材料的原子力显微镜照片
(右侧为 InGaAs 缓冲层、左侧为 InAsP 为缓冲层)
Fig.2.2.9 AFM micrographs of plane type epitaxial material

2.3 X 射线能谱分析 (EDAX)

在用扫描电子显微镜获得样品表面形貌后，利用同一台仪器上的 X 射线能谱分析仪进行原位化学成份或微区晶体结构分析，可以提供包括形貌、成份、晶体结构或位向在内的丰富资料，本节利用 EDAX 对几种外延材料的表面成份进行了分析。

首先简要的介绍一下 X 射线能谱分析，它是利用样品发出的特征荧光 X 射线对样品进行成分分析的装置。当电子束与样品作用时，可使样品发出 X 射线。由于不同元素发出的特征 X 射线的能量不同，特征 X 射线就是特定元素发出的特定能量的 X 射线。X 射线能谱就是利用 X 射线的能量不同进行的展谱技术，再利用软件的 X 射线峰识别功能，鉴定图谱上特征 X 射线峰是由何种元素产生的。能谱图的横坐标是 X 射线的能量数值，纵坐标是 X 射线计数。某元素的计数越大，表明该元素在样品中含量越高。

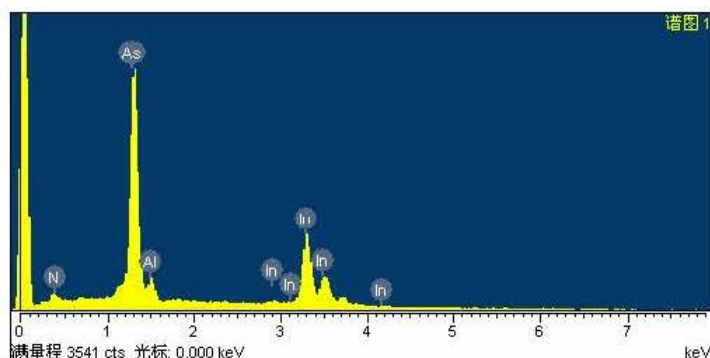


图 2.3.1 台面型外延材料的 x 射线能谱图 (InAlAs 为帽层和缓冲层)

Fig.2.3.1 EDAX profile of mesa type epitaxial material

图 2.3.1 为台面型外延材料的 X 射线能谱图，外延材料采用了 InAlAs 为帽层和缓冲层结构，表 2.3.1 给出了外延材料帽层的各元素的百分含量，从中我们可以得知，外延材料帽层的基本组分为 InAlAs，它们的原子数百分比为 $\text{In}:\text{Al}=36.72:8.49\approx 4:1$ ， $(\text{In}+\text{Al}):\text{As}=(36.72+8.49):43.07\approx 1:1$ ，与设计材料参数基本符合，设计的材料参数为 $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ (In 原子数组分含量为 0.8、Al 原子数组分含量为 0.2)。在帽层的表面也同时监测到了 N 元素，考虑主要的原因可能是在材料的储存和传输过程中带入的污染，以及在大气环境下材料表面吸附的 N 元素。

表 2.3.1 台面型材料帽层的各组分含量 ($\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 为帽层)

Table 2.3.1 The content index of epitaxial material with InAlAs capping layer

元素	质量百分比	原子百分比
In	53.80	36.72
Al	2.92	8.49
As	41.18	43.07
N	2.09	11.72

图 2.3.2 为采用 InGaAs 为帽层和缓冲层结构台面型外延材料的 X 射线能谱图，表 2.3.2 给出了外延材料帽层的各元素的百分含量，从中我们可以得知，外延材料帽层的基本组分为 InGaAs，它们的原子数百分比为 $\text{In}:\text{Ga}=48.04:11.42\approx 4:1$ ，与设计材料参数基本符合，设计的材料参数为 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ (In 原子数组分含量为 0.8、Ga 原子数组分含量为 0.2)。

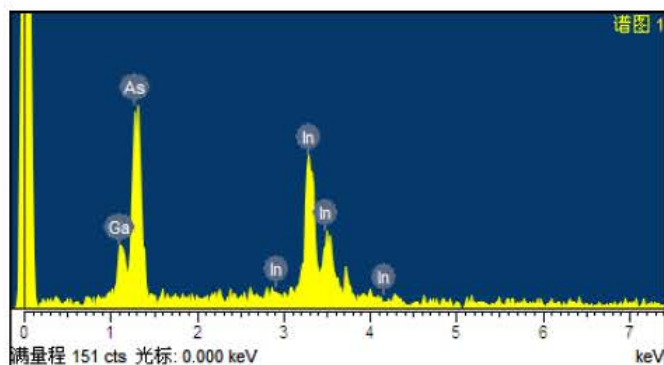


图 2.3.2 台面型外延材料的 x 射线能谱图 (InGaAs 为帽层和缓冲层)

Fig.2.3.2 EDAX profile of mesa type epitaxial material

表 2.3.2 台面型材料帽层的各组分含量 ($\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 为帽层)

Table 2.3.2 The content index of epitaxial material with InAlAs capping layer

元素	质量百分比	原子百分比
In	58.99	48.04
Ga	8.51	11.42
As	32.49	40.55

2.4 材料的双晶 XRD 表征

高分辨X射线衍射被认为是表征晶体质量的最有效的方法，它具有快速准确和非破坏性的无以比拟的优点。X射线摇摆曲线是化合物半导体中用得最多的结构特性表征方法。它可获得外延层组份、晶格常数、失配度、全衍射峰全高半宽、应变、弛豫以及厚度精确测量等信息。在X射线双晶衍射中必须通过外延层与衬底衍射峰位置之间的差异来确定外延层晶格对衬底的失配度从而确定外延层的晶格常数。为此，必须同时记录下外延层和衬底两个衍射峰，才能反映外延层的质量。在高分辨X射线衍射中，外延层的Bragg 峰的全高半宽 (FWHM) 通常被作为外延层晶格完整性的一个定性表征。

图2.4.1为采用MBE方法外延生长的台面型外延材料的XRD测试结果，衬底为(001) InP，缓冲层为 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 、帽层为 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ ，得到的摇摆曲线是对外延材料进行(004)晶向衍射的测试结果。图中存在两个主峰，其中Substrate峰是衬底InP引起的， $\omega=31.66^\circ$ ；另一个Epi-layer峰是InGaAs引起的， $\omega=31.00^\circ$ ，计算出的成分含量为 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 。外延层的FWHM为252arcsec，可以看出，外延材料结晶度较高，成分偏差较小。在两个峰之间存在一系列峰值很小的渐变结构，它们是由组分线性渐变的缓冲层衍射形成的，由于它们的厚度很小所以峰值很小并且连续。

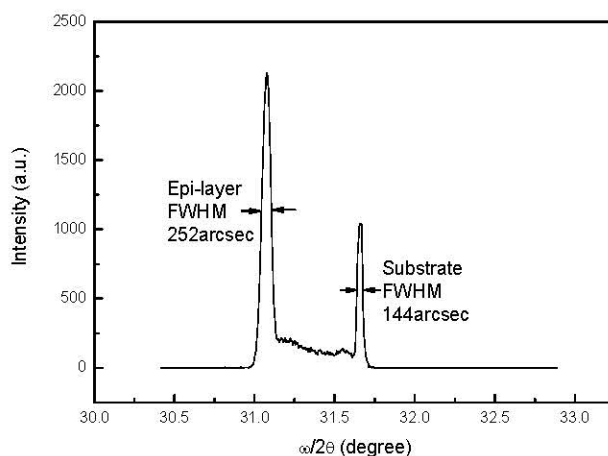
图 2.4.1 台面型外延材料的 x 射线衍射峰 (InGaAs 为帽层和缓冲层)

Fig 2.4.1 Measured XRD rocking curve of the mesa type epitaxial material

图 2.4.2 为平面型外延材料的 XRD 测试结果，外延材料是采用 MOCVD 在 InP 衬底上，利用两步生长法外延生长的高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 外延材料。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。

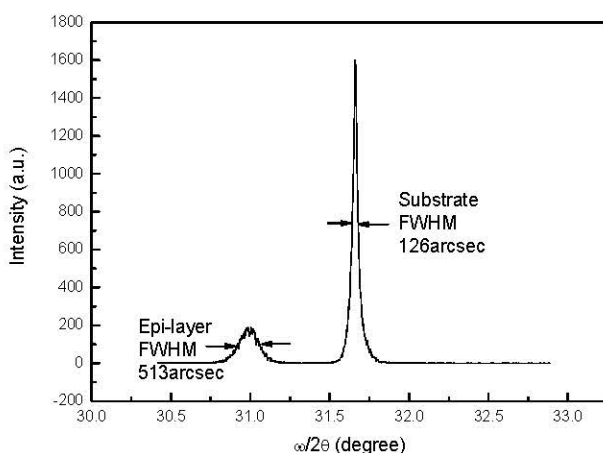


图 2.4.2 平面型外延材料的 x 射线衍射峰 (InGaA 为缓冲层)
Fig.2.4.2 Measured XRD rocking curve of the plane type epitaxial material

2.5 本章小结

本章通过采用 SEM、AFM、EDAX、XRD 等测试手段, 对我们采用的高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 外延材料进行了基本的表征, 为器件级材料的筛选提供基本的依据。通过前面的测试结果, 可以看出采用 MBE 方法外延生长的两种不同缓冲层结构的台面型高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 外延材料, 其表面的形貌均表现规整、粗糙度小于 12nm, XRD 测试结果显示其结晶质量较好, 其外延层的 FWHM 为 252arcsec, EDAX 测试结果显示外延材料的组分与设计要求基本一致, 为器件的制备奠定了基础。而采用 MOCVD 方法外延生长的两种不同缓冲层结构的平面型高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 外延材料, 不同的缓存层结构对材料的影响很大, 其中其中采用 InGaAs 为缓冲层的外延材料的粗糙度约 13nm, XRD 衍射峰的 FWHM 为 513arcsec, 采用 InAsP 为缓冲层的外延材料的粗糙度大于 100nm, 说明平面型外延材料质量较差, 将会严重影响器件的性能。后面章节将对台面型高 In 组分 InGaAs 线列探测器的制备和性能分析进行的详细的讨论。

第三章 P 型电极欧姆接触及表面钝化工艺研究

本章首先简要地介绍了高 In 组分 InGaAs 探测器 ($\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, $\lambda_c=2.4\mu\text{m}$) 的制备工艺流程。在流通整个制备工艺的基础上, 对 p-InP、p- $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 、p- $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 的欧姆接触和台面型器件的表面钝化工艺进行了部分研究。其中 P 电极的欧姆接触采用了多层金属薄膜退火金属化的方法, 钝化工艺主要是对几种钝化薄膜进行了简单的对比和分析。通过对单项关键制备工艺的研究, 为最终高性能 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 长线列探测器芯片的制备奠定基础。

3.1 金属—半导体的欧姆接触

金属/半导体接触是固体物理和半导体技术的一个具有近百年历史的古老研究领域^[60]。随着科学技术的发展, 这个领域取得了许多进展, 但是, 也存在许多重要问题有待解决。在基础研究方面, 如 Fermi 能级的钉扎机理问题; 在技术应用方面, 由于器件的发展提出了许多新要求, 所以不断有许多新技术和工艺尚待探索。在这个研究领域中, 欧姆接触是其中一个重要的课题。

3.1.1 机理

利用金属—半导体接触的电流机制, 可以说明欧姆接触的机理, Schottky 势垒的电流输运机制比较成熟。关于电流的输运方式, 按 Rohderick 的分析^[60], 可以有以下四种:

(1) 电子从半导体越过势垒顶点到金属中。这一过程包括热电子发射 (TE) 和扩散漂移 (D) 两种机制, 所谓二极管理论, 这是基本的电流输运过程。后来, Crowell 和 Sze 研究了扩散漂移机制和热电子发射机制的联合作用^[61]。实际上, 半导体导带电子从耗尽区边界依靠扩散漂移作用向界面运动, 当电子到达距界面约一个平均自由程的距离内, 就以热电子方式进入金属。(2) 电子由隧道效应穿过势垒, 称为场发射 (FE)。在极低温下, 热电子发射可以忽略, 电子可以通过隧道效应穿过势垒。随着温度的升高, 电子被激发到较高的能级上, 这时电子穿过势垒的几率较大, 这就是热电子激发和隧道效应的联合作用, 称为热电子场发射机制 (TFE)。对于高掺杂半导体, 势垒变的很薄, 隧道效应就起支配作用, 这是形成欧姆接触的一个基本物理原因。(3) 在空间电荷区中电子与空穴复合。(4) 在半导体中性区电子与空穴复合。上述的 (2) (3) (4) 机制引起势垒降低, 使 Schottky 二极管偏离理想特性。

3.1.2 表征

表征金属—半导体接触特性的是比接触电阻 (ρ_c), 即单位面积金属—半导体接触的微分电阻。

$$\rho_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1} (\Omega \square \text{cm}^2)$$

ρ_c 取决于势垒高度和掺杂浓度。

一般说，具有不同能量的电子的隧穿几率不同，隧穿几率可写成电子能量的函数 $T(E)$ 。对各种能量电子对隧穿电流的贡献积分可得总电流，这样可求得 ρ_c 。Yu^[62]和 Chang^[63]对此作了比较详细的分析，结论如下：

$$E_{00} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N_D}{m\varepsilon}}$$

E_{00} 为隧穿几率参数， N_D 为掺杂浓度， m 为电子质量， ε 为介电常数， h 是普朗克常数。

(1) 对于 $N_D < 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ， $kT/E_{00} \ll 1$ ，TE 机制为主。

$$\rho_c \propto \exp\left(\frac{q\Phi_b}{kT}\right)$$

由此可以得到， Φ_b 为 Schottky 势垒高度，在 Φ_b 一定的条件下，温度较高， ρ_c 较小。

(2) $N_D \approx 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ，且 $< 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ， $kT/E_{00} \approx 1$ ，为 TFE 机制。

$$\rho_c \propto \left[\frac{q\Phi_b}{E_{00} \coth(E_{00}/kT)} \right]$$

此时，依赖于温度和隧穿发射参数。

(3) 当 $N_D > 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ， $kT/E_{00} \ll 1$ ，FE 为主。

$$\rho_c \propto \exp\left(\frac{q\Phi_b}{E_{00}}\right)$$

由此可以看出， ρ_c 强烈依赖于掺杂浓度，只要有足够高的掺杂浓度， Φ_b 较高也可以产生隧穿。

综上所述，制备良好的金属-半导体欧姆接触可以有以下几种方式：(1) 低势垒接触。如果金属与半导体接触形成的势垒比较低，在室温下就有足够的载流子可以从半导体进入金属或由金属进入半导体，这样的接触，其整流效应极小。(2) 高复合接触。在金属-半导体接触面附近用一定的方法引入大量的强复合中心，就构成了高复合接触。高复合接触不会向半导体注入非平衡载流子，因为原来可能注入体内的非平衡少数载流子在通过高复合接触区时都复合掉了。高复合接触也不会有整流作用，因为在反向时，高复合中心将成为高产生中心，使反向电流变的很大，反向的高阻状态就不存在了。如果半导体表面被损伤，表面附近就可能形成晶体缺陷，他们的作用类似于复合中心。如果这些复合中心密度足够高，耗尽区中的复合将成为主要的导电机理，因而使接触电阻明显减小。(3) 高掺杂接触。在半导体表面与

金属接触处，如果先用扩散或合金等方法，掺入高浓度的施主或受主杂质，就形成了高掺杂接触。高掺杂的 n^+ 或 p^+ 层一方面可以有效地降低非平衡载流子的注入，同时耗尽层区很薄，容易产生场发射，因此零偏压下接触具有很低的电阻。

3.1.3 比接触电阻的测量

比接触电阻 (ρ_c) 即欧姆接触的界面电阻，实际上是无法直接测量的。接触区一般包括金属层、金属与半导体界面和半导体结。此外测量时，还有各种寄生电阻引入。目前，已有许多基于不同模型的测试方法可供选择。但无论何种方法，都是在一定的恒定电流下，在一些接触点之间测量电压，求出各自的电阻，然后按不同的物理模型，从总电阻中扣除各种寄生电阻，最后求得比接触电阻。

根据样品的不同结构类型，欧姆接触电阻的测量大致可以分为两类：一类是在体材料上制备欧姆接触图形进行测量；另一类是在薄膜材料上制备欧姆接触图形进行测量。这里主要介绍对薄膜材料欧姆接触的测量。对薄膜材料欧姆接触的测量，目前应用最广泛的方法之一就是传输线模型 (TLM)。这种方法首先由 Schockley 引入，后经 Berger 做了进一步改进。

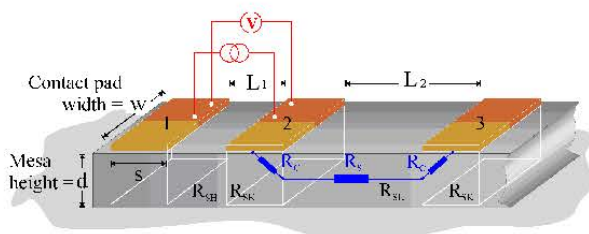


图 3.1.1 传输线结构的测试模型

Fig.3.1.1 Schematic diagram of a semiconductor material with ohmic contact pads prepared for TLM analysis

在与周围环境绝缘的条形半导体材料上制备不等距的长方形接触块如图 3.1.1 所示，分别在两个不同距离 L_n 的长方形接触间通恒定电流 I 并由电压探针测出响应的电压 V ，并求得总电阻 R_T ，这可由下式表示：

$$R_T = 2R_c + \frac{R_{sh} L_n}{W}$$

其中 R_c 是接触电阻， R_{sh} 是半导体材料的方块电阻。

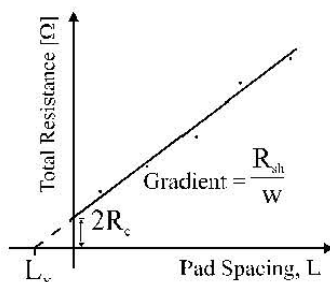


图 3.1.2 传输线模型结构下测量电阻与金属电极间距的关系

Fig.3.1.2 An example of a plot of total resistance as a function of TLM pad spacing

在不同距离 l_n 下可测出一系列对应的 R_T , 把这些点连接成如图 3.1.2 所示的一条直线, 直线的斜率就是 R_{sh}/W , 在 x 轴和 y 轴的交点分别是 L_x 和 $2R_c$, Reeves 等人把 R_c 用下式表达:

$$R_c = \frac{R_{sk} L_T}{W}, \text{ 且 } L_T = \sqrt{\rho_c / R_{sk}}$$

R_{sk} 是欧姆接触下半导体的方块电阻, L_T 为传输长度。若近似认为当合金化后, 欧姆接触时半导体的方块电阻和半导体材料的方块电阻 R_{sh} 相等, 则 $2L_T=L_x$, 所以

$$\rho_c = R_{sk} L_T^2 \approx R_{sh} L_T^2 = R_c^2 W^2 / R_{sh}$$

这可以简单计算比接触电阻。但 R_{sk} 和 R_{sh} 确有不同, 为了精确计算比接触电阻值, Reeves 等人对此法提出修正, 在图 4.1.1 中测量电极 1, 2 间的电阻 R_{12} , 2, 3 间的电阻 R_{23} , 和 1,

3 间电阻 R_{13} , 根据等式 $R_T = 2R_c + \frac{R_{sh} l_n}{W}$, 可知

$$R_{12} = R_{c1} + R_{c2} + R_{sh}(L_1/W)$$

$$R_{23} = R_{c3} + R_{c2} + R_{sh}(L_2/W)$$

$$R_{13} = R_{c1} + R_{c3} + R_{sh}((L_1 + L_2)/W) + R_{sk}(s/W)$$

其中 s 是接触的长度, 接触末端电阻 R_e : $R_e = (R_{12} + R_{23} - R_{13})/2 = R_c - R_{sk} \cdot s/2W$, 所以 $R_{sk} = (2W/s)(R_c - R_e)$,

$$\rho_c = \frac{R_c^2 W s}{2(R_c - R_e)}$$

3.2 III-V 族材料化合物/金属的欧姆接触

早期的 III-V 族材料化合物/金属的欧姆接触研究是针对 Gunn 振荡器 (N_D 约 10^{14}cm^{-3}) 和重掺杂的半导体激光器 (N_D 约 10^{18}cm^{-3}), 最早对 GaAs 的欧姆接触采用 Sn 在约 450°C 进行合金化。1967 年, 提出了 Ni/AuGe。但是, 近年 III-V 族器件在光电子、高速数字与模拟方面有许多新的应用进展, 如 MESFET, HBT, HEMT 和各种新型的半导体光电器件等, 对欧姆接触提出了许多新要求。特别是由于器件尺寸的缩小, 相应的比接触电阻 (ρ_c) 也要求降低。例如对 MESFET, 栅长为 $1\mu\text{m}$ 时, 要求 $\rho_c \approx 10^{-5} \sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 但当栅长为亚微米时, 则要求 $\rho_c \approx 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 或更低。众所周知, 寄生电阻、电容可以直接影响器件的性能, 工作频率越高, 这种影响越大。其中寄生电阻的一个很大的组成部分来自欧姆接触。Won 等总结了一个 (InP/InGaAs/InP) HBT 的 f_{\max} 与 ρ_c 的关系, ρ_c 越低 f_{\max} 越高。像 InGaAs 等 III-V 族化合物红外光电探测器, 如果电极不是欧姆接触, 则其电极的接触电阻将使光电流严重损失, 直接影响器件的性能。对于 III-V 材料族化合物半导体而言, 特别是 p 型电极的欧姆接触一般要比

n 型难做得多,其原因首先在于空穴的有效质量比电子大,其次是由器件加工工艺本身决定的。表 3.2.1 给出了主要几种 III-V 族材料化合物与金属形成欧姆接触的研究结果。

表 3.2.1 III-V 族材料化合物/金属的欧姆接触

Table 3.2.1 Alloyed Ohmic contacts to the III-V alloy semiconductors

材料	类型	金属膜系	比接触电阻 $\Omega\cdot\text{cm}^2$	掺杂浓度 n 或 p cm^{-3}	参考文献
InP	p	Au-Be	$(1\times 10^{14})/p$	$10^{16}-10^{19}$	[64]
	p	Au-Mg	10^{-4}	6×10^{17}	[65]
	p	Au-Zn	$<10^{-3}$	$10^{16}-10^{18}$	[66][67] [68]
	p	In-Zn	1×10^{-2}	5×10^{16}	[69]
	n	Au-Ag-Sn	8×10^{-5}	$5\times 10^{17}-10^{18}$	[70]
	n	Ag-Sn-In	$<10^{-4}$	3×10^{15}	[70]
	n	Au-Ge-Ni	$3\times 10^{-5}-8\times 10^{-7}$	$3\times 10^{16}-8\times 10^{17}$	[71][72]
	n	Au-Sn	1.8×10^{-6}	3×10^{18}	[73]
	GaAs	p	Au-Zn	$(1.8\times 10^{18})/p^{1.3}$	$10^{17}-10^{19}$
p		Ag-Zn	2×10^{-5}	2×10^{17}	[75]
p		Au-Ag-Zn	$<10^{-4}$	10^{18}	[76]
n		Au-Ge-Ni	$(1.8\times 10^{12})/n$	$10^{15}-10^{19}$	[77]
n		Au-Ag-Ge	6×10^{-4}	5×10^{15}	[76]
n		Ni-Ge	3×10^{-5}	1×10^{17}	[78]
n		Pd-Ge	3.5×10^{-4}	1×10^{16}	[79][80]
InAs		n	In		
	n	Sn-Te			
$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ x=0.4	p	Al	2×10^{-5}	2×10^{19}	[82]
	p	Au-Zn	8×10^{-6}	2×10^{19}	[82]
	n	Au-Ge-Ni	2×10^{-4}	1×10^{18}	[82]
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$	p	Au-Zn	2×10^{-5}	5×10^{18}	[83]
	n	Au-Ge-Ni	5×10^{-7}	1×10^{17}	[84]
	n	Au-Sn			[85]
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ x=0.3,y=0.4	p	Au-Mg			[86]
	p	Au-Zn	$10^{-4}-10^{-5}$	$2\times 10^{18}-5\times 10^{18}$	[83]
	n	Au-Ge-Ni	5.8×10^{-6}	1×10^{17}	[84]

我们在参考国内外研究文献的实验基础上,根据我们的实验条件、整个器件的制备工艺和器件的性能参数要求,对 p-InP、p-In_{0.8}Ga_{0.2}As 和 p-In_{0.8}Al_{0.2}As 与金属的欧姆接触进行了初步的研究探索。

3.2.1 p-InP 与 Au/Zn/Au 的欧姆接触

样品是采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)方法,在 2 英寸 350 μm 厚的(100)晶向半

绝缘 InP 衬底上制备的 p-InP 外延薄膜, 外延层的厚度约为 $0.8\mu\text{m}$, 样品载流子浓度为 $3\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。晶片依次用氯仿、乙醚、丙酮和酒精清洗后, 用氮气吹干, 采用标准光刻工艺来定义传输线模型 (TLM), 然后在真空度为 10^{-4}Pa 电子束蒸发系统溅射金属薄膜 Au(200Å)/Zn(700Å)/Au(200Å), 浮胶后如图 3.2.1 所示, 金属层长 $250\mu\text{m}$, 宽 $120\mu\text{m}$, 间距从 $10\mu\text{m}$, $12\mu\text{m}$, $14\mu\text{m}$ 一直到 $28\mu\text{m}$ 。然后将样品置于退火炉中, 在 N_2 气氛下快速退火, 退火温度从 380°C 到 450°C , 退火时间为 30 s, 氮气的流速约为 $2.5\text{L}/\text{min}$ 。I-V 测试系统是由计算机控制 Keithley236 源测量仪, 测试时样品封于杜瓦瓶中置入暗的金属屏蔽盒, 以减少干扰。通过测量电阻和间距计算出比接触电阻值, 利用最小二乘法线性拟合, 接触电阻 R_c 和面电阻 R_s 可从直线的截距和斜率中得到, 比接触电阻 ρ_c 用 $R_c^2 W^2 / R_s$ 进行计算。

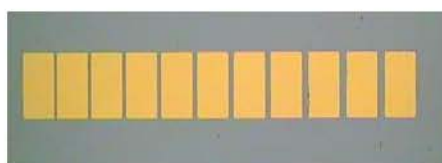


图 3.2.1 浮胶后 TLM 结构图
Fig 3.2.1 TLM structure after lift-off

图 3.2.2 是未退火样品的 I-V 曲线, 从图上可以很明显地看出, 在未退火时, p-InP 与 Au/Zn/Au 的接触表现为 Schottky 接触, 而非欧姆接触。

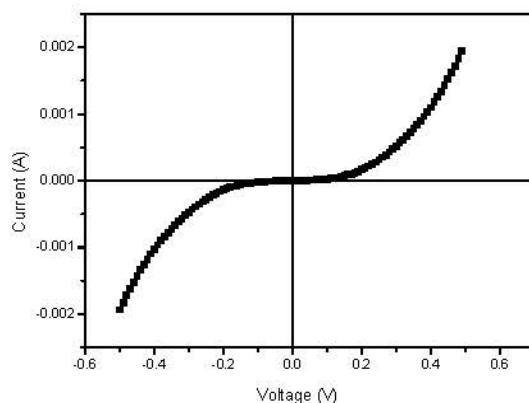


图 3.2.2 未退火的 p-InP 与 Au/Zn/Au 接触的 I-V 曲线
Fig 3.2.2 I-V curve of Au/Zn/Au freshly deposited contacts on p-InP

图 3.2.3 给出了退火温度分别为 380°C 、 400°C 、 430°C 、 450°C , 退火时间同为 30 s 的条件下, 相同间距的两个电极之间的 I-V 测试曲线。从图中可以看出, 随着退火温度的提高, 电极的欧姆特性明显变好, 其中经过 450°C 、30 s 退火后的样品, 通过 I-V 测试曲线得到的零偏动态电阻在 $10\sim 25\Omega$ 之间, 形成了良好的欧姆接触电极。分析其可能的一个原因是随着温度的升高, Zn 逐渐的向 p-InP 内部扩散, Zn 的存在一方面降低了金属/InP 接触的势垒高度, 另一方面增加了 Au_2P_3 的界面功函数, 使得金属与 InP 形成了欧姆接触^[87]。图 3.2.4 给出了经

过 450°C、30 s 退火后不同间距间的 I-V 测试曲线，它们都呈现出良好的欧姆接触特性。

考虑整个器件制备的工艺兼容性，我们采用了 450°C、30 s 这一退火工艺。图 3.2.5 给出了在此工艺下，p-InP 与 Au/Zn/Au 接触电阻与间距的关系，利用最小二乘法线性拟合，得到了比接触电阻 $\rho_c < 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ 。需要特别指出的是，在我们的工艺条件下，所生长的 Au/Zn/Au 薄膜与 p-InP 的粘附性很差，在浮胶的过程中多次出现脱落现象。考虑可能的原因有两个，一是由于 Zn 的熔点比较低，生长的速度很快很难控制，造成生长的 Zn 薄膜的致密性不高，二是我们所使用的 Zn 源的纯度不够。

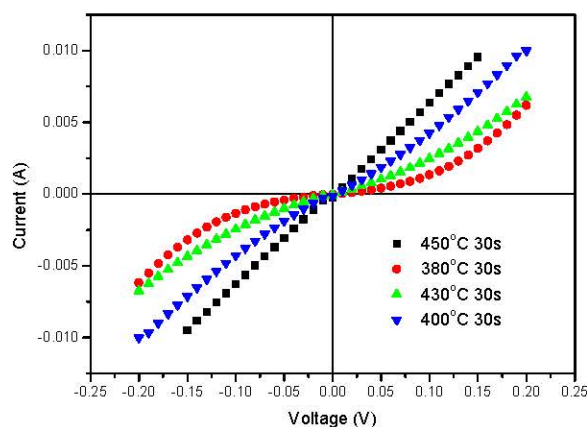


图 3.2.3 p-InP 与 Au/Zn/Au 接触电极分别在 380°C, 400°C, 430°C, 450°C 的温度下退火 30s 后的 I-V 曲线

Fig 3.2.3 I-V curves of Au/Zn/Au contacts on p-InP annealed at 380°C, 400°C, 430°C, 450°C for 30s

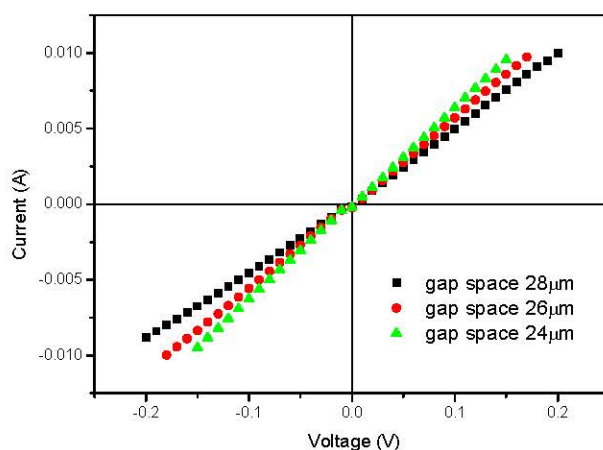


图 3.2.4 不同间距的 p-InP 与 Au/Zn/Au 接触电极在 450°C 退火 30s 后的 I-V 曲线

Fig 3.2.4 I-V curves of Au/Zn/Au contacts on p-InP annealed at 450°C for 30s for different contact gap spacing

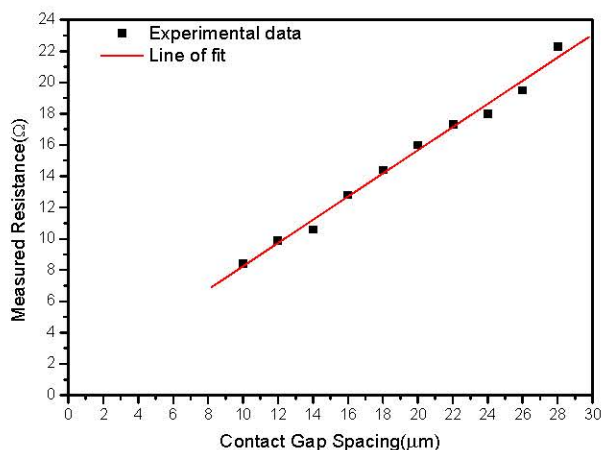


图 3.2.5 p-InP 与 Au/Zn/Au 接触电阻与间距的关系 (450°C退火 30s)
 Fig 3.2.5 Measure resistance versus gap spacing of Au/Zn/Au contacts on p-InP.
 (Alloying was at 450°C for 30s)

