

密级: 公 开

中国科学院研究生院

博士学位论文

高密度单片长线列 InGaAs 焦平面探测器研究

作者姓名: 朱耀明

指导教师: 龚海梅 研究员 中科院上海技术物理研究所

李 雪 研究员 中科院上海技术物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 微电子学与固体电子学

培养单位: 中国科学院上海技术物理研究所

2012 年 5 月

学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：

朱耀明

2012年6月5日

学位论文使用授权说明

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

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

论文作者签名：

朱耀明

2012年6月5日

指导教师签名：

Eugen

2012年06月05日

Study on high density monolithic long linear InGaAs
detector focal plane arrays

By

Zhu Yaoming

A Dissertation Submitted to

Graduate University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Doctor of Science

Shanghai institute of technical physics,

Chinese Academy of Sciences

May, 2012

致谢

在技物所呆了快四年了，这里留下了我许多美好的回忆。这些回忆中众多的老师、同学、朋友，将铭记于我的一生。

首先，要衷心感谢我的导师龚海梅研究员，这些年来给予我的鼓励和教诲。从刚进所时的毛头小子到如今即将毕业，龚老师务实严谨的工作态度、宽容豁达的生活作风一直感染着我，不仅让我学会了如何去学习，也让我懂得了如何去做人、如何去生活。同时要衷心感谢的还有我的二导李雪研究员，在科研活动上李老师是言传身教、孜孜不倦，在生活上更是像朋友一样的关怀，深深地感谢李老师对我的支持和帮助。

感谢研究室方家熊院士、李言谨老师，兄弟研究室的李向阳老师，微系统所的张永刚老师对我的支持和帮助。他们严谨的治学态度、渊博的学识，都一直感染和激励着我在科研的道路上前行。在这些年的学习过程中，感谢实验室多年来给予我帮助各位老师和师兄师姐：邵秀梅、刘大福、范广宇、张海燕、洪斯敏、朱龙源、叶丽萍、贾嘉、许金通、马伟平、王建新、廖清君、汪洋、陈郁、徐勤飞、曾智江、王妮丽、刘诗嘉、乔辉、刘向阳、赵水平、兰添翼、储开慧、汤亦聃、蔡子健、姜佩璐、翟厚明、施永明、张在实等，以及工程九室危峻、李建伟，物理室李天信老师也在测试方面给予大量的帮助。

感谢与我一起生活和学习的同学和朋友们：唐恒敬、张可锋、李永富、李淘、包西昌、王玲、张文静、张伟、黄张成、黄松垒、李超、宁锦华、徐勤飞、王荣阳、王韡、张燕、曹岚、邓洪海、魏鹏、许中华、马学亮、夏王、刘福浩、叶柏松、刘飞、杨波、朱宪亮、王云姬、石铭、黄星等等。

感谢研究生部的诸位老师在学习、生活上给予的关心和帮助。

最后，我要深深感谢我的父母和兄弟，感谢他们无私的关爱和默默的支持，让我在人生的道路上不断前行。谨以此文献给默默关心和支持我的家人和朋友们。

朱耀明

2012年5月23日于上海

摘要

空间遥感领域中, III-V 族的短波红外 InGaAs 探测器以其工作温度高、探测性能优良、稳定性好以及抗辐照等特点, 具有广阔的应用前景。基于 InGaAs 探测器发展趋势和国家对于空间遥感用 InGaAs 探测器的迫切需求, 本论文为进一步提高短波红外 InGaAs 焦平面探测器性能, 重点研究了探测器的关键参数暗电流, 分析了台面型 InGaAs 探测器暗电流成分; 研究了 ICP 刻蚀台面成型技术的损伤机理并探索了可行的低损伤刻蚀工艺; 获得了高密度长线列 InGaAs 探测器关键工艺的改进方法, 实现了高密度高性能 1024×1 元交错排列及 800×1 元一字型排列线列焦平面探测器。

利用台面型 InGaAs 探测器暗电流成分具有各自不同的温度、电压特性, 从探测器的电流-电压特性进行反演, 计算出了各主要电流成分, 明确了台面型 InGaAs 探测器暗电流的主要来源, 为降低台面型探测器暗电流提供了理论依据。对于 InP 帽层的常规台面型工艺制备的 InGaAs 探测器, 其暗电流以表面复合电流和分路电流为主, 主要来源于吸收层的界面处和台面的侧表面; 而采用宽禁带的 InAlAs 作为帽层的 InGaAs 探测器, 其漏电引起的分路电流得到了有效的抑制。设计并制备了台面型 InGaAs 探测器测试结构, 分析了探测器暗电流与光敏元周长面积比的关系, 结果表明来自台面侧表面的电流密度约为 $8.86 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2$, 载流子的扩散长度约为 $5.6 \mu\text{m}$, 当空穴的扩散系数取为 $7.5 \text{cm}^2/\text{s}$ 时, 台面侧表面的少数寿命仅为 41.8ns 。

抑制和消除台面成型过程所引入的损伤是降低探测器暗电流的有效途径。本文采用了热处理的方法释放刻蚀损伤引入的应力、并消除刻蚀表面的电荷堆积; 去除表面氧化层后室温硫化的方法, 能更有效地消除刻蚀表面的断键, 降低探测器暗电流; 采用了先退火后钝化的工艺流程, 避免了电极退火过程中对钝化膜的影响, 能够提高探测器制备的成品率。但是在目前工艺基础下, 由于延伸波长台面型探测器材料较高的位错密度, 该方法对其不适用。

本文采用 ICP 刻蚀技术进一步优化 InGaAs 成结过程的低损伤刻蚀参数。采用 Raman 光谱技术和 X 射线衍射(XRD)技术, 研究了常规 Cl_2/N_2 气氛刻蚀 InGaAs 的主要损伤机制, 确定了是以晶格缺陷损伤为主的; 采用微波反射光电导衰退的方法表征了不同处理工艺下表面的缺陷损伤, 刻蚀表面湿法腐蚀和硫化的方法都

一定程度的减小了表面的缺陷损伤和断键，但是深层次的缺陷仍不能避免。采用正交设计试验方法研究了 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛刻蚀 InGaAs 材料低损伤工艺新方法，获得了优化的工艺条件：温度为 60°C 、ICP 功率为 600W、RF 功率为 45W、压强 2mT 的刻蚀条件下，刻蚀的表面平滑、离子轰击损伤较小。该工艺方法已应用于器件的研制中。

研究了高密度、小光敏元长线列 InGaAs 探测器制备方法和串音抑制技术。通过光刻工艺参数的改进、以及 RIE-ICP 结合的方法，获得了光敏元最小间距为 $2\mu\text{m}$ 、占空比优于 90%的精确台面定义工艺规范。通过小光点测试系统，研究了线列探测器相邻像元和垂直方向对光敏元串音的影响，确定了电子横向扩散是引起的电串音的主要原因，为抑制串音的台面型探测器新结构的提出提供了实验依据。实现了背照射、中心距为 $15\mu\text{m}$ 、光敏元交错排列的 1024×1 元线列探测器，以及背照射、中心距为 $25\mu\text{m}$ 、光敏元一字型排列的 800×1 元线列探测器，与读出电路直接互连的焦平面探测器响应非均匀性约为 4.3%，平均峰值探测率达到了 $6.4\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。采用平行光管测量系统测量了带红外镜头的焦平面探测器的调制传递函数 MTF 达到了 0.4,推算 InGaAs 焦平面探测器的 MTF 约为 0.5。

空间应用中 InGaAs 探测器可能会受到强太阳光直接辐照，研究了太阳光直接辐照对探测器性能的影响。研究结果表明，强太阳光直接辐照下探测器实时响应信号随时间增加而减小，辐照后探测器的暗电流暂时性增大，但经过一定时间后可以恢复，响应光谱基本没有变化。

关键词：短波红外；InGaAs；暗电流；ICP 刻蚀；长线列焦平面；太阳光辐照

ABSTRACT

With the advantages of high operation temperature, high detectivity, good stability and radiation resistance characteristics, the short wavelength InGaAs detectors of III-V family have wide application foreground in the space remote sensing area. Based on the development tendency and the instancy demand of our country for InGaAs detectors used in the space remote sensing area, the dark current as the key parameter of detector was investigated and the current components of mesa InGaAs detector were analyzed in this paper. The damage mechanism of ICP etching for mesa was investigated and feasible etching technics with low damage was researched. The linear FPA of interlaced parity files 1024×1 and single file 800×1 were fabricated based on the breakthrough of the key technics for the fabrication of high density linear InGaAs detector array.

The main components of dark current were calculated using the different temperature and bias voltage characteristics of each current components of mesa InGaAs detector. And the main sources of the excess current in mesa InGaAs detector was found out by inverting from the current-voltage characteristics. For the InGaAs detectors with InP cap layer fabricated by general mesa technics and process, the dark current mainly consists of shunt current and surface recombination current, which come from the interface of absorbing layer and the side surface of the mesa. While for the ones with InAlAs cap layer, the shunt current resulted from leakage is restrained effectively. The new test structure of mesa InGaAs detectors was designed and fabricated. The current density of side surface and the diffusion length of minority carrier were calculated through analyzing the relationship between the currents of mesa InGaAs detectors with different sizes of photosensitive area. The current density of side surface is about $8.86 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, and the minority diffusion length is about $5.6 \mu\text{m}$. When the diffusion coefficient of hole is $7.5 \text{ cm}^2/\text{s}$, the minority lifetime in the side surface is about 41.8 ns .

The dark current could be decreased effectively by the restraining and removing of damages in the forming of mesa. The method of heat treatment was used to release the stress caused by etching, and eliminate accumulated charge in the etch surface. In addition, the method of sulfur treatment after oxidation layer removing at room temperature was used to eliminate the broken bonds in the etch surface. The process with passivating after the thermal annealing was employed to avoid the degradation of passivation film when the electrode was annealing, and to improve the yield of detector preparation. But this kind of method is not available for the extended wavelength mesa detectors for the high dislocation density.

The ICP etching technology was further optimized for low damage etching parameters of the forming of InGaAs mesa. The main damage mechanism of InGaAs etching with Cl_2/N_2 mixture was investigated using Raman spectroscopy and X-ray diffraction (XRD) technology. The results indicated that lattice defects are the main damages. The surface damage of different treatment process was characterised by the method of microwave photoconductivity decay measurement. The results indicated that the surface defects and broken bonds of etching damage are decreased to a certain

extent by wet etching and surface sulfur treatment, but deep defects still cannot be avoided. The method of orthogonal experimental design was used to study the etching technology of $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ mixture for InGaAs material, and the results indicated that in the condition of 60°C , ICP power to 600W, RF power to 45W and 2mT chamber pressure, smooth surface and less damage caused by ion bombardment could be obtained. This technology had been used to fabricate devices already.

The fabrication technology of long linear detector arrays with high density, small pixel and the method of restraining cross talk were investigated. The precise mesa definition of 2 micrometer spacing and the duty ratio which is better than 90% were achieved through the improvement of lithography technological parameter and the combination of RIE-ICP methods. The influence of crosstalk between neighbouring pixels and along the vertical direction was investigated through the tiny dots test system. Using this system, the cross talk of conserved absorber in the vertical direction was investigated. The results indicated that the electronic cross talk caused by lateral diffusion is the main source for the crosstalk. It's experimental base for restraining the cross talk through new mesa detector structure. Back illuminated interlaced parity files 1024×1 linear InGaAs detector arrays with $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ pixel and back illuminated high density single file 800×1 long linear InGaAs detector arrays with $25\mu\text{m} \times 23\mu\text{m}$ pixel size and $2\mu\text{m}$ spacing, whose duty ratio better than 90%, were developed. The detector array was bonded to readout circuit indirectly. The response nonuniformity and average detectivity of the FPA reach to 4.3% and $6.4 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ respectively. In addition, the modulation transfer function of the FPA with infrared lens was measured to 0.4 by the system of collimator tube, and the MTF of detector array was estimated to 0.5.

InGaAs detector could be affected by strong sunlight direct irradiation in space application. The mechanism of the sunlight direct irradiation on InGaAs detector performance was investigated. When the sunlight irradiated directly on the detector, the real time signal decreased with irradiation time and the dark current of the detector increased temporarily. The spectral response characteristic of detector was nearly not affected.

Keywords: shortwave infrared, InGaAs, dark current, ICP etching, long linear FPA, sunlight irradiation

目 录

致谢	I
摘要	III
ABSTRACT	V
1 引言	1
1.1 红外辐射和大气窗口	1
1.2 红外探测器的应用	2
1.3 红外探测器原理及分类	3
1.3.1 红外探测器原理	3
1.3.2 红外探测器的种类	3
1.4 短波红外及 InGaAs 探测器	4
1.4.1 InGaAs 材料特性	6
1.4.2 InGaAs 探测器研究热点	8
1.5 InGaAs 焦平面探测器发展现状	11
1.5.1 国外发展现状	11
1.5.2 国内研究状况	17
1.6 InGaAs 焦平面探测器发展趋势	17
1.7 本论文的研究目的和主要内容	18
2 台面型 InGaAs 探测器暗电流研究	20
2.1 引言	20
2.2 暗电流模型	21
2.2.1 扩散电流	22
2.2.2 产生复合电流	22
2.2.3 界面复合电流	23
2.2.4 表面复合电流	24
2.2.5 分路电流	24
2.2.6 隧穿电流	25
2.3 台面型 InGaAs 探测器暗电流分析	26
2.3.1 台面型 InGaAs 探测器制备	26
2.3.2 台面型 InGaAs 探测器 I-V 特性	27
2.3.3 InP 帽层的台面型 InGaAs 探测器暗电流成分	29
2.3.3.1 探测器隧穿电流与界面电流	29
2.3.3.2 探测器分路电流	30
2.3.3.3 探测器产生复合电流	32
2.3.3.4 探测器表面复合电流	33
2.3.3.5 探测器扩散电流	34

2.3.4 InAlAs 帽层的台面型 InGaAs 探测器暗电流成分	36
2.3.5 台面型 InGaAs 探测器侧面电流密度和少子寿命	41
2.4 本章小结	43
3 基于暗电流的台面型 InGaAs 探测器器件工艺优化	44
3.1 引言	44
3.2 热处理方法对暗电流的影响	44
3.2.1 探测器制备	45
3.2.2 测量结果和分析	45
3.3 室温硫化对暗电流的影响	47
3.4 提高成品率的台面型 InGaAs 探测器工艺改进	49
3.5 本章小结	52
4 基于 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛 ICP 刻蚀技术研究	54
4.1 引言	54
4.2 ICP 刻蚀原理	55
4.3 基于 Cl_2/N_2 气氛 ICP 刻蚀损伤机制研究	56
4.3.1 Raman 光谱分析	57
4.3.2 X 射线衍射分析	58
4.3.3 刻蚀损伤的表征	59
4.4 基于 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛 ICP 刻蚀技术	62
4.5 本章小结	69
5 高密度单片长线列 InGaAs 探测器研究	70
5.1 引言	70
5.2 小光敏元、高密度结构设计 with 关键工艺	71
5.3 小光敏元、高密度线列探测器制备	73
5.4 2 微米间隔 800×1 焦平面探测器的 MTF	76
5.5 本章小结	80
6 短波红外 InGaAs 探测器太阳光辐照的初步研究	81
6.1 引言	81
6.2 实验	82
6.2.1 探测器制备	82
6.2.2 太阳光辐照实验	83
6.3 结果分析	84
6.3.1 太阳光辐照下探测器的实时信号	85
6.3.2 太阳光辐照前后探测器性能的变化	86
6.4 本章小结	87
7 全文总结与展望	88
7.1 全文总结	88
7.2 展望	89
参考文献	91

目 录

作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果.....	101
----------------------------	-----

1 引言

1.1 红外辐射和大气窗口

红外辐射是介于可见光和微波之间的一种电磁波，波长在 $0.78\sim 1000\mu\text{m}$ 之间，是一种人眼看不见的辐射，俗称红外线。当一个物体温度高于 0K 时，它就会自发的向外发出电磁辐射，而在常温下物体的自发辐射主要是红外辐射。根据不同的波长，红外波段一般被分为 4 个区域：近红外波段 $0.78\sim 3\mu\text{m}$ ，中红外波段 $3\sim 6\mu\text{m}$ ，中远红外波段 $6\sim 20\mu\text{m}$ ，远红外波段 $20\sim 1000\mu\text{m}$ 。

红外辐射在大气中传输的过程中会产生吸收和散射等现象，并在传输过程中逐渐衰减。传输过程中红外辐射能量的衰减，主要是由于水蒸气、二氧化碳、臭氧以及一些液体或者固态的悬浮物，如灰尘、烟雾、云、雨、雪等，它们对红外线有强烈的散射和吸收，导致了红外辐射传输的衰减。而大气中的 N_2 、 O_2 、 H_2 、 Ar_2 等对称的双原子分子，红外辐射在传输过程中不会引起这些分子电荷的振荡，不会造成红外辐射能量的衰减^[1]。

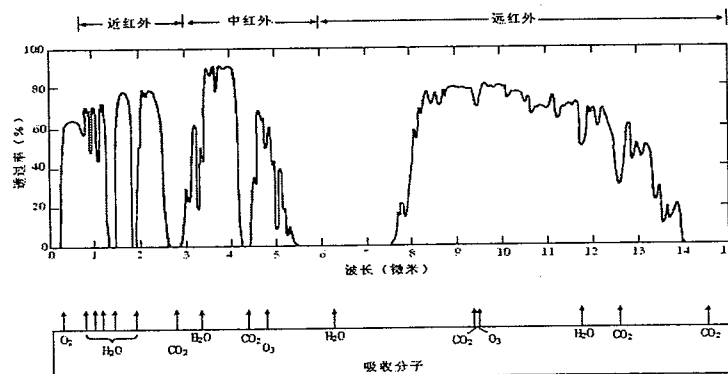


图 1.1.1 海平面大气对红外光的透射

Fig.1.1.1 Atmospheric transmission on sea level

图 1.1.1 给出了太阳光在海平面大气中通过 1 海里路径的透过光谱合成曲线，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^[2]。大气传输过程中只有在吸收较弱的区域，红外辐射才能透过大气向远方传播，红外辐射在通过大气后被分割成几个波段区域，这些高透过区域被称之为大气窗口。常见的红外波段大气窗口有： $0.95\sim 1.05\mu\text{m}$ 、 $1.15\sim 1.35\mu\text{m}$ 、 $1.5\sim 1.8\mu\text{m}$ 、 $2.1\sim 2.4\mu\text{m}$ 、 $3.3\sim 4.2\mu\text{m}$ 、 $4.5\sim 5.1\mu\text{m}$ 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。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，这三个大气窗口对于从事红外光谱研究、红外技术应用尤为重要。

1.2 红外探测器的应用

红外波段包含极其丰富的信息,获取这些信息可以极大程度地造福人类,尤其是三个大气窗口波段中,能够提供很多有用的重要信息^[3]。而获取这些重要信息,便要依赖于各种各样的红外探测器。红外探测有以下一些优点:

①适应性好,环境适应性要优于可见光,尤其是在夜间和恶劣气候环境下;

②隐蔽性好,红外探测一般多为被动接受目标辐射的信号,比雷达和激光探测安全且保密性强,不易被干扰;

③识别伪装能力强,可以对目标和背景之间的温差和辐射功率差形成的红外辐射特性进行探测,因此识别伪装目标的能力优于可见光;

④与雷达系统相比,红外探测系统体积小、重量轻、功耗低,探测器响应光谱范围覆盖短波和长波,应用范围广。

基于以上优点,红外探测器在军事应用方面具有着重要地位和巨大潜力,并推动着红外探测技术快速前进^[4]。它们主要用在红外成像、红外制导与对抗、夜视等技术上^[5],在现代和未来战争中有着重要的战略意义^[6,7]。

在民用方面红外探测器也有着广泛的应用,包括工业、农业、医疗卫生以及环境等领域。在工业领域中,主要是利用红外探测器进行测温、无损探伤以及过程监控。在农业领域中,主要是利用红外探测器防治病虫害,预报灾情,农业估产等。在医疗卫生领域中,红外探测器还可用于临床诊断等。随着红外探测光谱技术的发展,利用红外波段的特征吸收谱线,红外探测器在环境监控和污染控制方面也有着大量的应用。

红外探测器另外一个有着广阔前景的领域就是遥感领域,在对地观测、环境监测、军事和海洋监控以及天文研究中有着重要应用。红外探测器具有很多优势,相比于可见光探测器,受白昼和天气影响较小可实现低背景探测,尤其是在短波红外波段(1-3 μm),可利用反射的太阳辐射获取分辨率较高的遥感图像,且受限于天气情况较小。因此,红外空间遥感技术成为了气象检测无可替代的手段,被广泛应用于气象预测、云图摄制、气温、大气流动、火灾防护等场合;并且也广泛应用于农业估产、病虫害防治和矿藏分布、地热及火山活动、水文等方面。此外,在宇宙天文、大气污染监控和军事领域中,红外空间遥感也有着重要的应用。

因此,空间遥感用红外探测器的研究也成为热点。随着科技的不断发展,

各种结构新颖且性能优良的红外探测器也相继问世，器件性能也在逐步提高，如更高的灵敏度，更高的工作温度，更低的噪声，更宽的波长覆盖范围等^[8-11]。

1.3 红外探测器原理及分类

1.3.1 红外探测器原理

将红外辐射信号转化为可测量信号的器件称为红外探测器，是红外技术的核心。一般，只要红外辐射引起的效应产生的信号可测量以及有足够灵敏度，均可以用来作为红外探测一种方式。红外探测器主要利用红外辐射的热效应和光电效应，输出的都是电信号。探测器包括探测芯片、连接电路、密封管壳和红外辐射透过窗口，有一些探测器还包含制冷部件、光学部件和外部电子部件等等。