3.2.2 p-In_{0.8}Ga_{0.2}As 与 Ti/Pt/Au 的欧姆接触

样品是采用分子束外延(MBE)生长的 In_{0.8}Ga_{0.2}As/In_{0.8}Ga_{0.2}As/In_{1-x}Ga_xAs/InP 外延材料, 具体的材料的参数见表 2.2.1, 其中 p-In_{0.8}Ga_{0.2}As 帽层的掺杂浓度 $\geq 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 0.55 μm。晶片依次用氯仿、乙醚、丙酮和酒精清洗后, 用氮气吹干, 采用标准光刻工艺来定义传输线模型 (TLM), 然后在真空度为 10^{-4} Pa 电子束蒸发系统溅射金属薄膜 Ti(200Å)/Pt(300Å)/Au(200Å)。电极退火后, 采用溅射生长 Cr/Au 加厚电极层, 方便互连引线。

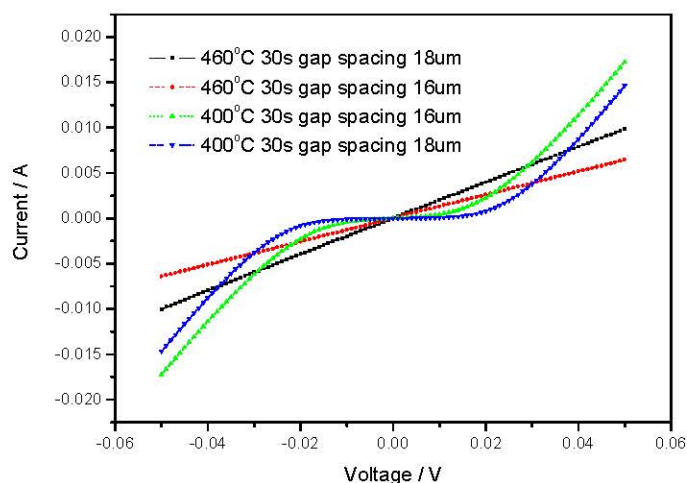


图 3.2.6 p-InGaAs 与 Ti/Pt/Au 接触电极分别在 400°C, 460°C 的温度下退火 30s 后的 I-V 曲线
 Fig 3.2.6 I-V curves of Au/Zn/Au contacts on p-InP annealed at 400°C, 460°C for 30s

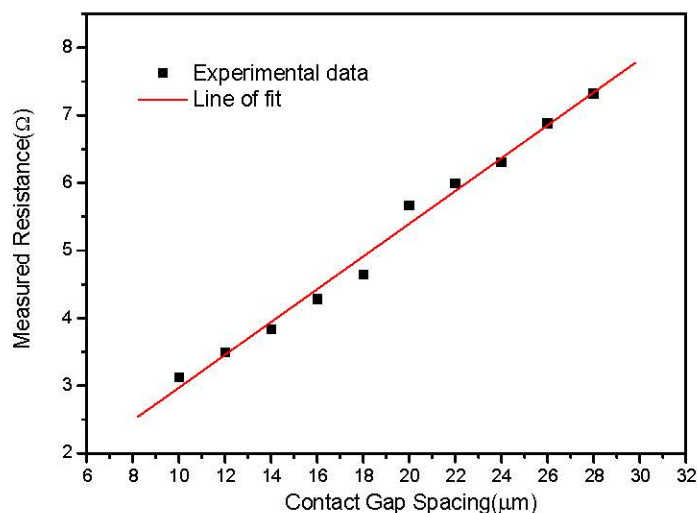


图 3.2.7 p-InGaAs 与 Ti/Pt/Au 接触电阻与间距的关系 (460°C 退火 30s)
 Fig 3.2.7 Measure resistance versus gap spacing of Ti/Pt/Au contacts on p-InGaAs.
 (Alloying was at 460°C for 30s)

图 3.2.6 给出了退火温度分别为 400°C、460°C，退火时间同为 30 s 的条件下，相同间距的两个电极之间的 I-V 测试曲线。从图中可以看出，随着退火温度的提高，电极的欧姆特性明显变好，其中经过 460°C、30 s 退火后的样品，通过 I-V 测试曲线得到的零偏动态电阻在 3 Ω~8 Ω 之间，形成了良好的欧姆接触电极。考虑我们整个工艺的稳定性和 p-In_{0.8}Ga_{0.2}As 较小的禁带宽度，所以采用了 Ti/Pt/Au 工艺。图 3.2.7 给出了在此工艺下，p-In_{0.8}Ga_{0.2}As 与 Ti/Pt/Au 接触电阻与间距的关系，同时利用最小二乘法线性拟合，得到了比接触电阻 $\rho_c \approx 7.5 \times 10^{-3} \Omega \square cm^2$ 。

3.2.3 p-In_{0.8}Al_{0.2}As 与 Ti/Pt/Au 的欧姆接触

样品是采用分子束外延(MBE)生长的 In_{0.8}Al_{0.2}As/In_{0.8}Ga_{0.2}As/In_{1-x}Al_xAs/InP 外延材料，具体的材料的参数见表 2.2.2，其中 p-In_{0.8}Ga_{0.2}As 帽层的掺杂浓度 $\geq 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，厚度为 0.6 μm。采用与前面 p-In_{0.8}Ga_{0.2}As 相同的工艺，电极采用 Ti(200 Å)/Pt(300 Å)/Au(200 Å)金属膜系。同样采用传输线模型对样品进行分析测试。

由图 3.2.8 可以看出，样品经过 480°C、30 s 退火后表现出良好的欧姆接触特性，通过 I-V 测试曲线得到的零偏动态电阻在 20 Ω~80 Ω 之间，形成了良好的欧姆接触电极。图 3.2.9 给出了在此工艺下，p-In_{0.8}Al_{0.2}As 与 Ti/Pt/Au 接触电阻与间距的关系，得到了比接触电阻 $\rho_c \approx 6.2 \times 10^{-3} \Omega \square cm^2$ 。

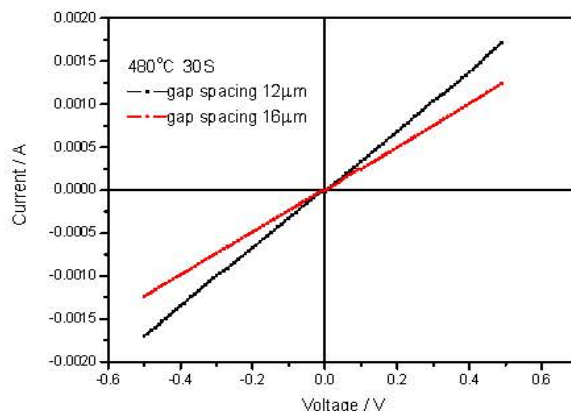


图 3.2.8 p-InAlAs 与 Ti/Pt/Au 接触电极 480°C、30s 退火后的 I-V 曲线
 Fig 3.2.8 I-V curves of Ti/Pt/Au contacts on p-InAlAs annealed at 480°C for 30s

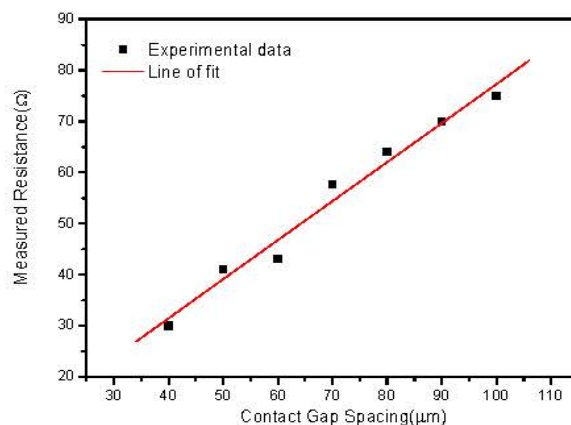


图 3.2.9 p-InAlAs 与 Ti/Pt/Au 接触电阻与间距的关系 (480°C 退火 30s)
 Fig 3.2.9 Measure resistance versus gap spacing of Ti/Pt/Au contacts on p-InAlAs.
 (Alloying was at 480°C for 30s)

3.2.4 欧姆电极的 LBIC 方法表征

3.2.4.1 LBIC 测试原理

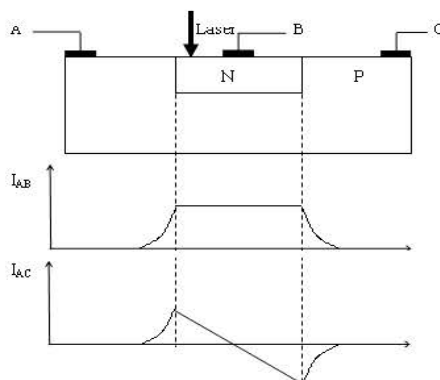


图 3.2.10 LBIC 信号原理图

Fig.3.2.10 Schematic illustration of signal and theory by LBIC

激光束诱导电流技术(Laser Beam Induced Current)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。该方法的原理是基于 1956 年 Wallmark 发现的水平光伏效应(LPV)，即当 p-n 结受到不均匀光照时，会在平行于 p-n 结方向产生电场，其大小和方向与 p-n 结的类型、光照的波长、强度和位置有关。国外在 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^[88]。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 p-n 结结深、载流子的扩散长度及线列器件的串音、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 3.2.10 所示。激光束在 p-n 结表面扫描时，若连接 A 和 B 电极，光生载流子扩散到空间电荷区边缘会立刻被电极收集，产生光伏响应信号 I_{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，会产生水平电场，产生如图所示的激光束诱导电流 I_{AC} ，水平电场的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。

根据 LBIC 的工作原理分析，我们可以简单认为，如果存在一个内建电场，并且在有光生载流子产生，就会被电场分开，连通电极后就会有光电流产生。如果我们所制备的 P 电极是 Schottky 接触而非欧姆接触，那么就可以满足上面的条件，在进行 LBIC 测试时，就会有光电流被监测出来。如果 P 电极是欧姆接触，那就不存在内建电场，光生载流子也就不可能被引出。我们就根据这样的思想对 P 电极进行了 LBIC 表征。我们采用的测试设备为 SEMILAB 公司产的 Micro LBIC 仪器，其系统如图 3.2.11 所示，脉冲激光波长为 980 nm，频率为 1 kHz，激光束斑直径为 5 μm ，分辨率为 1 μm ，激光能量可调，扫描步进可选择。

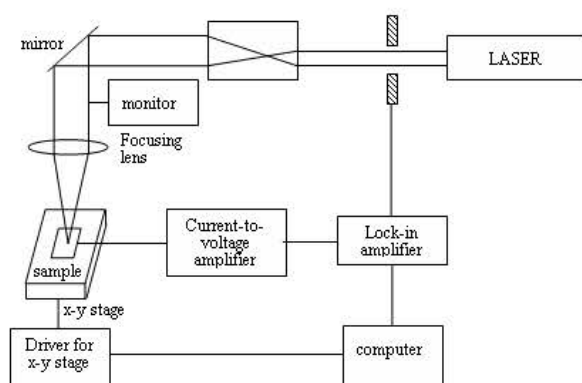
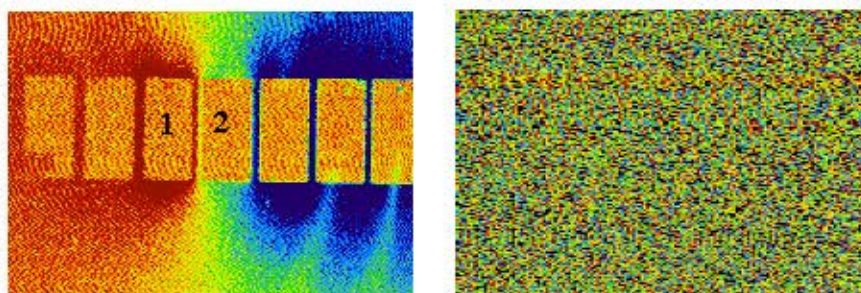


图 3.2.11 LBIC 检测系统结构框图
Fig.3.2.11 Block diagram for LBIC system

测试样品采用的是 p-InP 与 Au/Zn/Au 接触电极，在图 3.2.12 中，左图为未经过退火欧姆化的 TLM 测试模型，右图为经过 450°C、30 s 退火欧姆化处理后的 TLM 测试模型，1 和 2 为测试时所采用的两个电极。从图中我们可以看到退火前，p-InP 与 Au/Zn/Au 接触电极存在一个 Schottky 结，所以有明显的光电流信号，两侧所表现出的不同颜色，说明两侧的电流方向不同。当样品经过退火欧姆化之后，Schottky 结消失，由激光光束照射样品所产生的光生载流子不能被电场分开，不能形成有效的光生电流，所以测不到任何的信号，说明样品上的电极为良好的欧姆接触。因此，我们认为利用 LBIC 测试也可以从另一个侧面反映电极的欧姆接触情况。



3.2.12 p-InP 与 Au/Zn/Au 接触电极的 LBIC 扫描图（左图为退火前，右图为退火后）

3.2.12 Photograph of LBIC scan signal for Au/Zn/Au contacts on p-InP (left: before anneal treatment, right: after anneal treatment)

3.3 表面钝化

随着 III-V 族半导体器件的发展，例如在 MISFETS 器件中栅绝缘层、光电器件的表面钝化层等，都要求能提供一种介质薄膜，它必须具有高电阻率、更低的界面态密度、良好稳定的机械、化学、电学等性能。特别是对于本论文所研究的台面型高 In 组分 InGaAs 短波红外探测器，其制备工艺采用了原位掺杂台面成型工艺，每一个探测器单位都是一个暴露在外面的台面，使得器件有更多的表面暴露在外，在这些外表面上由于晶格周期性结构的终止，半导体表面上的原子通常会偏离理想晶格的位置，从而使表面出现很多不饱和键（悬挂键，容易失去电子而出现正电荷）。这些局域化的表面/界面电子能态会对器件产生影响，甚至会对器件性能起到决定性作用。因此对台面型器件的表面钝化提出了更高的要求。

在选取钝化层薄膜材料和薄膜生成方式上已有大量的、非常有意义的研究工作。常用的钝化薄膜材料有 SiO₂、Si₃N₄、Al₂O₃、ZnS、聚酰亚胺以及双层或多层膜系结构等^{[89]-[93]}。常用的薄膜生长方式包括：化学气相沉积（Plasma-enhanced CVD, Photo-assisted CVD）、热蒸发、溅射（Ion-beam sputtering, Magnetron sputtering）、匀涂退火等^[94]。由于不同的介质薄膜本身的禁带宽度、纯净度、均匀性、与衬底的应力和内部的缺陷等，都是影响钝化效果的重要因素。图 4.3.1 给出了几种常用的钝化薄膜的缺陷密度以及它们所在的位置和 InP 的禁带宽度比较的示意图^[94]。

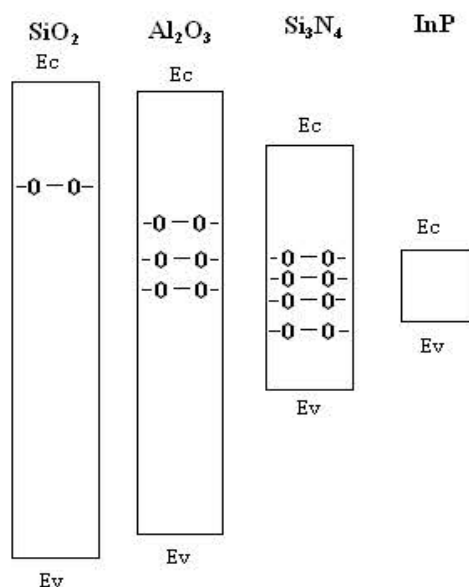


图3.3.1 SiO₂、Al₂O₃、Si₃N₄的缺陷密度以及它们所在的位置和InP的禁带宽度比较示意图

Fig 3.3.1 Approximate energy-band alignment positions and trap locations for SiO₂, Al₂O₃ and Si₃N₄ with respect to InP

应当指出的是介质层中的缺陷密度和它们所在的位置，不仅与材料本身有关，还与介质薄膜的生长方式有关。不同的介质薄膜生长方式，其作用在衬底表面上的能量是不同的，对界面的状态影响也不同，一般说来过高的能量会带来更多的界面缺陷，表给出了几种常用长膜方式的能量大小。因此对于钝化薄膜的选择要进行综合考虑。根据图3.3.1和表3.3.1的结果来看，对于我们所研究的台面型器件，采用CVD方法生长的SiO₂钝化层效果可能会更好一些。

表 3.3.1 各种长膜方式的能量大小

Table 3.3.1 The energy associated with various deposition techniques

长膜方式	能量 (eV)
热蒸发 (Thermal evaporation)	0.05~0.2
化学气相沉积 (CVD)	0.1~1.0
离子束溅射 (Ion-beam sputtering) (substrate)	20~30
离子束溅射 (Ion-beam sputtering) (target)	50~2000
磁控溅射 (Magnetron sputtering)	1000~2000

我们实验室在优化器件钝化介质薄膜方面，前期做了大量的工作，根据实验室自己的实验条件，主要集中在SiN_x (PECVD)、单层聚酰亚胺、硫化+单层聚酰亚胺、硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化、硫化+In₂S₃/聚酰亚胺双层钝化和SiN_x/聚酰亚胺双层钝化，并对它们的钝化效果进行了比较，其中采用SiN_x薄膜钝化的器件性能较好。

3.3.1 阳极氧化/SiO₂双层钝化研究

实验中制备In_{0.8}Ga_{0.2}As探测器所采用的外延材料结构参数如表2.2.1所示。外延材料的帽层为In_{0.8}Ga_{0.2}As，缓冲层采用了In组分渐变的In_{1-x}Ga_xAs，其中In组分从0.53线性增加到0.8。根据我们的常规工艺，在台面成型过程中，n电极一般要做在n⁺-InP上，此时台面的高度要大

于 $5\mu\text{m}$ ，较高的台面使得台面钝化工艺更为重要和困难。特别需要指出的是我们采用了湿法腐蚀台面成型工艺，由于磷酸/双氧水系的湿法腐蚀速率为反应速率控制^{[95][96]}，台面侧壁呈规整的特定晶面结构，属于各向异性的腐蚀液，对于InGaAs材料在(011)面上呈现倒台面^[96]，使得钝化工艺的难度更大，而且由于位错造成的材料表面呈现凹凸不平的格纹状形貌，也会加大钝化的难度。

为了解决高台面侧面钝化较难的问题，一般采用双层钝化膜和单层加厚的方法，但是因为钝化薄膜层和台面表面存在应力，所以单层钝化膜不能无限制的加厚，而且还要考虑对响应波段起到增透的作用，所以生长良好的单层加厚钝化膜难度较大。我们首先选用了利用阳极氧化的方法，在台面表面自身生成一层氧化物钝化层，然后再在上面沉积一层 SiO_2 薄膜，同时起到双层钝化和增透的作用，以及使氧化物钝化层与外部环境隔离，而且阳极氧化层还可以减弱钝化层和器件表面之间的界面位错，进一步降低界面态密度。

采用了表2.2.1所示的外延材料，晶片经解理后，依次用氯仿、乙醚、丙酮和酒精清洗后，采用标准光刻、腐蚀等工艺制备P型台面，然后将外延片作为阳极，石墨或铂金为阴极，同时浸入电解液中，调节与阳极和阴极联接的电源电压，在晶片上逐渐生长氧化物钝化膜。具体的实验装置如图3.3.2。

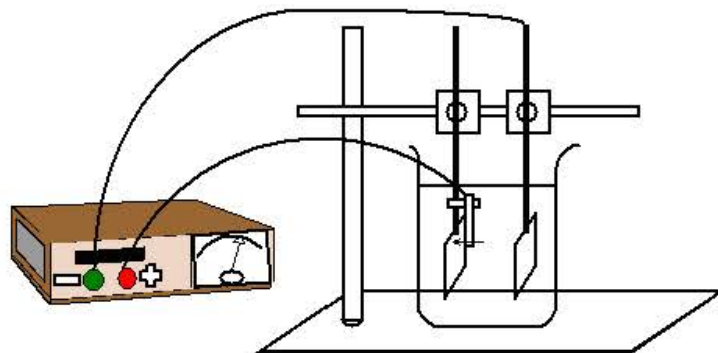
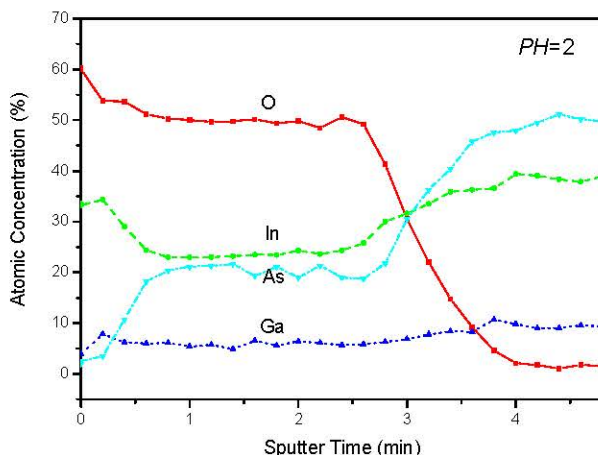


图 3.3.2 阳极氧化的实验装置图
Fig 3.3.2 Anodic oxidation equipment

首次实验采用的电解液为3%的 H_3PO_4 与乙二醇以1:1混合比配制的，其PH值为2。初始电压设定为10V，以后每隔3分钟，电压上升10V，最后使电压升到30V，并在30V恒压下生长10min，完成台面上表面和侧面的氧化物钝化膜的生长，所生成的氧化物钝化膜主要为 In_2O_3 、 As_2O_3 、 Ga_2O_3 、 As_2O_5 。对生成的氧化物薄膜进行了俄歇电子能谱（AES、型号PHI-700）分析，分析结果如图3.3.3。

图3.3.3 氧化物薄膜的AES深度分布 (3% H_3PO_4 / 乙二醇)Fig 3.3.3 AES profiles of anodic oxides of InGaAs grown in a 3% H_3PO_4 / propylene glycol (1:1)

通过AES分析可以看到，在PH为2的磷酸/乙二醇电解液中生成的氧化物薄膜中， In_2O_3 在表面的含量明显偏高，而 $As_2O_3(As_2O_5)$ 和 Ga_2O_3 的含量较少。由于钝化薄膜材料的禁带宽度与钝化效果存在直接的联系，如果禁带宽度较小，可能使半导体材料和钝化层之间的电荷交换变得更加容易，最终使器件的表面漏电明显变大，严重影响器件的性能。表3.3.2给出了几种常见的III-V族材料氧化物的禁带宽度，从中可以看到， In_2O_3 的禁带宽度要小于 $As_2O_3(As_2O_5)$ 和 Ga_2O_3 的禁带宽度，因此为了进一步提高氧化物钝化层的钝化效果，应降低 In_2O_3 与($As_2O_3 + Ga_2O_3$)的含量比。

表3.3.2 几种常见的III-V族材料氧化物的禁带宽度

Table 3.3.2 Band gaps of familiar oxides for III-V material

氧化物	禁带宽度 (eV)	参考文献
In_2O_3	2.6	[98]
Ga_2O_3	4.4	[99]
As_2O_3	4.0	[99]
P_2O_5	8~10	[100][101]
$GaAsO_4$	3~7	[100][101]
$InPO_4$	4.5	[102][103]

3.3.2 阳极氧化/ SiO_2 双层钝化薄膜的优化

为了进一步提高氧化物薄膜的钝化效果，考虑到 $As_2O_3(As_2O_5)$ 比较容易被酸性溶液腐蚀掉，所以尝试了PH值为9的0.1mol/L的KOH溶液 (90%乙二醇+10%去离子水)。同样在氧化过程中选用了逐步升高电压的方法，同时注意到随着电压的升高氧化膜的生长速度会明显变快，而生长速度越快其致密性就越差，从而其钝化效果也就越差，所以设定的生长电压从10V开始，每生长5min电压上升5V，直到电压达到30V。为了使所生长的钝化膜更厚一些，最后在30V恒压下生长15min。生成的氧化膜呈蓝色，厚度在80~100nm范围内。同样我们对在PH值为9的电解液中生长的氧化物薄膜也进行了AES分析，分析结果如图3.3.4。

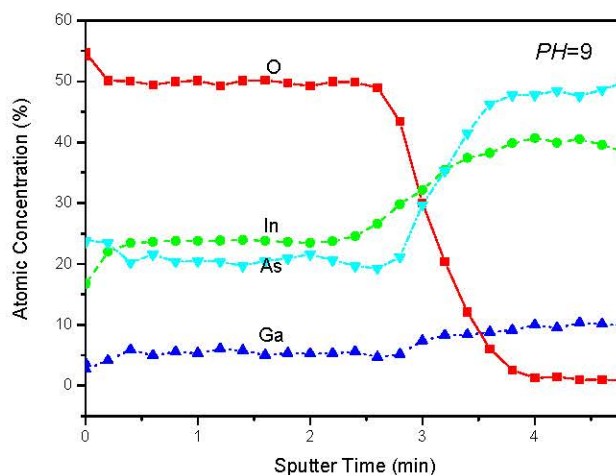
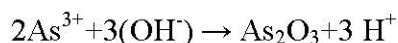
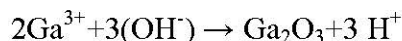
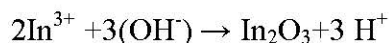
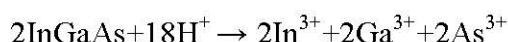


图3.3.4 氧化物薄膜的AES深度分布 (0.1mol/L KOH / 乙二醇)

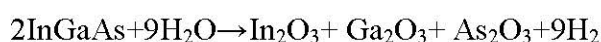
Fig 3.3.4 AES profiles of anodic oxides of InGaAs grown in a 0.1mol/L KOH / propylene glycol

通过AES分析可以看到, 在PH为9的KOH/乙二醇电解液中生成的氧化物薄膜中, 禁带较宽的 As_2O_3 和 Ga_2O_3 的含量明显增大, 更有利于提高氧化物薄膜的钝化效果。通过对阳极氧化的分析, 我们认为其原理如下^[97]:

在阳极发生的反应可以简化为:



综合整个氧化过程可简化为:



这种利用阳极氧化制备台面钝化膜的方法, 其主要的优点是长膜简便, 而且生长的钝化膜中各种氧化物的含量可以根据 PH 值的不同进行调整优化, 同时表现出了良好的绝缘性和粘附性, 并且与 InGaAs 材料有比较接近的热膨胀系数, 与后面的工艺基本相容; 缺点是 In_2O_3 的禁带宽度较小, 以及所生成的氧化物容易吸收空气中水分潮解, 所以我们采用了再沉积一层 SiO_2 薄膜来隔离氧化物薄膜与空气的直接接触, 并起到双层钝化和增透的作用。图 3.3.5 给出了, 采用阳极氧化+磁控溅射 SiO_2 双层钝化与磁控溅射单层 SiO_2 钝化器件的 I-V 特性比较, 其中阳极氧化所用的电解液为 PH=9 的 KOH/乙二醇电解液, 从图中我们可以看到, 有氧化物钝化层双层钝化的器件 I-V 特性, 要优于单层 SiO_2 钝化器件的 I-V 特性, 如在 -0.2V 时双层钝化器件的暗电流为 $3.0 \times 10^{-7}\text{A}$, 而单层 SiO_2 钝化器件的暗电流为 $1.0 \times 10^{-6}\text{A}$ 。

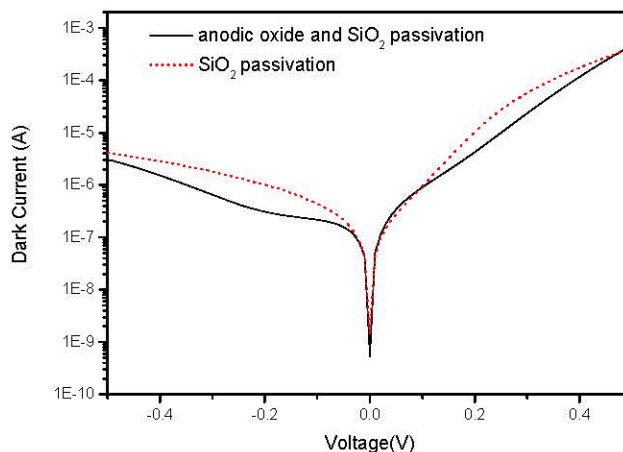


图3.3.5 两种钝化层器件的I-V比较

Fig 3.3.5 Measured dark current of the device versus voltage

3.4 本章小结

本章对P型电极的欧姆化和高台面的钝化技术进行了研究,为器件整体性能的提高提供了几个可选备用的方案。经过450℃、30 s 退火后, p-InP与Au/Zn/Au接触电极的比接触电阻可以降低到 $10^{-6} \Omega \text{cm}^2$; p-In_{0.8}Ga_{0.2}As与Ti/Pt/Au的接触电极经过460℃、30 s 退火后,其比接触电阻 $\rho_c \approx 7.5 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$; p-In_{0.8}Al_{0.2}As与Ti/Pt/Au的接触电极,经过480℃、30s 退火后,其比接触电阻 $\rho_c \approx 6.2 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ 。三种P型电极经过退火处理后,都能实现欧姆接触,但对于高In组分的InGaAs探测器来讲,其动态零偏电阻较小,所以由接触电极引入的电阻对器件性能的影响就会更明显,因此电极欧姆化和降低接触电极的电阻,将对器件性能的提高产生非常有益的影响。

第四章 测试结构芯片设计与测试结果分析

本章首先简要地介绍了光伏型探测器的工作原理以及典型的性能表征参数。通过我们自行设计的一套测试结构,对高 In 组分 InGaAs 探测器光敏芯片的响应信号、暗电流、噪声等典型性能参数与光敏芯片的台面面积、光敏面面积、周长以及形状等设计参数之间的关系进行了详细的研究,为长线列高 In 组分 InGaAs 探测器光敏芯片及焦平面组件的设计和性能分析奠定基础。

4.1 引言

随着 InGaAs 探测器焦平面向大面阵、长线列方向的发展,其探测器单元的尺寸正在不断地减小,例如探测器单元的面积由 $500\mu\text{m}\times 25\mu\text{m}$ (欧洲环境卫星的大气分布扫描成像吸收光谱仪: SCIAMACHY^[4]) 减小到 $13\mu\text{m}\times 13\mu\text{m}$ (印度资源卫星的高级广角传感器: AWiFS^[25])。随着器件尺寸逐渐减小,所引起的器件性能的变化越来越明显,因此研究器件的设计尺寸以及形状对其性能的影响,对 InGaAs 线列和面阵焦平面的研究和设计有着重要的意义。针对这个问题国内外相关的研究和文献报道还不是很多,而且也都很不全面,只是对某一个性能参数与器件尺寸的关系进行了研究,如 1983 年 Paul P.WEBB 对直径为 $100\mu\text{m}$ 和 $500\mu\text{m}$ 的 InGaAs 单元器件的暗电流进行了对比研究^[109]; 2006 年 Howard W.Yoon 等人对直径为 1mm 和 3mm 的 InGaAs 单元器件的零偏电阻进行了对比研究^[117]; 2008 年 Joseph Boisvert 等人对不同直径-面积比的 InGaAs 单元器件的暗电流进行了对比研究^[118]。

综上所述,设计一套能同时完成多个性能参数分析的测试结构是非常必要的,我们在总结和参考国内外同行专家的研究经验和成果的基础上,自行设计了一套测试结构,并通过它对器件的性能与器件的设计尺寸之间的关系进行了详细的研究。

4.2 光伏型探测器的工作原理

p-n 结是光伏型探测器的核心,由于扩散的结果,使 p 区带负电, n 区带正电,这些电荷以偶层的形式积累在 p-n 结附近,建立起一势垒,如图 4.2.1 所示。当这一势垒增高,使相应内建电场达到一定的强度,就能阻止电子和空穴的进一步扩散,此时达到热平衡状态。

当适当波长的光照射 p-n 结时,不论是在 n 区或 p 区或结区都可产生电子-空穴对,破坏原来的热平衡状态。p 区中的光生空穴和 n 区中的光生电子被 p-n 结势垒阻挡,不能进入结区,结区产生的光生电子-空穴对,在结区电场的作用下被分开,光生电子向 n 区移动,光生空穴向 p 区移动。则这些光生电子和空穴,将使得 p 区得到附加的正电荷,使 n 区得到附加的负

电荷，相应地 **p-n** 结得到附加的电动势，这种由内建电场引起的光电效应，称为光生伏特效应，这种附加的电势称为光生电动势。

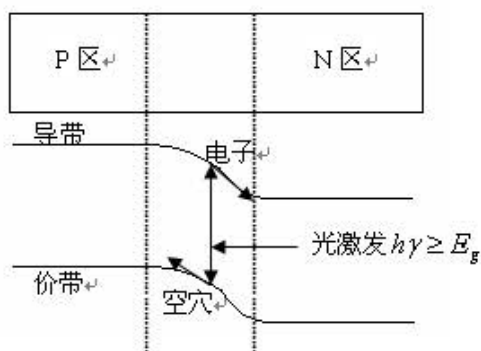


图 4.2.1 p-n 结的能带图

Fig 4.2.1 Energy-band diagrams of p-n junction

光生电动势的产生，是由于光生电子-空穴对的产生和分离，因而入射的光子的能量必须足以产生光生电子-空穴对。即必须是本征激发才能产生光生伏特效应。杂质的激发一般只产生一种载流子，不会产生光生伏特效应。

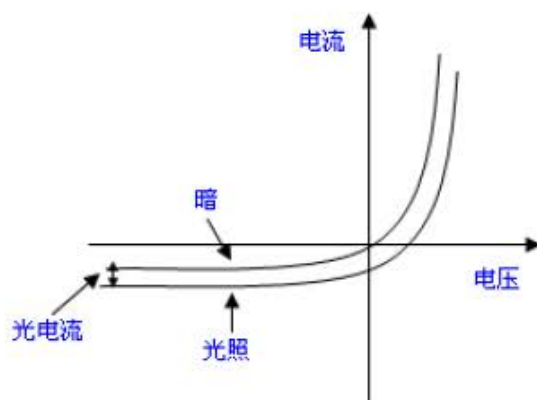


图 4.2.2 有无光照时 p-n 结光电二级管的典型 I-V 曲线

Fig 4.2.2 Current-voltage characteristics for the illuminated and nonilluminated photodiode

在适当的光照下，如果将 **p-n** 结光伏探测器短路或者将它与外电路互连后，则会出现光生电流（光电流），如图 4.2.2 所示。此时光电二极管的 I-V 特性可表示为^{[104][105]}：

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

其中， $I_s = A \left(\frac{qD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} \right)$ 为反向饱和电流。上式中的第一项表示为光伏探测器的暗电流，

第二项表示为光伏探测器的光电流，光电流的大小与入射光辐照能量和器件的光电转换效率有关。

虽然光伏探测器可以在零偏和反向偏压下工作，但一般都在反向偏压的条件下工作。因为在反向偏压可以改变电流-电压特性曲线上的工作点，减小散粒噪声电流，而且适当的反向

偏压有利于增大耗尽区电场的强度，同时增大耗尽层的宽度，从而缩短载流子的渡越时间和提高光电转换效率，可以提高器件的频响特性和灵敏度。

本文所研究的 InGaAs 短波红外探测器，是在 p-n 结光电二极管的基础上，在重掺杂的 P 区和 N 区之间插入了一层非掺杂或轻掺杂的吸收层（i 层），形成 P-i-N 结构的光电探测器，i 层的引入增加了器件的耗尽层宽度，提高了器件的量子效率。根据外延材料的不同（如表 2.2.1 和表 2.2.2），我们制备了同质结和异质结型两种 P-i-N 高 In 组分 InGaAs 探测器，两种器件的性能分析将在下面几节中重点介绍。

4.3 InGaAs 探测器的特性参数

探测系统的设计是以探测器的性能为基础的。因此，我们需要一组参数作为衡量探测器性能的标准，这不仅是为了比较器件性能的优劣，更为了结合具体探测目的，选择最合适的红外探测器。应当指出，红外探测器的性能指标是与它的工作条件密切相关的。换言之，所给的性能指标，应标明有关的测试条件。例如器件的工作温度，输入辐射的光谱分布，电路的频率范围，偏置的大小等。描述探测器性能的主要参数有：探测器的 I-V 特性、响应光谱、噪声、响应率和探测率等。

4.3.1 I-V 测试

I-V 特性测试是 InGaAs 探测器性能表征的重要手段之一，通过 I-V 测试可以获取器件在不同偏压下的暗电流特性、器件的动态零偏电阻，确定器件的优值因子 R_0A 。特别是通过对变温的 I-V 测试可以分析器件的暗电流和噪声机制等。本论文中器件的 I-V 测试都是在 Keithley236 电流—电压测试仪上进行的。

对于 PIN 型 InGaAs 光电探测器的暗电流往往是由扩散电流 I_{diff} 、产生复合电流 I_{gr} 、直接带间隧穿电流 I_{bbt} 、缺陷辅助隧穿电流 I_{ta} 和表面/界面漏电流共同起作用的。

扩散电流公式表示为：

$$I_{diff} = I_{diff}^n + I_{diff}^p \approx qn_i^2 \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \left(\frac{A}{N_d}\right) [\exp(\frac{qV}{kT}) - 1]$$

其中： $n_i = 2 \left(\frac{2\pi k_B T}{h^2} M_c\right)^{3/2} (m_e m_h)^{3/4} \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right)$ ，为本征载流子浓度； D_p 为吸收区空穴扩散系数；

τ_p 为吸收区空穴的寿命； N_d 为吸收区掺杂浓度； A 是结面积； V 为探测器所加偏压。扩散电流受温度的影响很大，并且与器件偏压有关。

产生复合电流公式如下：

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

式中： q 为电子电量； τ_{eff} 是有效载流子寿命，它由间接复合、辐射复合、俄歇复合寿命共同决定； W 为耗尽层宽度， $W = [2\varepsilon_s(V_{bi} - V)/qN_D]^{1/2}$ ， ε_s 为吸收区介电常数； V_{bi} 为内建电场， $V_{bi} = (kT/q)\ln(N_D N_A / n_i^2)$ ， N_D 为吸收区掺杂浓度， N_A 为 P 区掺杂浓度。产生复合电流与温度和器件的偏压均有关系。

隧穿电流一般由两种隧穿电流模型组成，分别为带间隧穿电流 (I_{bt}) 和辅助隧穿电流 (I_{tat})，其表达式分别为：

$$I_{bt} = \gamma A \exp(-\mathcal{G}m_0^{1/2}E_g^{3/2}/qE_m\hbar)$$

$$I_{tat} = CE_mV \exp(-\mathcal{G}m_0^{1/2}E_t^{3/2}/qE_m\hbar)$$

式中： m_0 是电子质量， E_m 是最大结内电场，表达式为 $E_m = 2(V_{bi} - V)/W$ ， E_g 是带隙宽度， $\mathcal{G} = \alpha(m_e/m_0)^{1/2}$ ， α 取决于隧穿势垒的具体形状， C 为隧穿常数， E_t 为缺陷能级。隧穿电流与器件的偏压关系很大，但只是通过 E_g 与温度存在较弱的关系。

表面/界面电流：

$$J_{if} = \frac{q}{2} A n_i \sqrt{\sigma_n \sigma_p} v_{th} N_{is} \pi k_B T$$

其中， σ_n, σ_p 分别为电子和空穴的俘获系数， $v_{th} = \sqrt{(3k_B T/m_h)}$ ， N_{is} 为界面态密度。由上式可以看出表面/界面漏电通过 n_i 与温度的倒数成指数关系，而与器件偏压无关，与表面复合速率有关。

4.3.2 相对响应光谱测试

器件对相同功率的单色入射光所产生的方均根信号电压 V_s 与入射波长 λ 的关系称之为器件的光谱响应，通常用单色响应率 R_λ 对 λ 作图，或者以单色 D_λ^* 对 λ 作图来表征器件的光谱响应，纵坐标 R_λ 或 D_λ^* 有时给出绝对的测量值，有时只给出相对数值。前者给出绝对光谱响应，后者给出相对光谱响应。本文所进行的光谱测试均为相对响应光谱，测试仪器为 Nicolet 傅立叶变换光谱仪，用待测的探测器代替光谱仪中的探测器，其中探测器工作在零偏状态下，输出的电信号经过前置放大器输入光谱仪中。利用迈克尔逊干涉仪中动镜位置的机械扫描结合傅立叶变换实现对探测器光响应的频率扫描，从而可测定出探测器的相对响应光谱。

4.3.3 黑体响应率

在调制辐射垂直投射到探测器的选用响应平面的情况下，响应率 R 就是电输出基频的方均根值 V （开路）与入射功率基频的方均根值 ϕ 之比，响应率的单位为 V/W，或 A/W。计算公式为： $R = V/\phi$ ，响应率通常与入射波长 λ ，调制频率 f ，探测器的温度 T 及其偏置有关。其中调制频率视探测器的种类不同而不同，对光子探测器则选用 800 Hz、1K Hz、2.5KHz，

对热探测器，可选用 10Hz、12.5 Hz 或 60 Hz。

由于实际应用中连续可调的单色光源及其功率标定的困难，通常采用较易实现的黑体辐射源来对探测器的响应率进行测量表征。由于黑体辐射的能谱分布与黑体温度满足普朗克定律，结合黑体辐射的特性可比较容易地计算出探测器峰值响应率和探测率，因此黑体测试成为标定红外探测器响应特性的重要手段。所用的黑体测试系统如图 4.3.1 所示。

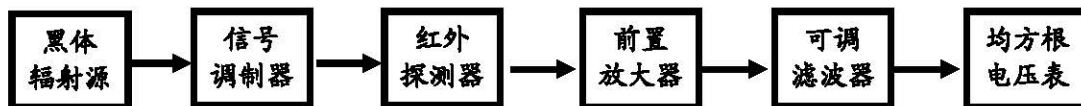


图 4.3.1 黑体响应率测试系统示意图

Fig 4.3.1. Measurement system of blackbody responsivity

一个温度为 T_1 光栏孔面积为 A 的黑体，如果周围环境温度为 T_2 ，并假定周围介质辐射也具有黑体的性质。则根据斯蒂芬—波尔兹曼定律，在单位时间内，它向周围辐射的能量为：

$$\phi' = A\varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4)$$

其中 ε 为黑体的发射率，斯蒂芬—波尔兹曼常数 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$ 。在距光栏为 l 的地方，放置光敏面积为 A_D 的探测器，则单位时间落在探测器光敏面上的能量为：

$$\phi = \frac{\varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\pi l^2} AA_D$$

加调制盘后，能量为：

$$\phi = \frac{m\varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\pi l^2} AA_D$$

m 为调制因子。

本文中的调制频率选为 800 Hz，探测器至黑体源的距离可调，根据不同的封装情况，确定它们之间的距离。仔细调节探测器的位置，使均方根电压表读数最大，测得信号电压为 V_s 。求得探测器的黑体响应率为：

$$R_{bb} = \frac{V_s}{\phi_s} = \frac{\pi l^2 V_s}{m\varepsilon\sigma(T_1^4 - T_2^4) AA_D}$$

黑体响应率 R_{bb} 和峰值响应率 R_{λ_p} 的关系可写为：

$$R_{\lambda_p} = GR_{bb}$$

G 因子表示的是峰值响应率和黑体响应率的比值，可由相对响应光谱与黑体辐射谱进行叉乘得到，定义为^[106]：

$$G = \frac{G(\lambda_p) \int_0^{\infty} \phi(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/(\lambda T)} - 1)} d\lambda} = \frac{G(\lambda_p) \sigma T^4}{\int_0^{\infty} G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/(\lambda T)} - 1)} d\lambda}$$

其中 $G(\lambda_p)$ 为峰值响应, 第一辐射系数 $C_1=3.742 \times 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2$, 第二辐射系数 $C_2=1.439 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$ 。InGaAs 探测器的理论响应率 R_i 为:

$$R_i = \frac{\lambda \eta}{hc} qg$$

式中 η 为量子效率, g 为光电增益, 对于光伏型探测器 g 取 1。在室温下峰值波长 $2.2 \mu\text{m}$ 和 $2.3 \mu\text{m}$ 附近, 理想情况下量子效率取 100% 时, 理论响应率的最大值约为 1.78 A/W 和 1.85 A/W 。

4.3.4 噪声测试

基本噪声定义为由于微观粒子所引起的物理量自然涨落, 人们既不能精确地预见它在下一瞬间的大小, 也不能完全排除它的存在。对于光电探测器而言, 噪声表现为无目标辐射入射时探测器的输出均方根电流 (或均方根电压), 即为噪声电流 (或噪声电压), 它不仅扰乱的有用的信号, 还决定了测量系统的最小可检测电平。InGaAs 光电探测器的噪声主要表现为五种基本噪声形式: (1) 热噪声, (2) 散粒噪声, (3) 产生-复合噪声, (4) $1/f$ 噪声, (5) 光子噪声等。其中热噪声、散粒噪声和光子噪声与频率无关属于白噪声, 产生-复合噪声和 $1/f$ 噪声与频率有关, 特别是 $1/f$ 噪声在低频时非常显著。本文中噪声的测试系统类似于黑体响应率的测试系统 (图 4.3.1), 省去黑体和信号调制器, 将装有待测器件的杜瓦瓶或封装好的器件放入屏蔽盒中, 仔细排除外界对测量系统的一切干扰。

4.3.5 探测率 D^*

探测率 D^* 是一个间接测量的探测器性能指标, 它表示当探测器为单位响应面积、放大器带宽为 1Hz 时, 单位入射功率所能获得的信噪比, 它的数值越大, 表明探测器的性能越好。探测率包含了噪声和响应率两个因子。因此, 在给出一个探测器的探测率时, 必须说明与上述两个因子有关的辐射源性质, 调制频率和放大器带宽。以黑体为辐射源测得的 D_{bb}^* , 称为黑体探测率, 具体的计算公式可写为:

$$D_{bb}^* = \sqrt{\frac{\Delta f}{A_D}} \times \frac{\pi l^2}{A m \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)} \left(\frac{V_S}{V_N} \right)$$

其中 V_S 为信号电压, V_N 为噪声电压, 其它的参数定义同上。

如果探测器的噪声以热噪声和散粒噪声为主时, 探测器的探测率也可以通过理论计算的方式求得, 首先通过器件的 I-V 特性曲线, 确定器件的优值因子 $R_0 A$, 因为探测器的探测率

和 R_0A 的关系可表示为:

$$D^* = \frac{e\eta}{2hy} \sqrt{\frac{R_0A}{KT}}$$

以单色光为辐射源测得探测率为光谱探测率或单色探测率,通常人们采用峰值波长处的探测率对器件进行描述,即峰值探测率 D_{λ}^* 。峰值探测率和黑体探测率的关系可写为:

$$D_{\lambda}^* = G \square D_{bb}^*$$

4.3.6 线列焦平面的性能参数

InGaAs 短波红外线列焦平面的主要性能参数包括:像元响应率、各元的非均匀性(暗电流、响应信号)、盲元率、像元之间的串音等。此外,还有焦平面组件的积分时间、动态范围、视场角等参数。

4.4 测试结构芯片设计和芯片的制备

图 4.4.1 (左图) 是测试结构芯片的示意图,其中包括了光敏面为正方形(A5~A8)、长方形(A9、A10、B1)以及圆形(B2~B5)的探测器结构。正方形探测器的光敏面边长分别为 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 和 $200\mu\text{m}$,其台面面积分别为 $25\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ 和 $200\mu\text{m} \times 250\mu\text{m}$;长方形探测器的光敏面边长分别是:A9 为 $25\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$,A10 为 $25\mu\text{m} \times 75\mu\text{m}$ 和 B1 为 $50\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$,其台面面积分别是:A9 为 $25\mu\text{m} \times 175\mu\text{m}$,A10 为 $25\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ 和 B1 为 $50\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$;圆形光敏面探测器(B5、B4、B3 和 B2)与共用电极另一侧与之相对的方形探测器(A5、A6、A7 和 A8)具有相同的台面周长。表 4.4.1 给出了部分测试单元的周长、面积等参数的比值。设计值和实际值之间的差别是由于在器件的台面成形工艺中采用了湿法腐蚀工艺制备台面,由于湿法腐蚀是各向同性的,所以存在横向钻蚀现象,测量结果表明横向钻蚀为 $2\mu\text{m}$,在对比实验中均采用实际的测量值。

测试结构芯片的制备采用了编号为 GM0781Z 的外延材料。采用湿法腐蚀台面成型工艺,制备完成器件的显微照片如图 4.4.1 (右图) 所示。

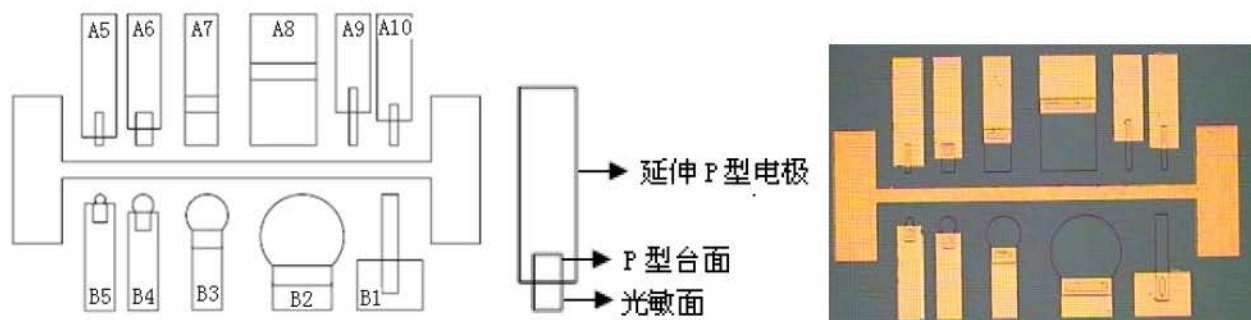


图 4.4.1 测试结构设计示意图及其显微照片

Fig 4.4.1 Schematic diagram of mesa structured detector and the photograph of the test configuration

表 4.4.1 测试结构中各测试单元尺寸大小的比值

Table 4.4.1 The ratio of design size for the different test configuration

比值	A6/A5	A7/A6	A8/A7	A9/A6	B1/A7
光敏区的周长 (设计值)	2	2	2	1.25	1.25
光敏区的面积 (设计值)	4	4	4	1	1
台面的周长 (设计值)	1.2	1.667	1.8	1.333	1.4
台面的面积 (设计值)	2	3	3.333	0.875	1
光敏区的周长 (实际值)	2.190	2.087	2.042	1.272	1.260
光敏区的面积 (实际值)	4.798	4.355	4.168	0.953	0.978
台面的周长 (实际值)	1.214	1.704	1.826	1.352	1.413
台面的面积 (实际值)	2.190	3.174	3.440	0.813	0.971

4.5 芯片的测试及结果讨论

4.5.1 芯片的 I-V 特性分析

图 4.5.1 为抽测的一组测试结构中各单元的 I-V 特性曲线 (左图), 右图为在同一偏压下 (-0.5V) 各测试单元暗电流 (I_d) 的测试结果。由 I-V 特性曲线可以看出器件的暗电流随器件面积的增大而明显增大, 随着面积的增大, 器件的 I-V 特性曲线明显分为四组。而对于面积相差不大、形状不同的器件, 其暗电流也基本相等, 表现为每一组中的两条曲线基本重合, 如长方形器件 A5、A6、A7、A8 分别与圆形器件 B5、B4、B3、B2 基本重合。对于周长相等的圆形测试单元和方形测试单元, 由右图可以看出圆形的测试单元的暗电流比方形的测试单元的暗电流稍大, 这是因为在相同的周长下, 圆形的台面面积稍大于方形的面积, 这说明器件的暗电流与整个台面的面积密切相关。

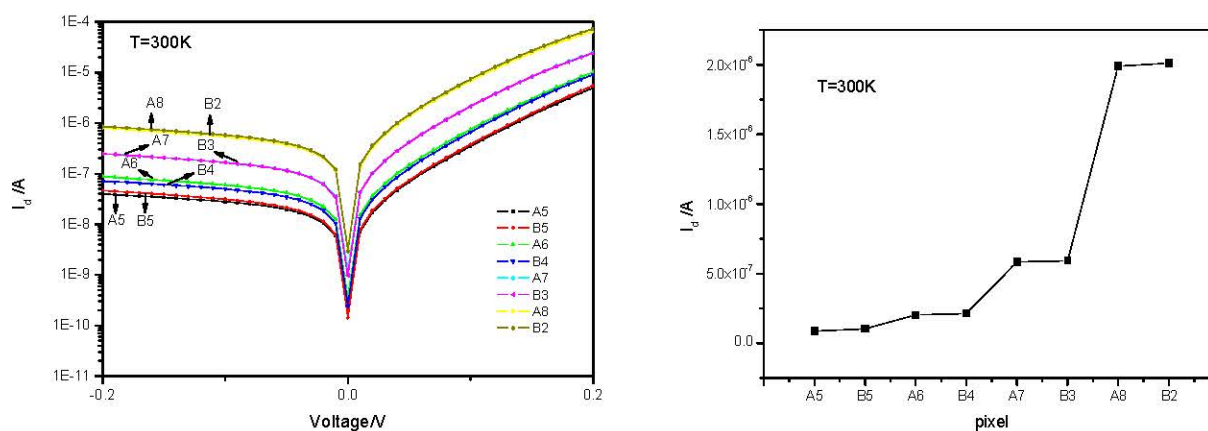
图 4.5.1 测试结构中各测试单元的暗电流 (I_d)

Fig 4.5.1 Dark current of each pixel for the test configuration

表 4.5.1 测试结构中各测试单元的暗电流比值

Table 4.5.1 The dark current ratio of each pixel of the test configuration

比值	A6/A5	A7/A6	A8/A7	A9/A6	B1/A7
台面的面积 (实际值)	2.190	3.174	3.440	0.813	0.971
暗电流 (I_d) (-0.5V)	2.361	2.875	3.313	0.805	0.837

表 4.5.1 给出了暗电流的比值关系, 器件暗电流的比值趋近于台面面积的比值, 而与台面的周长之比无明显的关联性, 由此可以得到器件的暗电流主要为器件体内的产生复合电流和体扩散电流等, 由台面的侧面损伤引起的暗电流可以忽略, 说明 SiN 钝化膜起到了明显的钝化效果。对 A9 和 A6 以及 B1 和 A7 器件的暗电流分析, 可以看出对于具有相同台面面积的器件, 其暗电流与器件的形状无关。

4.5.2 芯片的噪声和响应信号

器件噪声和响应信号随器件的台面面积增大而迅速增大 (图 4.5.2)。由表 4.5.2 可以看出器件响应信号的比值趋近于整个台面面积的比值, 分析可能的原因是台面器件的结区特性是由整个台面的大小决定的, 而不仅仅是由光敏区决定, 更具体的原因还要进一步分析研究; 同时由 A6/A5、A7/A6 和 A8/A7 可以得到, 响应信号和噪声所表现出的变化倍数不同, 而且响应信号增大倍数大约是噪声增大倍数的 2 倍, 这可以由下面的探测率公式给出解释:

$$D^* = \sqrt{\frac{\Delta f}{A}} \times \frac{\pi l^2}{A_B m \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)} \left(\frac{V_{0S}}{V_{0N}} \right)$$

其中 m 为调制因子, l 为黑体和探测器距离, Δf 为频率带宽, σ 为斯忒藩常数, ε 为黑体比辐射率, T_1 为黑体温度, T_2 为调制盘温度, A_B 为黑体出射孔面积, A 为光敏区面积, V_{0S} 为探测器的响应信号, V_{0N} 为噪声。

对于采用相同的材料和工艺所制备的器件 (大部分器件), 其探测率 D^* 应基本相同 (与面积无关), 所设计的器件 (A5~A8) 的面积存在大约 4 倍的关系, 而 $D^* \propto \sqrt{\frac{\Delta f}{A}} \left(\frac{V_{0S}}{V_{0N}} \right)$, 所以响应信号与噪声的增大倍数就产生了 2 倍的关系, 这与实验结果很好的符合。对于 A9/A6 和 B1/A7 的响应信号与噪声的增大倍数相同是因为我们在设计时 A9 和 A6 以及 B1 和 A7 器件的面积 (光敏面积或台面面积) 近似相等, 所以它们的信号和噪声的增大倍数一样。通过这组实验数据的分析, 同时说明了我们测试得到的器件的信号和噪声是可信的。

因此, 台面型探测器的响应信号和噪声不仅仅由光敏面的面积决定, 而是由探测器的整个台面面积决定的。

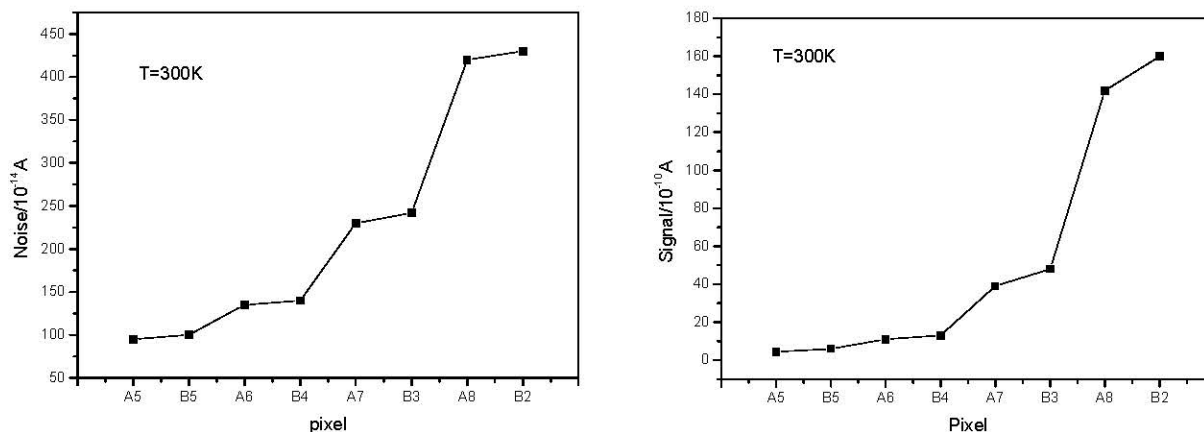


图 4.5.2 测试结构中各测试单元的噪声和响应信号
Fig 4.5.2 Noise and signal of each pixel for the test configuration

表 4.5.2 测试结构中各测试单元的噪声以及信号的比值
Table 4.5.2 The noise and signal ratio of each pixel for the test configuration

比值	A6/A5	A7/A6	A8/A7	A9/A6	B1/A7
光敏区的面积 (实际值)	4.798	4.355	4.168	0.953	0.978
台面的面积 (实际值)	2.190	3.174	3.440	0.813	0.971
信号	2.558	3.545	3.641	0.836	1.038
噪声	1.421	1.704	1.826	0.963	1

4.5.3 芯片的优值因子和探测率

优值因子 (R_0A 值) 是表征光伏器件的一个重要的品质因子, 它决定了降低背景通量所能达到的探测率上限, 低背景下 R_0A 值是由各种暗电流成份共同决定的, 这些暗电流的大小由材料的参数、成结和钝化等制备工艺水平决定。因此 R_0A 值综合反映材料的好坏和器件的制备工艺水平, 是评价 PN 结质量的重要指标。对于正照射台面型探测器而言, 由于其制备工艺的需要, 一般在腐蚀 (或刻蚀) 台面时, 除保留光敏区外还要预留一部分 P 型台面区域作为 P 电极区, 因此整个台面的面积就要大于光敏区的面积, 而对于小光敏元器件, 其 P 电极区所占整个台面面积的比重更大, 这就对 R_0A 值的确定和计算带来了一个比较棘手的问题: A 的取值是取整个台面的面积还是光敏区的面积更为合理。

$$\text{探测率和优值因子的关系可表示为: } D^* = \frac{\sqrt{A\Delta f}}{NEP} = \frac{e\eta}{2h\gamma} \sqrt{\frac{R_0A}{KT}} \quad (\text{其中 } e \text{ 为电子电量, } \eta \text{ 为光的}$$

量子效率, h 为普朗克常数, γ 为入射光的频率, K 为波尔兹曼常数, T 为温度)。根据此公式可以得到, 对于采用相同的材料和工艺所制备的器件, 在相同的测试条件下, 它们的探

测率应为一个定值，从而它们的优值因子 R_0A 为同一常数。表 4.5.3 是测试结构中各元 R_0A 的测试结果的比值。由表可知，当 A 取为台面的面积时， R_0A 值趋于定值，因此台面型探测器的优值因子 R_0A （或结区特性）应由整个台面面积所决定，同时也可以得到器件的 R_0A 与器件的周长无关，也就是在台面面积一定时与器件的具体形状无关，这也同时说明了我们采用的 SiN_x 钝化层起到了良好的钝化效果，使得器件的优值因子（暗电流）与器件的侧面积大小无关。

表 4.5.3 测试结构中各测试单元的优值因子的比值

Table 4.5.3 The zero-bias resistance area ratio of each pixel for the test configuration

比值	A6/A5	A7/A6	A8/A7	A9/A6	B1/A7
R_0A (A 为光敏区的面积)	2.285	1.545	1.281	1.249	1.174
R_0A (A 为台面的面积)	1.043	1.126	1.058	1.067	1.147
探测率 D^*	0.824	0.996	0.977	0.861	0.998

从 R_0A 的比值以及探测率 D^* 的比值，可以看出，随着台面面积的减小， R_0A 也有减小趋势（的比值稍大于 1），而探测率 D^* 有增大的趋势（探测率 D^* 的比值稍小于 1），说明随着器件尺寸的减小，器件的周长与面积比增大，侧面的漏电成份有所增加，使得 PN 结性能有所下降，导致 R_0A 有减小的趋势；同时随着侧面所占的比重增大，由侧向杂散光所产生的光生载流子，以及光生载流子的横向收集成份所占信号的比例有所增加，引起了探测率 D^* 有增大的趋势，但这种效应会使列阵成像模糊，所以小光敏面器件对器件的设计和钝化等关键工艺要求更高。

4.6 信号、暗电流和噪声与台面关系的进一步研究

4.6.1 关于测试信号与整个台面成比例关系的思考

根据前面对探测器响应信号的分析，可以看出器件的响应信号与器件的面积关系密切。一般考虑，p-n 结二极管探测器的响应信号与器件结面积成正比例函数关系，但是对于我们的正照射台面型探测器，器件的结面积不仅包括接收入射辐射的有效光敏区，还包括一部分被加厚延伸电极（P 电极）所覆盖的电极区域。因此我们希望通过响应信号分别与整个台面面积（结面积）和有效光敏区面积进行拟和，来确定器件的哪一个面积与其响应信号的关系更接近正比例函数关系。

图 4.6.1 给出了响应信号与两个面积的关系以及它们的拟和结果，其中左图为响应信号与器件整个台面（结面积）的关系，右图为响应信号与器件有效光敏区面积的关系。我们采用

了 $y = a \cdot x^b$ 函数关系式对两者进行了拟和, 两者中参数 b 中越接近 1 的, 说明其更符合正比例函数关系, 也就是说更与理论相符合。由图 4.6.1 给出的拟和结果可知, 在器件的响应信号与器件整个台面面积 (结面积) 的拟和结果中, 参数 $b = 1.053$, 而器件的响应信号与器件有效光敏区面积的拟和结果中参数 $b = 0.898$ 。说明器件的响应信号与器件整个台面面积 (结面积) 的关系更接近于正比例函数关系。

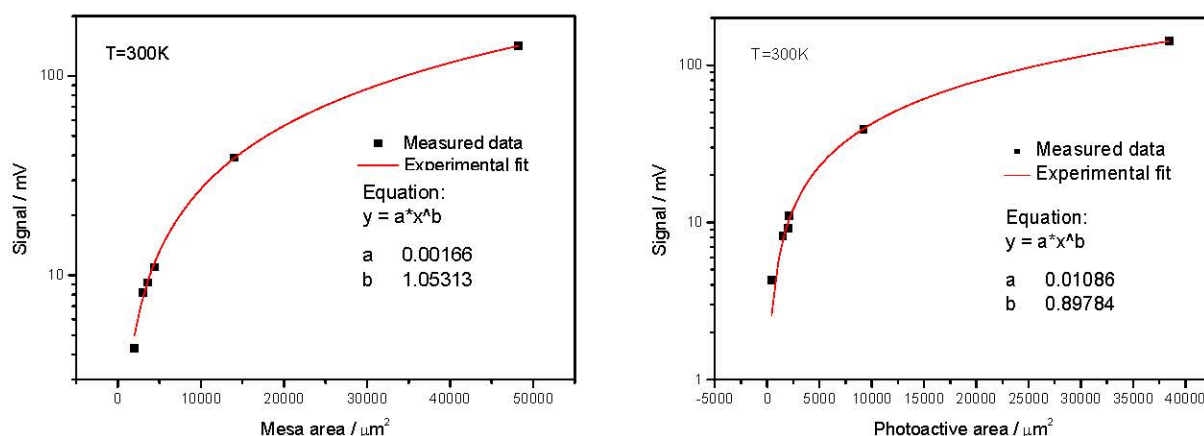


图 4.6.1 器件的响应信号与台面面积和光敏区面积的关系 (左侧为信号与台面面积的关系, 右侧为信号与有效光敏面面积的关系)

Fig 4.6.1 The measured signal versus mesa area (left) and photoactive area (right) of the $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

根据前面的分析, 可以认为正照射台面型器件的响应信号取决于器件的整个台面面积 (结区面积), 但是器件的台面面积被分为了两部分, 一是有效的光敏区面积, 二是被加厚延伸电极 (P 电极) 所覆盖的电极区域。但是两部分面积对于信号的贡献具体是否一样, 也就是说关系式 $y = a \cdot x^b$ 中的参数 a 还没有确定, 接下来我们对两者对信号的贡献进行分析。