近一二十年，红外探测器已从单元发展到多元、多元发展到长线列和大规模面阵，实现了线列扫描成像和面阵凝视成像，同时也从单波段探测发展到了多波段探测。

1.3.2 红外探测器的种类

从原理上分，红外探测器一般分为热探测器和光子探测器两大类。

热探测器是利用固体或气体介质对温度敏感的特性，并通过敏感元件的某种电参数与温度的关系，将介质温度的变化转变成容易测量的电信号，以此来探测红外辐射的。常见的热探测器有下面几个类型：气动探测器、温差电偶和温差电堆、测辐射热计、热释电探测器等。气动探测器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，温差电偶利用温差电效应，热释电探测器利用自发极化随温度升降而发生变化。热探测器属于无选择性探测器，对不同波长的单位入射功率，有相同的输出信号，但其响应光谱仍受窗口材料限制。热探测器不需要制冷，但其响应速度慢、探测器能力低。

光子探测器则是利用光所激发的载流子所引起的光生电动势大小，或材料电导率的变化值，或者是吸收入射光子的物质表面发射的电子数来测定被吸收的红外辐射的。光子探测器属于选择性探测器，探测器能够探测的红外辐射波长有一定的阈值，而且不同材料的探测器阈值不同，这个阈值称为长波限。当入射辐射波长大于长波限时，探测器无法响应。因此，光子探测器的光谱响应不及热探测器宽，但有较高的灵敏度和较快的响应时间，并且噪声低。常见光子探测器有以下类型：光电导探测器、光伏型探测器及量子结构探测器等。这其中光电导探测

器可以分为本征光电导探测器、非本征光电导探测器和自由载流子光电导探测器；光伏型探测器根据形成 pn 结方式和材料结构特点的不同又可以分为 PIN 型光伏探测器、Schottky 光伏探测器、APD 光伏探测器、MSM 结构探测器、RCE 结构探测器等；而量子结构探测器主要可以分为量子阱探测器和量子点探测器两大类。

表 1.3.1 常见红外探测器种类及其特点^[3]

Table.1.3.1 Classification and characteristic of ordinary infrared detectors

红外探测器种类				工作原理	优点	缺点
热探测器	气动探测器			受热膨胀	简单轻便，成本低，可室温工作	无选择性 探测率较低 响应速度较慢
	热电偶、热电堆			温差电效应		
	测辐射热计			电阻温度特性		
	热释电			热释电效应		
光子探测器	光电导探测器	本征光电导探测器	IV-VI 化合物材料	基于带间跃迁吸收光电导效应	禁带宽度窄	机械特性差 介电常数大，结电容大
			II-VI 化合物材料		应用波长范围宽 技术比较成熟	缺陷密度高 成本较高
			III-V 化合物材料		材料性能优良 技术比较成熟	需要合适衬底
		非本征光电导探测器		重掺杂杂质能级跃迁，主要应用于长波，响应波长范围宽	成本低，工艺简单，可量产，易于调节响应波长	吸收系数低，需低温工作 量子效率较低
	光伏探测器	PIN、Schottky、APD、MSM、RCE		光生载流子产生光电压	高灵敏度和响应率，噪声小，功耗低	薄膜材料生长要求较高 ^[12-15]
	量子结构探测器	量子阱探测器		半导体材料相间排列形成具有量子局限效应的势阱，子带间跃迁	波长大幅可调，技术比较成熟，容易实现多色探测	需特殊的光耦合方式 量子阱中基态电子浓度受掺杂限制 量子效率不高 ^[16,17]
		量子点探测器		维度很小的量子点内部电子受到局限，产生不连续电子能级，子带间跃迁	较小暗电流，较大增益，较高的工作温度	量子点尺寸、密度和均匀性的控制比较困难 ^[18]

1.4 短波红外及 InGaAs 探测器

短波红外是指 1~3 μm 波段的红外辐射。在该波段中，很多物质具有独特的光谱特性，如岩石、矿物中含有的氢氧根^[19]，农作物中的水，空气中的水蒸气、

CO_2 , NH_3 , H_2S , N_2O 等^[20]。而且许多高温物体如飞机和火箭的发动机喷口, 导弹尾焰等红外辐射能量也集中在这个波段。另外, 夜天光的大部分能量也集中在这个波段, 特别是在晴朗星空的夜间, 远远超过可见光的亮度, 因此短波红外探测及短波红外成像技术在空间对地探测、资源分布、土壤水分监测、大气成分分析、农作物估产, 以及医学成像、工业多光谱成像分析、安全防范、军事监视、红外预警和夜视成像等众多重要的民用和军事领域有着广阔的应用前景。

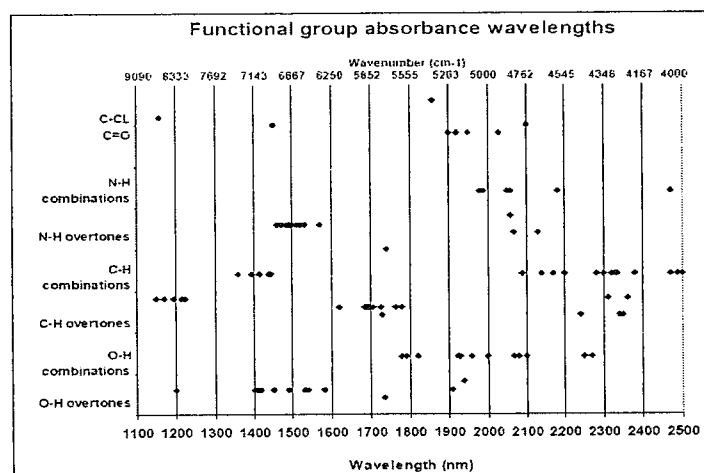


图1.4.1 O-H、C-H、C-O、C=O和N-H等功能键在短波红外波段的吸收

Fig 1.4.1 The main SWIR absorbance wavelengths of the diatomic functional groups of O-H, C-H, C-O, C=O, and N-H

图 1.4.2^[21]给出了各个波段不同材料的响应情况, 可用于 $1\text{-}3\mu\text{m}$ 波段的红外探测材料主要包括 HgCdTe 、 InSb 、 InAs 、 PbS 以及 InGaAs 等材料。 InSb 和 InAs 都是窄禁带半导体, 探测器性能稳定, 室温条件下探测率较低。相比而言, HgCdTe 材料具有许多可贵的性质, 电子有效质量小而本征载流子浓度低, 探测器噪声低、探测率高; 介电常数小, 探测器频率响应高; 电子迁移率高, 载流子寿命长; 本征跃迁, 吸收系数大, 量子效率高; 表面生长的氧化物化学稳定等等^[22]。但是, HgCdTe 材料也有一些方面的局限性^[23], HgCdTe 材料具有较高的本征缺陷密度且在较高温度或辐射作用下性能不稳定; 为了精确控制材料的响应截止波长, 需要精确的控制 HgCdTe 的组分, 在阵列探测器制备需求下还要求整个晶片有较高的均匀性, 这大大增加了材料生长的难度; HgCdTe 材料本身存在着严重的隧道效应, 为了使其能够进行很低背景的红外探测, 必须工作在低温致冷条件下, 以抑制热噪声的影响, 因而在应用方面受到诸多限制。

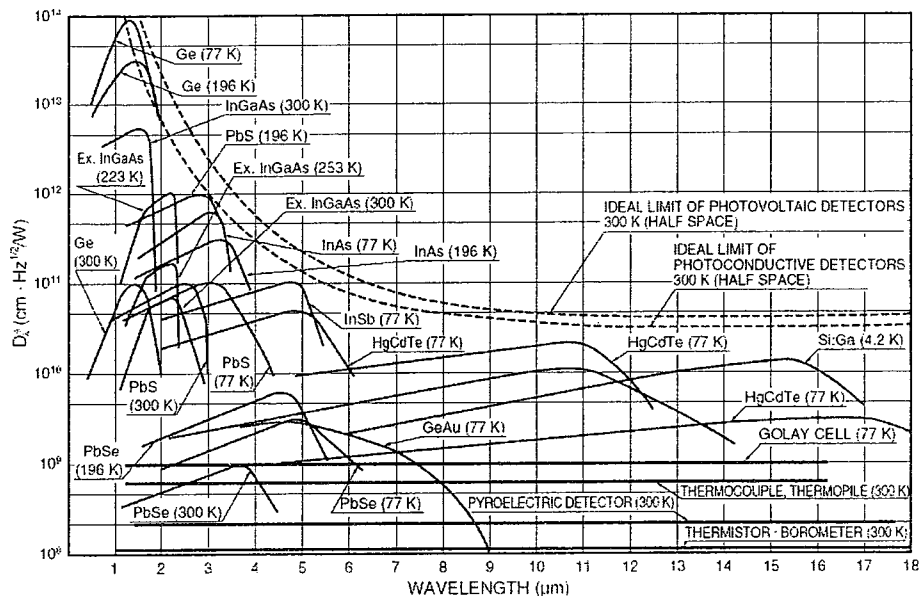


图 1.4.2 各种材料探测器的探测特性

Fig1.4.2 Detectivity characteristics for detectors of various materials

HgCdTe、InSb 和 InAs 等材料具有各自的特点，但其制备的探测器一般都需要较高程度的致冷才能达到较高的探测率。而应用致冷器都会有一个明显的缺点，那就是制冷器有一定的重量和体积，也增加了整个系统装配的复杂性，以及一些难以解决的问题，例如玷污、振动、可靠性和寿命等问题，同时也增加整个红外系统的功耗等，在航天遥感等应用方面受到约束。

与这些材料制备的探测器相比，与 InP 晶格匹配外延生长的 InGaAs 材料，由其制备的探测器量子效率高、灵敏度高，在短波波段不同温度下，InGaAs 探测器比 HgCdTe 探测器有更好的性能^[23]。更重要的是，InGaAs 探测器可室温工作，且具有很高的性能，使红外探测系统摆脱致冷的制约，从而在仪器的小型化、降低红外系统的成本等方面具有很大的竞争力，在航天遥感领域受到广泛关注。

1.4.1 InGaAs 材料特性

三元化合物是 III-V 族的Ⅱ-Ⅲ族二元系、直接带隙的半导体材料^[24,25]，其具有高迁移率、良好的抗辐照特性等优点。In_{1-x}Ga_xAs 化合物可由 InAs 与 GaAs 以任何配比形成，如图 1.4.3 所示，其晶格常数随 In 组分的变化近似为线性，从 GaAs 的 5.6533 Å 变化到 InAs 的 6.0583 Å，禁带宽度在 InAs(0.35eV)与 GaAs(1.43eV)之间变化，截止波长在 3.5μm 和 0.87μm 之间变化，很好的覆盖了 1~3μm 的大气窗口，是制备短波红外探测器的合适材料。

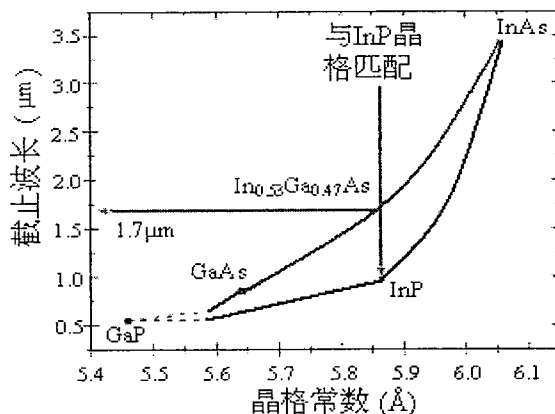


图 1.4.3 III-V 族化合物晶格常数与截止波长的关系

Fig1.4.3 The relationship between the lattice constant and the long wavelength cutoff of III-V compounds

表 1.4.1 给出了 InP、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 和 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 在 300 K 时的材料参数。 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 与 InP 材料晶格完全匹配，因此可以在 InP 衬底上生长出高质量的外延层，制备出性能优越的器件。增加 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 中 In 的含量，可使得 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 的探测波段向长波方向移动，以满足一些特定应用需求^[26]。与 InP 材料完全晶格匹配 InGaAs 探测器可在室温下工作，而扩展波长的 InGaAs 探测器在热电制冷温度下也可以获得较好的性能^[27]。另外，有多种材料制备技术，包括气相外延、液相外延、金属有机化合物化学气相淀积、分子束外延技术等^[28,29]，可以生长出高质量的 InGaAs 外延材料。

表 1.4.1 InP、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 和 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 在 300 K 时的材料参数
Table 1.4.1 Basic parameters of InP, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ and $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ at 300K

参数	InP	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$
晶格结构	闪锌矿 ⁺	闪锌矿 ⁺	闪锌矿 ⁺
晶格常数(Å)	5.8687	5.8687	$6.0583-0.405x$
禁带宽度(eV)	1.344	0.75	$0.324+0.7x+0.4x^2$
低频介电常数	12.5	13.9	$15.1-2.87x+0.67x^2$
高频介电常数	9.61	11.6	$12.3-1.4x$
本征载流子浓度 (cm^{-3})	1.3×10^7	6.1×10^{11}	
电子迁移率($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	≤ 5400	≤ 12000	$40-80.7x+49.2x^2 \times 10^3$
空穴迁移率($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	≤ 200	≤ 300	
有效导带态密度 (cm^{-3})	5.7×10^{17}	2.1×10^{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}	$2.5 \times 10^{19} [0.41+0.1x]^{3/2}$
电子的有效质量(m_0)	0.08	0.041	$0.023+0.037x+0.003x^2$
轻空穴有效质量(m_0)	0.089	0.052	$0.026+0.056x$
重空穴有效质量(m_0)	0.6	0.45	$0.41+0.1x$

1.4.2 InGaAs 探测器研究热点

① 选用不同的衬底

InP 材料与 InGaAs 可以做到完全晶格匹配, 在 InP 衬底上生长出质量很高的外延层, 而且其长波截止为 $1.7\mu\text{m}$, 正好可以覆盖光纤通讯常用的波长, 在光纤通讯需求的推动下, InP 衬底 InGaAs 红外探测器被广泛研究并且取得了很大进展, 技术日益成熟, 由单元器件发展到线阵列器件, 二维面阵器件, 器件性能也达到了很高的水平。

GaAs 衬底比 InP 衬底便宜, 其质量通常也高于 InP 衬底, 而且当铟含量大于 53% 时, 在 InP 衬底上很难生长 InGaAs, 因此, 探索采用 GaAs 衬底的 InGaAs 红外探测器是一个重要的方向^[30]。为了增大 GaAs 衬底上的 InGaAs 的铟组分, 要求超晶格缓冲层缓解释放更多的应变, 因此带来很大的挑战。

Joachim John 等人^[31]已经在 GaAs 衬底上生长出 In 含量在 75~80% 之间的 InGaAs 的 256 元、512 元线列和 320×256 的焦平面短红外探测器, 探测波长为 $1.7\sim 2.5\mu\text{m}$ 。通过分子束外延技术在 3 英寸的 GaAs(100)衬底上生长 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, 为了克服 6% 的晶格失配和更好的透明, 先在 GaAs 衬底上生长宽能带 InAlAs 缓冲层, 再生长 InGaAs 的 p-n 结结构。为了得到更好的欧姆接触, 在顶层生长一层高掺杂的 n^+ 层, 再生长 TiW/Au 电极, 最后通过铟柱与 CMOS 读出电路相连接。在无抗反射层的情况下, $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ 焦平面的探测率为 $5\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。

单片 InGaAs 焦平面是把硅读出电路和 InGaAs 探测器集成在一起, 具有很多超过混成结构的优点。单片 InGaAs 焦平面的尺寸不需要考虑硅读出电路芯片的热匹配而受到限制, 制备与硅 CCD 相似的大规模传感器是可行的。探测器阵列与读出电路连接所需过程, 如铟球焊接, 将被取消, 因此单片 InGaAs 传感器的成本大大降低。如果单片 InGaAs 焦平面采用正面照射结构, 其探测波长可以从可见光至短波红外波段。

Abhay M. Joshi 等人^[32]设计并制备出 256 元和 512 元硅基 InGaAs 单片红外探测阵列, 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 $1\sim 3\mu\text{m}$ 。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 $45\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 。B. F. Levine^[33]和 Alexandre

Pauchard^[34]分别报道了光敏元直径为 $20\mu\text{m}$ 的 Si 基 InGaAs p-i-n 探测器。B. F. Levine 制备的器件，在 -10V 偏压下，暗电流低至 180pA ， 3dB 带宽为 20GHz ；Alexandre Pauchard 制备的器件，在 -4V 偏压下，暗电流低至 38pA ， 3dB 带宽大于 11GHz 。

② 响应波长扩展

在许多实际应用中，需要探测器的截止波长大于 $1.7\mu\text{m}$ ，比如探测农产品水分需要 $1.9\mu\text{m}$ 的探测器，“LIDAR”系统所需要的 $2.05\mu\text{m}$ 探测器^[35]。为了使 InGaAs 探测器的探测波段延伸，需要增大 In 的组分，从而导致与 InP 衬底晶格不匹配。当外延的 InGaAs 层与衬底的晶格不匹配时，导致的应变会产生缺陷和位错，那么会使暗电流增加。为了缓解或释放晶格不匹配带来的应变，人们做了大量的研究和尝试^[36]。

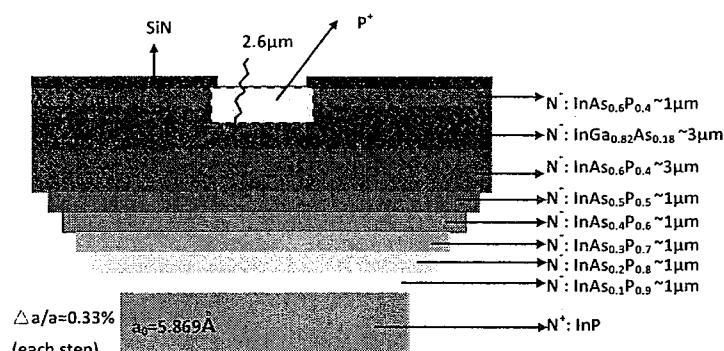


图 1.4.4 $2.6\mu\text{m}$ InGaAs 材料结构示意图

Fig1.4.4 Schemes of configuration for $2.6\mu\text{m}$ InGaAs material

图 1.4.4 所示就是被成功用来缓解或释放应变的一种方法，在衬底与 InGaAs 有效区之间生长厚度约 $1\mu\text{m}$ 超晶格缓冲层来缓冲。薄层的晶格常数与衬底相同或者略微不同，在缓冲层以上生长的每个薄层都具有与 InGaAs 有效区比较接近的晶格常数，这样可使应变的位错产生于缓冲层，被超晶格之间突变的异质结捕获，从而降低有效区的缺陷密度。常用的缓冲层材料有 InAsP、InAlAs 和 InGaAs。利用超晶格缓冲层技术人们在 InP 衬底上生长了铟组分高达 82% 的 InGaAs 有效层，这样可制备截止波长大于 $1.7\mu\text{m}$ 的红外焦平面探测器。G. H. Olsen 等^[37]报道了量子效率达到 70% 的延伸波长 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.53 < x < 0.8$) p-i-n 探测器，在室温下，截止波长为 $1.8\mu\text{m}$ 器件的优值因子 R_0A 优于 $2000\Omega\cdot\text{cm}^2$ ，截止波长为 $2.1\mu\text{m}$

的器件优于 $900 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，截止波长为 $2.6 \mu\text{m}$ 的器件优于 $15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

在有些应用中，人们希望 InGaAs 探测器不仅可用于短波红外波段成像，而且还可以在可见甚至紫外波段成像。常用的方法就是减薄 InP 帽层或者衬底的厚度，增大探测器对可见部分的响应。短波方向延伸的 InGaAs 典型结构如图 1.4.5 所示，通过引入一种 InGaAs 或 InGaAsP 刻蚀阻挡层到外延基底中，再用化学腐蚀液有选择性的湿法刻蚀掉 InP。美国 Indigo 公司的 T. R. Hoelter 等^[38]报道了一种光谱响应延伸至 350 nm 的 InGaAs 探测器，器件响应率在短波方向得到有效增强。

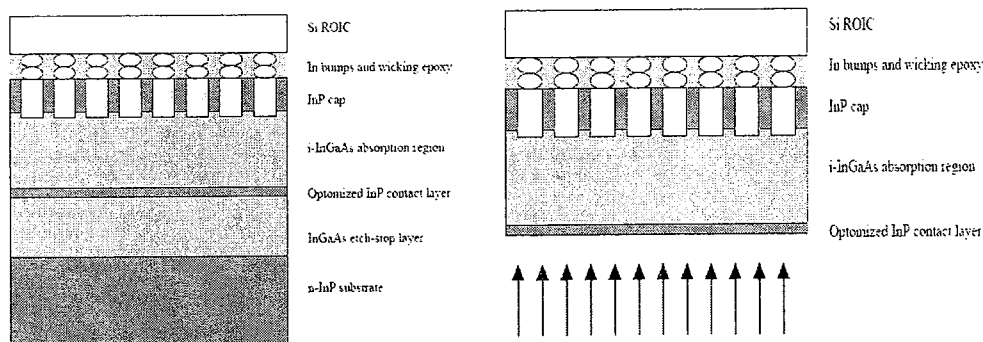


图 1.4.5 向短波方向延伸的 InGaAs 结构示意图

Fig1.4.5 Schemes of extended short-wavelength InGaAs detectors

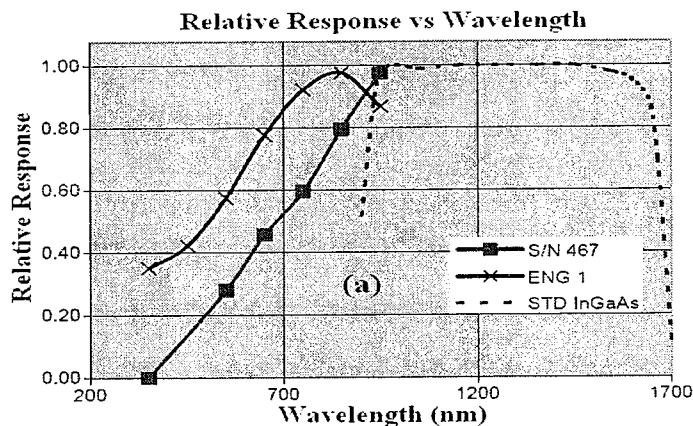


图 1.4.6 短波延伸 InGaAs 探测器响应光谱

Fig1.4.6 Response spectrum of extended short-wavelength InGaAs detector

③ APD 探测器

随着量子通讯技术的发展和成熟，特别是量子密钥分配技术的发展，导致单光子探测接收技术的研究成为了一个热点，而且单光子探测在高能物理、放射探测、天文观测以及一些物质分析方面也有着广泛的应用基础。在光通信波段，常采用的是 InGaAs/InP APD 单光子探测器，Ping Yuan 等人通过采用 InGaAsP 作为

缓冲层，并且优化了倍增层和电荷层，制备出了 32×32 元 $1.55 \mu\text{m}$ 盖革模式工作模式的 InGaAs APD，在 273K、2V 过偏压下光子探测效率超过了 30%，暗电流速率降低至 $20 \text{KHz}^{[39]}$ 。

④ 量子型探测器

量子阱 InGaAs 探测器具有本征光电流反应速度快的特点，而量子点 InGaAs 探测器因为更长的载流子俘获和弛豫时间，具有更小的暗电流和更高的量子效率，所以它们都吸引了研究者的目光，成为了研究的热点。InGaAs 量子型探测器主要包括 InGaAs/InP、InGaAs/InAlAs、InGaAs/InAs 以及 InGaAs/GaAs 等体系，Cellek 等人^[40]采用 MBE 技术生长的 InGaAs/InP 量子阱材料制备出了 640×512 元面阵探测器，在 80K、反偏 1V 的条件下，峰值响应率达到了 0.28A/W ，探测器达到了 $2.5 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ ；H.Lim 等人^[41]采用 InP 衬底 InAs 作为量子点的 InGaAs 材料制备出的探测器，在 120K 的条件下量子效率达到了 35%，峰值探测率达到了 $2.8 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ ，探测器具有较低的暗电流。

1.5 InGaAs 焦平面探测器发展现状

从上世纪 80 年代开始多个国家开展了空间遥感应用 InGaAs 光电探测器的研究，目前国际上的研究已从单元器件发展到焦平面探测器，性能不断提高，功能越来越多。焦平面探测器分为扫描型线列焦平面探测器和凝视型面阵焦平面。同时探测波段也由 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 延伸到 $0.9 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 和 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 等，使得器件的应用范围得到极大的扩展。国外对于 InGaAs 红外焦平面器件的研究起步较早，许多制备厂商都已经拥有非常成熟的系列产品。国内也有许多研究机构从事 InGaAs 探测器的研究工作，但他们所研制的探测器也主要应用于光纤通讯，重点方向是提高器件的带宽和速度。对于 InGaAs 焦平面探测器的研究，目前国内主要有重庆光电技术研究所和上海技术物理研究所。

1.5.1 国外发展现状

① 线列焦平面探测器发展现状

扫描型线列焦平面发展方向，一方面是增大规模，增加线列焦平面像元数和提高像元密度；另一方面是提高焦平面性能，减小噪声、提高均匀性和响应率等。通过拼接的方法实现更长、超长的线列焦平面，从而满足更宽视场的应用要求，但是由于拼接存在的差异性导致非均匀性，单片长线列焦平面的发展有着重大意

义。

上世纪八十年代中期, 法国 THOMSON 公司研制了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面, 应用在陆地卫星(SPOT4, SPOT5)的高分辨可见红外系统(HRG)和植被仪(Vegetation)中^[42]。该线列焦平面探测器工作波长为 $1.55\sim 1.70\mu\text{m}$, 室温工作, 是由 10 个 300 元 InGaAs 小线列拼接而成, 主要应用于土壤、植被含水量的监测。该探测器的主要性能: 像元面积为 $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$, 探测率为 $6\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 平均噪声为 0.3mV , 非均匀性小于 10%, 平均量子效率为 65%, 噪声等效功率为 10^{-13}W , 焦平面探测器的动态范围超过 4000。

1997 和 2003 年印度发射的资源卫星 IRS-1C 和 IRC-P6 上 AWiFS 相机的短波红外通道分别采用了 2100 元和 6000 元拼接实现的长线列焦平面^[43,44], 探测器像元面积为 $13\mu\text{m}\times 13\mu\text{m}$, 品字形排布, 奇偶行中心距为 $26\mu\text{m}$, 饱和信噪比达到了 1200, 该焦平面扫描成像如图 1.5.1 所示。

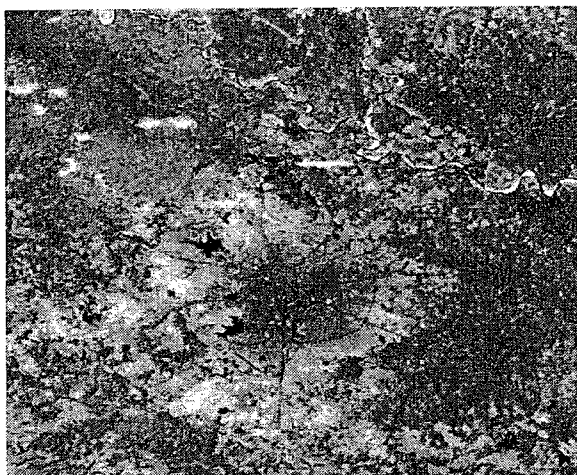


图 1.5.1 AWiFS 相机短波红外通道成像

Fig1.5.1 Imaging of short wavelength channel in AWiFS camera

原 EPITAXX 公司很早就致力于单片长线列焦平面的研究, 他们利用少子横向扩散制备了像元面积 $25\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$, 中心距为 $25\mu\text{m}$ 的 512 元单片线列焦平面和拼接实现的 1024 元线列焦平面^[45,46], 响应波长范围包括 $1.7\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 以及 $2.6\mu\text{m}$, 其器件漏电流水平分别为 $6\text{pA}(@300\text{K}, -10\text{mV})$ 、 $500\text{pA}(@300\text{K}, -10\text{mV})$ 以及 $20\text{nA}(@300\text{K}, -10\text{mV})$ 。2001 年 ESA 新一代环境卫星 ENVISAT 上大气分布扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY)^[47,48], 四个通道分别采用了该公司研制的单片 1024 元的 III-V 族 InGaAs 晶格匹配和晶格失配的 InGaAs 线列器件, 单元尺寸 $25\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$, 器件分别工作在 200K 和 150K, -2mV 偏压下, 暗电流为

20~100fA, 优值因子 R_0A 为 $2.5\sim12.5\times10^6 \Omega\cdot\text{cm}^2$ 。这是晶格失配 InGaAs 探测器件首次在卫星遥感上的应用。在 2011 年 3 月 11 日日本 9.0 级大地震发生后, 欧空局向日本提供了 Spot-5 卫星、ENVISAT 卫星以及德国测绘卫星 TerraSAR-X 的观测图片 (见图 1.5.2 所示), 帮助评估损失、协调震后救援工作, 图片显示, 地震破坏力极大, 日本西北海岸线东移了 4 米。

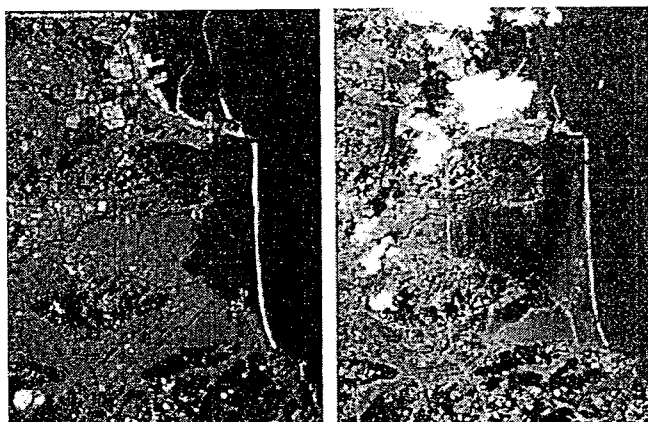


图 1.5.2 地震前后日本沿海卫星图片对比 (左: 2010-9-5; 右: 2011-3-12)
Fig1.5.2 Satellitic images of Japan seaboard before and after earthquake (left: 2010-9-5, right: 2011-3-12)

Sensors Unlimited 公司报道了其研制的单片 1024 元混合线列焦平面探测器^[49], InGaAs 光电二极管与硅基 CMOS 读出器混成, 如图 1.5.3 所示。探测器像元面积为 $20\mu\text{m}\times250\mu\text{m}$, 像元中心距为 $25\mu\text{m}$, 响应波长范围为 $1.1\mu\text{m}\sim2.2\mu\text{m}$, 焦平面在积分时间小于 1ms 的条件下具有很高的线性度, 增益常数达到了 $52402\pm6203 \text{ e}^-/\text{DN}$, 在 $1.5\mu\text{m}\sim2.2\mu\text{m}$ 波长范围内平均量子效率为 70%。

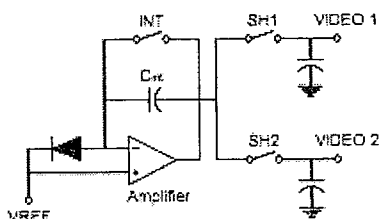


图 1.5.3 Sensors Unlimited 公司 1024 线列焦平面像素单元结构
Fig1.5.3 Pixel configuration of 1024 linear FPA of Sensors Unlimited corporation

比利时 XenICs 公司在扫描型焦平面探测器研究方面也取得了重大进展。该公司成功研制了截止波长分别 $1.7\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ 的 128 元、256 元和 512 元线列焦平面, 在室温下的平均探测率分别达到了 $7.5\times10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 、 $5\times10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 和 $8\times10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。近期, XenICs 公司公布了其最新产品 Xlin-1.7-

1024 单片扫描型行列 InGaAs 焦平面探测器^[50], 器件响应波段 0.9~1.7 μm , 光敏元中心距为 12.5 μm , 这是目前所报道的光敏元中心距最小的行列 InGaAs 器件。

日本 Hamamatsu 公司将行列探测器芯片、热电制冷器和 CMOS 读出电路耦合在一起, 器件的响应波段为 0.9 μm ~1.7 μm 或 0.9 μm ~2.6 μm , 焦平面探测器规模有 128 元、256 元、512 元和 1024 元, 光敏元大小为 50 μm ×500 μm 或 25 μm ×500 μm , 以及响应波段为 0.9 μm ~1.7 μm , 光敏元大小 450 μm ×1000 μm 的 16×1 元大光敏元行列器件。该公司还推出了响应波段为 0.9 μm ~1.7 μm , 光敏元大小为 50×50 μm 的 256 元成像焦平面和光敏元大小为 25 μm ×25 μm 的 512 元行列成像焦平面^[51,52]。

2012 年 ESA 将发射 Proba-V 卫星接替 SPOT 系列^[53], 其中近红外继续采用 III-V 族 InGaAs 探测器, 光敏元密度提高一倍, 即由“品”字型 26 μm 中心距提高到“一”字型 25 μm 中心距, 同时器件的暗电流水平进一步降低, 子模块读出由 CCD 模式转变为 CMOS 模式, 规模由 300 元提高到 1024 元。

② 面阵焦平面探测器发展现状

从上世纪90年代到本世纪初, Sensors Unlimited公司已经相继成功研制出 128×128、320×240、640×512、1024×1024、1280×1024规模的焦平面探测器。目前, 该公司可以提供高性能的常规和向短波方向延伸128×128元、320×240元、640×512元和1280×1024元面阵焦平面产品。2005年, 该公司制备的规模为 1280×1024和1024×1024的平面型InGaAs短波红外焦平面探测器^[54], 响应波长为 0.9~1.7 μm , 光敏元中心距20 μm , 其中1024×1024焦平面器件的优值因子R0A为 $1.5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (@265K) 和 $8 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (@280K)。而且, 随着近期DARPA(Defense Advanced Projects Agency), NASA, the US ARMY, Air Force Research Labs等一系列研究计划的资助, 其碲镓汞焦平面探测器的性能得到了极大的提高^[55], 他们已经成功在3英寸及4英寸的InGaAs外延片上制备了背照射式1280×1024的阵列焦平面器件, 响应波长为0.9~1.7 μm , 光敏元中心距缩减为15 μm , 并且通过InGaAs材料以及器件工艺流程的优化, 探测器暗电流密度<1nA/cm² (@10°C), 峰值探测率 $1.5 \times 10^{13} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ (@295°C), 填充因子达到了100%, 而且焦平面器件也会具有很高的灵敏度。

除了提高焦平面探测器性能之外, 该公司在焦平面系统小型化、低功耗方面也取得一定的进展^[56]。1994年, 传感无限公司的128×128元焦平面红外相机的重

量为3.5kg,集成度为3pixels/g;2004年,该公司的S.Huang报道的320×256元焦平面商用微型短波红外相机,光敏元中心距25μm,相机重量小于70g,集成度1000pixels/g,功耗小于1.3W;而到了2008年,该公司的商用红外相机所用的InGaAs焦平面为640×512元,光敏元中心距25μm,相机重量小于100g,集成度3000pixels/g,功耗小于2.5W;近期,Goodrich宣布参与DARPA MISI(Micro-Sensors for Imaging)计划^[57],根据该计划该公司的红外相机的InGaAs焦平面探测器要达到10000pixels/g的集成度,光谱响应范围0.4~1.7μm,能够在白天及夜间条件下对100m距离的物体进行成像,成像系统能够在四节“AA”电池的支撑下至少工作4小时,预计其1280×1024规模的InGaAs成像模块重量<10g,功耗<0.5W,包括组件封装、成像透镜及电路,以用于该计划中所需的单兵SWIR成像系统。

同时受 DARPA 的 PCAR(Photon Counting Array)计划的资助,美国 Boeing Spectrolab 公司通过优化材料外延结构及器件结构成功制备了高量子效率、低暗电流密度的 1280×1024 元的 InGaAs 焦平面器件^[58],光敏元大小为 15μm×15μm,暗电流密度低于 1nA/cm²(@280K);而且在室温条件下,1.55μm 峰值响应率达到 1.08A/W。在 DARPA's MANTIS(Multispectral Adaptive Networked Tactical Imaging System)计划资助下,2009 年,美国 Raytheon 公司制备了高动态范围的 1280×1024 规模的读出电路,并与 Boeing Spectrolab 公司的低暗电流的 InGaAs 焦平面器件互连,研制出高动态范围低噪声的军用短波红外成像系统^[59]。

在焦平面暗电流优化方面取得进展的还有 Aerius Photonics 公司,该公司研制的 InGaAs 焦平面探测器主要应用于天文观测。他们主要通过材料结构的优化以及工艺的优化来降低器件的暗电流,材料结构的优化主要集中在 InGaAs 吸收层与 InP 盖帽层及缓冲层的界面特性上,而工艺的优化则主要集中在扩散成结过程以及表面钝化上。通过材料结构的优化设计,成功将器件在 20°C 时的暗电流密度从 18nA/cm² (@-0.1V) 降至 8.4nA/cm² (@-0.1V),而后根据研究结果对器件工艺流程中的扩散成结及表面钝化进行了优化,从而将器件在 7°C 时的暗电流密度降至<1nA/cm² (@-0.1V)。在此基础之上,他们成功研制出 1024×1024 元的平面型 InGaAs 焦平面探测器^[60],器件光敏元中心距为 18μm,像元电容小于 35fF,将焦平面器件与 Teledyne Scientific 公司的读出电路 HAWAII-1RG 互连,应用在天文成像上取得了良好的效果。图 1.5.4 所示为用该 InGaAs 相机及 Si CCD 相机

(2148×1472 像素级别)对猎户座星云的成像效果对比图(InGaAs 相机所用的积分时间为 20s)，由图可知，采用 InGaAs 相机可获得更多的天体信息。

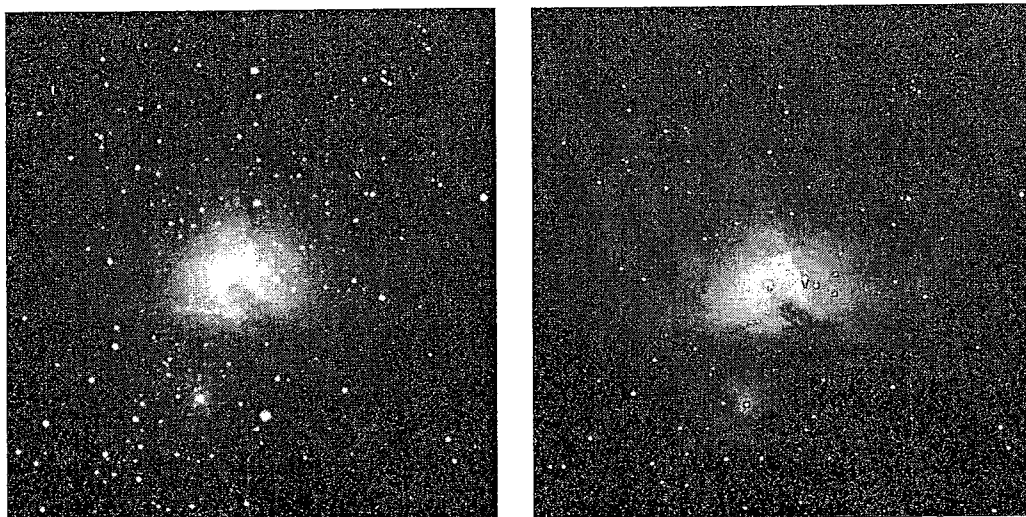


图1.5.4 左)1024×1024 InGaAs相机对猎户座星云的成像图，右) 2148×1472 CCD相机成像图
Fig1.5.4 left) Image of the Orion Nebula taken by 1024×1024 InGaAs camera, right) Image of the Orion Nebula taken by 2148×1472 CCD camera

近期，该公司又研制出1280×1024元的平面型InGaAs焦平面器件，器件暗电流密度在7℃(@280K)时小于1nA/cm²。目前，该公司宣称他们已经具备4096×4096规模InGaAs焦平面器件的研制能力^[61]。

在焦平面响应波长扩展方面，比利时 XenICs 公司以及美国 Judson 公司都取得很大进展。XenICs 找到了一种安全地除去 InP 基底的方法，通过引入一种 InGaAsP 刻蚀阻挡层到外延基底中，再用 HCl 湿法刻蚀有选择性的刻蚀掉 InP。从而将探测器芯片的厚度从 125μm 减至 5μm，使得 InGaAs 焦平面器件的波长响应范围扩展至 0.4~1.7μm，并制备了 320 × 256 的焦平面器件，器件光敏元中心距 20μm，主要应用于高光谱探测^[62]。

2008 年，据报道^[63,64]美国 Judson 公司已经具备成熟的包括常规、短波方向延伸和向长波方向延伸的 320×256 元 InGaAs 焦平面探测器制备技术。目前，该公司也已经开始研制 1280×1024 规模的常规 InGaAs 焦平面器件，光敏元大小为 20μm×20μm，在 1.35~1.6μm 波段的量子效率在 80%~85%之间，有效像元为 99.8%。向短波方向延伸的 InGaAs 焦平面器件采用衬底移除技术制备，响应波段为 0.4~1.7μm，-65℃~40℃ 温度范围内，器件在 0.5~1.6μm 响应波段内的量子效率最低为 40%。向长波方向延伸 InGaAs 焦平面的响应波段为 1.4~2.6μm，采用 InAsP

作为缓冲层和帽层，器件的峰值量子效率优于 80%，由于 InAsP 缓冲层的窗口效应，当制冷至 -65°C 时，响应波段变为 $1.5\sim 2.5\mu\text{m}$ ，长波延伸器件采用了四级热电制冷器。

1.5.2 国内研究状况

在扫描型线列焦平面探测器方面，上海技术物理研究所取得一定的进展，成功研制了台面型 256×1 正照射 InGaAs 焦平面探测器芯片的峰值响应率达到 1.09 A/W ，室温下响应截止波长为 $1.71\mu\text{m}$ ，平均峰值探测率为 $1.20\times 10^{12}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，响应非均匀性为 3.87%；台面型 256×1 元背照射线列 InGaAs 焦平面探测器，探测器芯片的峰值响应率为 0.95 A/W ，峰值探测率为 $4.5\sim 6\times 10^{11}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，响应非均匀性 3.5%~5%，以及台面型 512×1 元背照射 InGaAs 探测器，平均峰值探测率为 $6.13\times 10^{11}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，响应不均匀性为 3.71%^[65,66]。