首先有两个假设: 1、我们可以把信号分为两部分, 这两部分分别与整个台面分成的两部分相对应, 一部为有效光敏区, 另一部分为被加厚延伸电极 (P 电极) 所覆盖的区域; 2、假设信号的大小与台面两个区域的面积都是成正比关系的。如果满足前面的两个假设条件, 那么我们就可以把信号的大小简化为:

$$S = \alpha A + \beta B$$

其中, S 为信号、 A 为光敏区的面积、 B 为被加厚电极所覆盖区域的面积、 α 和 β 为两个系数。

通过上式我们可以很容易的求 α 和 β 两个系数的具体数值, 任意选取两个测试单元的信号测试数据和 A 、 B 值带入上式。如选取 A6 和 A7, 其中 A6 的有效光敏面 (A) 面积为 $2208\mu\text{m}^2$, 被加厚电极所覆盖的台面区域 (B) 面积为 $2208\mu\text{m}^2$, 测试的信号 (S) 为 11mV ; A7 的有效光敏面 (A) 面积为 $9408\mu\text{m}^2$, 被加厚电极所覆盖的台面区域 (B) 面积为 $4608\mu\text{m}^2$, 测

试的信号 (S) 为 39mV。带入上式后求得:

$$\alpha = 3.34 \times 10^{-3} \text{ mV} / \mu\text{m}^2, \quad \beta = 1.64 \times 10^{-3} \text{ mV} / \mu\text{m}^2$$

为了验证两个参数的准确性, 把通过上面的信号表达式求出的另外几元器件的信号与实际测试的结果进行了对比, 如下表:

表 4.6.1 探测器响应信号的计算值与测试值

Tab 4.6.1 Calculated and measured signal of the detector with different mesa area

器件编号	A μm^2	B μm^2	αA mV	βB mV	计算信号 mV	实测信号 mV	误差 %
A5	483	1533	1.61	2.51	4.12	4.3	4.2%
A10	1533	1533	5.12	2.51	7.63	8.2	6.95%
A9	2058	1533	6.87	2.51	9.38	9.2	1.96%
B1	9108	4508	30.42	7.39	37.81	40.5	6.64%
A8	38808	9408	129.62	15.34	145.05	142	2.15%

从表 4.6.1 中, 我们可以看到采用前面所假设的公式和参数, 计算得到的信号值与测试值之间的误差在 1%~7%之间, 说明两者符合较好。当然, 这种简单的思考和推导方式, 其本身的理论依据和理论解释还很缺乏, 但对于同一批材料同一次流片和测试的情况下, 这种简化的推导方式还是有意思的。遗憾的是, 我们虽然能够确定器件的结性质是由整个台面所决定的, 但对于被延伸电极所覆盖的结区是怎样影响器件的响应信号的, 我们还没有给出一个合理的解释。

4.6.2 关于暗电流和噪声与台面面积成比例的思考

与对信号的分析相类似, 我们将暗电流和噪声与台面面积进行了 $y = a \cdot x^b$ 函数关系式的拟和, 在暗电流与台面面积的关系式中参数 $b = 0.919$, 噪声与台面面积的关系式中参数 $b = 0.938$, 可以看出两者都非常接近正比例函数关系式。说明两者都主要来自于器件的体内。

另外, 如果随着器件的设计尺寸越来越小, 当器件的暗电流和噪声小于了测试系统的理论极限时, 我们可否考虑采用这样的理论公式进行推算, 当然对于不同批次的材料应该有不同系数, 可以通过在流片过程中同时进行测试结构陪片的流片, 并采用相同的测试条件, 这样就可以得到与每一批器件相对应的系数, 从而对测试起到有益的补充作用。

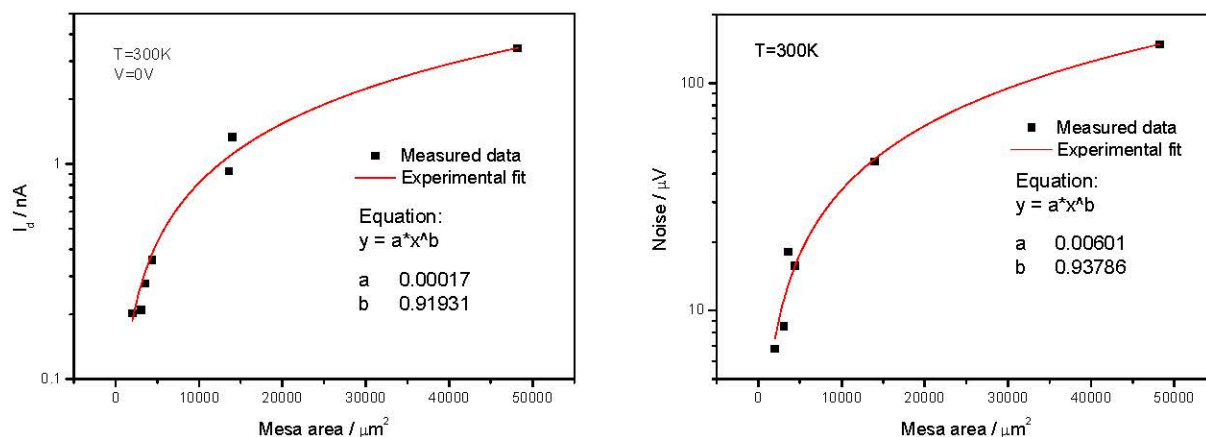


图 4.6.2 器件的暗电流和噪声与台面面积的关系（左侧为暗电流与台面面积的关系，右侧为噪声与台面面积的关系）

Fig 4.6.2 The measured dark current and noise versus mesa area of the $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

关于器件的暗电流主要来源于器件体内的另外一种推导。一般认为器件的暗电流由两个来源，一是来源于器件的体内，二是来源于器件的外表面。对于台面型器件而言，我们认为主要是来源于器件的体内和台面的侧面。由此，我们可以将器件的暗电流表示为：

$$I = J_B A + J_S P$$

$$J = \frac{I}{A} = J_B + J_S \frac{P}{A}$$

其中， A 为台面的面积， P 为台面的周长， $J_B A$ 表示体内电流， $J_S P$ 表示侧面漏电流。

由上式可以看出，器件的暗电流密度（ J ）与器件周长面积比（ $\frac{P}{A}$ ）的关系类似于一次函数，因此可以通过分析 J 和 $\frac{P}{A}$ 的关系来进行研究，从而得到台面器件的侧面漏电流是否为器件暗电流的主要成份。图 4.6.3 给出了在不同的偏压下 J 和 $\frac{P}{A}$ 的关系图。从图中可以看出，在不同的偏压下，随着 $\frac{P}{A}$ 的变化暗电流密度基本上都是围绕着同一数值波动，对两者进行拟合得到的结果基本上都是一条平行于 $\frac{P}{A}$ 轴的水平直线，由此可以得到 $J_S \approx 0$ ，即器件的侧面漏电流相对于器件的总暗电流可以忽略不计。说明在我们的器件制备工艺中，侧面钝化起到了良好的效果，有效的减少了侧面的漏电流。

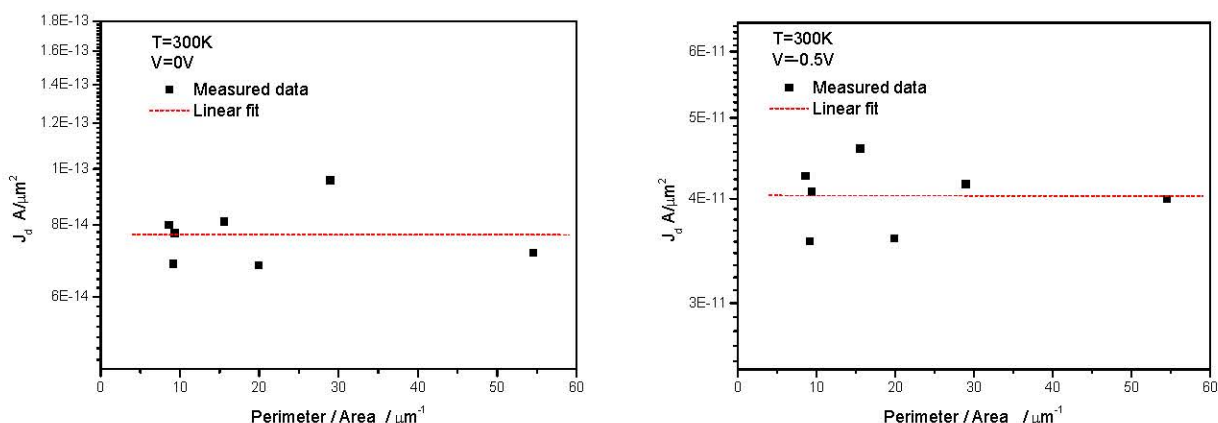


图 4.6.3 不同偏压下器件的暗电流密度与周长面积比的关系
 Fig 4.6.3 The dark current density versus P/A ratio at 0 and -0.5V bias under 300K

4.7 本章小结

本章对测试结构中各测试单元的测试结果进行分析,得到了正照射台面型 InGaAs 探测器的性能参数与器件设计尺寸参数之间的一些对应关系。在用优值因子 (R_0A) 描述器件的结区特性时, A 取台面的面积更为合理; 器件的暗电流和噪声都是由整个台面面积所决定的, 特别是通过对暗电流密度和器件周长面积比的分析, 得到器件的侧面漏电流相对于其总暗电流可以忽略不计; 器件的响应信号不仅取决于光敏感区的面积, 而是与整个台面面积密切相关; 当台面型器件具有相同的台面面积时, 在一定的合理范围内其性能与具体形状无关; 小光敏面探测器更容易受到侧面和表面状态的影响, 因此在设计小光敏面器件时, 更应注意整个台面面积的大小和光敏感区所占整个台面面积的比例。

第五章 线列器件制备及性能分析

本章首先简要地介绍了器件的制备工艺，其中包括采用阳极氧化和 SiO_2 双层钝化工艺、 SiN_x 单层钝化工艺及背照射器件的制备工艺。通过对所制备的原型器件进行测试分析，对采用 InGaAs 为缓冲层和帽层的同质结器件和 InAlAs 为缓冲层和帽层的同质结器件进行了对比分析。最后，对光敏芯片与读出电路互连后的焦平面进行了初步分析。

5.1 台面型线列器件的工艺流程

外延材料是由中科院上海微系统与信息技术研究所提供的原位掺杂的高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 外延材料。外延材料晶片经过三氯甲烷、乙醚、丙酮和乙醇四步清洗之后，采用标准的光刻工艺，将图形转移到晶片上，依次进行台面成型、钝化、长电极、退火欧姆化、划片、互连和测试等基本工艺完成器件的制备。对于正照射和背照射器件的台面成型均采用湿法腐蚀的方法，腐蚀液采用磷酸/双氧水系腐蚀液，它具有较好的可控性和稳定性，其具体的反应机制为：首先由双氧水产生的活性氧，与表面 InGaAs 或 InAlAs 材料反应生成相应氧化物；然后氧化物与扩散到材料表面的磷酸反应，生成溶于水的化合物，使得反应得以继续进行，从而获得工艺想要的台面高度。钝化工艺根据不同的器件结构，采用阳极氧化和 SiO_2 双层钝化工艺、 SiN_x 单层钝化等工艺。在电极金属膜系的选择上 P 型电极均采用了 $\text{Ti}/\text{Pt}/\text{Au}$ ，具体的退火工艺根据不同的器件结构而不同，N 型电极均采用了 Cr/Au 金属膜系。

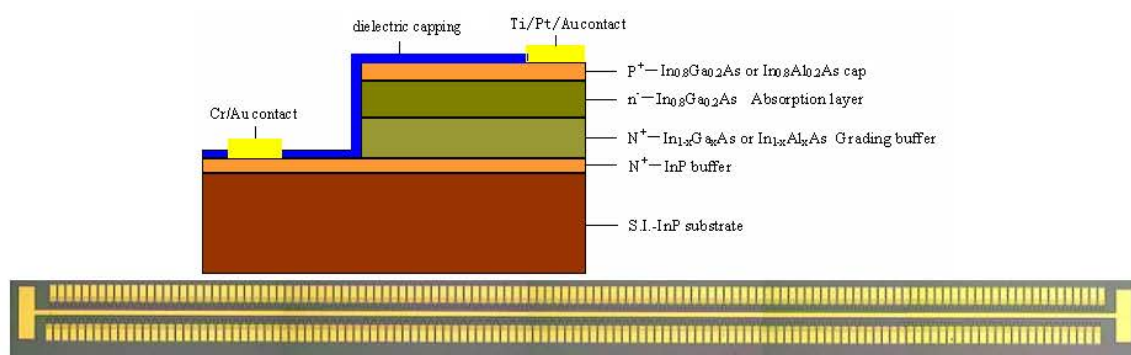
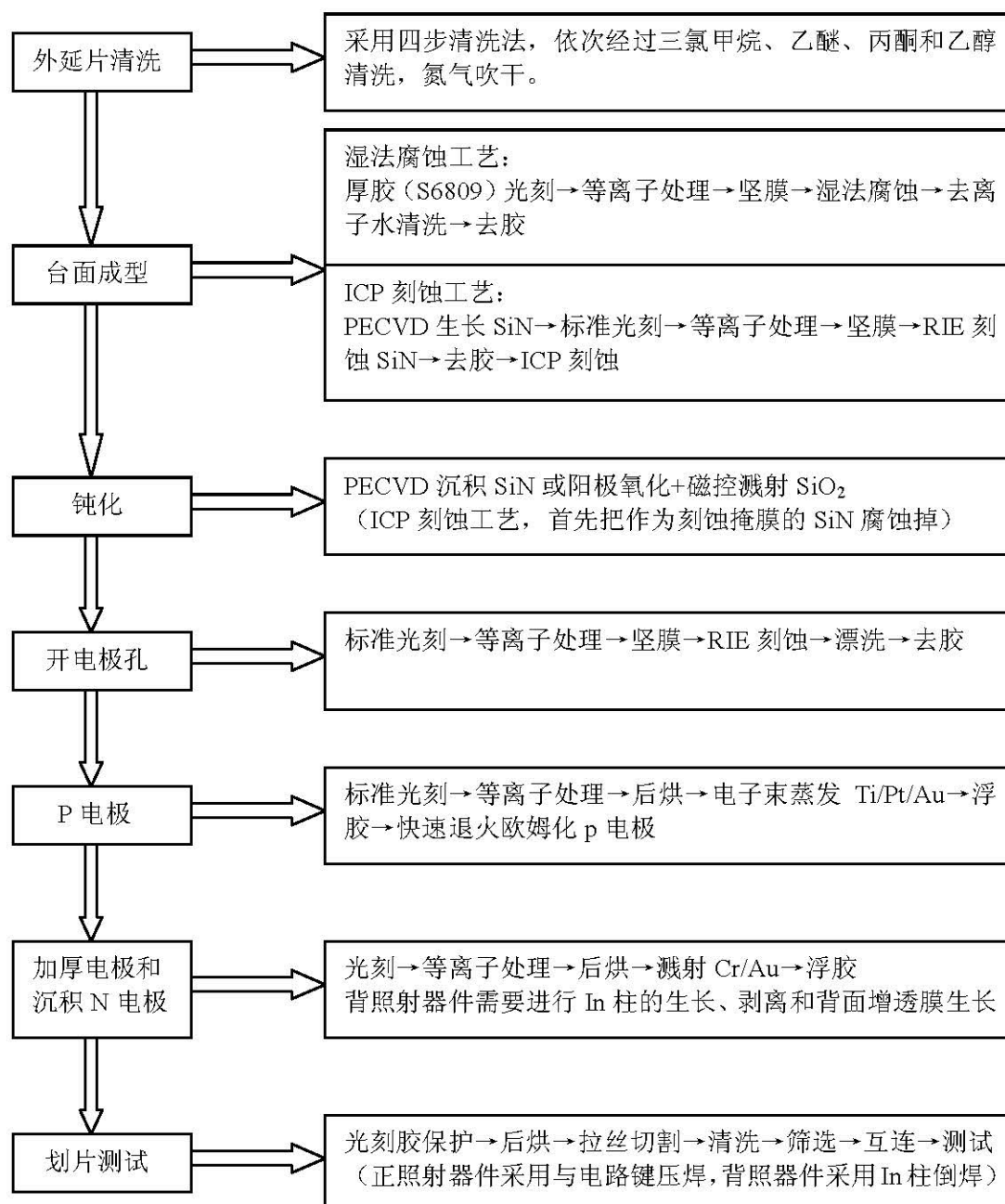


图 5.1.1 InGaAs 台面探测器的结构示意图和线列器件的照片

Fig 5.1.1 Schematic illustration of the mesa InGaAs detector structure and photograph of the linear detector array

图 5.1.1 给出了器件的结构示意图和线列器件的照片。为了减小台面的高度以降低钝化难度，N 型电极并不一定要做到 N^+-InP 缓冲层上，也可以做在 N^+ 型的 $\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ 缓冲层上。根据器件结构的不同具体的制备工艺会有所不同，基本的工艺流程图如下：



5.2 正照射高 In 组分 In_{0.8}Ga_{0.2}As 探测器的性能测试分析

5.2.1 缓冲层和帽层为 In_{1-x}Ga_xAs 的同质结器件性能分析

外延材料的具体参数如表 2.2.1。256×1 线列探测器如图 5.1.1，光敏面的尺寸为 50μm×50μm，光敏元之间的间距同样为 50μm。器件采用了湿法腐蚀台面成型工艺，台面高度大于 3 μm。钝化层采用了阳极氧化+SiO₂ 双层钝化。P 电极均采用 Ti/Pt/Au 金属膜系，N 电极为 Cr/Au。

5.2.1.1 室温下同质结器件的性能分析

同质结器件的 I-V 特性分析

首先在室温下，对三种采用不同吸收层浓度的外延材料所制备的器件的 I-V 特性进行了

测试分析，三种材料分别是 GM0708z、GM0705z 以及 GM0729z，它们的吸收层浓度分别为 $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、 $6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 和 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。三种器件的 I-V 特性曲线如图 5.2.1 所示。从图中我们可以看到三种器件的 I-V 特性曲线表现明显不同，随着吸收层掺杂浓度的增大，在相同的反向偏压下，器件的暗电流明显降低。在 -0.5V 的偏压下，三种器件的暗电流的大小分别为 $1 \sim 1.4 \times 10^{-4} \text{A}$ 、 $6 \sim 7.5 \times 10^{-6} \text{A}$ 和 $1.8 \sim 2.0 \times 10^{-6} \text{A}$ 。相应的器件的优值因子分别为 $1 \sim 2.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $3 \sim 4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $6 \sim 7.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。这是因为对于高 In 组分的 InGaAs 探测器，其各层外延材料之间存在大量的位错，进而在器件体内形成大量的缺陷。在反偏时，这些缺陷使得器件体内的产生-复合电流和隧穿电流成为整个暗电流的主要组成部分。当随着吸收层的掺杂浓度逐渐变大时，器件的耗尽层宽度逐渐减小，从而有效地减少了耗尽层中的产生-复合中心数量，抑制了产生-复合电流。对三种器件都进行了大量的抽测，每组器件中分别抽测了两个画在同一图中，从图中我们可以看出，它们的 I-V 特性曲线基本重合，说明器件的均匀性较好。

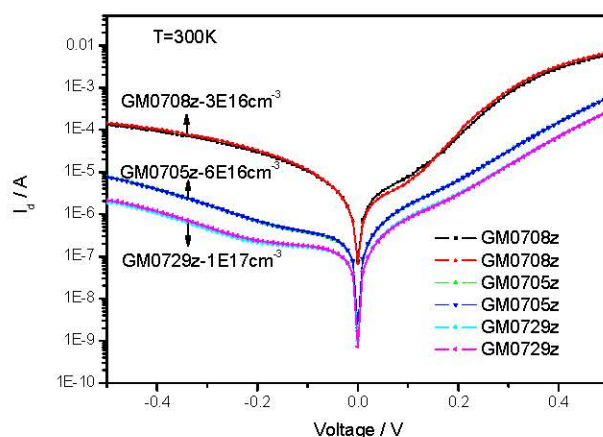


图 5.2.1 同质结器件的典型 I-V 曲线（三种不同的吸收层浓度）
Fig 5.2.1 Typical I-V curves of the homojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

同质结器件的响应光谱测试分析

同质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的相对响应光谱如图 5.2.2 所示，室温下的峰值波长为 $2.36 \mu\text{m}$ ，50%响应的长波截止波长为 $2.42 \mu\text{m}$ 。水汽在 $1.38 \mu\text{m}$ 和 $1.87 \mu\text{m}$ 附近的吸收明显。当温度降低时响应光谱的截止波长向短波方向移动，当温度每降低 10 度，截止波长将偏移大约 $0.01 \mu\text{m}$ 。响应波长的蓝移主要是源于 InGaAs 材料禁带宽度随温度的变化效应。

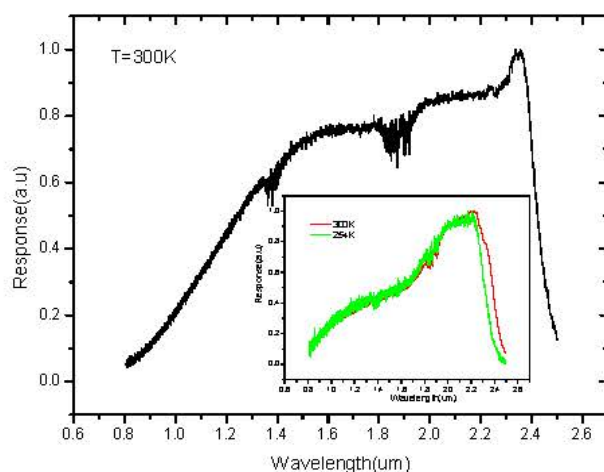


图 5.2.2 同质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的响应光谱
Fig 5.2.2 Spectral response of homojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

同质结器件的噪声测试分析

对所制备的器件进行了噪声测试和分析，图 5.2.3 给出的是 GM0729z 中一元器件的噪声测试和理论分析的结果。一般认为散粒噪声和热噪声是光伏器件最主要的噪声来源之一，而散粒噪声和热噪声可以通过理论计算得到。首先通过器件的 I-V 特性曲线提取器件的零偏电阻 R_0 ，两者跟零偏电阻的关系为：

$$i_N^2 = \frac{4kT}{R_0} \Delta f$$

其中 Δf 为 100Hz。

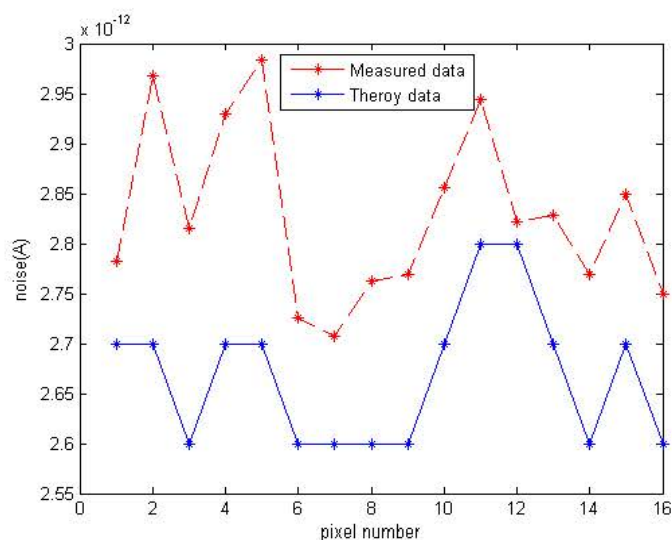


图 5.2.3 抽测 16 元器件的噪声的理论值和测试值之间的关系 (T=300K)
Fig 5.2.3 Comparison between theoretical and experimental noise for 16 pixels of the detector

从图中我们可以得到，测量值和理论值在一些大小趋势上是有一定的相似性的，说明散粒噪声在器件中确实提供了很大的一部分。同时也可以看到，测试值要明显的大于理论值，

说明器件的噪声还有其它来源。

同质结器件的探测率

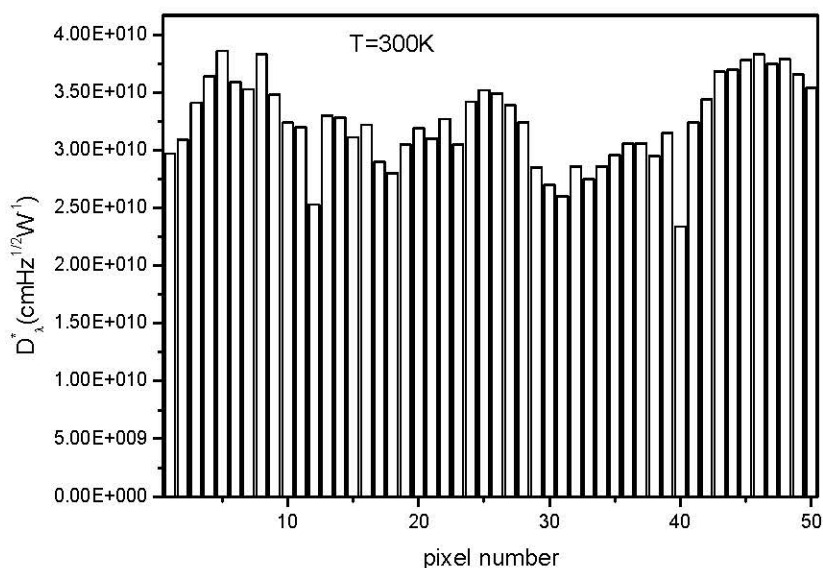


图 5.2.4 抽测 50 元器件的探测率直方图（同质结器件）

Fig 5.2.4 The detectivity and uniformity of the linear detector array

对 GM0729z 器件进行了探测率的测试计算，信号测试采用了 900K 的黑体辐射源，辐射出射孔径为 8mm，环境温度为室温，器件距辐射出射孔的距离为 30cm。由器件的相对响应光谱求得的 G 因子为 15~17。根据测试得到的信号、噪声和 G 因子求得的峰值探测率如图 5.2.4，图中给出了抽测的 52 元器件的峰值探测率，其中 2 个盲元，其盲元率为 4%。器件的峰值探测率约为 $2.5\sim 4\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，非均匀性为 10.5%，量子效率 60%~70%，响应率为 1.5~1.7A/W。

同质结器件的 LBIC 测试分析

根据第三章 3.2.4 节对 LBIC 的工作原理和性介绍可以看出，LBIC 技术非常适合测量和研究线列器件的串音和单个光敏元的扩大等问题。本节我们采用了 SEMILAB 公司产的 Micro LBIC 仪器，脉冲激光波长为 980 nm，频率为 1 kHz，激光束斑直径为 5 μm ，扫描步进为 1 μm 。

图 5.2.5 给出了线列器件的 LBIC 扫描图，扫描的范围为 $500\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ 。从图中我们可以看出，所测光敏元的信号响应很强，信号响应区的形状与所设计的方形光敏元形状基本符合；与所测光敏元两侧相邻的光敏元有非常微弱的信号响应，其它间隔较元的光敏元没有响应信号。

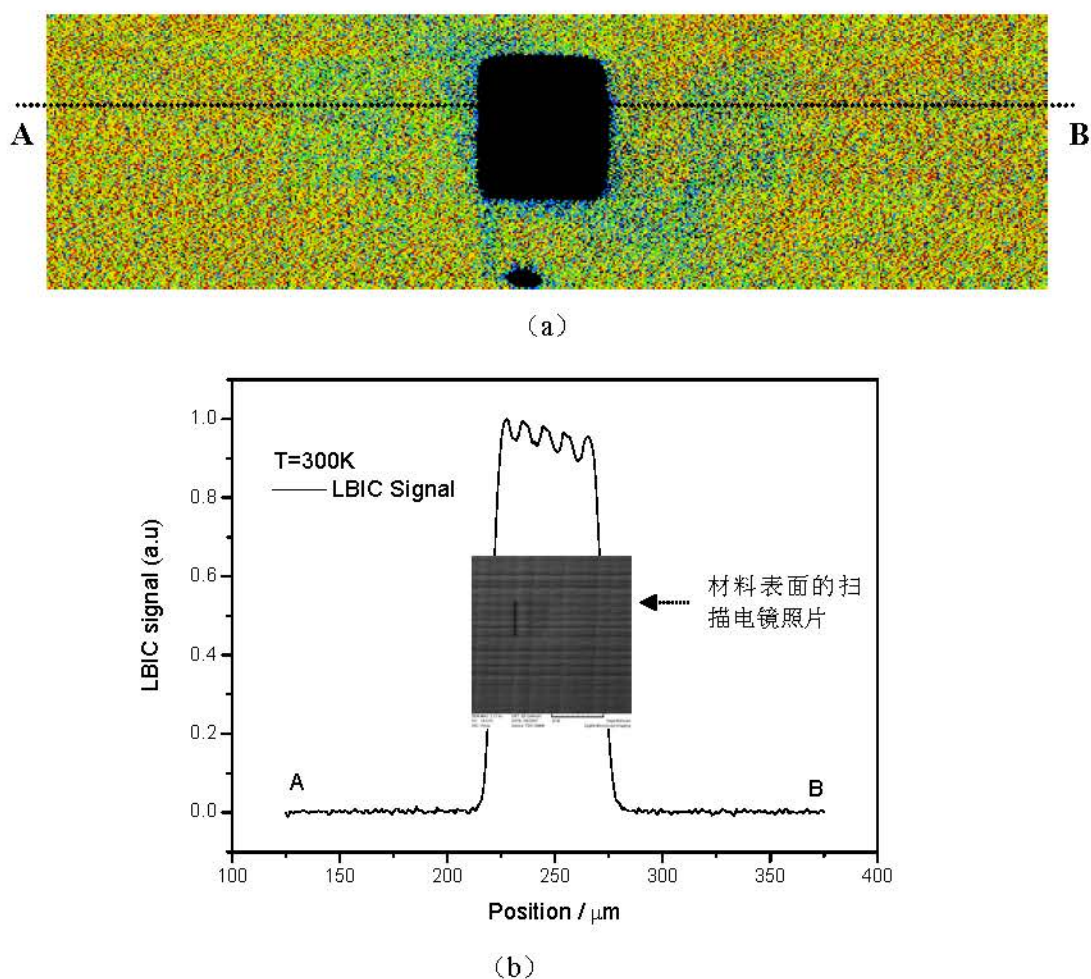


图 5.2.5 同质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 线列探测器的 LBIC 扫描图
 Fig 5.2.5 Photograph of LBIC scan signal for $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ linear array detector

为了更精确地分析相邻光敏元之间串扰信号的大小和光敏元上不同位置信号响应的均匀性，提取了图 (a) 中 AB 线所在位置的扫描信号响应数据，绘制在图 (b) 中，从所提取的数据来看，所测光敏元两侧相邻器件的微弱响应，相对于所测光敏元的信号响应非常的弱，约为所测光敏元的 0.8%，可以忽略不计。对于光敏元有效区的面积，通过提取的数据可以进行精确计算，如果我们把光敏区两侧响应信号为峰值处 50% 的位置，定为光敏区有效区的边界，则光敏区实际的有效区面积为 $52\mu\text{m}$ ；如果取 10% 的位置，则光敏区实际的有效区面积为 $59\mu\text{m}$ ，而所设计的 256×1 线列器件的光敏面的设计值为 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ ，说明光敏面的有效区有所扩大，可能的原因有两个：1、少子的扩散和侧向收集效应，2、光敏区周围被反射的杂散光入射到探测器结区所引起的信号响应。

用 LBIC 技术测试光伏器件的少子扩散长度，可以不用划片而直接在晶片上进行测量。另外，它还能给出器件在成型后少子扩散长度的真实值，而不用对掺杂浓度和杂质分布情况做任何理想的假设。测试过程中用与器件光敏元相比足够小的光源照射样品，然后移动样品台使光点垂直地通过 p-n 结结区边界，考察光点照射在样品不同位置时的 LBIC 信号就可以获

得关于器件少子扩散的信息。

通常情况下，在结区外一个扩散长度 L_D 内，激光激发的载流子仍可以通过扩散到达结区边界而产生信号，但能收集到的载流子数目随着距离的增大而迅速减少。在理想情况下，收集到的信号 I_{LBIC} 根据光点离开结区边界的距离 d 呈指数规律衰减^[107]，即：

$$I_{LBIC}(d) = ke^{-\frac{d}{L_D}}$$

其中， k 为比例常数。

因此，如果我们对图 5.2.5 中右侧的衰减信号进行指数拟合，可以获得一个特征长度 L ，如图 5.2.6 所示。在考虑了电极的位置和形状、表面复合及测量误差等因素以后，得到的特征长度 L 和实际器件的少子扩散长度 L_D 必然存在一定的差异^[108]。如果去除离结区边缘较近的数据点，以消除结区边缘效应的影响，并用多次测量求平均的方法，可以提高计算的准确性，从图 5.2.6 中我们可以得到其 L_D 为 $2.6\mu\text{m}$ 。