在凝视型面阵焦平面探测器方面，重庆光电技术研究所成功研制了 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 的背照射式 320×56 规模的 InGaAs 面阵探测器^[67]，光敏元中心距 $30\mu\text{m}$ ，采用 Zn 扩散成结工艺，器件增透膜为 SiN_x 。探测器通过 In 柱倒焊与 Si 基 CMOS 读出电路互连。室温下，器件平均峰值探测率 $6\times 10^{12}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。如图 1.5.5 所示，在可见度 500m 的条件下，实现对 3km 远建筑物的成像，取得了较好的成像效果。

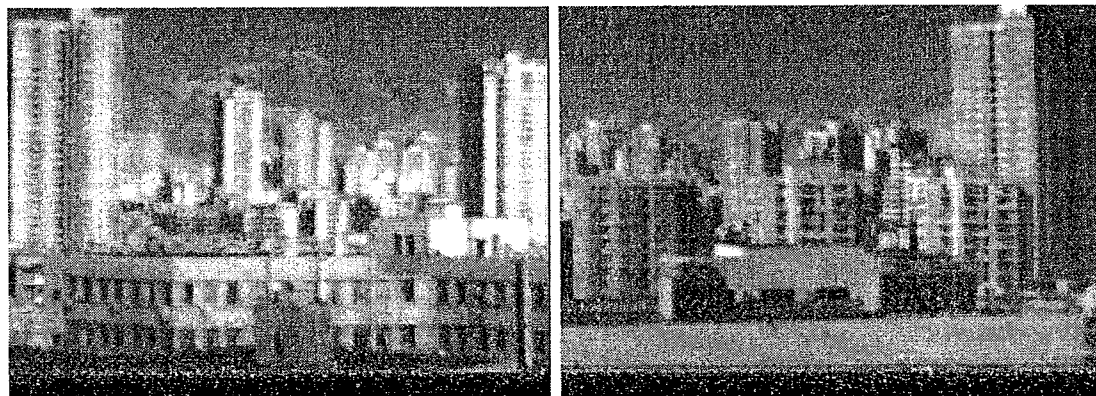


图 1.5.5 可见度 500m 下、3000m 远建筑物的成像图

Fig1.5.5 Images of buildings from 3000m away under the visibility of 500m

1.6 InGaAs 焦平面探测器发展趋势

通过分析国际及国内 InGaAs 焦平面探测器的发展现状和对 InGaAs 焦平面器件需求，也同样可以发现，今后 InGaAs 短波红外焦平面探测器的发展将会主要集中在以下几个方面：

(1) 小光敏元、大规模阵列焦平面器件。采用焦平面器件,可以更好地满足系统的要求,同时也有利于简化系统结构、降低成本。在向更大规模的凝视型焦平面、多色探测器发展的中,长波器件已达到 640×480 元的规模,中、短波器件达到了 2048×2048 的规模。今后,为显著提高系统的性能,InGaAs红外成像探测器将向更大面阵和甚长线列的大阵列方向发展。

(2) 低暗电流、低噪声。随着红外成像系统对功耗、系统质量以及成本等方面的要求越来越高,非制冷探测器已经成为一个发展趋势,这样对于器件暗电流噪声的要求也越来越高,降低暗电流噪声已经成为一个研究热点。

(3) 探测器芯片与读出电路的混合集成。背照射式大规模阵列InGaAs焦平面器件通过In柱与Si基读出电路的连接已经成为一种主流的互连方式,这极大的简化了红外成像探测器的结构,便于器件焦平面化。而随着半导体材料及器件制备技术的日益成熟,单片集成InGaAs焦平面阵列的研制也有了很大的突破。

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

对比国内外InGaAs焦平面探测器的研究现状,可以发现,无论从焦平面探测器规模、功能多样性,还是焦平面性能上来看,都还存在很大的差距,要缩小这种差距,在材料生长、结构设计及器件制备工艺流程等方面都有大量的工作需要去做。

1.7 本论文的研究目的和主要内容

本论文针对空间遥感用短波红外InGaAs焦平面探测器应用需求,以研制高性能、高密度的长线列InGaAs焦平面探测器为目的,对台面型InGaAs探测器暗电流、制备工艺等方面进行了研究,期望能够为台面型InGaAs焦平面探测器的发展和应用提供些许的参考,本论文重点研究的是截止波长 $1.7\mu\text{m}$ 的InGaAs探测器,如无特殊说明均指的是截止波长 $1.7\mu\text{m}$ 的InGaAs探测器。本论文的第一章回顾了红外探测器技术的发展,概述了InGaAs长线列和面阵焦平面探测器的研究现状和趋势;第二章针对ICP刻蚀台面型InGaAs探测器暗电流较大的问题,分析了不同帽层结构的台面型探测器暗电流成分,并分析了台面侧表面的电流密度和少子寿命;第三章尝试了几种工艺处理方法以减小ICP刻蚀所引起的损伤,从而

达到降低暗电流的目的；第四章研究了常规的 Cl_2/N_2 气氛ICP刻蚀的主要损伤机制，并研究了一种新的 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛ICP刻蚀条件，并进行了比较分析；第五章研制了小光敏元的 1024×1 元品字型线列焦平面探测器，以及 $2\mu\text{m}$ 间距高密度 800×1 元一字型线列焦平面探测器，并研究了其光电性能；第六章结合空间应用需求，研究了太阳光直接辐照对 InGaAs 探测器性能的影响；第七章是全文总结与展望。

2 台面型 InGaAs 探测器暗电流研究

2.1 引言

遥感用 InGaAs 探测器常用的制备方法包括平面型和台面型，主要是按照光敏元定义方式来划分的。平面型探测器是采用扩散或注入填充式的方法定义光敏元，而台面型探测器则是采用干法或者湿法刻蚀隔断式的方法定义光敏元。前者优点是形成的 pn 结处在吸收层中，减小了界面的影响和探测器钝化的难度，从而探测器可以达到比较低暗电流水平，但是这种方法也存在一些问题，扩散工艺复杂并且其方向选择性较差，由于横向扩散导致定义的光敏元会产生偏差，通常需要减小扩散区和采用保护环结构抑制光敏元之间串音。台面型探测器光敏元定义可以比较精确，有利于相邻光敏元之间串音的抑制，这对成像系统的图像质量至关重要，其缺点是光敏元定义是通过破坏性方法实现的，并且 pn 结的截面是暴露在外面的，这导致台面型器件要达到低暗电流具有更大的难度。

波音实验室的 Joseph Boisvert 等人^[68]对平面 PIN 型 InGaAs 探测器暗电流进行了研究，如图 2.1.1 所示，他们认为平面型探测器暗电流主要来源于下面这些地方：缓冲层与有源层的界面处、吸收层内部、吸收层与帽层的界面处、帽层表面与钝化层界面处以及钝化层表面，这其中暗电流主要受到吸收层与帽层的界面影响。

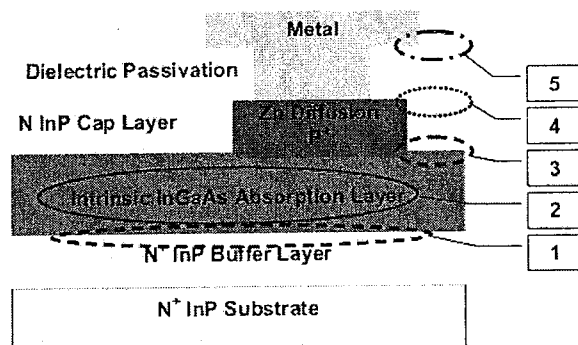


图 2.1.1 平面型探测器暗电流来源示意图^[1]: 1.吸收层与缓冲层界面; 2.吸收层; 3.帽层与吸收层界面; 4.钝化层与帽层界面; 5.钝化层表面。

Fig2.1.1 Schemes of dark current sources in planar detector: 1.absorber and buffer interface; 2.absorption layer; 3.cap and absorber layer interface; 4.cap and passivation interface; 5.surface of passivation layer.

台面型 InGaAs 探测器从器件结构上来说，其暗电流的来源与平面型探测器不同的是，裸露的 pn 结截面和帽层与吸收层的界面处。研究台面型 InGaAs 探

测器暗电流的主要组成成分,以及暗电流的主要来源,对于降低台面型探测器暗电流具有重大指导意义。由于台面型探测器结构的特殊性,其暗电流相对于平面型探测器要复杂一些,从理论上直接推导出台面型探测器暗电流来源和成分的可行性较小,所以目前主要是采用器件模拟和反演的办法,来研究台面型探测器的暗电流成分和来源。

F. K. Hopkins 等人^[69]根据不同电流成分的偏压特性,对反偏压下 I-V 曲线进行分区间拟合,得到了 InSb 光电探测器反偏下的暗电流分布。在此之前,Forrest 等人^[70]也曾利用类似方法对 InGaAs 探测器进行了暗电流分析,这种方法存在一个缺点,那就是在一个偏压区间里单一电流成分的假设并不是很有效的。Vishnu Gopal 等人^[71]对 HgCdTe 探测器暗电流成分进行了分析,探测器在正向偏压下暗电流主要由扩散和复合电流组成,通过正向偏压下的 I-V 和 R-V 曲线可以计算得到少子寿命、耗尽区载流子寿命,该方法的缺点是,正偏下暗电流容易受到接触势垒的影响。对探测器暗电流的研究,国内也有一些研究小组提出了新的方法,比如叶振华等人^[72]在零偏附近暗电流主要由扩散和产生复合电流组成的前提下,利用零偏电阻与温度的关系,计算出少子寿命和耗尽区载流子寿命。这种方法对于漏电小的探测器适用,但是当器件漏电较大,导致分路电阻较小时,假设条件不成立,所以不适用于漏电较大的探测器。

本章提出了一种适合台面型 InGaAs 探测器的暗电流分析方法,拟合计算了暗电流的组成成分,为在器件结构、器件工艺方面改善探测器暗电流提供了一定的指导意义;通过对不同面积的台面型探测器暗电流的研究,得到了相同工艺条件下探测器暗电流与周长面积比的关系,并计算得到了台面侧表面的电流密度和少子寿命。

2.2 暗电流模型

理想的突变异质结器件中,载流子输运过程主要包括扩散、复合以及隧穿过程,从而形成了扩散电流、复合电流以及隧穿电流。但是,异质结的能带带阶、渐变特性、界面态以及掺杂等因素都影响载流子的输运,所以实际异质结器件中,还存在一些特殊的电流,比如表面/界面复合电流、以及表面/界面漏电流等等。不同探测器结构的输运过程,使得这些电流具有不同的特性,比如温度特性、电压特性、微分电阻特性等等。利用这些不同的特性,就可以对器件电流组成成分

加以区分并进行分析。

2.2.1 扩散电流

平衡状态下,载流子的产生和复合是相互中和的,处于一种平衡。当通过电注入或者光照等其他方法产生非平衡载流子时,由于载流子浓度的不同产生梯度,载流子从浓度高的地方向浓度低的地方扩散,这种载流子的定向扩散运动对外电路的电流产生贡献。在耗尽区边缘准中性区域中,热激发产生的电子空穴对扩散到耗尽区时,将被耗尽区电场拉开,少子漂移到结区的另一边,从而形成了扩散电流。对于单边突变异质结(p^+n),重掺杂区所产生的扩散电流可以忽略不计,轻掺杂区的扩散电流占主导地位。

$$J_{dif} = \frac{qn_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \exp\left(\frac{\Delta E_v}{K_0 T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{K_0 T}\right) - 1 \right] \quad (2.2.1)$$

式中 D_p 为空穴扩散系数, τ_p 为空穴寿命, 本征载流子浓度表示式为

$$n_i = 2 \left(\frac{2\pi K_0 T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_e m_h)^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2K_0 T}\right) \quad (2.2.2)$$

因此,扩散电流与偏压和温度都有关系,可以表示为:

$$J_{dif} = \frac{4q(m_e m_h)^{\frac{3}{2}} (2\pi)^3}{N_D (h^2)^3} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} (K_0 T)^3 \exp\left(-\frac{E_g - \Delta E_v}{K_0 T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{K_0 T}\right) - 1 \right] \quad (2.2.3)$$

2.2.2 产生复合电流

这里说的产生复合电流,指的是产生于耗尽区的体产生复合电流。当 pn 结处于热平衡状态时,耗尽区中非平衡载流子的产生速率与复合速率相等。当 pn 结附加偏压时,这种产生-复合速率相等的平衡被打破,热激发的载流子将对电流产生贡献。当耗尽区中本征载流子浓度远大于非平衡载流子浓度时,假设复合中心能级 E_t 等于 E_i , 电子俘获系数 r_e 与空穴俘获系数 r_p 相等,那么非平衡载流子复合率可以表示为^[73]:

$$U = \frac{rN_t(np - n_i^2)}{n + p + 2n_i} \quad (2.2.4)$$

非平衡载流子产生-复合所形成的电流密度可以表示为:

$$J_{gr} = \frac{qn_i W r N_t}{2} \left[\exp\left(\frac{qV}{2K_0 T}\right) - 1 \right] = \frac{qn_i W}{2\tau} \left[\exp\left(\frac{qV}{2K_0 T}\right) - 1 \right] \quad (2.2.5)$$

上式中的 N_t 表示的是复合中心密度, τ 为非平衡载流子寿命, 耗尽区宽度

$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}} (V_{bi} - V)$, 其中耗尽区接触势垒 $V_{bi} = \frac{K_0 T}{q} \left(\ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$ 。而在实际情况下,非平衡电子与空穴的俘获系数是不相同的,此时的载流子寿命是电子寿

命和空穴寿命的综合效应，称之为有效载流子寿命 $\tau_{\text{eff}}^{[74]}$ 。

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{1}{\sigma_t v_{th} N_t} \exp\left(\frac{E_t - E_i}{K_0 T}\right) \quad (2.2.6)$$

可以看到体产生复合电流与耗尽区的杂质离子、位错缺陷以及沾污有关，这些因素影响了有效载流子寿命；也与本征载流子浓度 n_i 有关，因为 n_i 影响了非平衡载流子复合率，这使得体产生复合电流与温度主要呈指数关系。因此，体产生复合电流与偏压、温度的关系可以表示为：

$$J_{\text{gr}} = \frac{2q\left(\frac{2\pi}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} (m_e m_h)^{3/4} \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_s N_A N_D}{q N_A N_D}}}{\tau_{\text{eff}}} (K_0 T)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_g}{2K_0 T}\right) \sqrt{(V_{bi} - V)} \left[\exp\left(\frac{qV}{2K_0 T}\right) - 1\right] \quad (2.2.5)$$

2.2.3 界面复合电流

界面处的位错、缺陷也能形成复合中心，非平衡载流子在界面处也能发生复合过程，形成的复合电流称之为界面复合电流。界面处的复合过程属于间接复合过程，与界面态能级在能带中的位置有关。

界面复合过程主要发生在耗尽区 p^+n 结界面处，该界面两边处于耗尽状态，非平衡载流子的浓度与界面复合中心能级相关，与外加的偏压无关。界面复合过程可以看作是界面处非平衡载流子 ΔP_{in} 以大小为 S 的速度垂直到过界面。所以，界面复合电流密度可以理解为单位时间单位面积垂直到过界面的非平衡载流子数，那么就可以表示为：

$$J_{in} = qS \cdot \Delta P_{in} \quad (2.2.6)$$

复合速率 S 与复合中心密度、以及复合中心对空穴的俘获能力有关，可以表示为：

$$S = \sigma_p v_T N_{it} \quad (2.2.7)$$

其中 σ_p 为空穴俘获截面，复合中心俘获空穴的能力通过复合中心俘获截面来反映，而且电子和空穴的俘获截面是不相同的。载流子热运动速度 v_T 可以表示为：

$$v_T = \sqrt{3K_0 T / m^*} \quad (2.2.8)$$

界面处非平衡载流子主要是由于界面位错、晶格缺陷及沾污所引起的，与这些缺陷、位错形成的复合中心俘获电子或者空穴时所产生的界面接触势垒 ϕ_i 有关，界面非平衡载流子浓度可以表示为^[75]：

$$\Delta P_s = n_i \exp\left(\frac{\phi_i}{K_0 T}\right) \quad (2.2.9)$$

所以，界面复合电流密度可以表示为：

$$J_{in} = q\sigma v_{th} N_{it} n_i \exp\left(\frac{\phi_i}{K_0 T}\right) = 2q\sigma N_{it} \left(\frac{2\pi}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} (m_e m_h)^{\frac{3}{4}} \sqrt{3/m^*} (K_0 T)^2 \exp\left(\frac{\phi_i}{K_0 T}\right) \exp\left(-\frac{E_g}{2K_0 T}\right) \quad (2.2.10)$$

2.2.4 表面复合电流

探测器表面也会因为表面缺陷以及污染所形成的复合中心, 产生表面复合电流。而表面的状态是比较复杂的, 这导致了表面复合所产生的复合电流机制的多样性。比较常见的观点是, 假设表面的载流子耗尽, 这种状态与耗尽区里的界面状态比较相似, 表面复合电流可以表示为^[76]:

$$J_s = \frac{1}{2} q n_i S_0 \quad (2.2.11)$$

实际情况下, 由于表面电荷等因素的影响, 表面不是处于耗尽状态下的。此时, 可以假设表面所形成的缺陷能级靠近禁带中心位置, 那么表面势垒 ϕ_s 与准中性区的势垒大小是相等的, 理论上最大的表面复合电流密度可以表示为:

$$J_s \propto \exp\left(-\frac{E_g}{4K_0 T}\right) \quad (2.2.12)$$

而且研究发现, 这种表面复合电流与偏压的平方根是成线性关系的^[77], 所以其与温度、偏压的关系可以表示为:

$$J_s \propto \sqrt{\text{abs}(V)} \exp\left(-\frac{E_g}{4K_0 T}\right) \quad (2.2.13)$$

2.2.5 分路电流

分路电流与偏压是呈线性关系的, 又称欧姆电流。分路电流形成的主要原因包括以下几个方面: pn 结边缘的表面泄露; 沿着贯穿 pn 结的位错或者晶界的扩散尖峰; 微细裂纹、晶界以及晶体缺陷所造成的类似金属分流器的分流效应。

Vishnu Gopal 等人^[78]提出了一种模型计算体位错所引起的分路电阻, 他们假设体位错是一种晶格的不连续, 每一个体位错都是圆柱状, 其半径为晶格常数的整数倍, 其中心分布着空间电荷从而形成耗尽层, 所以体位错可以看作是一个高复合的区域, 并且每个体位错所形成的分流电阻与其所产生的复合电流相关, 如下列关系所示:

$$R_s = \frac{K_0 T}{q I_R} \quad (2.2.14)$$

这其中 I_R 是该位错形成的复合电流, 其表示式为:

$$I_R = q n_i s A_s \quad (2.2.15)$$

n_i 为本征载流子浓度, A_s 是该圆柱形位错对复合电流产生贡献的表面积, 其表示式为:

$$A_s = 2\pi r d \quad (2.2.16)$$

上式中, r 为位错半径(晶格常数的整数倍), d 为位错的长度, 当位错贯穿整个吸收层时, d 等于吸收层厚度。S 为该位错处复合速率, 其可以表式为:

$$S = \frac{\sqrt{\sigma_p \sigma_n} N_t (p+n)}{2n_i [\cosh(\frac{E_t - E_i}{K_0 T} - u_0) + \cosh(\frac{q U_s}{K_0 T} - u_0)]} \quad (2.2.17)$$

E_t 是该位错等效复合中心能级, N_t 为晶格不连续区域的态密度, p 、 n 分别为空穴和电子密度, σ_p 、 σ_n 分别为空穴和电子的俘获几率, $u_0 = \ln \sqrt{\frac{\sigma_p}{\sigma_n}}$, U_s 为该位错所形成的势垒。

因此, 与体位错有关的分路电流等于所有体位错所形成的复合电流之和。该分路电流与温度的关系, 主要表现为 n_i 与温度的关系。

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}} \propto VT^{3/2} \exp(-\frac{E_g}{2K_0 T}) \quad (2.2.18)$$

2.2.6 隧穿电流

在异质结器件暗电流中, 隧穿电流是一种常见的电流成分。根据输运过程的不同, 隧穿电流主要有两种机制, 包括带间隧穿(band to band tunnelling)和陷阱辅助隧穿(trap assisted tunneling)机制。带间隧穿是指少数载流子从 pn 结一边的价带隧穿到另一边的导带, 以 p^+n 单边突变结为例, 空穴带间隧穿几率可以表示为^[79]:

$$T_P = \exp \left\{ -E_g \sqrt{\frac{2m_p}{\hbar^2} \cdot \frac{2\epsilon_0 \epsilon_s}{q^2 N_D}} \left[\left(1 + \frac{E}{E_g} \right) \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \sqrt{\frac{E}{E_g - E}} \right) - \sqrt{\frac{E}{E_g}} \right] \right\} \quad (2.2.19)$$

式中 E 为空穴能量, m_p 为空穴有效质量。因此, 带间隧穿电流可以表示为:

$$J_{btb} = \frac{q}{4\hbar\pi^2} \sqrt{\frac{K_0 T E_g}{p^2}} \int_0^{E_{max}} T_P \frac{E}{2} dE \quad (2.2.20)$$

式中, $E_{max} = E_f + qV$, V 为外加偏压, P 为动量矩阵元。当采用三角形势垒近似时, 空间电荷区电场强度不随位置变化, 电场强度 $F = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_0 \epsilon_s}} (V_{bi} - V)$, 带间隧穿电流可以用如下公式表示^[80,81]:

$$J_{btb} = \frac{q^3 F V}{4\pi^2 \hbar^2} \sqrt{\frac{2m_p}{E_g}} \exp \left(-\frac{4\sqrt{2m_p} E_g^{\frac{3}{2}}}{3q\hbar F} \right) \quad (2.2.21)$$

陷阱辅助隧穿指的是少数载流子从 pn 结一边的准中性区占有陷阱态隧穿到

另一边的空态，或者是先隧穿到耗尽区中的界面陷阱态，然后跃迁到另一边的空态上。陷阱辅助隧穿电流与陷阱密度、陷阱态能级等因素有关，在一维近似的条件下可以用以下公式计算^[82]：

$$J_{\text{tat}} = qWN_tW_vN_v \quad (2.2.22)$$

式中 W 为耗尽区宽度， W_vN_v 表示空穴的隧穿速率，其表示式为：

$$W_vN_v = \frac{\pi^2 q F m_p M^2}{h^3 (E_g - E_t)} \exp \left[-\frac{8\pi\sqrt{2m_p}(E_g - E_t)^{3/2}}{3qhF} \right] \quad (2.2.23)$$

式中 M 是与陷阱势垒有关的矩阵元， E_t 表示的是陷阱能级与导带底的距离大小。

$$J_{\text{tat}} = \frac{\pi^2 q^2 W N_t F m_p M^2}{h^3 (E_g - E_t)} \exp \left[-\frac{8\pi\sqrt{2m_p}(E_g - E_t)^{3/2}}{3qhF} \right] \quad (2.2.24)$$

2.3 台面型 InGaAs 探测器暗电流分析

台面型 InGaAs 探测器的暗电流，一般主要包括扩散电流、产生复合电流、界面及表面复合电流、隧穿电流以及漏电流等等。如图 2.3.1 所示，这些电流产生自不同的位置，比如说，表面复合电流主要来源于光敏元台面的表面和侧表面，体产生复合电流主要来源于吸收层的耗尽区，漏电流主要来源于台面的表面处以及帽层与吸收层的界面处，隧穿电流主要来源于吸收层的耗尽区和吸收层界面，扩散电流则主要来源于吸收层耗尽区外的边缘区域。利用这些电流各自不同的温度、电压特性，拟合计算出各主要电流成分的参数并进行外推，从探测器性能进行反演，从而找出台面型探测器暗电流过大的主要来源，为从材料和器件工艺方面降低暗电流提供理论依据。

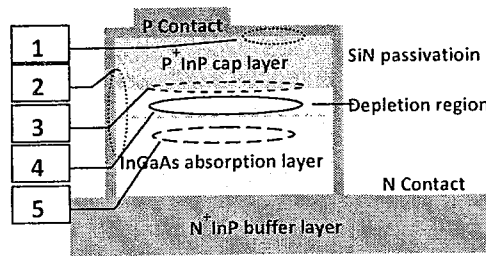


图 2.3.1 台面型探测器暗电流来源示意图：1.帽层表面；2.台面侧表面；3.帽层与吸收层界面；4.吸收层耗尽区；5.吸收层

Fig2.3.1. Schemes of dark current sources in mesa PIN detectors: 1.cap layer surface; 2.lateral surface of mesa; 3.cap layer and absorber interface; 4.depletion region in absorber; 5.absorption layer.

2.3.1 台面型 InGaAs 探测器制备

台面型探测器制备所用到的两种材料,是由中科院上海微系统与信息技术研究所提供的。两种外延材料都是采用气源分子束外延（GSMBE）技术在 InP 衬底上生长的，外延结构及参数如表 2.3.1 所示。

表 2.3.1 外延材料结构及参数

Tab2.3.1The structure and parameters epitaxial materials

材料	InP 帽层			InAlAs 帽层		
外延结构	cap layer	absorber	buffer layer	cap layer	absorber	buffer layer
材料	InP	In _{0.53} Ga _{0.47} As	InP	In _{0.52} Al _{0.48} As	In _{0.53} Ga _{0.47} As	In _{0.52} Al _{0.48} As
导电类型	P ⁺	n ⁻	N ⁺	P ⁺	n ⁻	N ⁻
厚度/μm	0.6	2.5	1.5	1	2.5	0.5
掺杂物质	Be	Si	Si	Be	Si	Si
掺杂浓度/cm ⁻³	4×10 ¹⁸	3×10 ¹⁶	3×10 ¹⁸	1×10 ¹⁸	3×10 ¹⁶	2×10 ¹⁸

两种台面型探测器结构相同，制备工艺都采用相同的常规台面工艺，等离子增强化学气态沉积(PECVD)技术沉积 SiN 薄膜作为掩膜，采用感应耦合等离子(ICP)刻蚀技术刻蚀出台面，之后沉积 SiN 薄膜作为钝化层进行钝化，然后是制作 P、N 电极，分别是离子束溅射的 Ti/Pt/Au 和热蒸发的 Cr/Au 合金电极，P 电极还需要高温快速退火减小接触电阻以实现欧姆接触，具体工艺流程如图 2.3.2 所示。同时，为了横向对比，采用吸收层掺杂浓度同样为 3×10¹⁶cm⁻³ 的平面型材料制备了平面型 InGaAs 探测器^[83]。

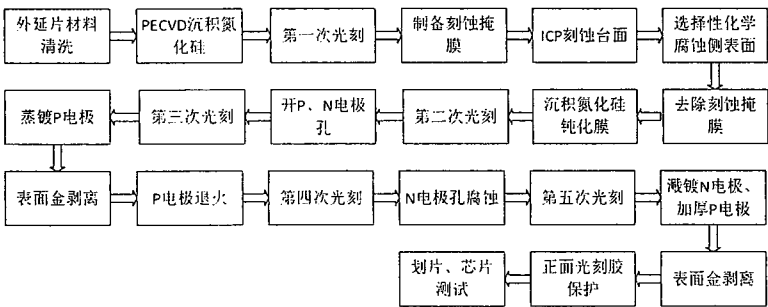


图 2.3.2 台面型 InGaAs 探测器常规制备工艺流程

Fig2.3.2The general fabrication process of mesa InGaAs detector

2.3.2 台面型 InGaAs 探测器 I-V 特性

I-V 特性是 pn 结的基本特性，反映了载流子的输运过程，是研究器件载流子输运特性的主要手段之一。探测器通过键压连接到测试杜瓦中，并抽真空到 0.5Pa 左右，测量时探测器置于接地的屏蔽盒中。I-V 测量系统采用 Keithley6430 亚 fA 远程源表，源表理论上测量极限是 fA 量级，能够精确测量到 pA 量级。

在常温条件下，两种材料所制备的台面型探测器典型 I-V 特性如图 2.3.3 所

示。相同工艺条件下, InP 帽层的材料所制备的台面型探测器的暗电流, 比 InAlAs 帽层的材料所制备探测器的暗电流大了一个量级以上。与平面型探测器相比较, 无论是窄禁带的 InP 帽层材料, 还是宽禁带的 InAlAs 帽层材料所制备的台面型探测器, 暗电流都要大得多, 说明了台面型探测器的暗电流与平面型探测器还是具有较大差异的, 包括暗电流的组成和产生的原因。

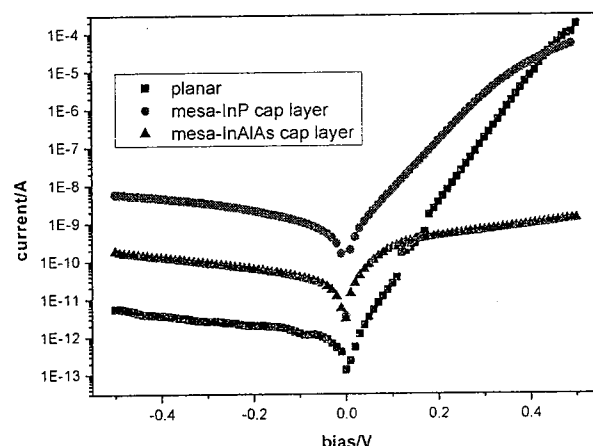


图 2.3.3 两种台面型 InGaAs 探测器及平面型探测器 295K 条件下典型 I-V 曲线

Fig2.3.3 The typical I-V curves of two kinds mesa InGaAs detectors and planar detector at 295K

为了分析计算探测器的暗电流, 进行了不同温度下的 I-V 测量。变温 I-V 测量过程中, 温度控制采用的是 LakeShore325 温度控制器, 温度变化范围从 295K 到 150K, 温度控制误差在 1K 左右。不同温度下, 台面型探测器 I-V 曲线如图 2.3.4、图 2.3.5 所示。为了精确测量小偏压下电流大小, 测量时的电流量程选择较小, 导致探测器正偏压下饱和, 但这不影响对暗电流的计算分析。

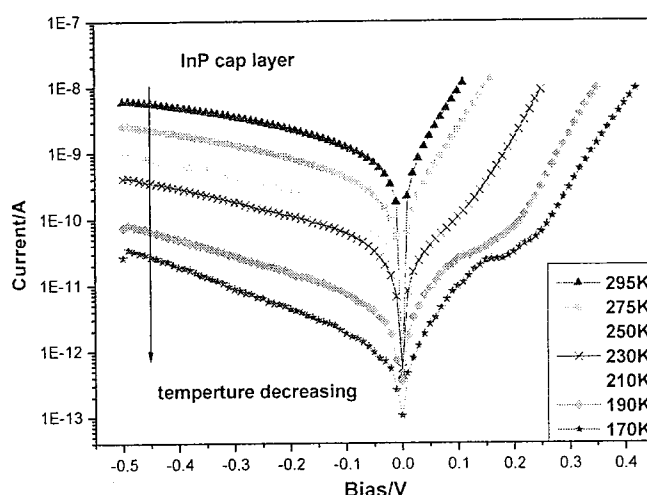


图 2.3.4 InP 帽层台面型探测器不同温度下 I-V 曲线

Fig2.3.4 The typical I-V curves of mesa detector with InP cap layer at different temperatures

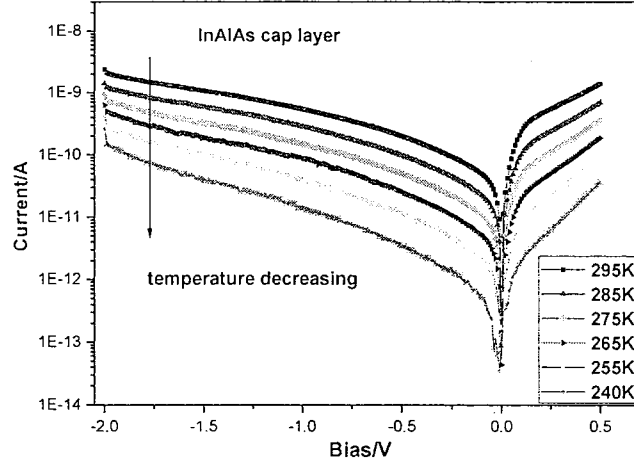


图 2.3.5 InAlAs 帽层台面型探测器不同温度下 I-V 曲线

Fig2.3.5 The typical I-V curves of mesa detector with InAlAs cap layer at different temperatures

2.3.3 InP 帽层的台面型 InGaAs 探测器暗电流成分

2.3.3.1 探测器隧穿电流与界面电流

从公式(2.2.21)和(2.2.24)可以看到，隧穿电流主要与禁带宽度和偏压相关，因此可以理论上估算隧穿电流的大小。300K 条件下 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料禁带宽度 $E_g = 0.75\text{eV}^{[84]}$ ，空穴有效质量 $m_p = 0.045m_0^{[85]}$ ，介电常数 $\epsilon_s = 13.9$ ，InGaAs 层掺杂浓度 $N_D = 3 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ ，带间隧穿和陷阱辅助隧穿电流大小如图 2.3.6 所示，陷阱辅助隧穿电流中的陷阱能级假设了一个浅能级和一个深能级，浅能级在价带顶距 E_i 能级 $1/4$ 的位置，深能级为等于 E_i 的极端情况。从图中可以看出，非极端情形下的带间隧穿和辅助隧穿电流在 $-0.5\text{V} \sim 0.5\text{V}$ 的偏压下非常小，与测量的电流大小相比可以忽略不计。所以，在热发射理论模型下，认为隧穿电流相比其他电流可以忽略，不会影响其他电流成分的分析计算。

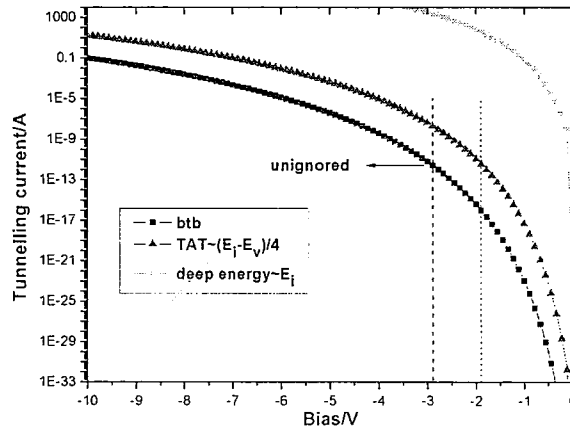


图 2.3.6 300K 条件下带间隧穿和辅助隧穿电流理论计算值

Fig2.3.6 The theoretic values of band-to-band and trap-assistant tunnelling current at 300K

根据 2.2 节各种电流的特性我们可以看出, 当外加偏压趋近零时, 暗电流以界面复合电流和隧穿电流为主。隧穿电流与温度的关系主要体现在禁带宽度 E_g 上; 而 E_g 随温度变化不是很灵敏^[86], 所以隧穿电流与温度的关系比较弱。可以近似认为零偏压下暗电流与温度的关系主要是界面复合电流所主导的, 从而通过不同温度下的零偏电流可以计算得到界面电流的参数。

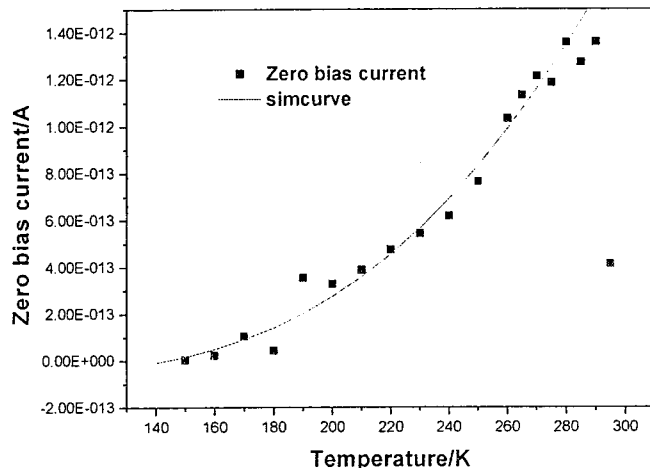


图 2.3.7 InP 帽层台面型探测器零偏电流与温度的关系

Fig2.3.7 The relationship between zero bias current of mesa detector with InP cap layer and temperature

根据公式(2.2.10)所揭示的界面复合电流与温度的关系, 对不同温度下的近零偏电流进行拟合计算, 如图 2.3.7 所示, 零偏电流与温度的关系可以表示为:

$$I_0(T) = 1.216 \times 10^{-16} T^2 \exp\left(-\frac{0.046\text{eV}}{K_0 T}\right) - 6.06 \times 10^{-14} \quad (2.3.1)$$

可以看到, 除去 295K 条件下电流偏离比较大以外, 其他温度条件下测量电流与计算值吻合的较好。对比公式(2.2.10), 可以得到界面势垒大小为 0.629eV, 界面复合电流相对于暗电流, 可以忽略不计。

2.3.3.2 探测器分路电流

由于分路电流与产生复合电流温度特性基本相同, 所以需要利用微分电阻特性来区分这两种电流。从各种电流与偏压的关系特性可以看出, 分路电流的微分电阻是与偏压无关的, 而其他电流的微分电阻与偏压是相关的, 探测器总的微分电阻可以看作是这些电流成分各自微分电阻并联所形成的。因此, 当总的微分电阻表现出与偏压无关的特性时, 可以认为起主要作用的就是分路电流。当总的微分电阻处于极大值时, 也就是

$$\frac{\partial R}{\partial V|_{V_e}} = 0 \quad (2.3.2)$$

在此极大值附近，可以近似认为微分电阻是与偏压无关的，所以极值 V_e 处的微分电阻可以近似认为就是分路电流引起的微分电阻 R_{sh} 。

总的微分电阻随偏压的变化如图 2.3.8 所示，近似认为微分电阻的极大值是分路电流所引起的微分电阻。根据公式(2.2.18)，分路电流与温度的关系类似于本征载流子浓度与温度的关系，所以分路电阻与温度的关系可以表示为：

$$R_{sh} \propto \exp\left(\frac{E_g}{2K_0T}\right) \quad (2.3.3)$$

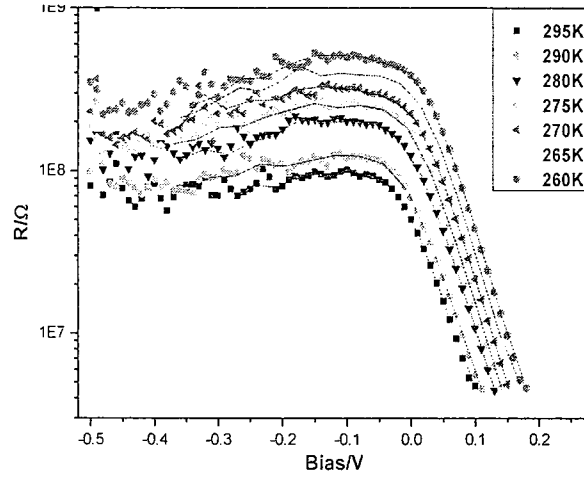


图 2.3.8 不同温度下的微分电阻

Fig2.3.8 The differential resistance of different temperatures

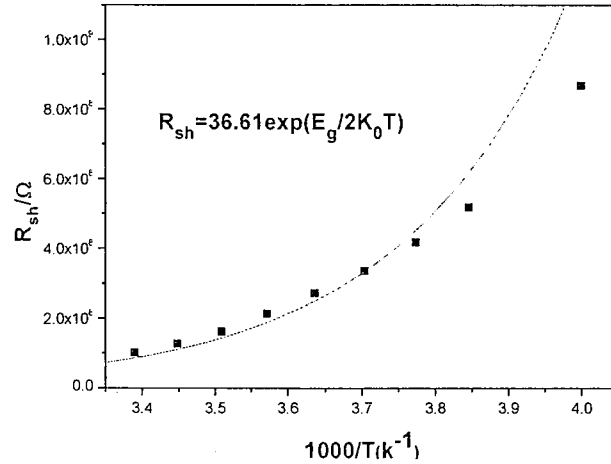


图 2.3.9 分路电阻与温度的关系

Fig2.3.9 The relationship between shunt resistance and temperature

如图 2.3.8 所示，当温度低于 260K 以后，测量的暗电流波动较大，由于探测器在近室温使用，因此分析时采用高于 260K 的数据。分路电阻与温度的关系基本与式(2.3.3)相同，如图 2.3.9 所示，根据测量的数据反演计算出分路电阻可

以表示为:

$$R_{sh} = 36.61 \exp\left(\frac{E_g}{2K_0T}\right) \quad (2.3.4)$$

E_g 为 InGaAs 的禁带宽度 0.75eV。结合公式(2.2.18)，分路电流大小可以表示为:

$$I_{sh} = 2.731 \times 10^{-2} V \left(-\frac{E_g}{2K_0T}\right) \quad (2.3.5)$$

2.3.3.3 探测器产生复合电流

为了能够提取产生复合电流的参数,就需要将产生复合电流与扩散电流区分开。扩散电流与产生复合电流大小的比值,根据公式(2.2.1)和(2.2.5)可以表示为:

$$\frac{I_{dif}}{I_{gr}} = \begin{cases} \frac{n_i \tau_{eff}}{N_D W} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \left[\exp\left(\frac{qV}{2K_0T}\right) - 1 \right] & \text{正向} \\ \frac{n_i \tau_{eff}}{N_D W} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}, & V \gg \frac{K_0T}{q}, \text{反向} \end{cases} \quad (2.3.6)$$

可以看出,在反向偏压下随着偏压的增大,耗尽区宽度 W 增大,扩散电流与产生复合电流大小的比值越来越小,所以当偏压增大到一定程度时,扩散电流相比于产生复合电流小到可以忽略不计,而这个偏压的大小与材料特性和温度有关。扩散电流和产生复合电流可以统一的表示为:

$$I \propto \exp\left(-\frac{E_a}{K_0T}\right) \quad (2.3.7)$$

式中 E_a 为激活能。InGaAs 材料禁带宽度取为 0.75eV 时,扩散电流对应的激活能为 0.75eV,而产生复合电流或者分路电流所对应的激活能则是 0.375eV。