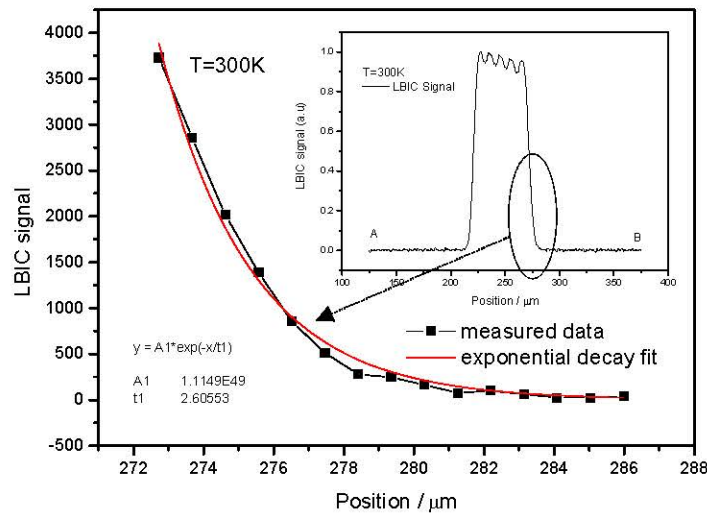


图 5.2.6 结区外的信号衰减及其指数拟合

Fig 5.2.6 Induced current decay from the edge of the junction and its exponential fit

如图 5.2.5 中的图 2 所示，从提取的 AB 线所在位置的数据上，还有一个非常值得注意的现象，就是光敏元有效区的信号响应并不是完全一致的，而表现出有一定规律的起伏，我们暂时称之为光敏区各点的信号响应不均匀性。我们将制备器件所使用的外延材料的扫描电镜照片，跟 AB 线所在位置的信号响应图放在一起，可以比较容易得到产生这种现象的一个可能原因，即由于外延材料的表面表现为有规律的方格状形貌，当激光照射器件表面时，其表面的突起和凹槽对入射光的反射效果不同，所以使得局部的光电转换效率不同，局部的响应信号就表现出有规律的起伏。另外一个可能原因是由于系统激光光源的步进造成的。由于材

料表面可能引起这种响应信号的起伏，给小光敏元长线列光敏芯片的信号响应均匀性带来了严重的影响，因为在台面的成型工艺中，不可能保证每一个光敏面上所占有的突起和凹槽的数量是一致的，所以响应信号也就不可能完全相同，使得线列器件的响应不均匀性增加，特别是对于小光敏面器件，其影响将更加明显。

图 5.2.7 给出了测试光敏元光敏区的响应信号等值线，为了更清楚的观察到边缘信号响应的不均匀性，测试时调节激光的强度使得其中内部的响应信号处于饱和状态，所以内部表现为同一数值。此时，光敏芯片边缘表现的参差不齐，并且也呈现出一定的周期规律性，这与我们前面对于光敏区上的不均匀性表现基本一致，同样是由于外延材料的方格状形貌，在台面成型中也在侧面形成了一定的突起和凹槽，从而使光敏面的边缘不再平直，响应信号不均匀。

总之，以上两种光敏芯片的响应不均匀性，都给线列焦平面的均匀性带来了不可忽视的影响，也给对制备工艺提出了更高的要求。

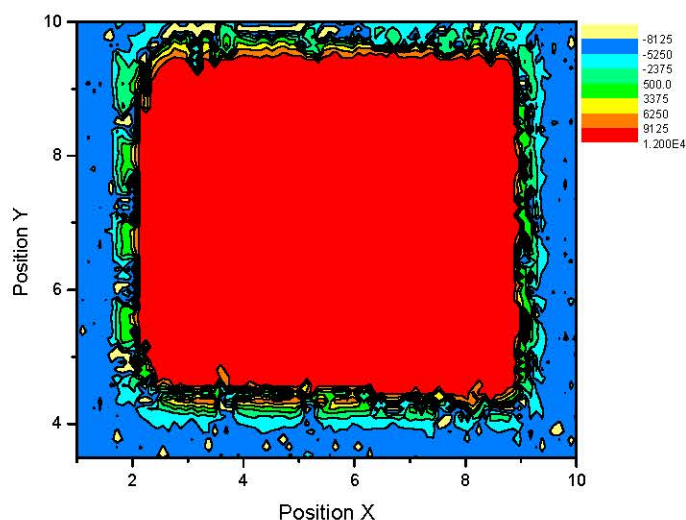


图 5.2.7 测试光敏面的响应等值线（内部的信号响应饱和）

Fig 5.2.7 Signal Contour of the chip

5.2.1.2 同质结器件性能随温度的变化

光敏芯片选择了前面测试所选择的外延材料编号为 GM0729z 的器件。器件的变温测试是采用液氮制冷，将待测光敏芯片装入变温杜瓦瓶中，使器件固定在杜瓦瓶头部的导热 Cu 冷头上，测温电阻放置在待测芯片的旁边。待杜瓦瓶排气完毕后，装入液氮，待芯片的温度降至最低温度后，倒空杜瓦瓶内的液氮，这样可以更容易和更好地控制温度。因为我们发现如果仅使用温控仪控制杜瓦瓶内的加热电阻，可以使杜瓦瓶的温度不断升高，并能在所设定的测试温度点保持不变，但是加热电阻内部所流过的电流会给测试带来了很大的噪声，最终使

变温测试失去意义。为了解决这个问题，我们采用了待芯片的温度降低到液氮的温度后（低于 100K），将杜瓦瓶内的液氮倒空的办法。如果使其自然升温，则升温的速度非常慢，也不利于测试。我们因此使用温控仪缓慢地给杜瓦瓶内的升温电阻通入电流，使杜瓦瓶内的温度逐渐升高，待接近测量温度时，将温控仪与变温杜瓦瓶的连接断开，因为杜瓦瓶内已经没有液氮，所以此时的温度可以保持较长时间，有利于器件各个性能参数的测定。

暗电流及优值因子随温度的变化关系

图 5.2.8 为 256×1 元同质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器变温的 I-V 测试曲线，探测器的温度从 300K 到 150K，从图中可以看出，随着温度的降低器件的暗电流迅速降低，但在不同的反向偏压区，呈现出不同的温度特性。在较高的反向偏压区（图中标注的 II 区），如在 -0.5V 的偏压下，从 300K 时的 $3 \times 10^{-6}\text{A}$ 降低到 150K 时的 $1 \times 10^{-7}\text{A}$ ，暗电流降低一个数量级。在反偏的低压区（图中标注的 I 区），即越接近零偏时，暗电流随温度的变化更加明显，如在在 -10mV 的偏压下，从 300K 时的 $4 \times 10^{-8}\text{A}$ 降低到 150K 时的 $7 \times 10^{-12}\text{A}$ ，降低了四个数量级。图 5.2.9 和图 5.2.10 给出了 -400mV 和 -10mV 下暗电流随温度的变化关系，从图上可以很清楚的得到我们的结论，在较高的偏压下，器件的暗电流与温度的关系相对于低压区变的不敏感。考虑到我们的器件一般是工作在零偏或反偏的低压区，那么我们就可以采用高可靠性和低功耗的热电制冷，使我们的器件获得更低的暗电流、噪声和更高的探测性能。

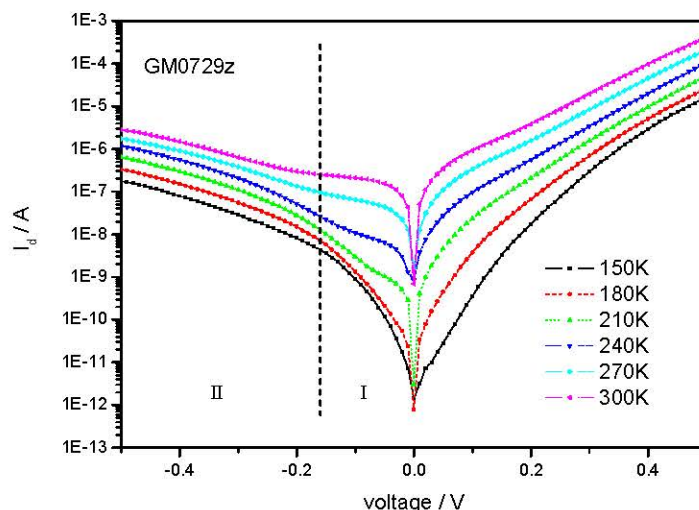


图 5.2.8 256×1 元同质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的变温 I-V 曲线

Fig 5.2.8 Typical I-V characteristics of 256 elements homojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector at different temperature

为了更清楚的说明探测器在不同的偏压下暗电流的温度特性，图 5.2.9 和图 5.2.10 给出了不同的偏压下暗电流与温度的变化关系。根据第四章 4.3.1 节对器件暗电流分类和其产生的原理，我们可以假设在一定的低压范围内暗电流可以简化表示为： $I_d \propto \exp(-E_g/nkT)$ ，其中

E_g/n 部分在很多的文献资料中称为热激活能^{[109]~[111]}, 当 n 趋近于 1 时, 即 $I_d \propto n_i^2 \propto \exp(-E_g/kT)$, 此时扩散电流为暗电流的主要贡献者; 当 n 趋近于 2 时, 即 $I_d \propto n_i \propto \exp(-E_g/2kT)$, 此时产生-复合电流将成为暗电流的主要贡献者。根据暗电流和温度的这个指数关系, 我们可以对器件的暗电流随温度的变化关系进行指数拟和, 依此求得器件的热激活能 E_g/n 。通过对比外延材料的禁带宽度与热激活能的大小确定参数 n 。首先我们对两种偏压下的暗电流测试结果进行指数拟和。我们看到在低压区时 (-10mV, 见图 5.2.9), 暗电流随温度的变化曲线明显的表现为指数关系曲线, 通过拟和得到的热激活能: $E_g/n = 0.338eV$, 通过响应光谱求得的外延材料的禁带宽度 $E_g = 0.5eV$, 因此得到 $n \approx 1.48$, 说明在低压区产生-复合电流和扩散电流共同组成了暗电流的主要部分。图 5.2.10 给出了较高偏压 (-400mV) 下暗电流随温度的变化曲线, 从中我们可以看出暗电流随温度变化的拟和结果与实验数据的吻合度比低压时的差, 说明此偏压下产生-复合电流和扩散电流在暗电流的组成部分中不占主导地位, 拟和得到的热激活能: $E_g/n = 0.0915eV$, 得到 $n > 2$ 。暗电流随温度的变化表现不再像低压区那样敏感, 分析可能的原因为: 在较高偏压下器件的暗电流开始由与温度关系较弱的隧道电流占主导地位。

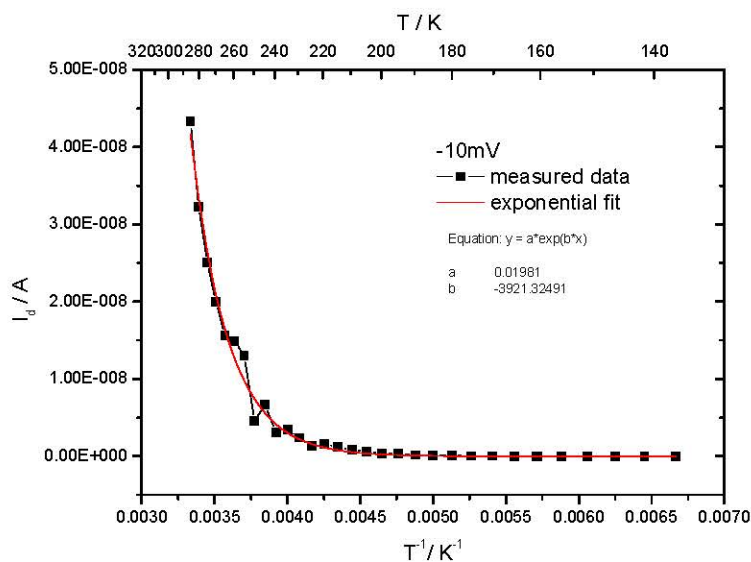


图 5.2.9 256×1 元同质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的暗电流随温度的变化关系 (-10mV)

Fig 5.2.9 Measured dark current versus reciprocal temperature of the 256 elements homojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector at reverse bias voltage of 10mV

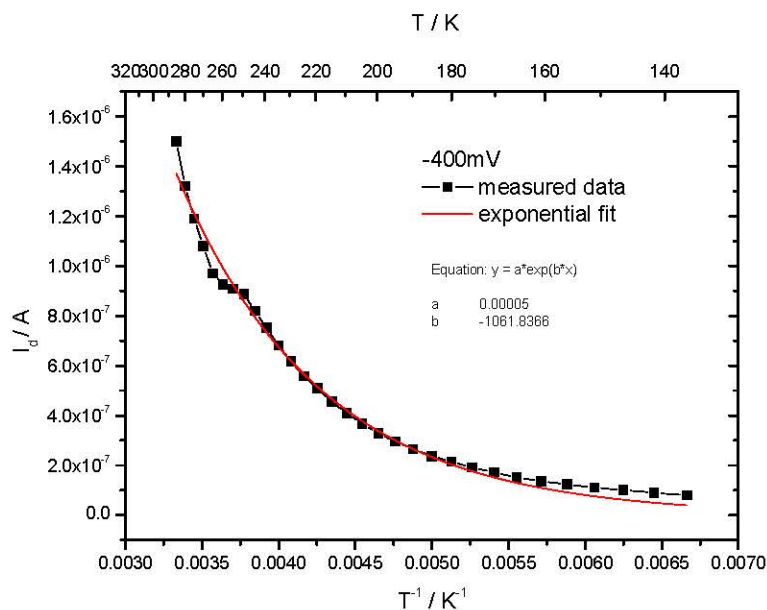


图 5.2.10 256×1 元同质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的暗电流随温度的变化关系 (-400mV)
 Fig 5.2.10 Measured dark current versus reciprocal temperature of the 256 elements homojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector at reverse bias voltage of 0.4V

为了更详细的分析，在零偏附近器件的性能随温度的变化关系，图 5.2.11 给出了器件的优值因子 R_0A 随温度的变化关系。首先是器件的优值因子 R_0A 随温度的降低迅速的增加，从 300K 时的 $5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 增加到 150K 时的 $5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，当温度降低 50K 时，器件的优值因子 R_0A 可以增加 2 个数量级，说明高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器在热电制冷条件下，可以获得更好的性能。从图中我们还可以看出器件的优值因子 R_0A ，在高于 160K 的温度下， R_0A 值的对数与温度 ($1000/T$) 基本上都是成线性变化的，这与在零偏附近扩散和产生-复合电流机理相吻合

$$\left((R_0A)_{diff} \propto \frac{kTN_d}{q^2 n_i^2} \sqrt{\frac{\tau_p}{D_p}} \propto \frac{1}{n_i^2}, (R_0A)_{g-r} \propto \frac{V_{bi} \tau_{eff}}{q n_i W} \propto \frac{1}{n_i} \right).$$

当温度继续降低时，即小于 160K 时，器件的 R_0A 值随温度的变化开始变的缓慢，分析可能的原因有两个，第一是当温度继续降低时，扩散和产生-复合电流在暗电流的组成部分中所占的比例开始减少，而跟温度关系较弱的隧穿电流开始占据暗电流的主要组成部分，第二个可能的原因是，当温度降低到一定的程度时，器件在零偏附近的暗电流小于 10^{-12}A ，此时达到了我们测量系统的理论极限值，测试的准确性受到了很大影响。

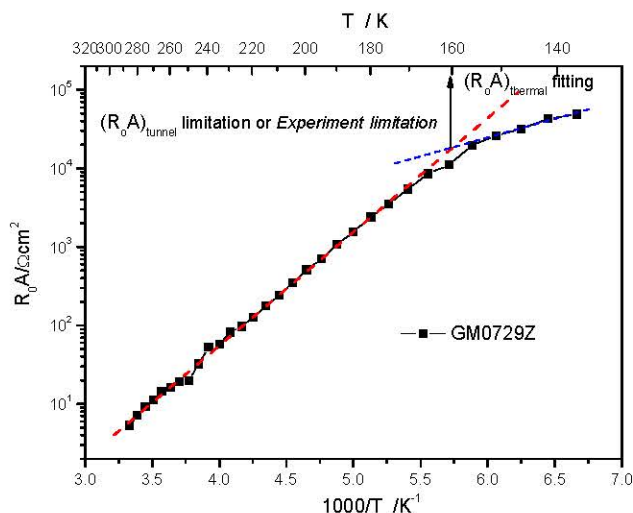


图 5.2.11 256×1 元同质结 In_{0.8}Ga_{0.2}As 探测器的 R₀A 随温度的变化关系

Fig 5.2.11 Temperature dependence of the R₀A product of the 256 elements homojunction In_{0.8}Ga_{0.2}As detector

信号、噪声及探测率随温度的变化关系

图 5.2.12 给出了探测器的信号和噪声随温度的变化关系。首先分析一下器件的响应信号随温度的变化关系，从图中我们可以看出，信号在 300K~240K 之间，随温度的降低信号也有所降低，但是降低的幅度不大。但当温度进一步降低时信号下降明显，产生这种现象的原因还不明确。分析可能的一个原因是由于 InGaAs 材料的吸收系数随温度的降低而降低，因而表现为器件的响应信号随温度的降低而有所降低。对于器件的噪声可以很明显看出，器件的噪声在 300K~240K 之间，随温度的降低而快速的降低，这与前面对暗电流的分析相一致，如图 5.2.9 所示。这是因为暗电流是光敏芯片噪声的主要来源，当暗电流快速降低时，芯片的噪声自然就随之降低，但是当温度低于 240K 时，芯片的暗电流机制开始发生转变，随温度的降低暗电流的减小开始变得非常的缓慢，所以芯片的噪声此时也基本保持不变。

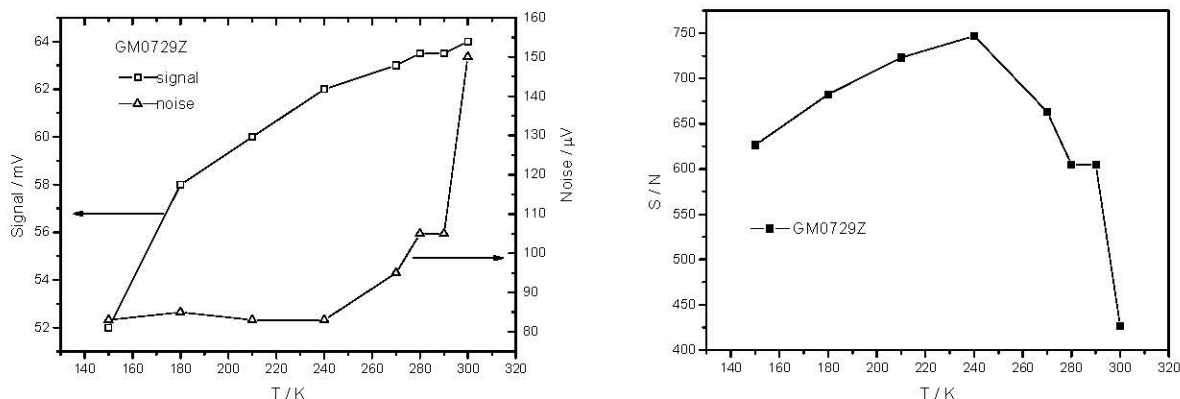


图 5.2.12 256×1 元同质结阵列器件的信号、噪声及信噪比随温度的变化

Fig 5.2.12 Temperature dependence of the signal and noise of the 256 elements homojunction In_{0.8}Ga_{0.2}As detector

虽然器件的信号和噪声都随温度的降低而降低，但是它们降低的趋势不同，如温度从 300K 降低到 240K 时，信号降低了不到 4%，而噪声降低了 40%，当温度从 240K 降低到 150K 时，信号降低大于 10%，而噪声基本不变。所以可以看出芯片在 240K 时，将得到最优的信噪比。

图 5.2.13 给出了芯片的探测率随温度的变化关系曲线，从图上我们可以得到，随着温度的降低，探测率逐渐增大，在 240K 时器件的探测率达到最优值，这与前面我们分析的信噪比最优值的条件是一致的，当温度继续降低时，探测率又开始下降，主要是因为信号继续降低，而噪声基本保持不变（接近了我们测试系统的本底噪声），使器件的信噪比降低。

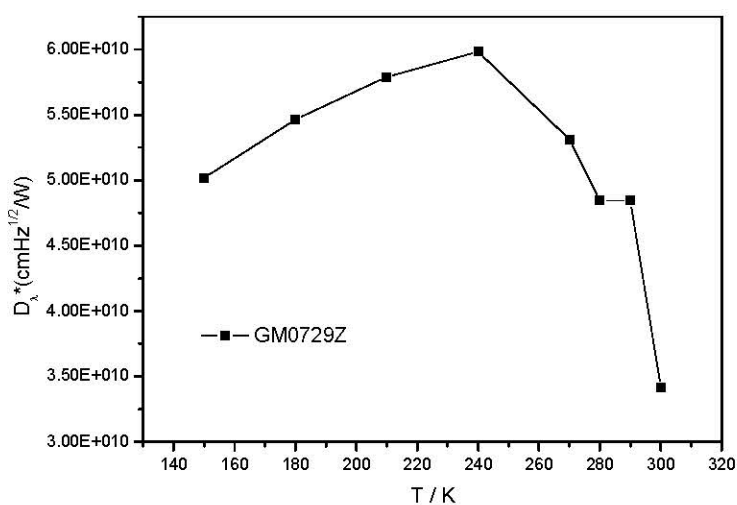


图 5.2.13 256×1 元同质结线列器件的探测率随温度的变化关系

Fig 5.2.13 Temperature dependence of the detectivity of the 256 elements homojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

5.2.2 缓冲层和帽层为 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 的异质结器件性能分析

制备双异质结器件所采用的外延材料结构如表 2.2.2 所示。其中缓冲层均采用了 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ，宽禁带的 $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 作窗口层，比同质结材料可以更好的抑制少子扩散电流和表面漏电流，并且 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 材料的晶格常数随 In 组分的变化也可以不断的调节，因此同样非常适合作为缓冲层材料。

256×1 异质结线列探测器芯片的制备工艺与同质结器件基本相同，采用湿法腐蚀工艺，钝化层采用了 PECVD SiN_x 薄膜。P 电极采用 Ti/Pt/Au 金属膜系，N 电极为 Cr/Au。同时进行了两种材料的流片，材料编号分别是 GM0781Z 和 GM07112Z，其中 GM0781Z 的吸收层厚度为 $1.5\mu\text{m}$ 、浓度为 $3 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ ，GM07112Z 的吸收层厚度为 $2.0\mu\text{m}$ 、浓度为 $5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ ，其它参数一致（见表 2.2.2）。

5.2.2.1 室温下异质结器件的性能测试

异质结器件的 I-V 性能测试分析

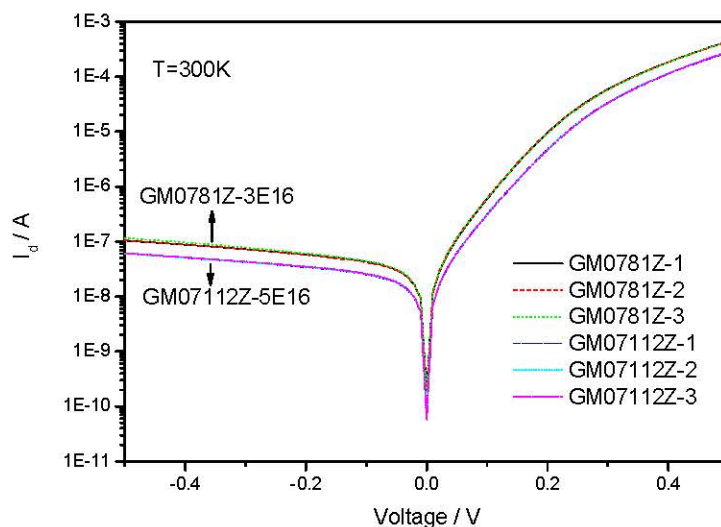


图 5.2.14 异质结器件的典型 I-V 曲线 (两种不同的吸收层浓度和厚度)

Fig 5.2.14 Typical I-V curves of the heterojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

两种器件的 I-V 特性曲线如图 5.2.14 所示。从图中可以得到两种器件的 I-V 特性曲线表现不同。在相同的反向偏压下，吸收层掺杂浓度较大的一组器件 (GM07112Z) 的暗电流，比掺杂浓度小的一组器件 (GM0781Z) 的暗电流明显的小很多。在 -0.5V 的偏压下，两种器件的暗电流的大小分别为 $6.0 \times 10^{-8}\text{A}$ 和 $1.0 \times 10^{-7}\text{A}$ ；在零偏时分别为 $6.0 \times 10^{-11}\text{A}$ 和 $1.8 \times 10^{-10}\text{A}$ 。相应的器件的优值因子分别为 $83 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $41 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。分析原因同前面所研究的同质结器件一样，这是因为随着吸收层的掺杂浓度逐渐变大时，器件的耗尽层宽度逐渐减小，从而有效的减少了耗尽层中的产生-复合中心数量，有效抑制了产生-复合电流。通过对两种器件大量的抽测，从图中我们可以看出，每组器件中分别将三个光敏元的 I-V 曲线做在同一图中，它们的 I-V 特性曲线基本重合，说明线列器件具有较好的均匀性。

异质结器件的响应光谱测试分析

图 5.2.15 给出了不同抗反射膜的双异质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的相对响应光谱。我们采用的钝化层 SiN_x 同时起到钝化和抗反射的作用，根据需要增强的响应波段的不同，在充分考虑其钝化效果的同时，可以在一定的范围内调整抗反射层的厚度。图中我们设计了两种厚度的抗反射膜，厚度分别为 3055\AA 和 9166\AA ，根据 SiN_x 的折射率 n 和增透膜的计算公式^[112] $nh = (k + 1/2)(\lambda/2)$ ，可知 3055\AA 的 SiN_x 抗反射膜可以在 $2.2\mu\text{m}$ 处一级增透 ($k=0$)， 9166\AA 的 SiN_x 抗反射膜可以同时 $2.2\mu\text{m}$ 处二级增透 ($k=1$) 和 $1.32\mu\text{m}$ 三级增透 ($k=2$)。从图中可以看出，室温下的峰值波长均为 $2.02\mu\text{m}$ 。 SiN_x 抗反射膜厚度为 3055\AA 时，50% 响应

的长波截止波长为 $2.35\mu\text{m}$ ，短波方向 50%响应的截止波长为 $1.3\mu\text{m}$ 。当 SiN_x 抗反射膜厚度为 9166\AA 时，50%响应的长波截止波长为 $2.38\mu\text{m}$ ，短波方向 50%响应的截止波长为 $1.2\mu\text{m}$ 。在图中所表征的 1、2 和 3 波长处，均有一定程度的响应波动，原因分别为：1 位置 $1.45\mu\text{m}$ 处是 $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 的吸收峰 ($E_g = 0.85\text{eV}$)，2 位置 $1.67\mu\text{m}$ 处可能的原因是由于各外延层之间光的反射造成的，3 位置 $2.2\mu\text{m}$ 处是由于抗反射膜的增透作用引起的。同时可以看出，当 SiN_x 抗反射膜厚度为 9166\AA 时，其响应光谱在长波和短波方向的响应均有所提高，特别是在短波方向，其扩展的趋势较大，这是由于在短波方向 ($1.45\mu\text{m}$ 以下) $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 存在吸收，而且 9166\AA 的 SiN_x 又在短波方向有增透的效果，所以使得器件在短波方向的响应有所增加。 $1.38\mu\text{m}$ 和 $1.87\mu\text{m}$ 附近的波动为光路中的水汽吸收。

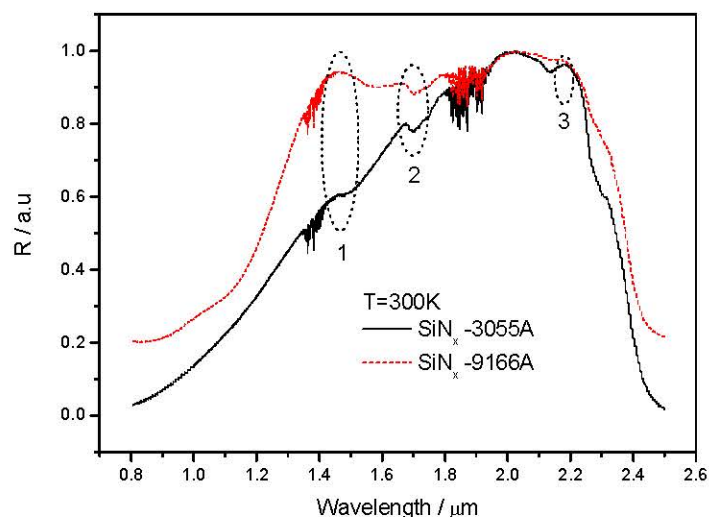


图 5.2.15 异质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的响应光谱 (不同厚度的抗反射膜)
Fig 5.2.15 Spectral response of heterojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

室温下异质结两组不同吸收层掺杂浓度和厚度的器件综合性能对比

为了更详细对两组不同吸收层掺杂浓度和厚度的器件进行分析对比，我们将两组器件的暗电流、优值因子、信号、噪声、响应率以及探测率，进行了分析总结如表 5.2.1 所示。两组材料的参数如下：GM0781Z 的吸收层厚度为 $1.5\mu\text{m}$ 、浓度为 $3 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ ，GM07112Z 的吸收层厚度为 $2.0\mu\text{m}$ 、浓度为 $5 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 。

对于两组器件的黑体响应信号，从表 5.2.1 中可以得到，编号为 GM0781Z 的一组器件的信号要远远的大于 GM07112Z，大约是四倍的关系，这似乎与我们一般的认识相矛盾，一般认为当吸收层 (i 层) 的厚度越大，越有利于对入射光的吸收，黑体响应信号更大，更容易获得较高的量子效率。但通过实际的测试我们发现吸收层 (i 层) 厚的 GM07112Z 器件的响应信号，要比吸收层 (i 层) 薄一些的 GM0781Z 编号的器件小 4 倍。导致这种现象的原因，可

以从下面三个可能的原因进行解释：一方面是由于 GM07112Z 器件的吸收层 (i 层) 掺杂浓度较大, 随着吸收层 (i 层) 掺杂浓度的增大, 少子的寿命降低, 更多的载流子被复合掉; 另一方面是由于随着吸收层 (i 层) 掺杂浓度的增大, 耗尽层的宽度减小, 使得耗尽层内的光吸收降低; 第三个方面的原因可以从吸收层 (i 层) 的宽度上进行分析, 由于高 In 组分的 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 外延材料与衬底 InP 之间存在较大的晶格失配, 虽然通过加入缓冲层技术来削弱这种失配, 但是在 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 吸收层 (i 层) 中仍然带入大量的由于位错形成的缺陷, 所以当光生载流子在其中通过的距离越长, 其被缺陷俘获的机会就越大, 最终导致响应信号的降低, 内量子效率降低。

表5.2.1 两组器件的典型性能参数 (每组各给出了5元器件的测试结果)

Tab 5.2.1 The typical performance of the two kinds of InGaAs detectors

编号	I_d / A	$R_0 \text{A} / \Omega \text{cm}^2$	S^\vee / mV	$N^\vee / \mu\text{V}$	$R / \text{A/W}$	D^*_{λ}
GM0781Z-1	-1.814E-10	42.946	92	125	1.649	6.280E10
GM0781Z-2	-1.842E-10	42.251	90	130	1.613	5.907E10
GM0781Z-3	-1.884E-10	41.888	96	130	1.721	6.301E10
GM0781Z-4	-1.886E-10	41.999	96	130	1.721	6.301E10
GM0781Z-5	-1.889E-10	41.899	98	130	1.757	6.432E10
GM07112Z-1	-6.44E-11	84.998	22	100	0.394	1.877E10
GM07112Z-2	-6.602E-11	83.392	22	105	0.394	1.787E10
GM07112Z-3	-5.693E-11	83.090	20	100	0.358	1.706E10
GM07112Z-4	-6.759E-11	83.945	21	110	0.376	1.628E10
GM07112Z-5	-6.978E-11	81.558	19	108	0.340	1.501E10

\vee : 在响应信号和噪声的测试中, 前置放大器的档位为 10^{-8} 档

根据吸收层 (i 层) 的掺杂浓度与量子效率和暗电流的关系, 可以看出, 较高的掺杂浓度有利于降低器件的暗电流, 但会使内量子效率降低, 因此需要在两者之间进行权衡。根据前面对吸收层 (i 层) 的厚度对响应率的影响分析, 我们可以初步认为通过适当减小吸收层的厚度, 来降低光生载流子在吸收层 (i 层) 中的复合。具体的吸收层厚度可以根据朗伯定律进行估算, 朗伯定律的数学表达式为^[112]: $I = I_0 e^{-\alpha L}$, 其中 α 为介质的吸收系数, L 为光在介质中传播的距离, 波长为 $2.0\mu\text{m}$ 的光在 InGaAs 材料中的吸收系数大约在 $10^4 \sim 10^5 \text{cm}^{-1}$ 之间, 由此可知 $2.0\mu\text{m}$ 厚度的吸收层基本上可以满足光的充分吸收。