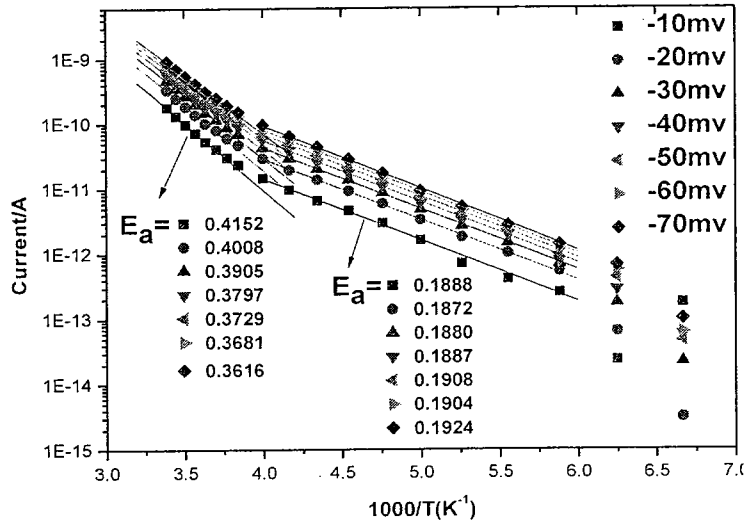


图 2.3.10 不同反偏压下的激活能

Fig2.3.10 The action energies of different reverse bias

如图 2.3.10 所示,随着反向偏压的增大,计算得到激活能越来越小,这说明

产生复合电流所占比例越来越大。当偏压为 50mV 时，计算得到的激活能为 0.373eV，比较接近于理论上的 0.375eV，说明在此偏压下是产生复合电流或者分路电流占主导的。因此，可以近似的认为在反偏 50mV 的条件下，激活能为 0.375eV，从而计算得到电流参数，产生复合电流与分路电流之和可以表示为：

$$I = 0.00163 \times \exp\left(-\frac{E_g}{2K_0T}\right) \quad (2.3.8)$$

另一方面，根据式(2.3.5)在反偏压 50mV 的条件下，分路电流大小与温度的关系可以表示为：

$$I_{sh} = 0.00137 \times \left(-\frac{E_g}{2K_0T}\right) \quad (2.3.9)$$

因此反偏 50mV 下产生复合电流与温度的关系可以表示为：

$$I_{gr} = 2.6 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{E_g}{2K_0T}\right) \quad (2.3.10)$$

将这个关系外推到所有偏压下，且根据表 2.3.1 的 InP 帽层材料参数计算，耗尽区接触势垒 $V_{bi} = 0.687V$ ，所以产生复合电流与温度、偏压的关系可以表示为：

$$I_{gr} = 4.901 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{E_g}{2K_0T}\right) \sqrt{V_{bi} - V} \left[\exp\left(\frac{qV}{2K_0T}\right) - 1\right] \quad (2.3.11)$$

对比式(2.2.5)，可以计算得到耗尽区载流子的有效寿命。当温度为 300K 时，本征载流子浓度 $n_i = 6.3 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ ，根据式(2.3.11)和式(2.2.5)，计算得到耗尽区有效载流子寿命 $\tau_{eff} = 0.81\mu s$ 。

2.3.3.4 探测器表面复合电流

从图 2.3.10 中还可以看到，随着温度的继续降低，计算得到的激活能减小到 0.189eV 左右，说明了在此低温下复合电流和分路电流已经不再是占主导的。根据 2.2 节可以知道，当禁带宽度取 InGaAs 的 0.75eV 时，表面复合电流的激活能为 0.188eV，与计算得到的激活能非常接近，而其他电流成分的激活能都不会处在这个值的附近。这说明随着温度降低到 240K 以下时，与温度关系更弱的表面复合电流慢慢地占据主导，而且主要产生于 InGaAs 的表面。从台面型探测器的结构可以看出，InGaAs 表面主要是在台面的侧表面位置以及和电极接触的位置。

因此，根据式(2.2.12)可以计算不同偏压下的表面复合电流的系数，如图 2.3.11 所示。计算结果表明，表面复合电流更倾向与偏压的 3/4 次方成线性关系。这种现象可能是由于低温条件下测量环境背景以及控温系统的干扰所造成的偏差，我们可以按照 1/2 次方关系来估算最小的表面复合电流。

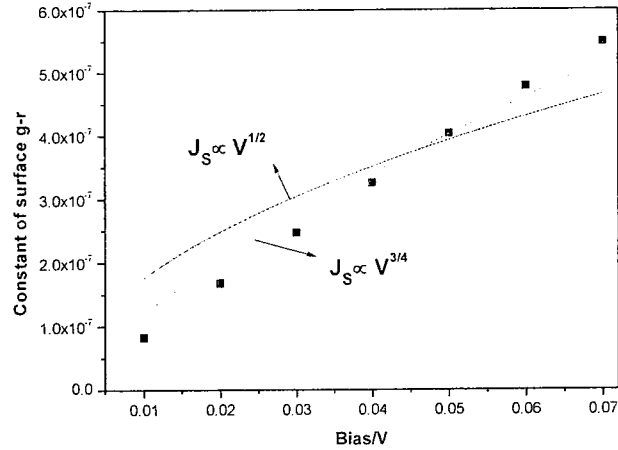


图 2.3.11 表面复合电流系数与偏压的关系

Fig2.3.11 The relationship between constant of surface g-r current and bias voltages

所以根据式(2.2.13)表面复合电流大小与偏压、温度的关系可以表示为:

$$I_s = 1.757 \times 10^{-6} \sqrt{\text{abs}(V)} \exp\left(-\frac{E_g}{4K_0T}\right) \quad (2.3.12)$$

2.3.3.5 探测器扩散电流

为了提取扩散电流的参数，同样也需要将扩散电流与产生复合电流区分开。如式(2.3.6)所示，随着正向偏压的增大，耗尽区宽度变窄，而且与非平衡载流子注入有关的项 $\left[\exp\left(\frac{qV}{2K_0T}\right) - 1\right]$ 也是增大的，所以扩散电流与产生复合电流的比值越来越大。当偏压增大到一定程度时，扩散电流远大于产生复合电流，产生复合电流小到可以忽略不计，所以计算得到的激活能接近于 0.75eV。

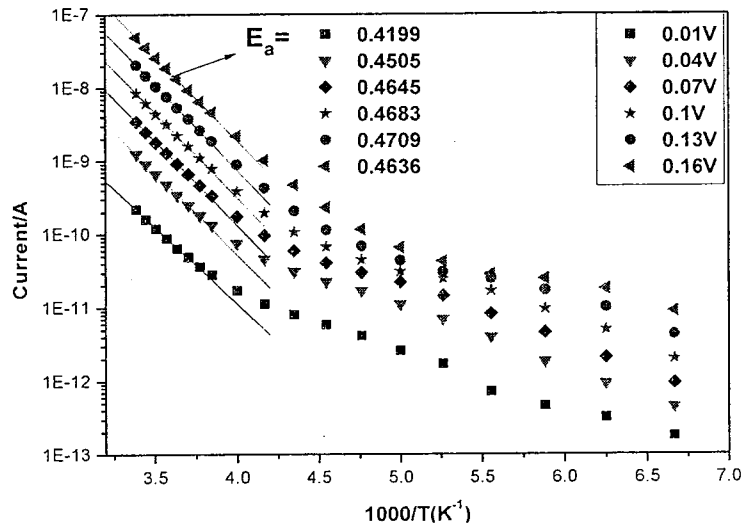


图 2.3.12 正偏压下的激活能

Fig2.3.12 The action energies of different forward bias

测量时因为量程选择较小，正向偏压较大时电流饱和，所以不方便利用偏压

特性计算激活能,但是可以利用温度特性来计算。如图 2.3.12 所示,计算得到的激活能处于 0.375eV 和 0.75eV 之间,说明电流主要是扩散电流、产生复合电流和分路电流共同作用。随着正偏压的增大,计算得到的激活能增大,但是当偏压超过 120mV 之后,激活能反而开始减小,在测量范围内扩散电流没有占据主导位置,可能是受到电极接触势垒或者分路电流过大的影响。因此,采用这种方法不能计算提取到扩散电流的参数,需要另外考虑其他方法。

从 2.2 节的各种电流特性可以看出,当偏压处在零偏附近时,扩散电流、产生复合电流以及分路电流都可以近似为是线性的,所以实际测量的 I-V 曲线在零偏附近区域,可以近似是呈线性的。因此,在零偏压附近的区域里,扩散电流的斜率可以表示为:

$$K_{\text{dif}} = K - K_{\text{gr}} - K_{\text{s}} - K_{\text{sh}} \quad (2.3.13)$$

式中 K 为测量曲线的斜率。另一方面,根据式(2.2.1)扩散电流在零偏位置作一级泰勒展开,零偏附近扩散电流可以表示为:

$$I_{\text{dif}} = \frac{qn_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{qV}{K_0 T} \quad (2.3.14)$$

所以,扩散电流大小可以近似的表示为:

$$I_{\text{dif}} = \frac{K_0 T}{q} K_{\text{dif}} [\exp\left(\frac{qV}{K_0 T}\right) - 1] \quad (2.3.15)$$

综合上述所提取的参数,InP 帽层的典型材料制备的台面型 InGaAs 探测器,在不同温度、偏压下的各种组成电流,可以根据公式 (2.3.5)、(2.3.11)、(2.3.12)、和(2.3.15)计算得到。

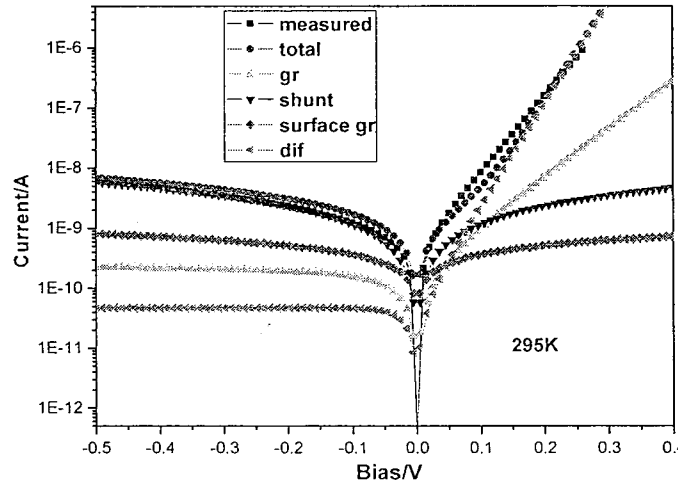


图 2.3.13(a) 295K 时 InP 帽层台面探测器暗电流

Fig2.3.13(a) The dark currents of mesa detector with InP cap layer at 295K

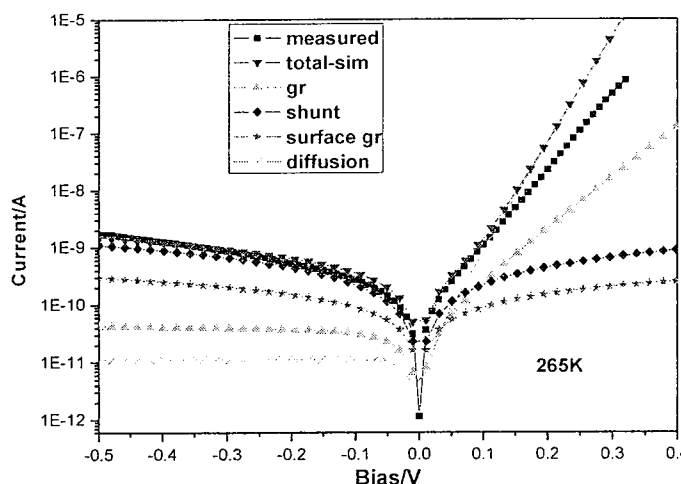


图 2.3.13(b) 265K 时 InP 帽层台面探测器暗电流

Fig2.3.13(b) The dark currents of mesa detector with InP cap layer at 265K

图 2.3.13(a)、(b)为在 InP 帽层的材料上采用常规台面型器件工艺所制备台面型 InGaAs 探测器在 295K、265K 温度下的 I-V 特性和电流组成成分。探测器暗电流主要是由分路电流、表面复合电流、以及产生复合电流所组成的，较大的分路电流和表面复合电流是探测器暗电流过大的主要原因。室温条件下，探测器主要受分路电流限制，随着温度的降低，分路电流减小的速度比表面复合电流要快，热电致冷条件下探测器主要受表面复合电流限制。从计算分析过程中的参数可以看出，分路电流以及表面复合电流主要是与 InGaAs 层相关的，InGaAs 层的表面和界面状态决定了探测器暗电流的水平。

2.3.4 InAlAs 帽层的台面型 InGaAs 探测器暗电流成分

InAlAs 帽层的材料制备的台面型 InGaAs 探测器，暗电流相比于 InP 帽层的台面型 InGaAs 探测器要小一个量级左右，在零偏压下暗电流如图 2.3.14 所示。探测器暗电流较小，而测量用的 Keithley6430 源表只能精确到 pA，导致零偏电流发生了漂移，电流大小也表现得没有规律。但是，从 InP 帽层的台面型探测器分析结果来看，界面复合中心引起的复合电流相对于总的暗电流是很小的，可以忽略不计，对其他电流成分的计算分析影响较小。

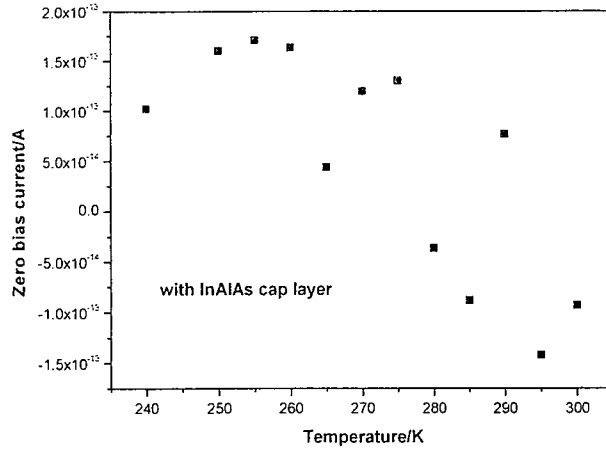


图 2.3.14 InAlAs 帽层的台面型探测器不同温度下的零偏电流

Fig2.3.14 The zero bias currents of mesa detector with InAlAs cap layer at different temperatures

不同温度下探测器暗电流的微分电阻如图 2.3.15 所示，当温度低于 260K 以后，微分电阻的波动比较大，温度越低波动越大，但是其变化的规律与较高温度条件下的变化规律相同。正偏压下微分电阻并不是像理想 pn 结那样单调减小，而是先增大然后再减小，就好像一个反向的 pn 结微分电阻的变化曲线。探测器正偏压下的暗电流如图 2.3.5 所示，电流曲线很明显的往下偏折，这是由于 P 电极接触所形成的肖特基结的影响而造成。在热电子发射模型下，这个反向的肖特基结电流可以表示为^[87]：

$$J_{st} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{K_0 T}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-qV_{st}}{K_0 T}\right)\right] \quad (2.3.16)$$

A^* 为有效里查孙常数， ϕ_B 为肖特基势垒， V_{st} 为肖特基结上的压降，外加正偏压下肖特基结处于反偏，肖特基结的压降近似等于外偏压，肖特基电流的微分电阻可以表示为：

$$R_{st} = \frac{K_0 T}{qA} (A^*)^{-1} T^{-2} \exp\left(\frac{q\phi_B}{K_0 T}\right) \exp\left(\frac{qV}{K_0 T}\right) \quad (2.3.17)$$

可以看到，肖特基电流的微分电阻随着正向偏压增大而增大，而 pn 结暗电流的微分电阻是随着正偏压增大而减小的，所以当探测器的正向微分电阻随偏压变化从减小转为增大时，说明此时占主导地位的肖特基电流，暗电流可以近似认为是肖特基电流。

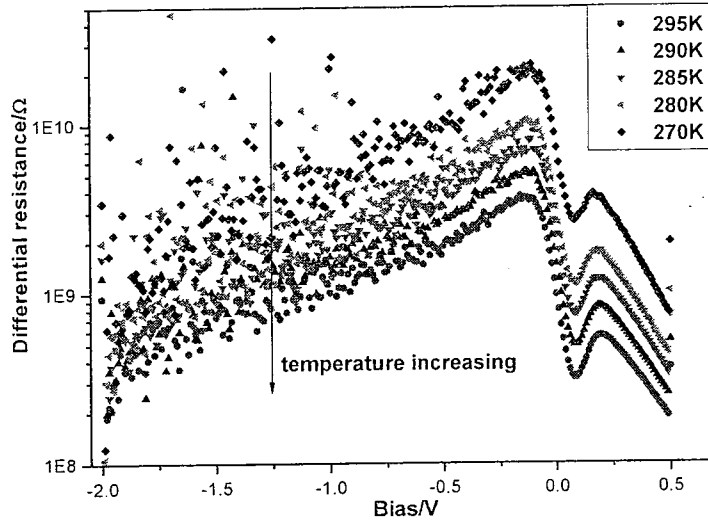


图 2.3.15 不同温度下的微分电阻

Fig2.3.15 The differential resistance of different temperatures

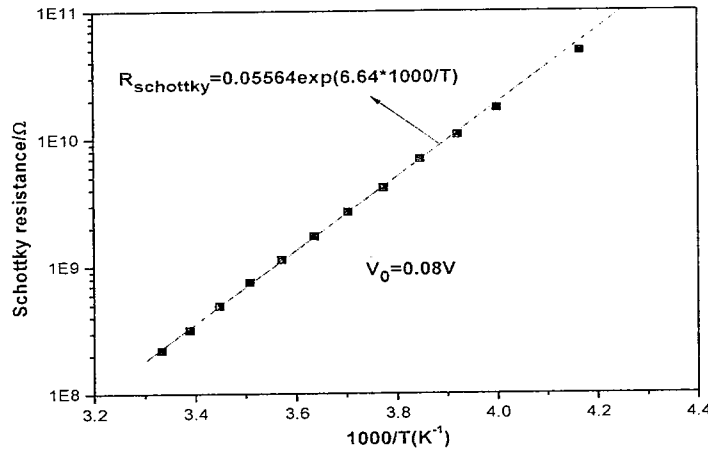


图 2.3.16 肖特基微分电阻与温度的关系

Fig2.3.16 The relationship between differential resistance of Schottky current and temperatures

当温度高于 260K 时，微分电阻在正偏 80mV 时发生转变，而温度低于 260K 之后，这个转变点有些许偏移，所以计算时以高于 260K 的数据为准。在正偏压 80mV 下肖特基微分电阻随温度的变化如图 2.3.16 所示。根据式(2.3.18)同一偏压下的肖特基微分电阻可以表示为：

$$R_{st} \propto \exp\left(q \frac{\phi_B + V_0}{k_0 T}\right) \quad (2.3.18)$$

式中 V_0 为正偏下微分电阻极小值时的偏压。计算结果与式(2.3.18)对比，可以得到肖特基势垒高度为 0.568eV，而肖特基电流与温度、偏压的关系可以表示为：

$$I_{st} = 0.467 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{k_0 T}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-qV_{st}}{k_0 T}\right)\right] \quad (2.3.19)$$

从上式可以发现，肖特基电流的微分电阻是与偏压相关的，所以探测器反偏

压下微分电阻的极大值仍可以近似等于 pn 结分路电阻的大小。利用插值和外推使 R-V 曲线变得平滑，然后选取其极大值。不同温度下的分路电阻如图 2.3.17 所示，可以看到提取的分路电阻与温度的关系基本上满足公式(2.3.3)，温度较低时出现一定程度的偏差，计算时以温度高于 260K 时的微分电阻为准。根据公式(2.2.18)分路电流大小可以表示为：

$$I_{sh} = 5.068 \times 10^{-4} V_d \exp\left(-\frac{E_g}{2K_0 T}\right) \quad (2.3.20)$$

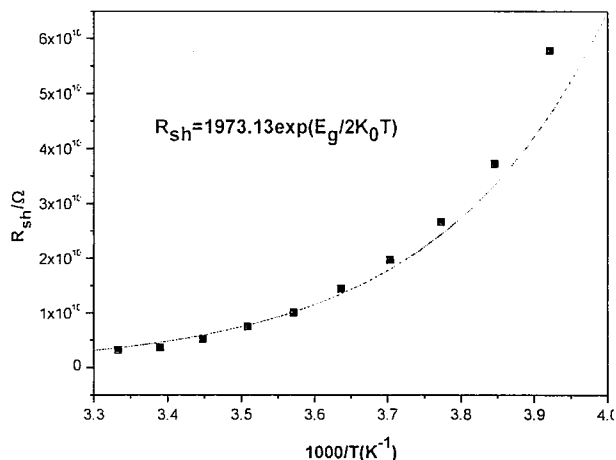


图 2.3.17 分路电阻与温度的关系

Fig2.3.17 The relationship between shunt resistance and temperature

利用提取的肖特基电流和 pn 结分路电流的参数，可以计算得到不同温度下的两种电流大小。反向偏压下，与测量的暗电流相比较，暗电流随偏压增大而增大的幅度，大于偏压的一次方关系，而产生复合、扩散电流等与偏压的关系都比一次方还要弱，因此，在 InAlAs 帽层材料体系中的暗电流机制与 InP 帽层材料体系中是不同的。图 2.3.18 为 InAlAs 帽层材料 pn 结的能带结构示意图，反向偏压下少数载流子热发射受势垒影响而被抑制，而通过界面陷阱态的隧穿更有可能成为其主导的输运方式。

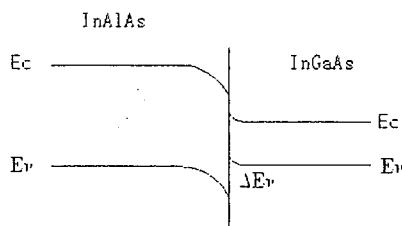


图 2.3.18 InAlAs 帽层材料能带结构示意图

Fig2.3.18 The structure scheme of energy band of material with InAlAs cap layer

当反向偏压下电流以隧穿电流为主时, 根据(2.2.24)陷阱辅助隧穿电流与偏压的关系可以表示为:

$$I_{\text{tun}} = a * (V_{\text{bi}} - V) \exp \left(-\frac{b}{\sqrt{V_{\text{bi}} - V}} \right) \quad (2.3.21)$$

式中 a , b 为常数。在 295K 温度下, 反向偏压下辅助隧穿电流通过计算可以表示为:

$$I_{\text{tun}} = 2.11 \times 10^{-8} (V_{\text{bi}} - V) \exp \left(-\frac{6.01}{\sqrt{V_{\text{bi}} - V}} \right) \quad (2.3.22)$$

所以, 可以计算得到陷阱能级为价带上 0.105eV 的位置。

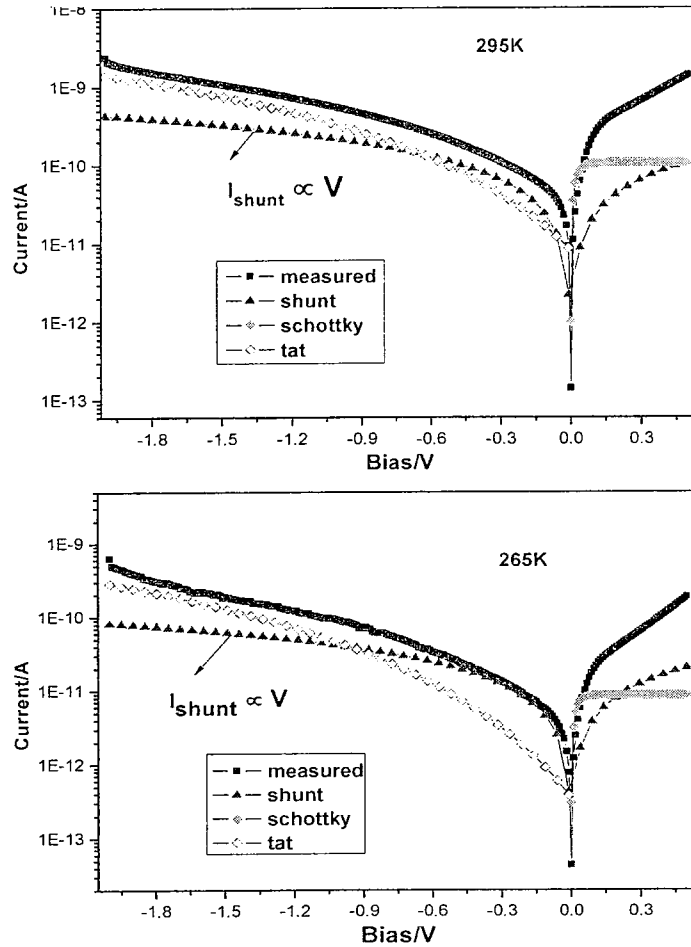


图 2.3.19 295K、265K 下 InAlAs 帽层台面探测器暗电流

Fig2.3.19 The dark currents of mesa detector with InAlAs cap layer at 295K and 265K

如图 2.3.19 所示, 通过计算得到了 pn 结分路电流、隧穿电流以及正向偏压下的肖特基电流的参数。可以看到, InAlAs 帽层的台面探测器分路电流和辅助隧穿电流是起主导作用的, 相比于 InP 帽层的台面探测器, 其分路电流要小了接近一个半量级, 说明禁带宽度较大的帽层能够形成较高的势垒, 从而限制界面以

及表面位错所导致的漏电，降低探测器的暗电流水平。在实现了宽禁带材料 P 型欧姆接触的前提下，利用宽禁带形成较高的势垒限制探测器的漏电，将是实现低暗电流台面型探测器的有效途径。

2.3.5 台面型 InGaAs 探测器侧面电流密度和少子寿命

从前面两节的计算分析可以知道，台面型 InGaAs 探测器暗电流是由吸收层界面和表面漏电所导致的分路电流及表面复合电流起主导作用的，所以 InGaAs 层与帽层的界面以及裸露的侧表面状态是降低探测器暗电流的关键之一。台面型探测器的侧表面状态与制备工艺直接相关，制备工艺的选择直接影响了侧表面状态的好坏。因此，台面型探测器侧表面状态的表征，对于优化台面型探测器制备工艺，具有十分重要的意义。能够比较直观地说明侧表面状态的参数，就是侧表面电流密度以及少子寿命。

为了得到侧表面电流密度和少子寿命，将探测器暗电流分为两类，包括侧表面电流和体电流。体电流 I_B 包含了 pn 结形成产生复合以及扩散电流、吸收层与帽层界面所产生的界面电流、帽层表面所产生的表面电流等电流，是与 pn 结面积 A_j 成正比的电流，而侧表面电流 I_L 包含了侧表面的漏电以及表面复合电流，与侧表面的面积有关。探测器暗电流 I_D 可以表示为：

$$I_D = I_B + I_L \quad (2.3.23)$$

那么探测器微分电阻就可以看作是体电流和侧表面电流微分电阻的并联：

$$\frac{1}{R_D} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_L} \quad (2.3.24)$$

探测器等效电流密度可以表示为：

$$\frac{1}{R_D A_j} = \frac{1}{R_B A_j} + \frac{1}{R_L A_j} = \frac{1}{R_B A_j} + \frac{A_L}{A_j} \frac{1}{R_L A_L} \quad (2.3.25)$$

式中 A_L 为产生侧表面电流的表面积。当探测器光敏元为边长 a 的方形光敏元，台面高度为 d ，侧表面的少子扩散长度为 L_p ，其产生侧表面电流的表面积可以表示为：

$$A_L = \begin{cases} [a + 2(L_p - d)]^2 - a^2 + 4ad & L_p > d \\ 4ad & L_p < d \end{cases} \quad (2.3.26)$$

而 pn 结面积 $A_j = a^2$ ，光敏元侧面的周长 $P = 4a$ ，代入式(2.3.23)中，探测器等效电流密度表示为：

$$\frac{1}{R_D A_j} = \begin{cases} \frac{(L_p - d)^2}{4} \frac{1}{R_L A_L} \left(\frac{P}{A_j}\right)^2 + \frac{L_p}{R_L A_L} \frac{P}{A_j} + \frac{1}{R_B A_j} & L_p > d \\ \frac{d}{R_L A_L} \frac{P}{A_j} + \frac{1}{R_B A_j} & L_p < d \end{cases} \quad (2.3.27)$$

上式中， $\frac{1}{R_B A_j}$ 等于等效体电流密度， $\frac{1}{R_L A_L}$ 等于等效侧表面电流密度。由上式可以看出，探测器暗电流密度是 $\frac{P}{A_j}$ 的函数，通过探测器暗电流密度与 $\frac{P}{A_j}$ 关系，可以计算得到侧表面电流密度 $\frac{1}{R_L A_L}$ 和少子扩散长度 L_p 的大小。

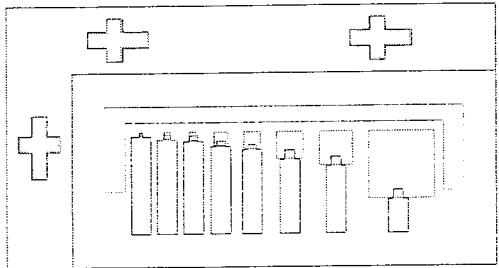


图 2.3.20 不同边长的探测器测试结构

Fig2.3.20 The test structure of detectors with different side length

表 2.3.2 不同边长的探测器测试结构

Tab2.3.2 The test structure of detectors with different side length

边长 $a(\mu\text{m})$	10	20	25	40	50	80	100	200
面积 $A_j(\mu\text{m}^2)$	100	400	625	1600	2500	6400	10000	40000
$P/A_j(\text{cm}^{-1})$	4000	2000	1600	1000	800	500	400	200

如图 2.3.20 所示，设计了一组不同边长的方形探测器测试结构，探测器的尺寸等参数如表 2.3.2 所示。制备方法采用的是常规台面工艺，探测器台面高度约为 $1\mu\text{m}$ 。制备完成后测量了每一元探测器的 I-V 特性，在室温条件， -20mV 偏压下，探测器微分电阻和电流密度与 $\frac{P}{A_j}$ 的关系如图 2.3.21 所示。可以看出探测器等效电流密度 $\frac{1}{R_D A_j}$ 以及测量得到电流密度与 $\frac{P}{A_j}$ 的关系，基本与式(2.3.27)相吻合。通过计算得到侧表面少子扩散长度约为 $5.6\mu\text{m}$ ，如果空穴扩散系数取为 $7.5\text{cm}^2/\text{s}$ ，那么侧表面少子寿命约为 41.8ns ，比前面计算得到的耗尽区载流子寿命要小一个量级，侧表面的电流密度约为 $8.86 \times 10^{-6} \text{A}/\text{cm}^2$ 。该研究结果表明，侧面是探测器暗电流的重要来源，台面结探测器表面和侧面工艺优化是降低探测器暗电流的重要研究方向之一。

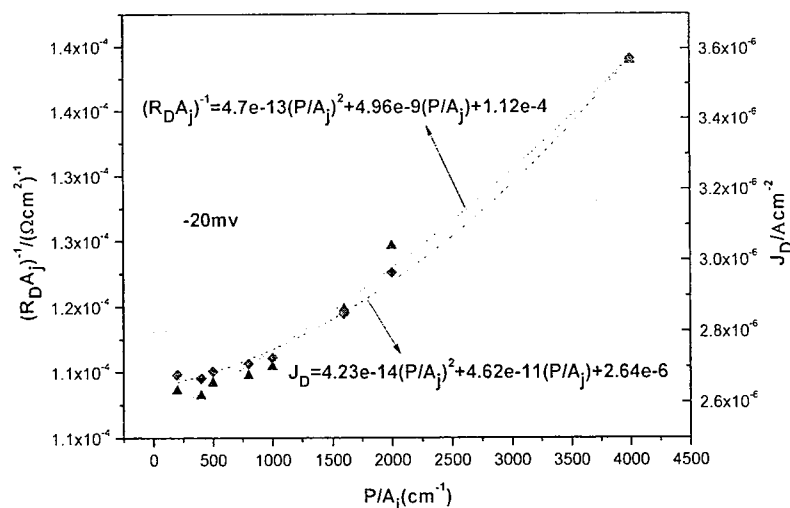


图 2.3.21 室温-20mV 下电流密度与的关系

Fig2.3.21 The relationship between current density and P/A_j under -20mV at room temperature

2.4 本章小结

利用台面型 InGaAs 探测器暗电流各成分具有各自不同的温度、电压特性, 从探测器的电流-电压特性中进行反演, 计算出了各主要电流成分, 明确了台面型 InGaAs 探测器暗电流过大的主要来源, 为降低台面型探测器暗电流提供理论依据。对于 InP 帽层的常规台面型工艺制备的 InGaAs 探测器, 其暗电流以表面复合电流和分路电流为主, 主要来源于吸收层的界面处和台面的侧表面; 而采用宽禁带的 InAlAs 作为帽层的 InGaAs 探测器, 由于 InAlAs 帽层形成了成较高的势垒, 其漏电引起的分路电流得到了有效的抑制。设计并制备了台面型 InGaAs 探测器测试结构, 分析了探测器的暗电流与光敏元周长面积比的关系, 结果表明台面侧表面的少子寿命比耗尽区有效载流子寿命减小了一个量级, 台面结探测器表面和侧面工艺优化是降低探测器暗电流的重要研究方向之一。

3 基于暗电流的台面型 InGaAs 探测器器件工艺优化

3.1 引言

探测器的漏电引起的分路电流以及表面复合电流是台面型 InGaAs 探测器暗电流过大的主要原因，表面状态是影响探测器暗电流的关键因素之一。台面型 InGaAs 探测器的台面是通过 ICP 刻蚀制作的，刻蚀造成了表面晶格不完整、化学键断裂、杂质污染或者元素缺失等损伤，较高的表面态密度和表面复合制约着探测器暗电流水平，是急需解决的难点之一。有效地减小刻蚀造成的晶格缺陷、悬挂键等，对于降低探测器暗电流、噪声和多元串音，提高探测器稳定性，具有十分重要的意义。

本章研究的目的是从器件工艺上，通过引入特殊的处理方法或者优化工艺流程顺序，减小刻蚀引入的晶格缺陷、悬挂键等损伤的影响，抑制侧表面的漏电和表面复合电流，从而降低探测器暗电流，提高探测器均匀性和稳定性。

3.2 热处理方法对暗电流的影响

台面工艺是采用离子刻蚀的方法制作台面，具有很好的均匀性以及各向异性，能够实现选择性刻蚀，并且易于控制；但是同时，会在刻蚀面引入各种损伤，包括间隙或者空位式缺陷、表面悬挂键以及位错等，这些损伤导致表面具有很大的态密度，表面复合电流和漏电增加，不利于实现探测器的低暗电流。

为了研究减小侧表面漏电和表面复合电流的方法，首先需要了解造成表面漏电和复合电流比较大的原因。在采用离子刻蚀的情况，有两个原因可能会导致表面漏电和复合电流比较大。一个原因是刻蚀导致表面层 V 族元素 As 或者 P 的缺失，而 V 族元素在晶格中充当受主的地位，当元素由于刻蚀向表面逸散造成缺失时，其所受的电子将释放到表面，导致表面电子电导增大，从而表面的漏电流增加^[88]；还有一个原因就是离子刻蚀时由于电荷的转移，造成刻蚀表面电荷堆积，表面的势垒降低，使得表面的复合电流增加，而且当这种堆积的电荷在位错周围时，点位错会扩展为位错列阵，形成位错空间电荷管道^[89]，产生较大的表面漏电。

基于上述可能造成表面漏电和复合电流偏大的原因，尝试采用了高温热处理的方法，以减小刻蚀造成的损伤。这种高温的热处理常在离子注入后用来释放晶格应力和修复晶格^[90]，在离子刻蚀完成后，对刻蚀表面进行高温的热处理，能

够使得刻蚀残留反应物进一步挥发，减小残留物所造成的沾污，同时还能够释放刻蚀损伤产生的晶格应力，而且能使表面积累的电荷发生转移，以热电子发射的形式得以释放。

3.2.1 探测器制备

探测器制备所用 M37 材料的参数如表 3.2.1 所示，新的制备工艺是在 ICP 刻蚀台面完成后，在氮气保护气氛、温度为 400℃的条件下烘烤 20 分钟，然后再按常规工艺流程进行后续流程，具体的工艺流程如图 3.2.1 所示。采用常规工艺流程和加入了热处理过程的新工艺流程，在同一种外延材料上，制备了两组同样尺寸的探测器。测量了探测器的 I-V 特性、响应和噪声特性，对比分析了热处理过程对降低暗电流的作用。

表 3.2.1 外延材料结构及参数

Tab3.2.1 The structure and parameters epitaxial materials

外延层	导电类型	厚度/ μm	掺杂物质	掺杂浓度/ cm^{-3}
InP	P^+	0.6	Be	2×10^{18}
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	n^-	2.5	Si	3×10^{16}
InP buffer	N^+	1.5	Si	2×10^{18}

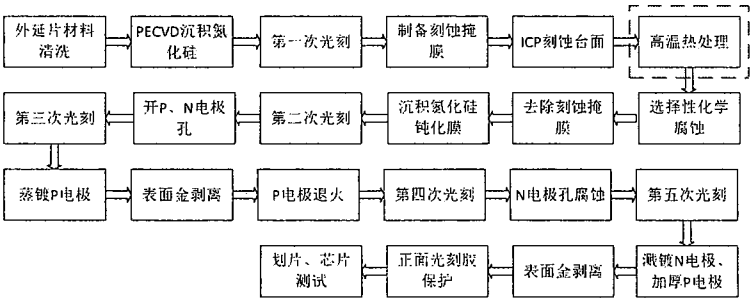


图 3.2.1 加入了热处理的制备工艺流程

Fig3.2.1 The process of fabrication with thermal treatment

3.2.2 测量结果和分析

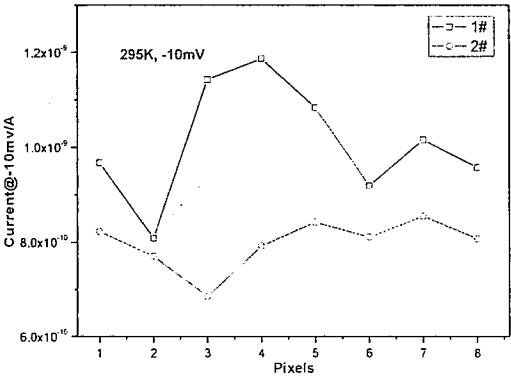


图 3.2.2 295K@-10mv 探测器的暗电流：(1#)常规工艺，(2#)有热处理的工艺

Fig3.2.2 The dark currents of detectors under -10mv at 295K: (1#)the general process, (2#)the

process with thermal treatment

采用两种工艺流程分别制备了 8 元探测器，常规工艺所制备的标记为 1#，加入了热处理过程的工艺所制备的探测器标记为 2#。在室温、-10mV 条件下两组探测器的暗电流如图 3.2.2 所示，可以看到有热处理过程的探测器暗电流比常规工艺所制备的探测器暗电流要小，平均减小了 19.8%，说明热处理过程能够一定程度的降低暗电流，但是表面漏电和复合电流仍然起主导作用，探测器暗电流仍处在一个较高的水平。

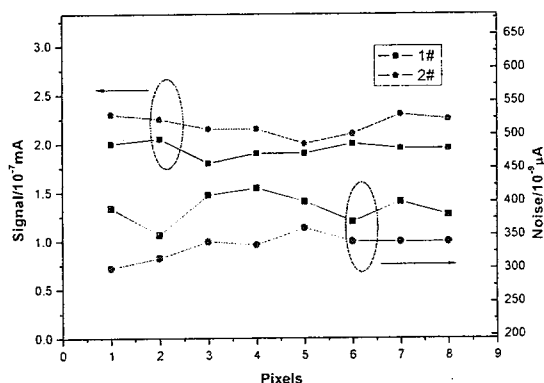


图 3.2.3 295K 探测器的黑体信号和噪声：(1#)常规工艺，(2#)有热处理的工艺

Fig3.2.3 The signal of blackbody and noise of detectors at 295K: (1#)the general process, (2#)the process with thermal treatment

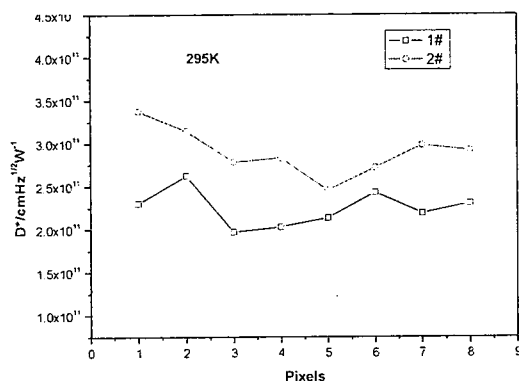


图 3.2.4 295K 探测器的探测率：(1#)常规工艺，(2#)有热处理的工艺

Fig3.2.3 The detectivity of detectors at 295K: (1#)the general process, (2#)the process with thermal treatment

295K 温度下，两组探测器黑体信号和噪声的大小如图 3.2.3 所示，有热处理过程的探测器黑体信号比常规工艺的要大，而噪声比常规工艺的要小，说明了热处理过程能够有效降低探测器暗电流，并不会对 pn 结造成其他不良影响，比如杂质的二次扩散以及 pn 结的弱化等等。根据测量得到的信号和噪声，计算得到探测器的探测率大小如图 3.2.4 所示，有热处理工艺的探测器探测率比常规的平

均要增大 29.7%。

3.3 室温硫化对暗电流的影响

InGaAs 吸收层的刻蚀表面, 存在大量由于刻蚀导致的悬挂键, 这些悬挂键可以看作是带电中心, 是表面复合电流的一个重要来源。另外, InGaAs 的表面态与其表面所吸附的元素物质以及表面化学反应有密切的关系。清洁的 InGaAs 表面态很小, 不存在费米能级钉扎, 禁带中不存在本征表面态能级^[91]。表面的反应物影响着表面势垒高度, 能级的弯曲在与空气接触、氧气接触和金属接触的三种情况下是不同的。自然状态下 InGaAs 表面主要吸附的是氧元素, 表面原子与氧元素会反应生产氧化物, 如 In_2O_3 、 Ga_2O_3 和 As_2O_3 等, 这些氧化物就是表面态产生的主要原因之一^[92,93]。

采用 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 进行表面硫化是隔离表面氧接触和去除表面氧元素的常用手段, 唐恒敬^[94]等人也进行过表面硫化的试验。将样品置于 60°C 的 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液中, 持续 30 分钟, 然后将表面冲洗干净, XPS 测试发现硫化能够有效去除表面的氧化层, 并且在表面形成 S 键^[95,96]。由于湿气或者氧渗透的影响, 硫化的效果会慢慢的衰退, 所以硫化之后再沉积氮化硅薄膜进行钝化, 具体的工艺流程如图 3.3.1 所示。

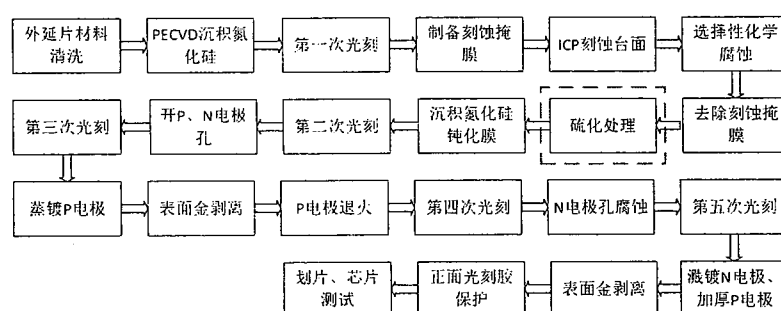


图 3.3.1 有硫化处理的制备工艺流程

Fig3.2.1 The process of fabrication with sulfur treatment

采用常规工艺和加入了 60°C 硫化的工艺, 在同一种外延材料上制备了两组探测器, 光敏元为 $50\mu\text{m}\times 50\mu\text{m}$, 制备所采用的材料参数如表 3.2.2 所示。