对于两组器件的噪声, 从图中可以看到, 由于 GM0781Z 器件的暗电流较大、优值因子较小, 所以其噪声也较大, 但两组器件的噪声和信号增大的幅度不同, 在噪声增加 30% 的同时, 信号增加大于 300%, 因此 GM0781Z 器件获得了更大的信噪比, 探测率和响应率可以达到 $6 \sim 7 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 和 $1.6 \sim 1.7 \text{A/W}$, 非均匀性小于 6%。GM07112Z 器件的探测率和响应

率只有 $1\sim 2 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 和 $0.3\sim 0.9 \text{ A/W}$ ，非均匀性小于 9%。

异质结器件的 LBIC 测试分析

图 5.2.16 给出了异质结线列器件的 LBIC 扫描图，扫描的范围为 $400\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 。从图中可以看出，所测光敏元的信号响应很强，信号响应区的形状为方形与所设计的方形光敏元形状基本符合。两侧相邻的光敏元没有响应信号，说明对于台面型线列器件其光敏元之间的串扰可以忽略不计。

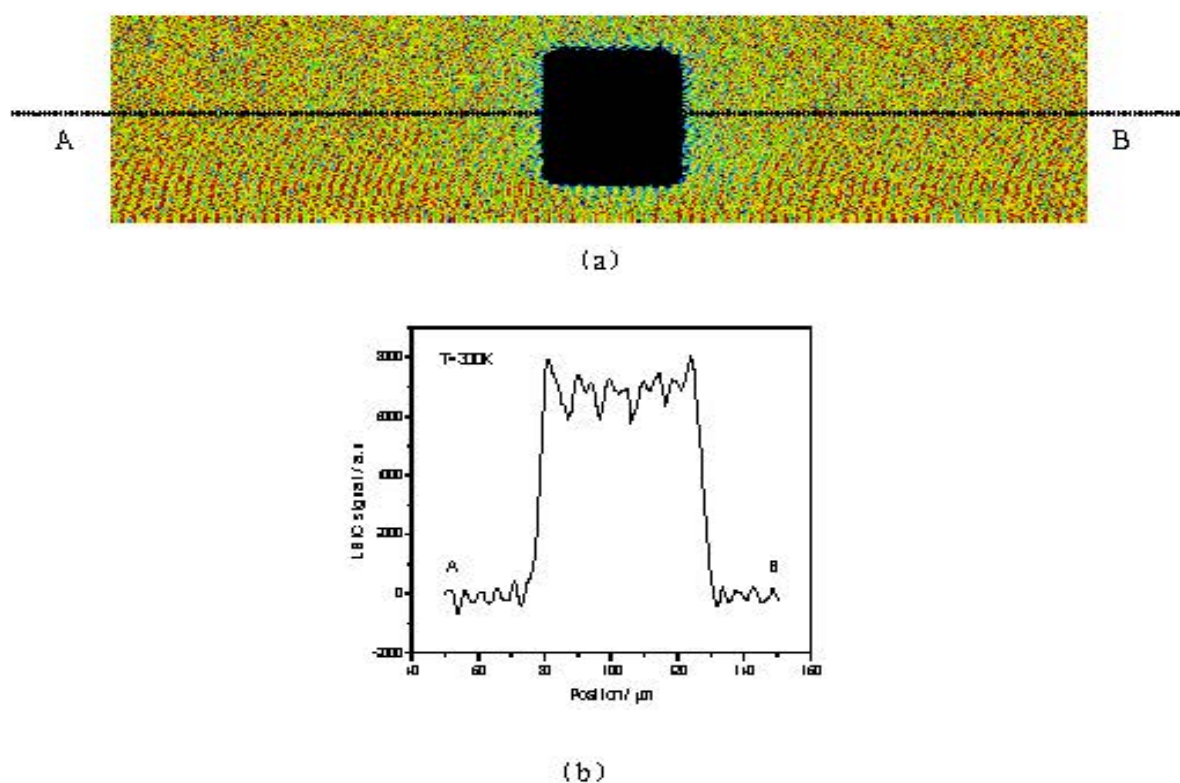


图 5.2.16 异质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 线列探测器的 LBIC 扫描图

Fig 5.2.16 Photograph of LBIC scan signal for heterojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ linear array detector

为了更精确的分析光敏元有效响应面积扩大情况和光敏元上不同位置信号响应的均匀性，提取了图 (a) 中 AB 线所在位置的扫描信号响应数据，重新绘制在图 (b) 中。通过提取的数据可以计算出光敏元有效区的面积，如果把光敏区两侧响应信号为峰值处 50% 的位置，定为光敏区有效区的边界，则光敏区实际的有效区面积为 $50\mu\text{m}$ ，与我们的设计完全吻合，说明基本没有光敏元响应扩大问题。通过与同质结器件相同的分析方法，少数扩散长度 L_D 小于 $2.2\mu\text{m}$ 。

5.2.2.2 异质结器件性能随变温变化的关系

图 5.2.17 给出了两组异质结器件的变温的 I-V 测试曲线。从图中可以看出，当温度从 290K 降到 200K 时，两组器件的暗电流均迅速降低 3 个数量级。在反向偏压区，两组器件的暗电流降低趋势相同，从低压区到高压区（从 $0\text{V}\sim 0.5\text{V}$ ），暗电流的降幅基本相等（两组反向偏

压的 I-V 曲线都基本平行), 这一点与同质结器件明显不同。当温度降低到 200K 时, 器件的暗电流开始小于 10^{-11} A, 由于我们的测试仪器的精度限制, 测试数据不再准确开始出现波动。

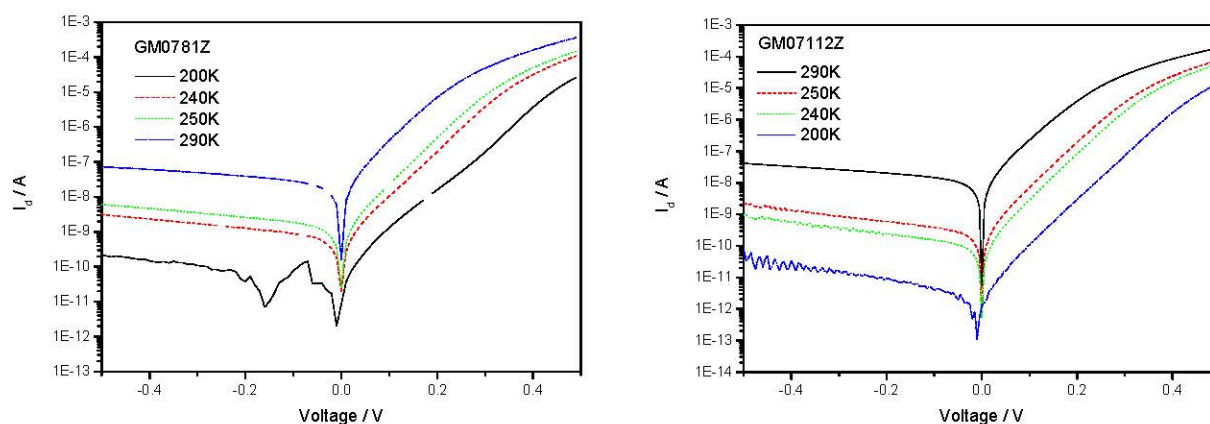


图 5.2.17 两组异质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的变温 I-V 曲线

Fig 5.2.17 Typical I-V characteristics of heterojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector at different temperature

我们提取了在 -0.5V 的偏压下, 两组器件的暗电流随温度的变化关系, 如图 5.2.18 所示。从图中可以看出, 两者的暗电流随温度的降低成指数关系快速地降低, 特别是从 300K 到 240K 之间, 暗电流降低迅速, 但从 240K 开始, 暗电流的降低逐渐变缓。通过指数拟和得到的 GM0781Z 器件的热激活能 $E_g/n = 0.39\text{eV}$, GM07112Z 器件的热激活能 $E_g/n = 0.49\text{eV}$ 。根据外延材料的禁带宽度 $E_g = 0.5\text{eV}$, 可以确定两者的参数 n 分别为 1.28 和 1.02。根据 n 参数的取值介于 1 和 2 之间, 可以得出两者在 -0.5V 偏压下的暗电流主要是由扩散电流和产生-复合电流组成的。特别需要指出的是 GM07112Z 器件的参数 n 为 1.02, 非常接近 1, 说明此时器件的暗电流主要是扩散电流。分析其可能的原因是因为 GM07112Z 器件的吸收层掺杂浓度较高, 使得耗尽层的宽度更小, P 区和 N 区的扩散载流子更容易通过耗尽层, 同时由于更窄的耗尽层宽度使得载流子在其中的产生-复合几率更低, GM07112Z 器件的暗电流产生机制更接近于扩散电流机制。

这种以体内电流为主导的暗电流机制, 说明器件的表面漏电得到了较好的抑制, 也为进一步降低器件暗电流带来了难度, 因为扩散电流 $I_d \propto n_i^2 \propto \exp(-E_g/kT)$ 和产生复合电流 $I_d \propto n_i \propto \exp(-E_g/2kT)$, 均与器件的工作温度有较大的关系, 而与器件制备工艺关系不大, 也就是说仅仅依靠提高器件的表面钝化效果, 对器件的暗电流的减小意义不大。

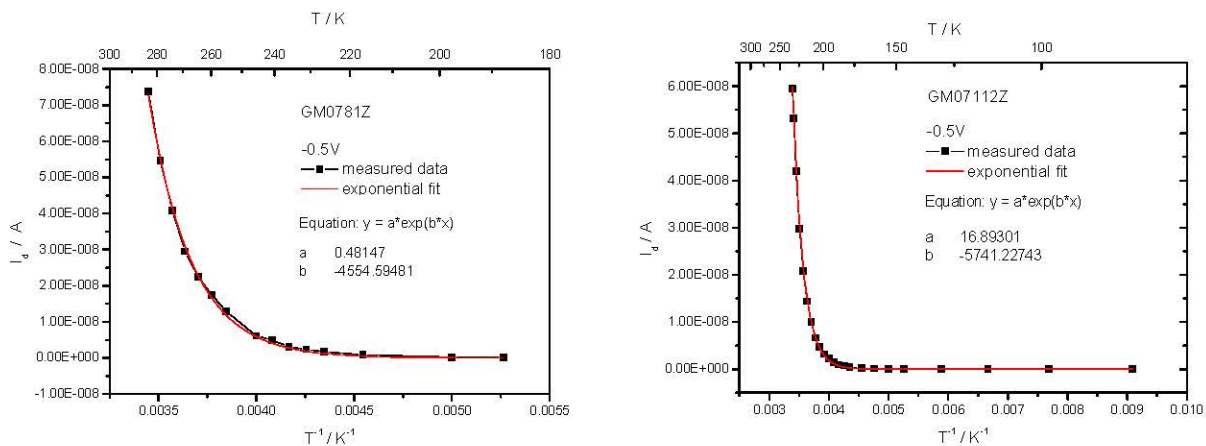


图 5.2.18 两组异质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的暗电流随温度的变化关系 (-0.5V)
 Fig 5.2.18 Measured dark current versus reciprocal temperature of heterojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector at reverse bias voltage of 0.5V

图 5.2.19 给出了两组器件的优值因子 R_0A 随温度的变化关系。器件的优值因子 R_0A 随温度的降低迅速地增加，从 300K 时小于 $100 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 增加到 150K 时的 $10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，当温度降低 50K 时，器件的优值因子 R_0A 可以增加 2 个数量级，说明探测器在热电制冷条件下，可以获得很好的性能。从图中我们还可以看出器件的优值因子 R_0A ，在 300K 到 240K 之间时， R_0A 值的对数与温度($1000/T$)基本上都是成线性变化的，这与在零偏附近扩散和产生-复合电流机理相吻合。当温度继续降低时，即小于 240K 时，器件的 R_0A 值随温度的变化开始变的缓慢，分析其可能的原因，可能是因为当温度降低到一定的程度时，器件在零偏附近的暗电流小于 10^{-11}A ，此时达到了我们测量系统的理论极限值，测试的准确性受到了很大影响，另外当温度继续降低时，扩散和产生-复合电流都迅速降低，而与温度关系不大的隧穿电流部分开始成为暗电流的主要组成部分，所以随着温度的降低变化 R_0A 值变化趋缓。

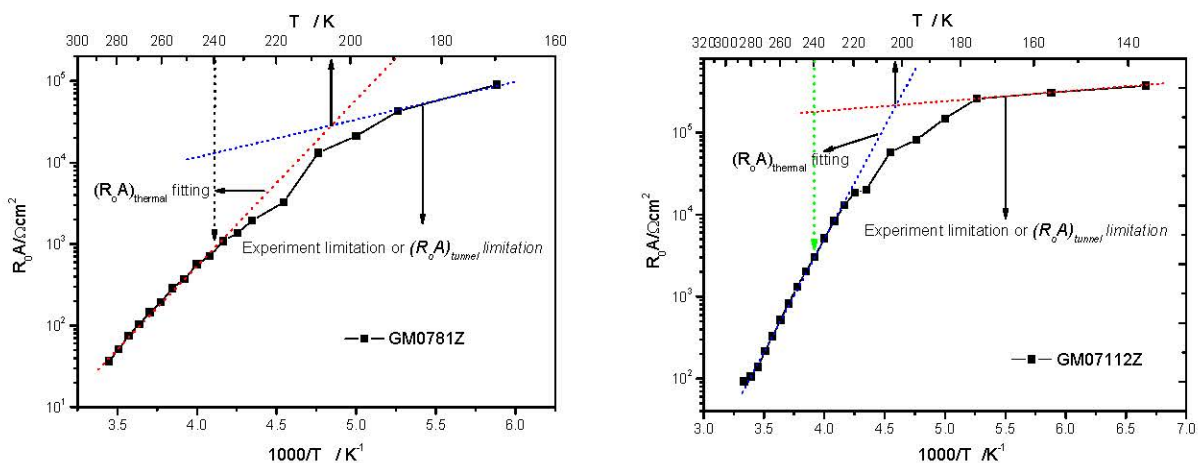


图 5.2.19 异质结 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的 R_0A 随温度的变化关系
 Fig 5.2.19 Temperature dependence of the R_0A product of heterojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

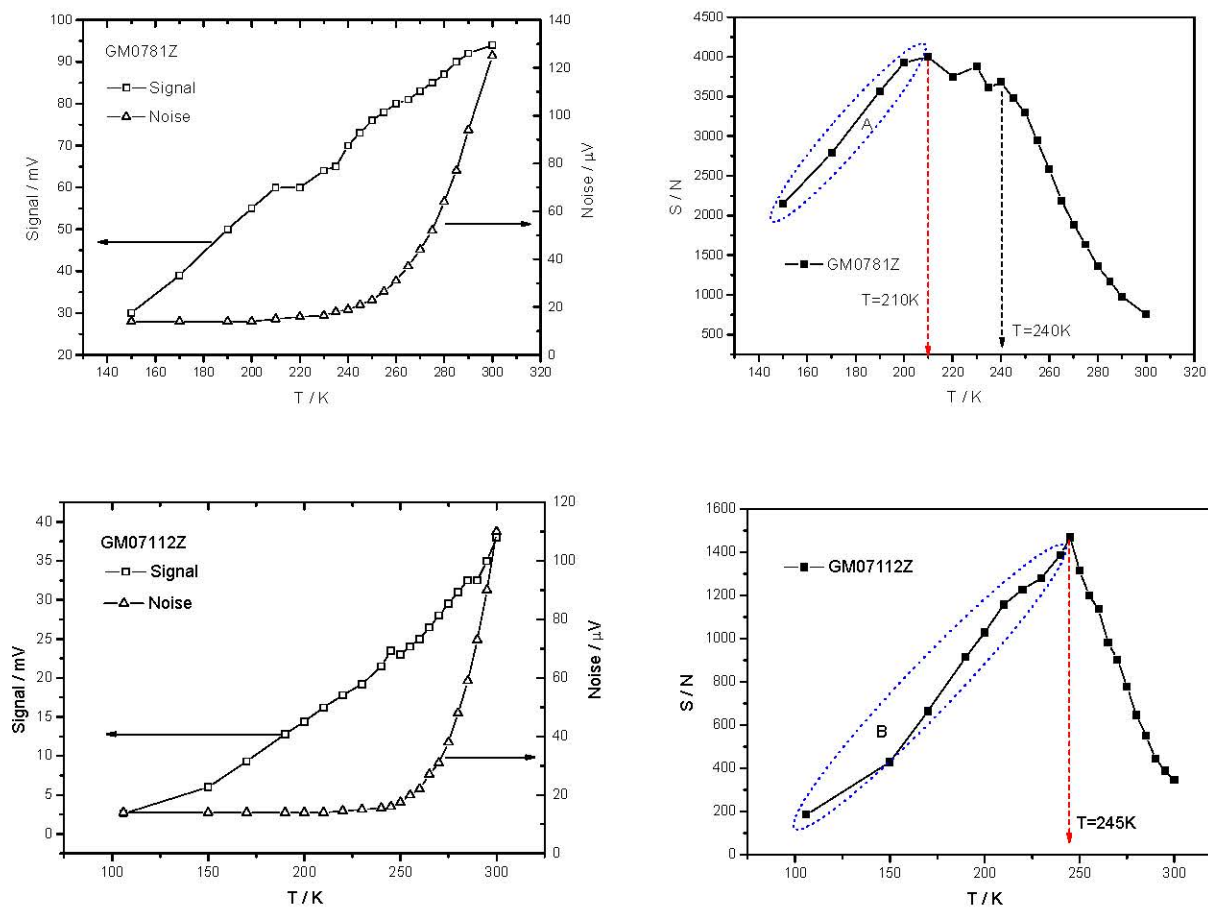


图 5.2.20 两组异质结线列器件的信号、噪声及信噪比随温度的变化（上面为 GM0781Z 器件、下面为 GM07112Z 器件）

Fig 5.2.20 Temperature dependence of the signal and noise of the heterojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

图 5.2.20 给出了两组异质结器件的信号、噪声和信噪比随温度的变化关系。从图中可以看出，两组器件的信号随温度的变化趋势基本相同，随温度的变化都是逐渐地降低，GM0781Z 器件的信号从 300K 时的 94mV 降低到 250K 时的 76mV 降低了 20%，从 250K 降低到 150K 时的 30mV 降低了 60%，GM07112Z 器件的信号从 300K 时的 38mV 降低到 250K 时的 23mV 降低了 40%，从 250K 降低到 150K 时的 6mV 降低了 74%，说明 GM07112Z 器件的信号随温度降低减小的较快。

两组器件的噪声随温度的变化分别为：GM0781Z 器件的噪声从 300K 时的 125 μV 降低到 250K 时的 23 μV 降低了 82%，从 250K 降低到 200K 时的 14 μV 降低了 40%，GM07112Z 器件噪声从 300K 时的 110 μV 降低到 250K 时的 17.5 μV 降低了 84%，从 250K 降低到 200K 时的 14 μV 降低了 20%。由此可见当两组器件的工作温度从室温降低 50K 时，由于受扩散电流和产生-复合电流的影响，其噪声随温度降低而迅速降低，当温度继续降低时暗电流机制发生转变，其噪声的变化开始减缓。当温度低于 200K 时，由于器件的噪声小于了测试系统的本底

噪声，此时的所测得的噪声为测试系统的本底噪声，大约为 $14\mu\text{V}$ 。图中的右侧部分给出的是两组器件的信噪比。从中可以看出，两组器件分别在 250K 和 210K 时，器件的信噪比达到最优值，随着温度的进一步降低，信噪比开始变差，其主要原因包括：1、器件的信号随温度的降低而继续降低并且有加快的趋势；2、由于受测试系统本底噪声的限制，所测得的器件噪声随温度的降低减小缓慢，最后达到测试系统的本底噪声而不再改变。因此我们初步认为图中所标示出的 A 区和 B 区的数据和变化趋势不再可靠。

两组异质结器件的探测率随温度的变化曲线绘制在了图 5.2.21 中，探测率的变化趋势同信噪比的变化趋势相同，同样图中所标示出的 A' 区和 B' 区的数据和变化趋势，受到测试系统的限制不再可靠。特别需要指出的是，GM0781Z 器件的探测率在 280K 时可以达到大于 $1 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，说明器件工作在一级热电制冷的环境下，就可以获得良好的器件性能。

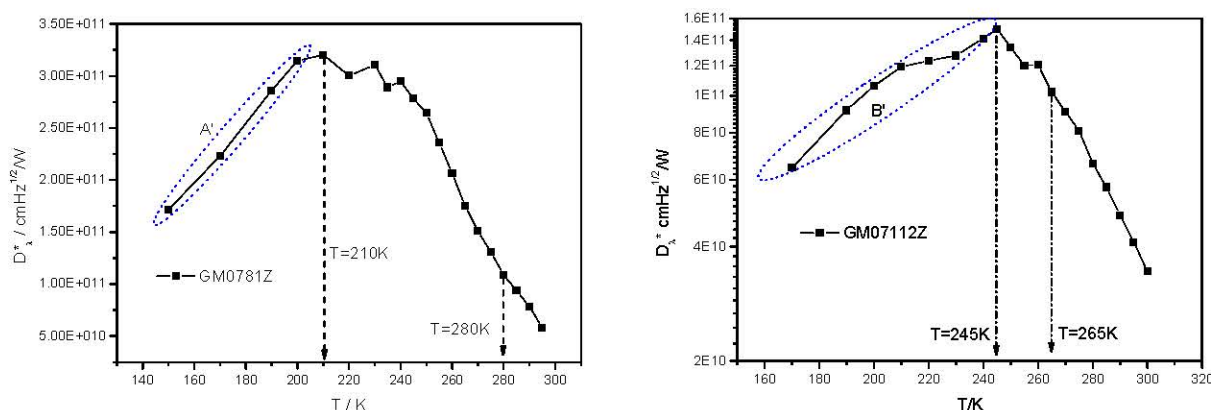


图 5.2.21 两组异质结线列器件的峰值探测率随温度的变化（左边为 GM0781Z 器件、右边为 GM07112Z 器件）

Fig 5.2.21 Temperature dependence of the detectivity of the heterojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

5.2.3 同质结器件与异质结器件的性能对比分析

图 5.2.22 给出了同质结和异质结探测器的 I-V 特性曲线，并根据偏压的大小，将反向偏压区分为两部分。通过前面几部分的分析可知，探测器在反向偏压较小的“ I ”区，产生-复合电流和扩散电流共同起作用，对于同质结器件的帽层和缓冲层为 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ ，其禁带宽度 ($E_g = 0.5\text{eV}$) 小于异质结器件帽层 $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 的禁带宽度 ($E_g = 0.85\text{eV}$)，当帽层的禁带宽度减小时，P 区的本征载流子将成指数增加 ($n_i \propto \exp(-E_g/2kT)$)，由 P 区向耗尽区的电子扩散电流将明显增加，所以使得扩散电流增大，同时产生-复合电流和界面电流 ($I_s = qAn_iS/2$ ， S 为表面复合速度) 也都将明显增大，因此同质结器件在“ I ”区同一偏压下的暗电流要明显的大于异质结器件的暗电流，由此我们可得出宽禁带材料 ($\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$) 作窗口层，可以更好的抑制少数载流子扩散电流和表面漏电流，以及 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 作缓冲层对由于晶格失配所引入的缺陷起

到了良好的抑制作用。随着反向偏压的增大，图中所标注的“II”区，两种器件的暗电流机制开始发生不同的变化，同质结器件的暗电流增加明显加快，分析可能的原因是由于同质结器件的隧穿电流在整个暗电流中所占的比例逐渐变大。

图 5.2.23 为两类器件的 R_0A 值的对数与温度曲线，异质结器件的 R_0A 值在整个温度范围内都明显的高于同质结器件，说明异质结器件的 PN 结质量要明显的优于同质结器件的 PN 结质量。两类器件 R_0A 值的变化趋势明显不同，当温度较高时， R_0A 值的对数与温度 ($1000/T$) 基本上都是成线性变化的，这与在零偏附近扩散和产生复合电流机制相吻合。当温度小于一定值 (200K) 时，异质结器件 R_0A 值随温度的降低变化缓慢，说明它不再与扩散和产生复合电流机制相吻合，而应是受到了与温度关系不大的隧穿电流机制和测试仪器限制的影响；而同质结器件在整个温度范围内 R_0A 值的对数与温度 ($1000/T$) 基本上都是成线性变化，只有在很低的温度时，才有了一些非线性的变化趋势，主要是因为在零偏附近同质结器件的扩散电流和产生-复合电流为主要的暗电流机制，并且要明显的大于异质结器件，这与前面的结果相符合。

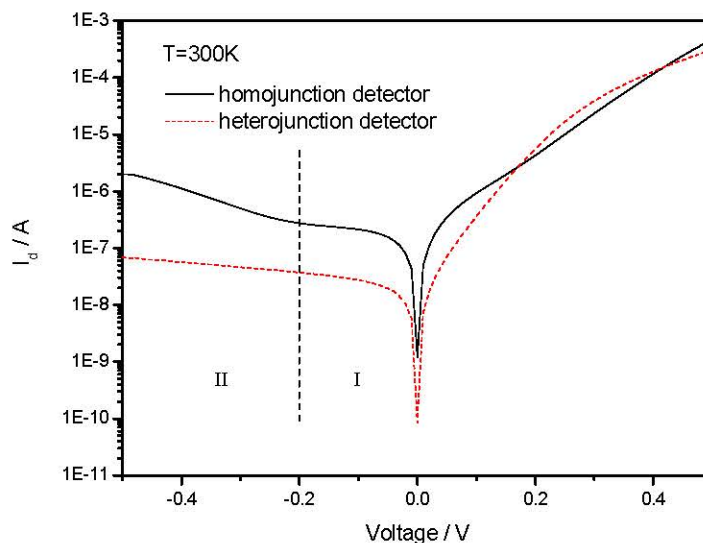


图 5.2.22 同质结器件(GM0729Z)和异质结器件(GM07112Z)的典型 I-V 曲线
Fig 5.2.22 Typical I-V curves of the homojunction and heterojunction $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

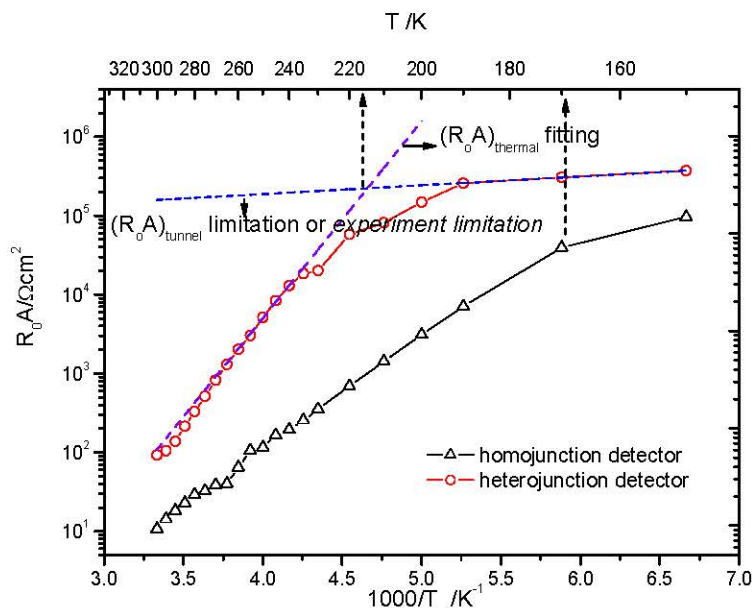


图 5.2.23 同质结器件(GM0729Z)和异质结器件(GM07112Z)的 R_0A 随温度的变化关系

Fig 5.2.23 Temperature dependence of the R_0A product of homojunction and heterojunction $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ detector

表5.2.2列出了两类器件的部分性能指标，通过表中的数据我们可以看出异质器件的性能要明显的优于同质结器件的性能。

表5.2.2两类器件的典型性能参数 (GM0729Z、GM0781Z)

Tab.5.2.2 The typical performance of the two kinds of $InGaAs$ detectors

T=300K	$R_0A / (\Omega \cdot cm^2)$	$I_d(A) / -0.5V$	$D_\lambda^* (cmHz^{1/2}/W)$	非均匀性
同质结器件	<10	> 10^{-6}	< 4.0×10^{10}	~10%
异质结器件	>40	< 10^{-7}	> 6.0×10^{10}	~6%

5.3 背照射高 In 组分 $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ 光敏芯片及焦平面的性能测试分析

5.3.1 背照射高 In 组分 $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ 光敏芯片的性能分析

背照射光敏芯片的制备选用了编号为 GM07112Z 和 GM0827Z 双异质结外延材料以及编号为 GM0729z 同质结外延材料，其中 GM0827Z 跟 GM0781Z 的吸收层浓度和厚度的参数完全一样。线列光敏芯片分别设计为 660×1 元和 256×1 元，光敏元的大小设计为 $25\mu m \times 25\mu m$ ，采用湿法腐蚀台面成型工艺，钝化层采用了 6300\AA 的 SiN_x 钝化层，背面生长 3100\AA 的 ZnS 增透膜。焦平面是采用 In 柱倒装的方式将光敏芯片、读出电路和过渡电极板进行互连。图 5.3.1 是光敏芯片和其与电路互连后的测试模块照片。

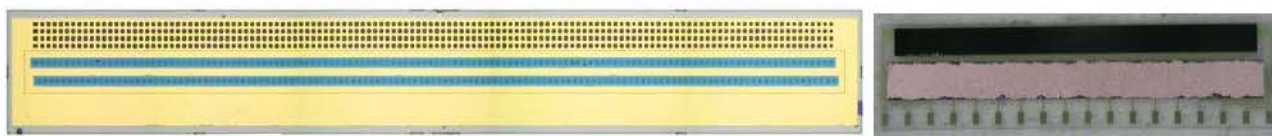


图 5.3.1 InGaAs 背照探测器光敏芯片及测试模块的照片

Fig 5.3.1 Photos of backside of illuminated InGaAs detector and measurement module

首先对所制备的编号为 GM07112Z 的双异质结 660×1 元线列光敏芯片进行了抽测，部分测试结果如下：

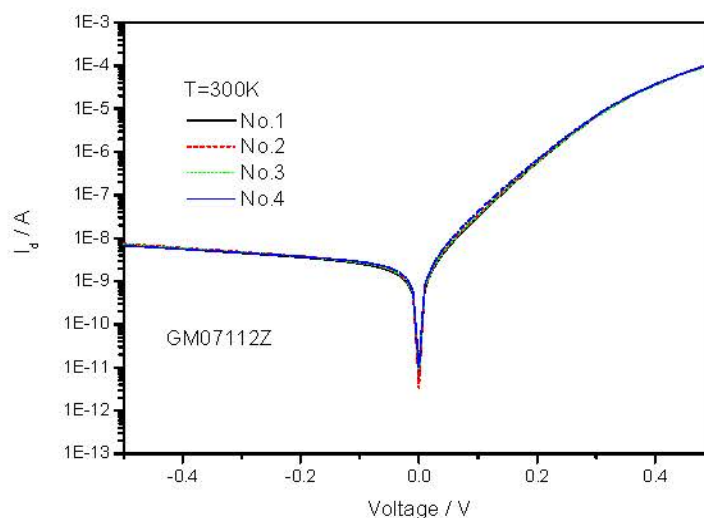


图 5.3.2 背照器件的典型 I-V 曲线 (GM07112Z)

Fig 5.3.2 Typical I-V curves of the backside illuminated $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

图 5.3.2 给出了背照射芯片的 I-V 特性曲线。室温下零偏附近器件的暗电流为 $1 \times 10^{-11} \text{A}$ ，在 -0.5V 时暗电流为 $6 \times 10^{-9} \text{A}$ 。器件的优值因子 R_0A 大于 $110 \Omega\text{cm}^2$ 。图中绘制了 4 个光敏元的 I-V 特性曲线，它们非常好地重合在一起，说明光敏芯片的均匀性较好。

图 5.3.3 给出了背照射芯片和正照芯片的相对响应光谱。背照芯片的相对响应光谱的抖动，是由于背照芯片属于小光敏元器件，所以其响应信号较小，给测量调整带来了一定困难。由图可以看出，两者的响应光谱基本重合。由于衬底的吸收，背照器件在短波方向的截止相对于正照器件更陡峭一些。

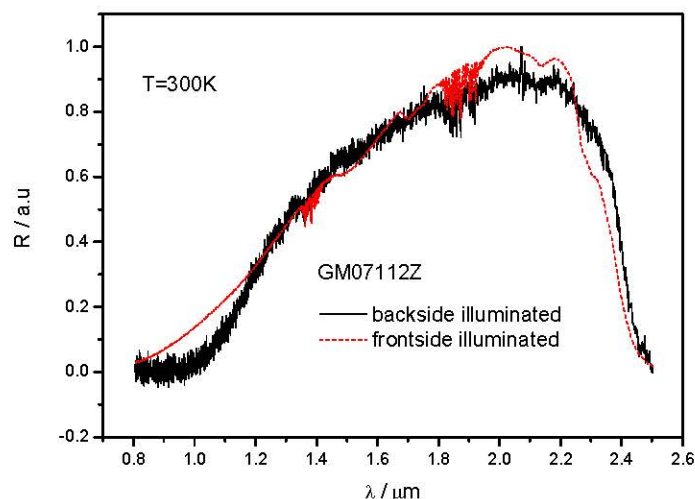


图 5.3.3 正照射和背照射 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的响应光谱
Fig 5.3.3 Spectral response of front side and backside illuminated $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ detector

表 5.3.1 给出了室温下背照器件的典型性能参数，器件的响应率大约为 0.23A/W ，探测率大约为 $1.5 \times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，与正照射器件的探测率 $1.7 \times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 相差不大，说明采用这种结构的外延材料制备背照器件是可行的。

表5.3.1 背照器件的典型性能参数(GM07112Z)

Tab 5.3.1 The typical performance of the backside illuminated InGaAs detectors

编号	I_d / A	$R_0 \text{A}/\Omega\text{cm}^2$	$S^{\sqrt{}}/\text{mV}$	$N^{\sqrt{}}/\mu\text{V}$	$R/\text{A/W}$	D^*_{λ}
GM07112Z-1	-1.275E-11	112.279	3.3	35	0.237	1.510E10
GM07112Z-2	-1.35E-11	110.616	3.2	35	0.229	1.464E10
GM07112Z-3	-1.351E-11	115.403	3.2	35	0.229	1.464E10
GM07112Z-4	-1.226E-11	114.791	3.3	35	0.237	1.510E10
GM07112Z-5	-1.191E-11	117.987	3.3	35	0.237	1.510E10

√: 在响应信号和噪声的测试中，前置放大器的档位为 10^{-8} 档

5.3.2 焦平面测试模块的性能分析

测试模块的照片见图 5.3.1。它是通过 In 柱倒装的方式，首先将光敏芯片与过渡电极板互连、读出电路与过渡电极板，通过过渡电极板的桥梁作用完成光敏芯片和读出电路的互连。

首先简要的介绍一下读出集成电路(Readout Integrated Circuit, ROIC)，它是焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)的重要组成部分，是把焦平面的各种功能集成在单一的半导体芯片中的高集成度电路，其基本功能是探测器信号的转换、放大以及将数据传输到较少的输出端。相对于周围物体的黑体辐射，被测物体的辐射信号相当微小，电流大小为纳安(nA)或者是皮安(pA)级，而且这种小信号很容易受到其它噪声的干扰，因此选择和设计电路就成为焦平面组件研制过程中非常关键的环节。电容跨阻抗放大器(CTIA)是读出电路常用的输入级，

具有低输入阻抗, 可提供稳定的探测器偏置, 且在高、低背景应用下都有很低的噪声, 适用于大范围的光敏芯片接口^[113]。在输入级后, 常用相关双采样 (CDS) 电路来消除 KTC 噪声、降低 $1/f$ 噪声和固定图形 (FPN) 噪声^[114]。输出级常用结构简单且高速的源跟随器。运算放大器的负端接探测器, 正端接参考电平 V_{ref} 。采样开关采用 CMOS 传输管结构, 输出级采用了 NMOS 源跟随器结构。读出电路的结构如图 5.3.4 所示, C_{int} 为积分电容, C 为采样保持电容。Reset 脉冲控制积分时间, SH_1 、 SH_2 为采样保持脉冲, SH_1 在积分开始阶段到来, 对应的输出为 Vo_1 , 只包含噪声; SH_2 在积分快结束时到来, 对应的输出为 Vo_2 , 包含噪声和信号。两者差分后得到信号量, 即相关双采样模式。

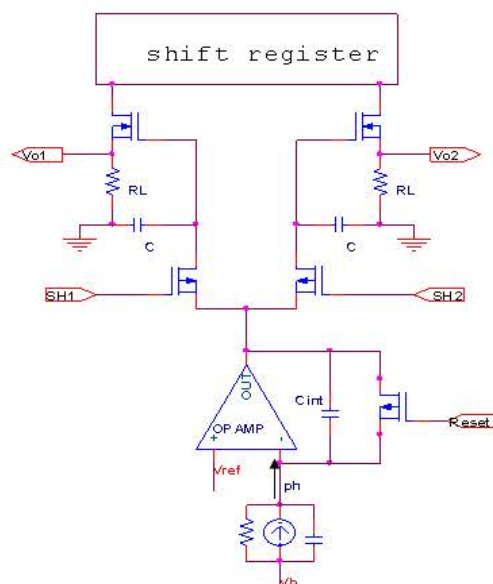


图 5.3.4 CTIA+CDS+SF 读出电路结构
Fig.5.3.4 Schematic of a CTIA unit cell

将互连后的测试焦平面组件放在屏蔽盒中进行测试, 测试系统包括温度为 900K 的黑体光源, 差分放大器, 数字发生器以及模数转换卡等, 黑体出射孔径为 10mm, 至焦平面像元面垂直距离为 L 可调, 读出电路的积分时间是 $1000\mu\text{s}$, 每一像元的读出时间为 $50\mu\text{s}$ 。通过测量焦平面组件的响应输出信号和噪声, 可计算其响应信号、噪声的非均匀性和焦平面的探测率及其非均匀性。焦平面组件的峰值探测率可由下式给出:

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

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, 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。

表 5.3.2 给出 660×1 元焦平面在不同温度下的典型性能参数 (GM0827Z)。从表中我们可

可以看出,焦平面的非均匀性变得非常的差,远远高于裸光敏芯片的非均匀性(室温下小于 5%)。我们将焦平面的响应信号的非均匀性、噪声的非均匀性和探测率的非均匀性随温度的变化分别进行分析。首先分析一下焦平面的响应信号的非均匀性,随着温度的降低响应信号的非均匀性迅速降低,从 258K 时的 43%降低到 195K 时的 8.3%,大约降低了 5 倍,其中当温度降低到 230K 以下时,响应信号的非均匀性低于 10%。其次分析一下焦平面的噪声,噪声的非均匀性随温度的降低也呈现一定的降低趋势,但是在降低的过程中存在明显的起伏,而且噪声的非均匀性在整个温度区间基本都在 70%以上,从高温区(255K 左右)的 129%降低到低温区(200K 左右)的 74%,大约降低了 1.7 倍。另外焦平面探测率的非均匀性随温度的降低呈现出明显的降低趋势,从 258K 时的 48.2%降低到 195K 时的 18.4%,大约降低了 2.6 倍。从三者随温度的变化关系上可以看出,探测率的非均匀性随温度的变化关系,介于信号的非均匀性和噪声的非均匀性随温度的变化关系之间。为了更清楚的了解三者之间的关系,我们将三者随温度的变化关系放在同一张图中进行比较说明,如图 5.3.5 所示。从图中可以得到,噪声的均方根偏差虽然随温度升高有增大的趋势,但是同时存在很大的随机性,而信号的非均匀性和探测率的非均匀性随温度的升高表现为逐渐的增大,两者的变化趋势相似,分析其原因是由于焦平面在这样的测试条件下,其信噪比大约在 10^3 左右,说明信号非均匀性的变化对探测率非均匀性的变化影响要比噪声的非均匀性变化带来的影响大一些,所以两者的变化趋势相似,但是因为探测率同时受到噪声的影响,所以两者并不是完全一致。

表 5.3.2 660×1 元焦平面的典型性能参数(GM0827Z, 扣除盲元)

Tab 5.3.2 The typical performance of the 660×1 element linear InGaAs detector module

测试 条件 温度	L=40cm、 $t_{int}=5ms$ 、 $d_{bb}=10mm$					
	Vs / V		Vn / V		$D^*_\lambda / cmHz^{1/2}/W$	
	平均值	非均匀性	平均值	非均匀性	平均值	非均匀性
195K	0.65913	8.3%	3.00998E-4	70%	2.66592E11	18.4%
203K	0.69971	9.4%	3.07038E-4	79%	2.82879E11	20.0%
213K	0.76488	9.4%	3.30377E-4	72%	2.84803E11	20.8%
223K	0.82934	9.7%	4.06854E-4	73%	2.53189E11	22.9%
233K	0.88178	12%	5.33597E-4	73%	2.05366E11	25.2%
243K	0.93427	17.9%	7.70432E-4	47%	1.43175E11	27.9%
253K	1.02105	33.3%	15.6 E-4	148%	8.48799E10	38.2%
258K	1.07135	43%	19.6 E-4	110%	6.76217E10	48.2%

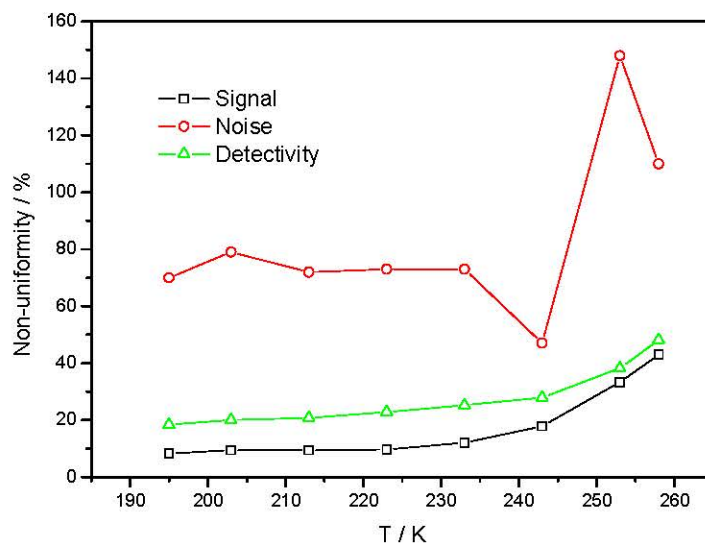


图 5.3.5 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 线列焦平面的噪声、信号和探测率的非均匀性随温度的变化关系

Fig 5.3.5 Temperature dependence of the non-uniformity of the signal, noise and detectivity for 660×1 element linear InGaAs detector module

为了研究焦平面的信号、噪声和探测率非均匀性的起因，我们通过改变测试条件对线列焦平面进行了测试，部分测试结果如下：

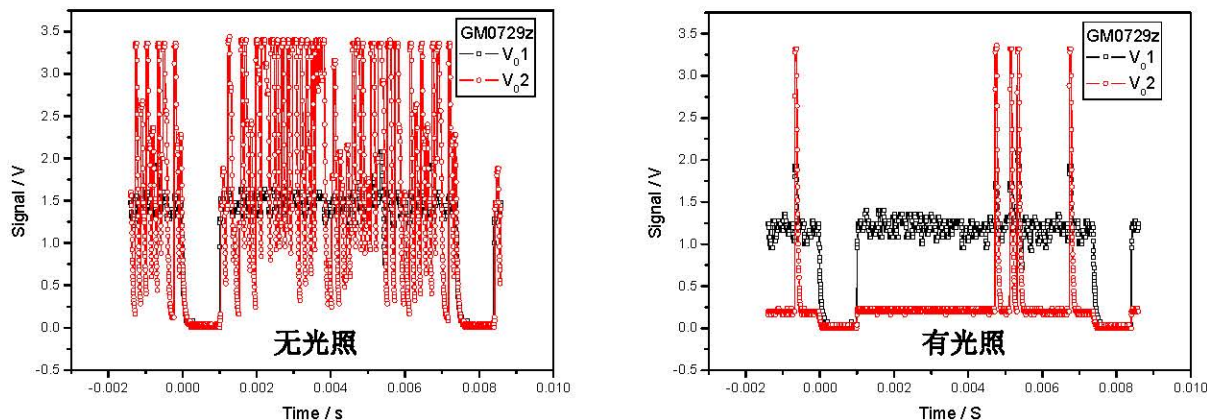


图 5.3.6 示波器中观察到的 InGaAs 焦平面扫描信号波形图 ($V_{\text{ref}}=2.5\text{V}$ 、 $V_b=2.5\text{V}$)

Fig 5.3.6 Wave diagrams of linear InGaAs detector module in oscillograph

图 5.3.6 给出了焦平面在 $V_{\text{ref}}=2.5\text{V}$ 和 $V_b=2.5\text{V}$ ，即探测器单元上没有偏压时，在没有光照和有光照条件下，在示波器上所得到的扫描信号。从图中可以非常清楚地看到，在没有光照的情况下，焦平面的输出信号非常的不均匀，特别是在读出电路刚开始积分时，即输出信号 V_{01} 已经表现出明显的不均匀，在积分完毕后的输出信号 V_{02} 表现的更加不均匀，这说明焦平面各元在零偏附近的暗电流或者说是噪声很大，而且非常不均匀。当有较强的辐射加到焦平面上时，可以看出焦平面有明显的信号响应（基本处于饱和状态），由于较大的光

电流抑制了这种由光敏元零偏时的暗电流引入的非均匀性，使得响应信号的均匀性有明显地提高。

考虑到由于光敏芯片在零偏附近时，如果给光敏元加一个较小的偏压就会使得 I-V 特性变化剧烈，如当给光敏元加一个 $\pm 3\text{mV}$ 的偏压时，器件的电流就会比零偏时大接近 2 个数量级。由于高 In 组分的 InGaAs 探测器零偏时的暗电流本身就比较大（相对于响应波段为 $1.7\mu\text{m}$ 的 InGaAs 探测器），再在此基础上随机地引入一个小的偏压，使得暗电流随机地有接近两个数量级改变，最终使得焦平面的非均匀性迅速变差。图 5.3.7 给出了在 $V_{\text{ref}}=2.5\text{V}$ 和 $V_b=2.6\text{V}$ 时，即光敏元工作在 0.1V 的偏压下，在示波器上所得到的没有光照和有光照时的扫描信号。我们这样做的目的是想通过在探测器的上强行引入一个较大的偏压，来抑制由于读出电路随机引入的输入失调电压^{[115][116]}，从而改变焦平面的均匀性，同时证明我们前面的分析。通过图 5.3.7 可以看出，在没有光照时，焦平面的扫描输出信号 V_{o1} 和 V_{o2} 的均匀性都比零偏压时有明显的提高。当把辐射加到焦平面上时，有明显的信号输出，即使在较弱的信号下（未出现响应饱和），焦平面的均匀性有明显地提高。

这种由于传统的 CTIA 读出电路会给探测器随机引入的一个大约 $\pm 3\text{mV}$ 的输入失调电压，一直困扰着高 In 组分 InGaAs 焦平面的发展，很多相关领域的专家对此也进行了大量的工作，并取得了较好的结果。图 5.3.8 给出了 2008 年传感无限公司（现属于 Goodrich 公司）的部分研究成果^{[115][116]}。他们通过在运放的输入端加入一个自动零（Autozero）功能电路，使输入失调电压从原来的 $\pm 3\text{mV}$ 降低到几十微伏，从而来降低焦平面的非均匀性。从图中可以看出，在关闭自动零时，焦平面暗电流的均匀性非常的差，这与我们的测试结果非常相似，但当开启自动零功能后，焦平面暗电流的均匀性就会变的非常的好，其非均匀性比关闭自动零时非均匀性降低了 10.7 倍。另外，加入自动零功能后使得测出的暗电流平均值降低了 3 倍。

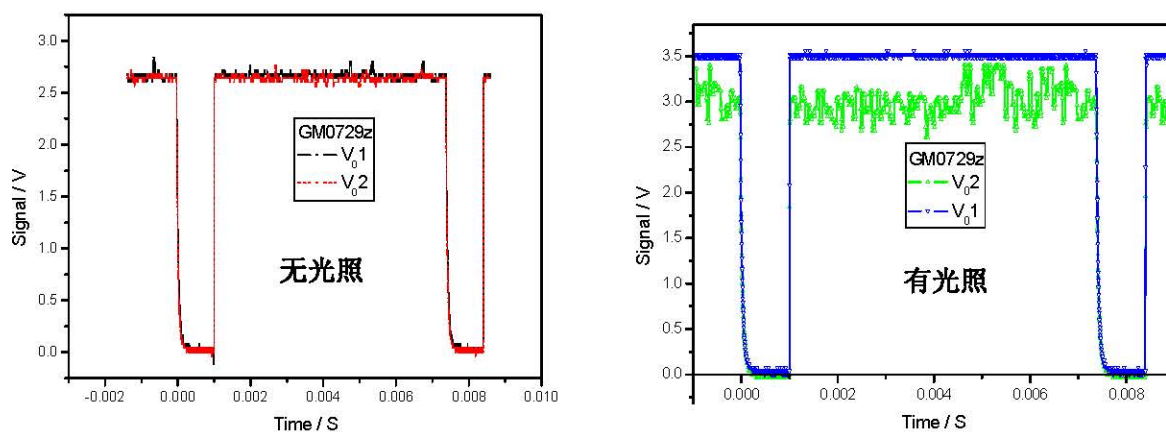


图 5.3.7 示波器中观察到的 InGaAs 焦平面扫描信号波形图 ($V_{\text{ref}}=2.5\text{V}$ 、 $V_b=2.6\text{V}$)

Fig 5.3.7 Wave diagrams of linear InGaAs detector module in oscillograph

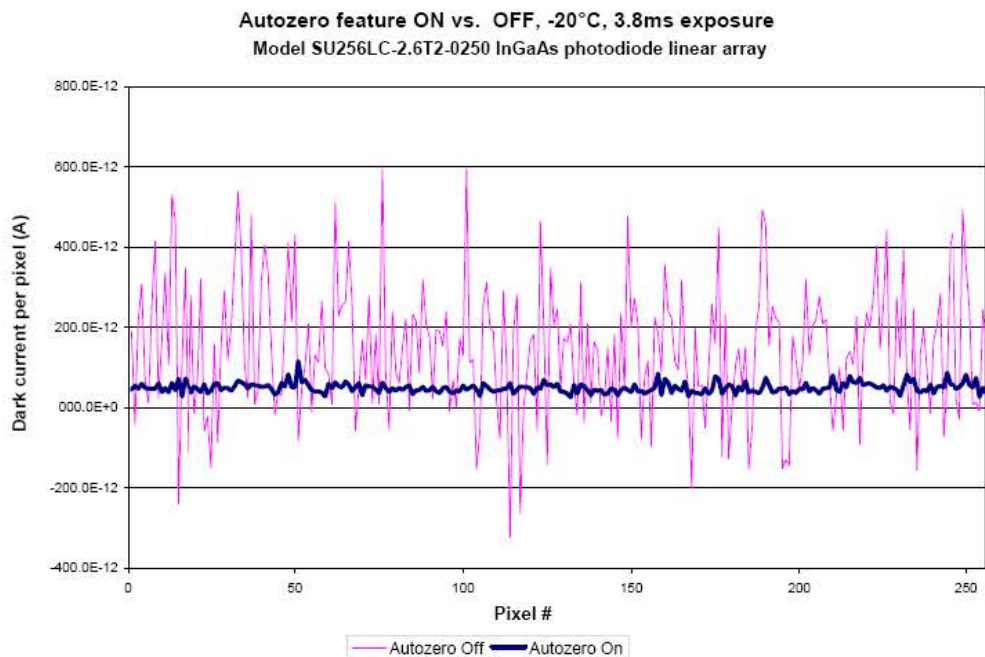
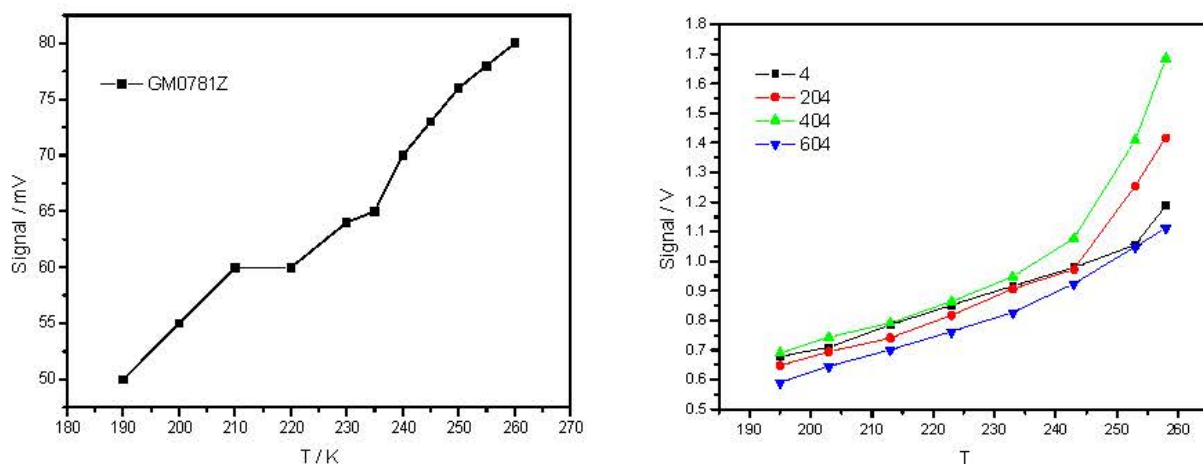


图 5.3.8 自动零关闭（虚线）和开启（实线）时测得的 SU256LC-2.6T2（传感无限公司 256×1 元 $2.6\mu\text{m}$ 的 InGaAs 焦平面）的暗电流
Fig 5.3.8 Dark scan of SU256LC-2.6T2 (Sensors Unlimited, part of Goodrich Corp) with autozero off (light line) and with autozero on (heavy line)

我们提取了 660×1 元线列焦平面中四元器件（第 4 元、204 元、404 元和 604 元）的测试结果，与裸光敏芯片的性能进行了部分对比分析，如图 5.3.9 所示。两者随温度的变化趋势基本相同，特别是两者最终得到的探测率基本一致。说明焦平面的探测率可以达到与正照射光敏芯片探测率相同的水平，正照射和背照射器件的制备工艺基本稳定，或者说两种工艺给器件带来的影响基本相同。同时也可以明显地看出焦平面各元间的一致性较差。



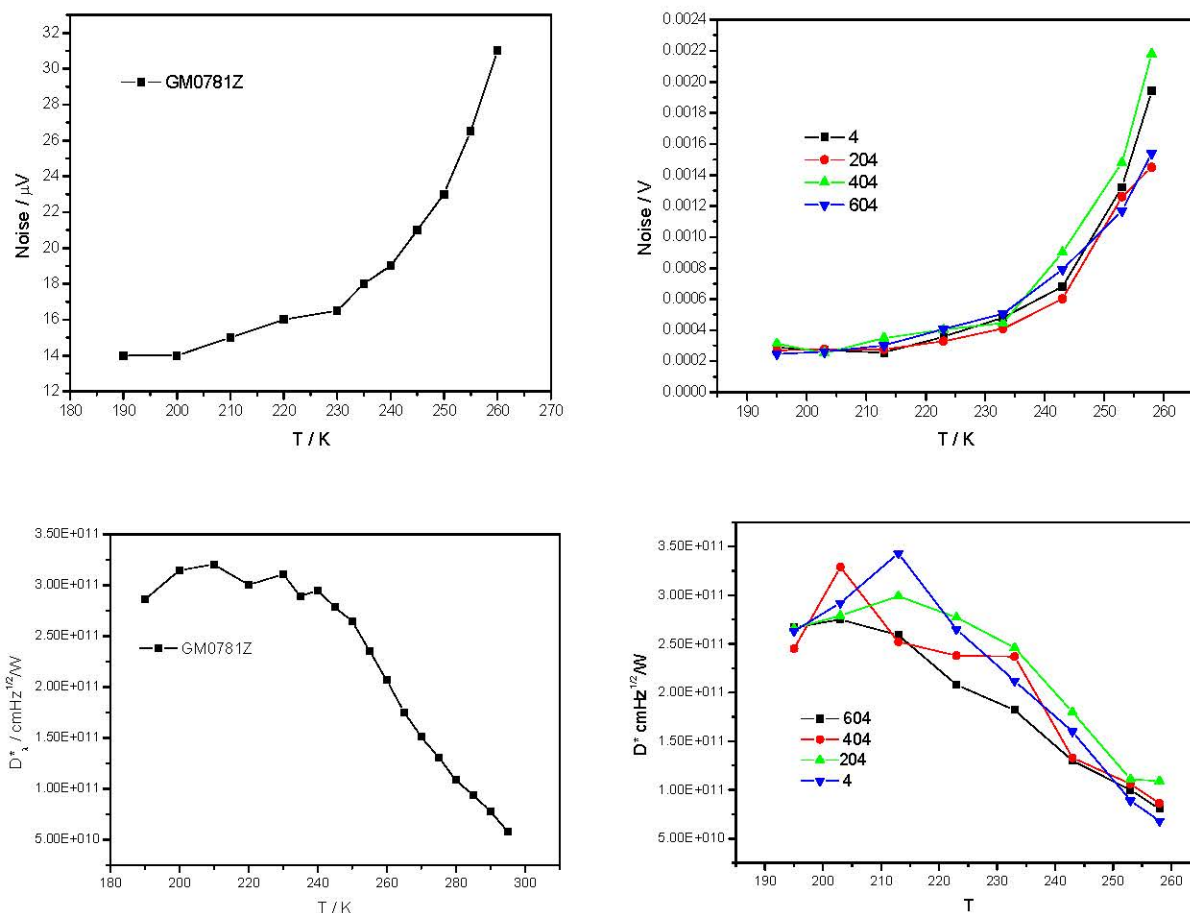


图 5.3.9 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 光敏芯片（左边）和抽测焦平面上四元光敏元（右边）的噪声、信号和探测率随温度的变化关系

Fig 5.3.9 Temperature dependence of the signal, noise and detectivity for linear InGaAs detector (left) and module (right)

5.4 本章小结

本章首先对正照射和背照射线列探测器光敏芯片的制备工艺进行了简要的介绍，然后对同质结和异质结两种结构的器件性能分别进行了详细的研究。其中，室温下同质结器件的优值因子和峰值探测率分别为 $6\sim 7.5\Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 $4\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，非均匀性约为 10%，而异质结器件的优值因子和峰值探测率可以达到 $40\sim 90\Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 $6\sim 7\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，非均匀性小于 6%，并且异质结器件在 280K 时其峰值探测率可以达到 $1\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 以上，结果表明异质结器件的性能要明显地优于同质结器件。同时，还详细讨论了外延材料的吸收层厚度和掺杂浓度等材料参数对器件性能的影响，对材料设计参数的进一步优化提供了参考。最后，对背照光敏芯片和焦平面进行了性能分析，通过测试分析得到，背照射芯片的性能与正照芯片的性能基本相同。但通过对焦平面性能的分析发现，由于传统读出电路（适用于 $1.7\mu\text{m}$ 波段的 InGaAs 探测器焦平面）的输入失调电压会显著增大高 In 组分 InGaAs 探测器焦平面组件的非均匀性。

第六章 全文总结与建议

6.1 全文总结

本文对高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的制备工艺及器件物理进行了深入的研究。主要包括：对高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 外延材料的表征和分析；对 p 电极的欧姆化和台面的钝化等关键工艺的优化；对同质结和双异质结器件进行了对比分析；研究了不同的外延材料参数对器件性能的影响；以及器件设计参数对器件性能的影响等。通过对上面几个关键工艺和器件物理的研究分析，得到了下面几个初步的结果。

(1) 对器件 p 型电极的欧姆化进行了初步研究。通过对比实验发现，经过 450°C 、30 S 退火后， $\text{p}^+\text{-InP}$ 与 Au/Zn/Au 接触电极的比接触电阻可以降低到 $10^{-6}\ \Omega\text{cm}^2$ ； $\text{p}^+\text{-In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 与 Ti/Pt/Au 的接触电极经过 460°C 、30 S 退火后，其比接触电阻 $\rho_c \approx 7.5 \times 10^{-3}\ \Omega\text{cm}^2$ ； $\text{p}^+\text{-In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 与 Ti/Pt/Au 的接触电极，经过 480°C 、30 S 退火后，其比接触电阻 $\rho_c \approx 6.2 \times 10^{-3}\ \Omega\text{cm}^2$ 。三种 P 型电极经过适当的退火处理后，基本上都能实现较好的欧姆接触。

(2) 对高台面 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 器件的钝化进行了初步研究。在高台面 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 器件的侧面钝化方面，首次采用了阳极氧化+ SiO_2 双层钝化技术，对利用阳极氧化方法，在器件表面自身生成氧化物介质薄膜的可行性进行了实验，并在证明方法可行的基础上，对氧化物介质薄膜进行了优化。通过对比实验发现通过调节电解液的 PH 值，可以改变氧化物介质薄膜的组分。通过 AES 分析可以得到，在 PH 为 9 的 KOH/乙二醇电解液中生成的氧化物薄膜中， As_2O_3 和 Ga_2O_3 的含量明显增大，更有利于提高氧化物薄膜的钝化效果。

(3) 通过对同质结和双异质结两类高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器对比分析，得出由 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 作帽层及缓冲层的外延材料制备的双异质结器件，其性能要明显的优于由 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 作帽层及缓冲层的外延材料制备的同质结器件，主要表现为宽禁带的 $\text{In}_{0.78}\text{Al}_{0.22}\text{As}$ 作窗口层，可以更好的抑制少子扩散电流和表面漏电流，而且 $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 作缓冲层对由于晶格失配所引入的缺陷起到了良好的抑制作用，使得异质结器件的隧穿电流也得到了明显的降低，这些优点明显的提高了高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器的性能。其中，室温下异质结器件的峰值探测率和响应率可以达到 $6\sim 7 \times 10^{10}\ \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 和 $1.6\sim 1.7\text{A/W}$ ，非均匀性小于 6%，280K 时其峰值探测率可以达到 $1 \times 10^{11}\ \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 以上，说明采用一级热电制冷就可以使芯片达到较高的性能。

(4) 对不同的外延材料参数与器件性能的关系进行了对比分析。从所进行的对比实验中

得到，随着吸收层（i 层）掺杂浓度的提高，器件的暗电流明显降低，但是量子效率也呈现出了降低的趋势，因此需要在两者之间进行权衡。另一个需要特别注意的参数是吸收层的厚度，我们发现虽然理论上可以认为更宽的吸收层（i 层）宽度，可以有利于量子效率的提高，但是更高宽的 i 层也就意味着，光生载流子要通过更宽的有大量缺陷的区域，增加了光生载流子的复合，降低量子效率，因此对于 i 层厚度的选择也同样需要特别注意。

（5）对高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器阵列焦平面组件进行了初步的测试分析。从测试结果中可以得到，由于高 In 组分 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器芯片本身的暗电流和非均匀性均较大，而且适用于常规 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器的 CTIA 读出电路存在 $\pm 3\text{mV}$ 的输入失调，所以使得整个焦平面的非均匀性迅速增大，严重制约了整个焦平面的性能。

（6）通过自行设计的一套测试结构，初步研究了器件图形的各项设计参数对器件性能的影响。通过对测试结构的实验数据分析得出，对于正照射台面型 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 探测器，在用优值因子（ R_0A ）描述器件的结区特性时， A 取台面的面积更为合理；器件的暗电流和噪声都是由整个台面面积所决定的，特别是通过对暗电流密度和器件的周长面积比的分析，得到器件的侧面漏电流相对于器件的整个暗电流可以忽略不计，即器件的暗电流主要来源于器件的体内暗电流；器件的响应信号不仅取决于光敏感区的面积，而是整个台面的面积；以及在具有相同的台面面积时，在一定的合理范围内探测器的性能与器件的具体形状无关。

6.2 建议

虽然在本论文的工作中，得到了上述一些基本结论，但同时还有很多的问题亟待研究和解决。

（1）焦平面组件的均匀性、可靠性和抗辐照特性等方面的研究。

根据前面第五章对焦平面部分的分析，在近室温范围内，焦平面的信号响应和探测率的非均匀性都大于 30%，这将成为长阵列高 In 组分 InGaAs 探测器焦平面的瓶颈，制约着焦平面的实际应用。根据前面的测试结果，可以考虑从以下几个方面进行优化：1、对读出电路进行修改，减小读出电路的输入失调电压；2、给芯片加入一个适当的反向偏压，削弱输入失调电压作用；3、优化器件的制备工艺，进一步降低器件的暗电流及提高器件的均匀性；4、适当降低器件的工作温度；5、进一步优化外延材料的各项参数，如掺杂浓度和吸收层厚度等，考虑当前焦平面组件非均匀性过大的问题，在响应率允许的情况下，可以适当的增加载流子浓度（ $>1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ），降低器件的暗电流，从而增加器件的均匀性。

对于高 In 组分 InGaAs 探测器光敏芯片以及焦平面组件的可靠性和抗辐照特性等方面的研究还很欠缺。希望通过这些方面的研究，确定光敏芯片以及焦平面组件的制备工艺对探测

器辐照特性的影响，为最终加固器件和实现整个工艺的稳定和标准化做铺垫。

（2）器件制备工艺的优化和标准化。

现在所采用的器件制备工艺，虽然经过了一定的标准化管理，但是工艺流程中的每一步都还存在很大随机性，而且这些随机性往往出现在几个关键的工艺中，如光刻、台面成型、钝化以及芯片、读出电路与过渡电极板的互连工艺等，并且现在所采用的这些工艺虽然经过了一系列的优化，但因为每次工艺中的偏差，使得优化效果也大打折扣。因此，尽快的稳定工艺并将其优化后的工艺标准化，成为提升器件性能和成品率的关键一环。

（3）测试系统的标准化

同前面的器件制备工艺一样，现在在器件的性能测试过程中同样存在很大的随机性，特别是在光敏芯片的抽测过程中，如各种测试中所使用的测试线、仪表的读数、以及测试系统所处的环境等，这些都会对器件的测试带入很大的随机性。

（4）统一数据库的建立

从前面几章的分析中，可以看出为了研究器件的各项性能，要对多种或者多组器件同时进行对比分析，这就需要一个大量统计的结果，而现在的数据量明显不够，所以得到的数据说服力或者说准确性不够。这当然有一定的客观原因，如人员力量、研究时间、实验次数等，但随着后面研究实验的继续进行，得到的实验数据会更加的丰富，因此建立一个统一的全面的数据库就显的非常的重要和必要了。

参考文献

- [1] <http://www.sensorsinc.com/hyperspectral.html>. (O-H, C-H, N-H...).
- [2] <http://directory.eoportal.org/presentations/7053/11149.html>.
- [3] Douglas S.Malchow, Robert M.Brubaker, Marc P.Hansen. Development of linear array ROIC for InGaAs detector arrays with wavelength response to 2.5 μm microns for NIR spectroscopy and machine vision. *Proc.SPIE*, 2008, **6940**, 69402V-1~11.
- [4] Ruud Hoogeveen, Hugo Spruijt, Bart Broers and Avri Selig, "Near-Infrared Focal-Plane Arrays for SCIAMACHY", *Proc.SPIE*, Vol.**2583**, 2001, 459-470.
- [5] 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", *Infrared Physics & Technology*, Vol.**42**, 2001, 1-16.
- [6] J.P.Moy, J.J.Chabbal, S.Chaussat, J.Veyrier, M.Villard, "Buttable arrays of 3000 multiplexed InGaAs photodiodes for SWIR imaging", *Proc. SPIE*, Vol.**686**, 1986, 93-95.
- [7] P.Moy, X.Hugon, J.Chabbal, J.De Cschar, C.Lenoble, D.Mollaret, M.Villard, B.Villotitch, "3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for SPOT4 SWIR channel, *Proc. SPIE*, Vol.**1107**,1989, 137-151.
- [8] 陈永甫等, 红外辐射红外器件与典型应用[M], 电子工业出版社, 北京, 2004.
- [9] 周书铨等, 红外辐射测量基础[M], 上海交通大学, 上海, 1991.
- [10] 汤定元, 糜正瑜等, 光电器件概论[M], 上海科学技术文献出版社, 上海, 1989.
- [11] D.A. Scribner, M.R. Kruer, J.M. Killiany, Infrared focal plane array technology, *Proc. IEEE*, 1991, 79:66-85.
- [12] Yonggang Zhang, Yi Gu, Zhaobing Tian, et al. Wavelength extended 2.4 μm heterojunction InGaAs photodiodes with InAlAs cap and linearly buffer layers suitable for both front and back illuminations. *Infrared Phys. Tech.*, 2008, **51**, 316-321.
- [13] Joachim John, et al. Extended wavelength InGaAs on GaAs Hybrid image sensors. *Proc. SPIE*, 2003, **5121**, 263~270.
- [14] Steven Wojtczuk, Peter Colter and M.Jhabvala. High-quantum-efficiency 2.2 μm InGaAs MOCVD photodiodes. *Proc. SPIE*, **2999**, 204~210.
- [15] R.U.Martinelli, T.J.Zamerowski, and P.A.Longeway. 2.6 μm InGaAs photodiodes. *Appl. Phys. Lett.*1988, **53(11)**, 989~991.
- [16] 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.

- Infrared Phys. Tech.*, 2001, **42**, 1-16.
- [17] J.P.Moy, X.Hugon, J.Chabbal, J.De Cschar, C.Lenoble, D.Mollaret, M.Villard, B.Villotitch. 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for SPOT4 SWIR channel. *SPIE*, 1989, **1107**, 137-151.
- [18] A.M.Joshi, V.S.Ban, S.Mason, M.J.Lange. 512 and 1024 element linear InGaAs detector arrays for Near-Infrared (1~3 μ m) environmental sensing. *SPIE*, 1992, **1735**, 287-295.
- [19] Joachim John, Lars Zimmermann, Stefan Nemeth, Thierry Colin, et al. Extended InGaAs on GaAs IR detectors. *SPIE*, 2003, **4820**, 435-459.
- [20] A.Sacedón, F.Gonzalez-Sanz, E.Calleja and E.Munoz. Design of InGaAs linear graded buffer structures, *Appl.Phys.Lett.*.66(**24**),12 June 1995,3334~3336
- [21] Yonggang Zhang, Yi Gu, Cheng Zhu. Gas source MBE grown wavelength extended 2.2 and 2.5 μ m InGaAs PIN photodetectors. *Infrared Physics & Technology*, 2006, **47**, 257-262.
- [22] T. P. Pearsall, and M. A. Pollack. Compound semiconductor photodiodes. *Semiconductors and semimetals*, 1985, **22(D)**, 174-241.
- [23] Alan Hoffman, Todd Sessler, Joseph Rosbeck, et al. Megapixel InGaAs arrays for low background applications. *SPIE*, 2005, **5783**, 32-38.
- [24] Joseph Boisvert, Takahiro Isshiki, Rengarajan Sudharsanan, et al. Performance of very low dark current SWIR PIN arrays. *SPIE*, 2008, **6940**, 69400L-1~69400L-7.
- [25] Himanshu Dave, Chirag Dewan, Sandip Paul, S.S.Sarkar, Himanshu Pandya, S.R.Joshi, Ashish Mishra, Manoj Detroja. AWiFS Camera For Resourcesat. *SPIE*, **6405**, 2006.
- [26] G.H.Olsen, A.M.Joshi and V.S.Ban. Current status of InGaAs detector Arrays for 1-3 μ m. *SPIE*,1991,**1540**, 596-605.
- [27] Ruud Hoogeveen, Hugo Spruijt, Bart Broers and Avri Selig. Near-Infrared Focal-Plane Arrays for SCIAMACHY. *SPIE*, **2583**, 459-470.
- [28] Ruud W.M. Hoogeveen, Ronald J. van der A, Albert P.H. Goede. Extended wavelength InGaAs infrared (1.0-2.4 μ m) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere. *Infrared Physics & Technology*, 2001, **42**, 1-16.
- [29] Henry Yuan, Gary Apgar, Jongwoo Kim, Joyce Laquindanum, et al. FPA development: from InGaAs, InSb, to HgCdTe. *SPIE*, 2008, **6940**, 69403C-1~69403C-11.
- [30] A.Krier, Y. Mao. High performance uncooled InAsSbP/InGaAs photodiodes for the 1.8~3.4 μ m wavelength range. *Infrared Physics & Technology*, 1997, **38**, 397-403.
- [31] Paul P.Webb, G.H.Olsen. Large-area and visible response VPE InGaAs photodiodes. *IEEE Transaction on electron devices*, 1983, **ED-30**, No.4, 395-400.
- [32] P.Esfandiari, P.Koskey, K.Vaccaro, et al. Integration of IR focal Plane Arrays with Massively Parallel Processor. *SPIE*, 2008, **6940**, 69402E-1~7.
- [33] J. Smith, L. C. Chiu, S. Margalit, A. Yariv, and A. Y. Cho. A new infrared detector using

- electron emission from multiple quantum wells. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1983, **1**(2), 376-378.
- [34] C. G. Bethea, B. F. Levine, M. T. Asom, R. E. Leibenguth, J. W. Stayt, K. G. Glogovsky, R. A. Morgan, J. D. Blackwell, and W. J. Parrish. Long wavelength Infrared 128×128 Al_xGa_{1-x}As/GaAs quantum well infrared camera and imaging system. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1993, **40**(11), 1957-1963.
- [35] S. D. Gunapala, J. S. Park, G. Sarusi, T. Lin, J. K. Liu, P. D. Maker, R. E. Muller, C. A. Shott, and T. Holter. 15μm 128×128 GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well infrared photodetector focal plane array camera. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1997, **44**(1), 45-50.
- [36] S. D. Gunapala, J. K. Liu, J. S. Park, M. Sundaram, C. A. Shott, T. Hoelter, T. Lin, S. T. Massie, P. D. Maker, R. E. Muller, and G. Sarusi. 9μm cutoff 256×256 GaAs/Al_xGa_{1-x}As quantum well infrared photodetector hand-held camera. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1997, **42**(1), 51-57.
- [37] S. D. Gunapala, S. V. Bandara, J. K. Liu, W. Hong, M. Sundaram, P. D. Maker, R. E. Muller, C. A. Shott, and R. Carralejo. Long-wavelength 640×486 GaAs/AlGaAs quantum well infrared photodetector snap-shot camera. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1998, **45**(9), 1890-1895.
- [38] S. D. Gunapala, S. V. Bandara, J. K. Liu, J. M. Mumolo, C. J. Hill, S. B. Rafol, D. Salazar, J. Woolaway, P. D. LeVan, M. Z. Tidrow. Towards dualband megapixel QWIP focal plane arrays. *Infrared Phys. Technol.*, 2007, **50**, 217-226.
- [39] S. Ozer, U. Tumkaya, and C. Besikci, Large format AlInAs-InGaAs quantum-well infrared photodetector focal plane array for midwavelength infrared thermal imaging. *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(18), 1371-1373.
- [40] S. Ozer, U. Tumkaya, B. Asici, and C. Besikci. Demonstration and performance assessment of large format InP-InGaAsP quantum-well infrared photodetector focal plane array. *IEEE. J. Quantum. Electron.*, 2007, **43**(8):709-713.
- [41] M. Jhabvala, K. K. Choi, C. Monroy, and A. La. Development of a 1K×1K, 8-12μm QWIP array. *Infrared Phys. Technol.*, 2007, **50**, 234-239.
- [42] Y. Arakawa, and H. Sakaki. Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **40**(11), 939-941.
- [43] V. Ryzhii. Analysis of the photocurrent in quantum dot infrared photodetectors. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2001, **40**, 148-150.
- [44] E. Towe, and D. Pan. Semiconductor quantum-dot nanostructures: their application in a new class of infrared photodetectors. *J. Sel. Top. Quantum. Electron*, 2000, **6**(3), 408-421.
- [45] K. W. Berryman, S. A. Loyon, and M. Segev, Mid-infrared photoconductivity in InAs

- quantum dots. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(14), 1981-1863.
- [46] S. W. Lee, K. Kirakawa, and Y. Shimada. Bound-to-continuum intersubband photoconductivity of self-assembled InAs quantum dots in modulation-doped heterostructures. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(10), 1428-1430.
- [47] S. F. Tang, S. Y. Lin, and S. C. Lee. Near-room-temperature operation of an InAs/GaAs quantum-dot infrared photodetector. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(17), 2428-2430.
- [48] L. Jiang, S. S. Li, N. T. Yeh, J. I. Chyi, C. E. Ross, and K. S. Jones. In_{0.6}Ga_{0.4}As/GaAs quantum-dot infrared photodetector with operating temperature up to 260K. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(12), 1986-1988.
- [49] E. T. Kim, A. Madhukar, Z. Ye, and J. C. Campbell. High detectivity InAs quantum dot infrared photodetectors. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(17), 3277-3279.
- [50] P. Bhattacharya, X. H. Su, S. Chakrabarti, G. Ariyawansa, and A. G. U. Perera. Characteristics of a tunneling quantum-dot infrared detector operating at room temperature. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**, 191106.
- [51] R. S. Attaluri, J. Shao, K. T. Posani, S. J. Lee, J. S. Brown, A. Stintz, and S. Krishna. Resonant cavity enhanced InAs/InGaAs dots-in-a-well quantum dot infrared photodetector. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2007, **25**(4), 1186-1190.
- [52] H. Lim, S. Tsao, W. Zhang, and M. Razeghi, High-performance InAs quantum-dot infrared photodetectors grown on InP substrate operating at room temperature. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**, 131112.
- [53] D.V.Rossi. *IEEE Electron Device Lett.*, 1991, **ED-12**(12), 688-690.
- [54] D.V.Rossi. *IEEE International Electron Device Meeting, San Francisco, CA December, 1992.*
- [55] http://directory.eoportal.org/pres_SPOT4.html.
- [56] Q.L.Kleipool, R.T.Jongma, A.M.S.Gludemans, et al. In-flight proton-induced radiation damage to SCIAMACHY's extended-wavelength InGaAs near-infrared detectors. *Infrared Physics & Technology*, 2007, **50**, 30-37.
- [57] 郝国强, InGaAs红外探测器器件与物理研究[D], 中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士学位论文, 2006.
- [58] W. Porod and D. K. Ferry, Modification of the virtual-crystal approximation for ternary III-V compounds [J], *Phys. Rev. B*, 1983, **27**(4): 2587-2589
- [59] 潘青, 用InGaAs材料制作的2.6um光电探测器, *半导体光电*, Vol.**20**, No2, 1999, 79~82
- [60] Rhoderick EH, Williams RH. Metal-Semiconductor contacts. Second Edition. Clarendon Press, 1988.

- [61] Crowell CR, Sze SM. *Solid State Electronics*, 1966, **9**, 1035.
- [62] Yu AYC. *Solid State Electronics*, 1970, **13**, 239.
- [63] Chang CY, Fang YK, Sze SM. *Solid State Electronics*, 1971, **14**, 541.
- [64] A.J.Valois and G.Y.Robinson, Au/Be ohmic contacts to p-type indium phosphide. *Solid-State Electron*. 1982, **25**, 973.
- [65] L.P.Erickson, A.Waseem, and G.Y.Robinson, Characterization of ohmic contacts to InP. *Thin Solid Films*. 1979, **64**, 421-426.
- [66] L.M.Schiavone and A.A.Pritchard, Ohmic contact to moderately resistive p-type InP. *J.Electrochem. Soc.* 1974, **46**, 452-453.
- [67] W.Tseng, A.Christou, H.Day, J.Davey, and B.Wilkins, Ohmic contacts to lightly doped n and p indium phosphide surfaces. *J.Vac.Sci.Technol.* 1981, **16**, 623-625.
- [68] E.Kuphal. Low resistance ohmic contacts to n-type and p-type. *Solid-State Electron*. 1981, **24**, 69-78.
- [69] F.A.Thiel, D.D.Bacon, E.Buehler, and K.J.Bachmann. Contacts to p-type InP. *J. Electrochem. Soc.* 1977, **124**, 317-318.
- [70] H.T.Mills and H.L.Hartnagel. Ohmic contacts to InP. *Int.J.Electron*. 1979, **46**, 65-73.
- [71] H.Morkoc, T.J.Drummond, and C.M.Stanchak. Schottky barriers and ohmic contacts on n-type InP based compound semiconductors for microwave FETs. *IEEE, Trans.Electron. Devices*, **ED-28**, 1981, 1-7.
- [72] G.Weimann and W.Schlapp. Ohmic contacts on indium phosphide. *Phys.Status Solidi*, 1978, **A50**, K219-K223.
- [73] P.A.Barnes and R.S.Williams. Alloyed tin-gold ohmic contacts to n-type indium phosphide. *Solid-State Electron*. 1981, **24**, 907-913.
- [74] T.Sanada and O.Wada. Ohmic contacts to p-GaAs with Au/Zn/Au structure. *Japan. J.Appl.Phys.* 1980, **19**, L491-L494.
- [75] O.Ishihara, K.Nishitani, H.Sawano and S.Mitsui. Ohmic contacts to P-type GaAs. *Japan. J.Appl.Phys.* 1976, **15**, 1411-1412.
- [76] R.H.Cox and H.Strack. Ohmic contacts for GaAs devices. *Solid-State Electron*. 1967, **10**, 1213-1218.
- [77] N.Braslau. Alloyed ohmic contacts to GaAs. *J.Vac. Sci.Technol.* 1981, **19**, 803-807.
- [78] W.T.Anderson, Jr.A.Christou and J.E.Davey. Development of ohmic contacts for GaAs devices using epitaxial Ge films. *IEEE J.Solid-State Circuits*. 1978, **SC-13**, 430-435.
- [79] A.K.Sinha, T.E.Smith and H.J.Levinstein. Sintered ohmic contacts to n and p type GaAs. *IEEE Trans.Electron.Devices*. 1975, **ED-22**, 218-223.

- [80] H.R.Grinfelds and G.Y.Robinson. Pd/Ge contacts to n-type GaAs. *Solid-State Electron*. 1980, **23**, 973-985.
- [81] V.L. Rideout. A review of the theory and technology for ohmic contacts to group III-V compound semiconductors. *Solid-State Electron*. 1975, **18**, 541-550.
- [82] K.K.Shih and J.M.Blum. Contact resistances of Au-Ge-Ni, Au-Zn and Al to III-V compound semiconductors. *Solid-State Electron*. 1972, **15**, 1177-1180.
- [83] Y.Nakano, S.Takahashi and Y.Toyoshima. Contact resistance dependence on InGaAsP layers lattice matched to InP. Japan. *J.Appl.Phys*. 1980, **19**, L495-L497.
- [84] H.Morkoc, T.J.Drummond, and C.M.Stanchak. Schottky barriers and ohmic contacts on n-type InP based compound semiconductors for microwave FETs. *IEEE, Trans.Electron. Devices* **ED-28**, 1981, 1-7.
- [85] H.H.Wieder, A.R.Clawson, D.I.Elder and D.A.Collins. Inversion mode insulated gate InGaAs field effect transistors. *IEEE Electron.Devices Lett*. 1981, **EDL-2**, 73-74.
- [86] C.A.Armiento, J.P.Donnely and S.H.Groves. p-n junction diodes in InP and InGaAsP fabricated by beryllium-ion implantation. *Appl.Phys.Lett*. 1979, **34**, 229-231.
- [87] Navid S. Fatemi, Victor G. Weizer, Electrical and metallurgical behavior of Au/Zn contacts to p-type indium phosphide [J], *J. Appl. Phys.*, 1995, **77**(10): 5241-5247.
- [88] 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 Mat. and Dev. IEEE Proc.*, 2000: 169-172.
- [89] R.Williams. Photoemission of electrons from silicon into silicon dioxide. *Phys.Rev*. 1965, **140**, 569-575.
- [90] V.J.Kapoor and R.A.Turi. Charge storage and distribution in the nitride layer of the metal-nitride-oxide-semiconductor structures. *J.Appl.Phys*. 1981, **52**, 311-319.
- [91] V.J.Kapoor and S.B.Bibyck. Energy distribution of electron trapping defects in thick-oxide MNOS structures. *The Physics of MOS Insulators*, Pergamon Press, New York, 1980, 117-121.
- [92] E.Harari and B.S.H.Royce. Trap structure of pyrolytic Al₂O₃ in MOS capacitors. *Appl. Phys. Lett*. 1973, **22**, 106-107.
- [93] G.W.Gobeli and F.G.Allen. Photoelectric threshold and work function. *Semiconductors and Semimetals*. Vol.2. Academic Press, New York, 1966, 263-280.
- [94] Carl W. Wilmsen. *Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces*. Plenum Press, New York and London, 1985, 165-206.
- [95] A.R.Clawson. Guide to references on III-V semiconductor chemical etching. *Material science*

- and engineering*, 2001, **31**, 1-438.
- [96] 田招兵, InP基短波红外InGaAs探测器及其物理研究, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所博士学位论文, 2008, 61-60.
- [97] Kefeng Zhang, Hengjing Tang, Xiaoli Wu, et al. Effects of an anodic oxide passivation layer on mesa-type InGaAs (PIN) photodetectors. *Semicond. Sci. Technol.* 2009, **24**, 015008(3pp).
- [98] R.L.Weihner and R.P.Ley. Optical properties of indium oxide. *J. Appl. Phys.* 1966, **37**, 299-302.
- [99] R.H.Bube. Photoconductivity of solids. Wiley, New York. 1960.
- [100] P.J.Harrop and D.S.Campbell. Selection of thin film capacitor dielectrics. *Thin Solid Films*, 1968, **2**, 273-292.
- [101] P.J.Harrop and D.S.Campbell. Handbook of Thin Film Technology (L.I.Maissel and R.Glang, eds.), McGraw-hill, New York, 1970.
- [102] J.F.Wager, C.W.Willmsen and L.L.Kazmerski. Estimation of the bandgap of InPO₄. *Appl. Phys. Lett.* 1983, **42**, 589-591.
- [103] J.F.Wager, K.M.Geib, C.W.Willmsen and L.L.Kazmerski. Native oxide formation and electrical instabilities at the insulator/InP interface. *J. Vac. Sci. Technol.* 1983, **B1**, 778-781.
- [104] 汤定元, 糜正瑜等, 光电器件概论, 上海:上海科学技术文献出版社, 1989.
- [105] 周书铨, 红外辐射测量基础, 上海交通大学出版社, 1991.
- [106] 陈新禹, 龚海梅, 章莲妹, 方家熊, 用傅立叶红外光谱仪测量器件响应光谱, 中国科学院上海技术物理研究所1958-1998四十年庆文集, 1998.
- [107] Ong V K S, Wu Dethau. Determination of diffusion length from within a confined region with the use of EBIC. *IEEE transactions on electron devices*, **48**(2):332-337.
- [108] Redfern D A, Thomal J A, Dell J M, etc al. Diffusion length measurements using laser beam induced current. *Conf on Optoelectron and Microelectron Mat and Dev IEEE Proc.* **2000**:463-466.
- [109] Paul.P.Webb, Gregory H.Olsen. Large-Area and visible response vpe InGaAs photodiodes. *IEEE Transctions on electron devices.* 1983, Vol.**ED-30**, 395-400.
- [110] Howard W.Yoon, Matt C.Dopkiss and Geroge P.Eppeldauer. Performance comparisons of InGaAs, extended InGaAs, and short-wave HgCdTe detectors between 1 μ m and 2.5 μ m. *Proc.SPIE*, 2006, **6297**, 629703-1-10.
- [111] Yongguang Zhang, Yi Gu, Zhaobing Tian, et al. Wavelength extended 2.4 μ m heterojunction InGaAs photodiodes with InAlAs cap and linearly graded buffer layers suitable for both front and back illuminations. *Infrared Physics and Technology*, 2008, **51**, 316-321.
- [112] 姚启钧, 光学教程, 第二版, 高等教育出版社, 1989, 10: 408~410.

- [113] Mary. J. Hewit, John L.Vampola, Steve H. Black and Carolyn J. Nielsen. Infrared readout electronics: a historical perspective. *Proc.SPIE*, 1994, Vol.**2226**, Infrared Readout Electronics.
- [114] Eric R.Fossum and Bedabrata.Pain, Infrared Readout Electronics for Space Sensors: State of the Art and Future Directors. *Proc. SPIE*, 1993, Vol.**2020**, Infrared Technology XIX.
- [115] Marc P.Hansen, Douglas S.Malchow. Overview of SWIR detectors, cameras and applications. *Proc. SPIE*, 2008, Vol.**6939**, 693901-1~ 693901-11.
- [116] Douglas S.Malchow, Robert M.Brubaker, Marc P.Hansen. Development of linear array ROIC for InGaAs detector arrays with wavelength response to 2.5 μm for NIR spectroscopy and machine vision. *Proc. SPIE*, Vol.6940, 2008, 69402V-1~ 69402V-11.
- [117] Howard W.Yoon, Matt C. Dopkiss, and George P.Eppeldauer, "Performance Comparisons of InGaAs, Extended InGaAs and Short-wave HgCdTe Detectors between 1 μm and 2.5 μm ", *Proc. SPIE*, 2006, Vol.**6297**, 6297031-10.
- [118] Joseph Boisvert, Takahiro Isshiki, Rengarajian Sudharsanan, et al, "Performance of Very Low Dark Current SWIR PIN Arrays", *Proc. SPIE*, 2008, Vol.**6940**, 69400L-1.

攻读博士学位期间发表的论文

1. **Zhang Kefeng**, Tang Hengjing, Wu Xiaoli, Zhang Yonggang, Li Xue, Gong Haimei. Effect of thin oxide film passivation layer on mesa type InGaAs (PIN) photodetectors. *Semiconductor Science and Technology*, **24** (2009) 015008.
2. **ZHANG Kefeng**, TANG Hengjing, WU Xiaoli, LI Xue, ZHANG Yonggang, GONG Haimei. Performance analysis of 256 element linear 2.4 μ m InGaAs photovoltaic detector arrays [J], *Proc. SPIE*, 2007, **6835**: 683506-1.
3. **ZHANG Kefeng**, TANG Hengjing, WU Xiaoli, XU Jintong, LI Xue, GONG Haimei. Improved Au/Zn/Au Ohmic contacts for p-type InP [J]. *Proc. SPIE*, 2007, **6621**: 662117.
4. **张可锋**, 唐恒敬, 李永富, 李淘, 龚海梅等, InGaAs 探测器性能与结面积和周长的关系研究, *光电子.激光* (已接收) .
5. **张可锋**, 唐恒敬, 李永富, 李淘, 龚海梅等, InGaAs 台面探测器的 AlN 钝化研究, *红外与激光工程* (已接受, 2009 年 6 月第 38 卷 3 期) .
6. **张可锋**, 吴小利, 唐恒敬, 龚海梅等. LBIC 技术研究平面结与台面结 InGaAs 探测器, *红外与激光工程*, 2007, Vol. 36: 23-27.
7. **张可锋**, 吴小利, 唐恒敬, 龚海梅等, 利用 LBIC 技术对 InGaAs 平面结器件结区特性的研究, *激光与红外*, 2007, Vol. 37: 947-950.
8. **张可锋**, 唐恒敬, 李永富, 李淘, 龚海梅等, 不同结构的高 In 组分 InGaAs 探测器性能研究 (已投稿) .
9. 唐恒敬, **张可锋**, 吴小利, 王妮丽, 陈新禹, 李雪, 龚海梅, SiN_x 钝化 256 元 InGaAs 短波红外焦平面研究[J], *红外与激光工程*, 2008, **37**(3): 424-427.
10. 吴小利, **张可锋**, 唐恒敬, 李雪, 龚海梅, 平面型铟镓砷探测器八元线列的制备及表征[J], *红外与激光工程*, 2008, **37**(3): 436-439.
11. 吴小利, 王妮丽, **张可锋**, 唐恒敬, 黄翌敏, 韩冰, 李雪, 龚海梅, p⁺-InP/n-InGaAs/n-InP 双异质结结构的微波反射光电导衰减法表征及机理分析[J], *半导体学报*, 2007, **11**(28): 1769-1772.
12. H. J. TANG, X. L.WU, **K. F. ZHANG**, Y. F. LI, J. H. NING, Y. WANG , X. LI and H. M. GONG, The defect density of a SiN_x/In_{0.53}Ga_{0.47}As interface passivated using (NH₄)₂S_x [J]. *Applied Physics A*, 2008, **91**: 651-655.
13. Tang Hengjing, Wu Xiaoli, **Zhang Kefeng**, Ye Liping, Wang Nili, Li Xue, Gong Haimei, High

- uniformity InGaAs linear mesa-type SWIR focal plane arrays [J], *Proc. SPIE*, 2007, **6835**: 683516-1.
14. H. J. Tang, X. L. Wu, Q. F. Xu, H. Y. Liu, **K. F. Zhang**, Y. Wang, X. R. He, X. Li, and H. M. Gong, Effect of sulfur passivation on the InP surface prior to plasma-enhanced chemical vapor deposition of SiN_x [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2008, **23**: 035031.
 15. 唐恒敬, 吴小利, **张可锋**, 汪洋, 贺香荣, 李雪, 龚海梅, InGaAs 线列探测器的 I-V 特性研究[J], *红外与激光工程*, 2008, 37(4): 598-601.
 16. 唐恒敬, 吕衍秋, 吴小利, **张可锋**, 徐勤飞, 李雪, 龚海梅, 正、背照 InGaAs 探测器的性能对比研究[J], *红外与激光工程*, 2007, **36**: 198-201.
 17. 唐恒敬, 吕衍秋, **张可锋**, 吴小利, 韩冰, 徐勤飞, 刘洪洋, 李雪, 龚海梅, 空间遥感用 InGaAs 短波红外探测器[J], *激光与光电子学进展*, 2007, 5: 42-49.
 18. Yanqiu Lv, Hengjing Tang, Bing Han, Xiaoli Wu, **Kefeng Zhang**, Xue Li, Haimei Gong. Properties of Au/Pt/Ti contact to p-InP by rapid thermal processing [J]. *Proc. SPIE*, 2007, **6835**: 68350D-1.

申请专利

1. **张可锋**, 唐恒敬, 吴小利, 徐国庆, 李雪, 龚海梅. 铟镓砷台面列阵探测器芯片的台面钝化膜及制备方法, 申请号: 200710171389.6 (发明专利)
2. 唐恒敬, **张可锋**, 吴小利, 朱慧, 李永富, 宁锦华, 李淘, 汪洋, 李雪, 龚海梅, 背照射铟镓砷微台面探测器芯片及制备工艺, 申请号: 200710173512.8 (发明专利)
3. 唐恒敬, 吴小利, **张可锋**, 汪洋, 刘向阳, 李永富, 吴家荣, 李雪, 龚海梅, InGaAs 低台面线列或面阵红外探测器芯片, 申请号: 200710047624.9 (发明专利)
4. 吴小利, 唐恒敬, **张可锋**, 李雪, 龚海梅. 平面型铟镓砷线列红外焦平面探测器, 申请号: 200710170717.0 (发明专利)
5. 吕衍秋, 韩冰, 唐恒敬, 任仁, 吴小利, 乔辉, **张可锋**, 李雪, 龚海梅, 硫化铟钝化铟镓砷线列探测器的制备工艺, 申请号: 200610118770.1 (发明专利)

致 谢

首先我要衷心感谢我的导师龚海梅研究员，本论文是在龚老师的悉心指导下完成的。感谢龚老师对我的关心，谆谆教导和精心培养，从龚老师那儿，我不仅学到了专业知识，培养了科研能力，还学到了对事业认真、执着追求的精神。龚老师严谨的治学态度和渊博的科学知识使我受益匪浅，我取得的每一点成绩都得益于龚老师的悉心指导，在此再次表示诚挚的感谢！龚老师是我学习的楷模！

感谢方家熊院士、李言谨研究员、李向阳研究员、李雪博士和中国科学院上海微系统与信息技术研究所张永刚研究员，对我的教诲和耐心指导，几位老师拥有渊博的知识、严谨的治学态度和敏锐的洞察力，与他们的每一次谈话都使我受益匪浅！

特别感谢朱龙源研究员和陈新禹研究员，在学习和生活上对我的帮助和指导！感谢实验室中给予我帮助和支持的各位老师：刘大福博士、范广宇高工、邵秀梅博士、张海燕、洪斯敏、吴家荣、于月华、张燕、叶丽萍、章莲妹、邱惠国、王继元、林杏潮、陈安森老师，以及材器中心的胡晓宁研究员、王建新、廖清君、马卫平、方维正老师，和硅器件室的翟厚明、施永明老师。十分感谢王妮丽、汪洋、乔辉、刘诗嘉、徐国庆、储开慧、刘向阳、汤亦聃、贾嘉、蔡子健、蓝天翼、赵水平、曾智江、贺香荣、俞君、孔令才、龚玮、姜佩路、蒋科、杨晓阳、陈玉等在实验和测试方面给予的帮助。还要感谢段竹莹在工作中的支持，以及与中科院上海微系统与信息技术研究所田招兵同学的有益讨论。

非常感谢与我一起生活和学习的诸位同学的帮助，他们是：吕衍秋、许金通、白云、陈亮、吴小利、唐恒敬、徐勤飞、韩冰、苏志国、任仁、黄翌敏、陈俊、朱慧、李尧桥、胡其新、谭俊、王玲、李淘、李永富、张文静、包西昌、宁锦华、张燕、黄松垒、黄张成、张伟、李超、朱耀明等，他们给了我很多无私的帮助。

感谢研究生部各位老师在学习和生活方面的关心和教育。

最后感谢我的父母和妻子，他们的爱是我的精神支柱，他们的支持和鼓励是我人生路上不断前进的动力。

张可锋

2009年5月1日于上海