表 3.2.2 外延材料结构及参数

Tab3.2.2 The structure and parameters epitaxial materials

外延层	导电类型	厚度/ μm	掺杂物质	掺杂浓度/ cm^{-3}
InP	P^+	0.6	Be	2×10^{18}
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	n^-	2.0	Si	7×10^{16}
InP buffer	N^+	1.5	Si	2×10^{18}

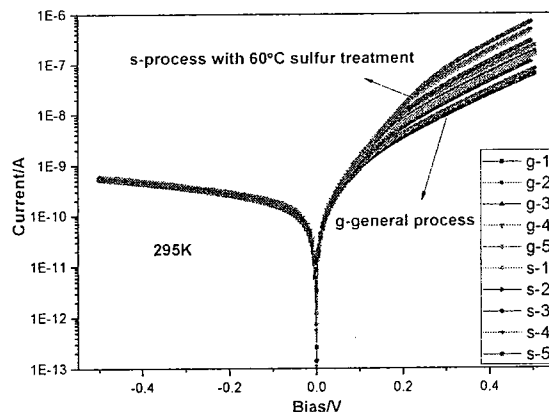


图 3.3.2 295K 不同工艺探测器的 I-V 曲线: (g)常规工艺, (s)60°C 硫化的工艺
Fig3.3.2 The I-V curves of detectors with different process at 295K: (g)the general process, (s)the process with 60°C sulfur treatment

295K 温度下, 探测器的 I-V 曲线如图 3.3.2 所示, 有 60°C 硫化工艺的探测器暗电流降低并不明显, 可能是因为表面硫化后采用 PECVD 沉积氮化硅薄膜时, 沉积过程的高温或者离子轰击破坏了表面 S 键, 导致表面悬挂键增多, 对表面复合和漏电的抑制效果变差。基于这种情况, 需要减小氮化硅沉积的离子能量以及沉积的温度, 才能保证硫化处理的效果不被破坏, M. R. Ravi 等人通过实验也证实了低温沉积氮化硅, 暗电流比高温沉积时要低^[97]。但是, 低温沉积氮化硅致密性降低, 对于湿气的防护减弱, 导致探测器稳定性变差。

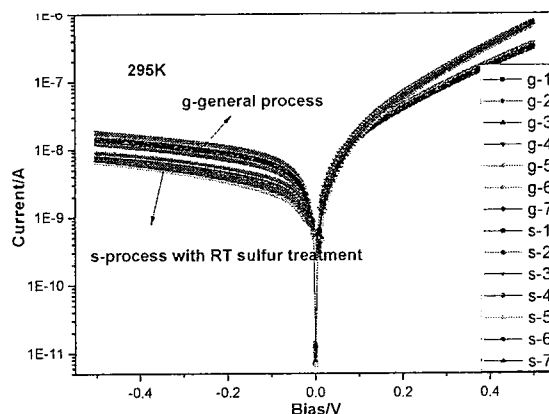


图 3.3.3 295K 不同工艺探测器的 I-V 曲线: (g)常规工艺, (s)室温硫化的工艺
Fig3.3.3 The I-V curves of detectors with different process at 295K: (g)the general process, (s)the process with RT sulfur treatment

采用腐蚀去除氧化层、室温条件下进行硫化的方法, 在同一种材料上采用常规工艺流程制备了光敏元为 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 的探测器, 在 295K 温度下, 两组探测器的 I-V 曲线如图 3.3.3 所示, 室温下硫化工艺的探测器暗电流比常规工艺减

小了近一半,说明室温下硫化和氮化硅钝化能够有效的减少表面悬挂键,一定程度上降低了探测器暗电流。可能的原因是在室温条件下硫化,在表面形成一层特殊的原子层,隔离表面与空气中氧的接触,但是低温条件使得小部分 S 原子与 InGaAs 发生键合,当进行高温沉积氮化硅时,一部分 S 可能会与表面元素在高温下发生二次硫化,形成较强的化学键,从而达到减小表面悬挂键的作用,抑制表面复合和漏电。

3.4 提高成品率的台面型 InGaAs 探测器工艺改进

台面型 InGaAs 探测器常规工艺制备过程中,在氮化硅钝化完成后,P 型电极需要高温快速退火以实现欧姆接触。当在沉积氮化硅薄膜之前,材料表面存在一些无法祛除的颗粒状沾污,在退火的时候由于应力或者膨胀等原因,这些颗粒状沾污处氮化硅薄膜会产生形变,严重的会导致氮化硅薄膜破裂,如图 3.4.1 所示。

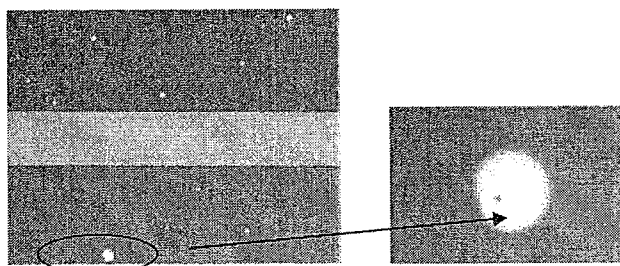


图 3.4.1 表面有沾污时退火后氮化硅状态

Fig3.4.1 The status of SiN after annealing with surface dust pollution

这种状态的氮化硅薄膜的钝化作用被减弱,对探测器的表面漏电和复合电流的抑制作用变差,而且探测器的均匀性也将降低,对于长线列或者面阵的探测器阵列,氮化硅薄膜钝化效果的影响更加突出,并且会降低制备探测器阵列的成品率。为了能够消除表面沾污在高温退火过程中对钝化膜造成的影响,从而保证钝化膜的钝化效果,并且提高制备探测器阵列的成品率,将 P 电极的生长和退火过程置于钝化步骤之前,表面沾污不会影响钝化膜的沉积生长,这样钝化膜不会因退火而发生衰退,这对于制备长线列或者面阵探测器具有重要意义。

先制作 P 电极再钝化的具体工艺流程如图 3.4.2 所示,采用这个流程分别制备了响应截止 $1.7\mu\text{m}$ 和 $2.4\mu\text{m}$ 的探测器,并采用常规工艺在相同的材料上制备了相同的探测器,探测器光敏元均为 $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$,测量并对比分析了探测器的 I-V 特性和响应光谱。

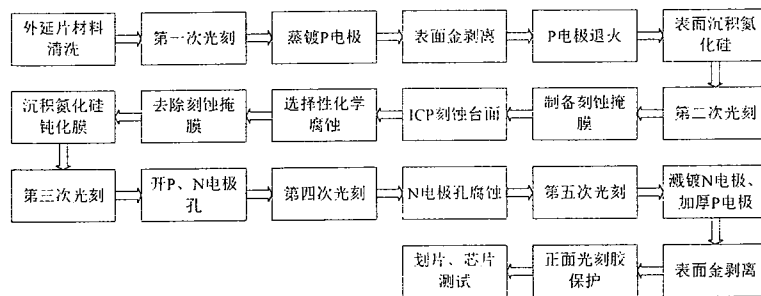


图 3.4.2 先退火后钝化的制备工艺流程图

Fig3.2.1 The process of fabrication with thermal annealing of p-type electrode before silicon nitride passivating

对于截止波长 $1.7\mu\text{m}$ 的探测器，两种不同工艺流程制备的探测器 I-V 曲线和响应光谱如图 3.4.3 所示，两种探测器暗电流基本没有差别，说明先退火后钝化的流程顺序没有降低氮化硅薄膜的钝化效果。另外，采用先退火后钝化流程的探测器在短波方向响应增大，可能是因为氮化硅薄膜没有经过退火过程，与常规工艺下的折射率和介电常数有所差异，导致不同波长下的透过率产生变化^[98]。

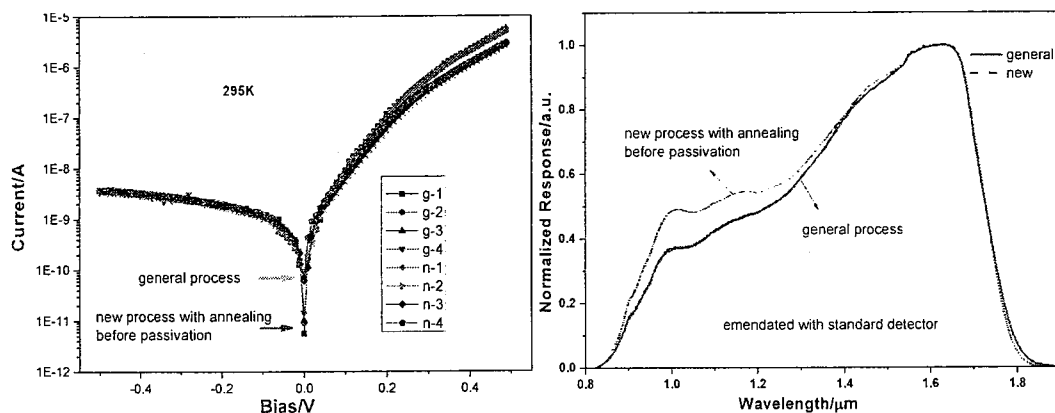
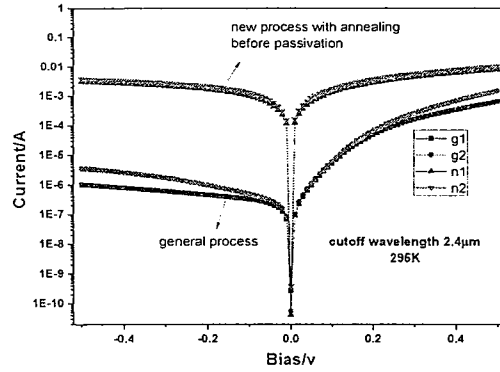

 图 3.4.3 截止 $1.7\mu\text{m}$ 的探测器 I-V 曲线和响应光谱

 Fig3.4.3 The I-V curves and response spectrum of detectors with cutoff wavelength at $1.7\mu\text{m}$

截止波长 $2.4\mu\text{m}$ 的两种不同流程所制备的探测器 I-V 曲线如图 3.4.4 所示，采用先退火后钝化流程制备的探测器表现出与电阻相似的电流特性，经测试排除了外部电路短路的可能性，所以可能产生这种现象的原因有两个：一个可能是高温退火过程中，P 电极的金属元素扩散渗透到结区位置，形成贯穿 pn 结的漏电通道，从而导致探测器呈类似电阻特性；另外一个原因可能是高温退火导致 pn 结退化，从而产生了很大的暗电流。针对这两个可能的原因，分别进行了俄歇电子谱(AES)和扫描电容显微镜(SCM)测试。

图 3.4.4 截止 $2.4\mu\text{m}$ 的探测器 I-V 曲线Fig3.4.4 The I-V curves of detectors with cutoff wavelength at $2.4\mu\text{m}$

从 pn 结的截面方向解理后，采用俄歇电子谱来研究高温退火后 P 电极金属元素的扩散运动，如图 3.4.5 所示。可以看出，在表面处 In 和 Ti 相互扩散合金化，从而形成欧姆接触，除此之外其他金属元素并没有向 pn 扩散渗透，之后的氮化硅钝化过程中金属元素分布也没有变化，这说明并不是金属元素的扩散渗透导致 pn 结漏电、探测器表现出电阻电流特性。

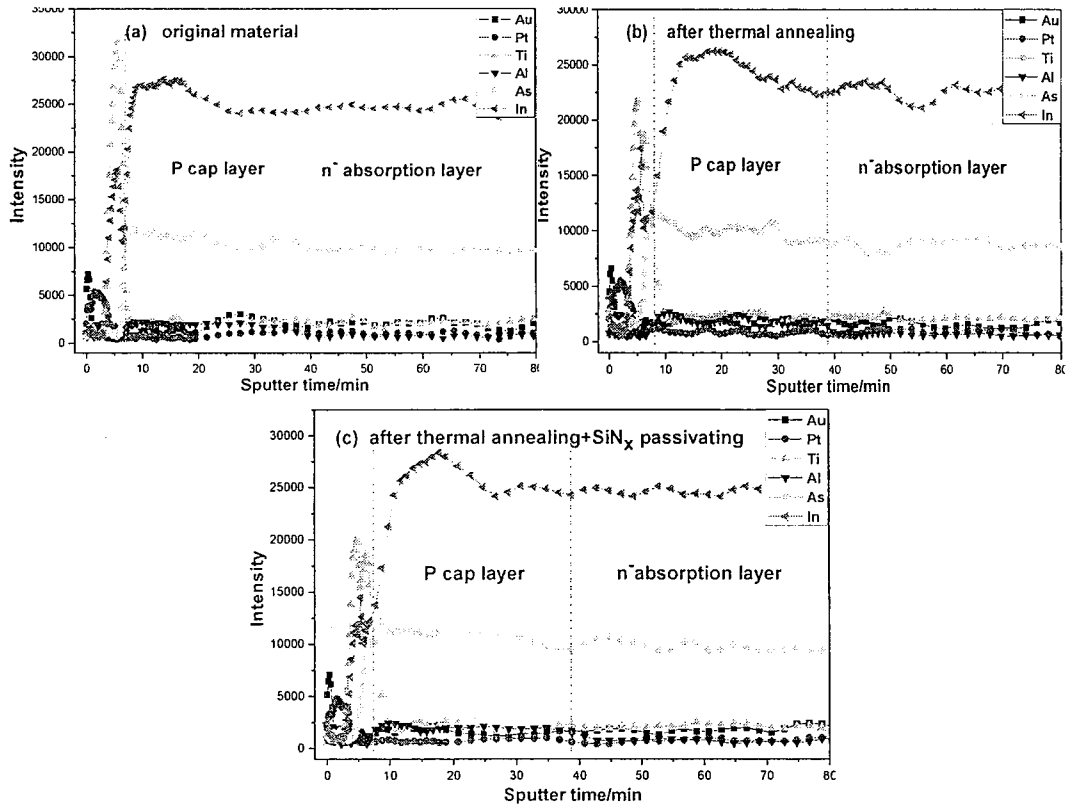


图 3.4.5 不同工艺步骤后的俄歇电子谱：(a)生长完 P 电极，(b)高温退火；(c)沉积氮化硅钝化

Fig3.4.5 The Auger electron spectrums with different process step: (a) material with Ti/Pt/Au, (b) after rapid thermal annealing, (c) after silicon nitride passivating

为了验证是否 pn 结的退化导致探测器暗电流呈电阻电流特性,沿 pn 结截面方向采用 SCM 的方法研究 pn 结的变化。SCM 测量采用的是恒压模式,扫描电容差值 $\Delta C = [1 - \alpha N^{1/2} / (\frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}} + \alpha N^{1/2})] \frac{\epsilon_{ox}}{T_{ox}}$, 电容差值与载流子浓度 $N^{1/2}$ 成反比, 所以根据 ΔC 的变化可以知道载流子的变化^[99]。如图 3.4.6 所示, 高温退火之后表面载流子浓度增大, 是因为电极金属电极合金化与 InP 表面元素相互反应和扩散, 在表面形成杂质能级, 导致表面载流子浓度增加, 从而减小 P 电极的接触电阻。从图中可以看出, pn 结是明显存在的, 高温退火之后 pn 结界面位置载流子浓度增大, 说明在退火过程中, 界面处由于晶格失配形成的界面态被激活, 处于束缚态的电子被激发到导带, 从而导致通过结的电流显著增加, 表现出 pn 结退化。另外, 还有一个可能导致电阻电流特性的原因, 由于 $2.4\mu\text{m}$ 材料表面位错形成一些纹路, 在表面无覆盖的情况下, 高温退火过程中金属元素可能会沿着侧表面扩散到 pn 结位置, 导致探测器一定程度的穿通并呈电阻电流特性。沿 pn 结截面解理进行 AES 测量时, 只观察体内元素的扩散运动, 表面金属元素的运动无法观察到。

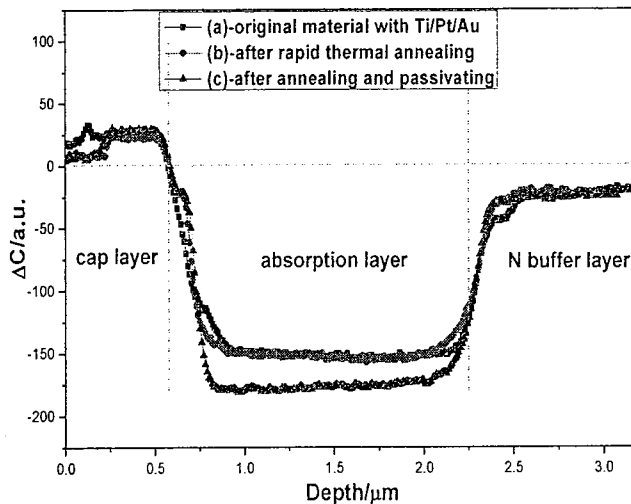


图 3.4.6 不同工艺步骤后的扫描电容: (a)生长完 P 电极, (b)高温退火; (c)沉积氮化硅钝化
Fig3.4.6 The scanning capacitance with different process step: (a) material with Ti/Pt/Au, (b) after rapid thermal annealing, (c) after silicon nitride passivating.

3.5 本章小结

台面成型过程中所引入损伤的抑制和消除是降低探测器暗电流的有效途径。本章对台面型 InGaAs 探测器制备工艺进行了优化, 以降低漏电引起的分路电流以及表面复合电流。采用高温热处理的方法, 去除刻蚀后表面残留的反应物并且

释放晶格损伤带来的应力，同时去除表面的堆积电荷，以达到减小表面复合电流的目的；通过室温硫化的方法中和表面悬挂键，并沉积氮化硅薄膜进行钝化；采用先退火后钝化的方法，避免表面沾污造成退火后钝化膜的失效，提高制备探测器的成品率。但是，在目前工艺基础上，这种方法对截止波长 $2.4\mu\text{m}$ 的延伸波长探测器不适用。

4 基于 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛 ICP 刻蚀技术研究

4.1 引言

随着空间遥感用短波红外探测器向大规模的长线列和面阵焦平面发展,对噪声和均匀性提出了更高的要求。对于短波红外 InGaAs 探测器,平面型探测器存在光敏元扩大现象,光敏元之间串音的抑制通常以减小扩散区和采用保护环的方法实现,这在一定程度上降低了探测器占空比;而台面型探测器相邻光敏元之间采用物理隔离的办法,串扰比较小,但是,台面型探测器的光敏元物理隔离方法是破坏性,从而导致了台面型探测器暗电流比较大。因此,探索具有低损伤的、工艺重复性好的、有利于实现较高的占空比的台面成型工艺方法是发展高密度、高性能焦平面探测器的关键技术之一。

台面成型技术的目标是既要有较高的图形保真度又要减小横向钻蚀,主要有湿法和干法刻蚀两种技术。湿法刻蚀便于实验、损伤较小,但腐蚀速率一般为各向同性,易发生横向钻蚀现象,导致腐蚀图形的分辨率降低,湿法刻蚀的均匀性和操控性比较差、易造成污染。干法刻蚀具有良好的各向异性和可控性、图形保真度高和均匀性良好的特点,因此,近几年来对干法刻蚀研究的较多。干法刻蚀方式的种类也很多,如离子束刻蚀,溅射刻蚀、等离子体刻蚀、反应离子刻蚀(RIE)和感应耦合等离子体刻蚀(ICP)等。干法刻蚀的基本原理就是将中性气体分子激发或解离成各种带电离子、原子团(Radicals)、分子以及电子等等离子体,利用这些带电等离子体在电场加速下产生的粒子轰击实现各向异性刻蚀。这种粒子轰击形成的刻蚀均匀性好,但是粒子轰击导致刻蚀表面晶格完整性被破坏,引入刻蚀损伤。刻蚀所引入的损伤,将导致表面漏电以及表面复合电流增大,从而影响电学性能和均匀性。

InP/InGaAs 和 InAlAs/InGaAs 异质结材料的 ICP 刻蚀技术在制备长线列或面阵焦平面探测器方面具有均匀性良好和图形保真度高的优势,但是刻蚀所引入损伤,限制了探测器的暗电流水平。所以,对于制备性能优良的长线列或面阵短波红外 InGaAs 探测器而言,迫切需要对 ICP 刻蚀的微观损伤行为进行表征和解释,寻找合适的刻蚀工艺参数,掌握刻蚀损伤的控制及消除技术,降低探测器暗电流水平,同时为实现更高密度、更高占空比的长线列探测器解决技术基础问题。

本章在宁锦华^[100]等人的研究基础之上,采用 Raman 光谱和 x 射线衍射(XRD)

技术,研究了 Cl_2/N_2 气氛刻蚀 InGaAs 的主要损伤机制,并采用微波反射光电导衰退(μPCD)法对损伤进行表征,研究了不同处理工艺下损伤的变化,并提出 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛刻蚀 InGaAs 的工艺方法,并对刻蚀参数条件进行了研究。

4.2 ICP 刻蚀原理

本文实验所用感应耦合等离子刻蚀设备是英国牛津公司的 ICP180 system100,它由腔体、射频系统、真空系统、气路系统,软件控制系统等五部分组成。射频 ICP 功率源和射频偏压功率源均为 13.56MHz,额定最大功率分别为 3000W 和 600W,压力范围 1-100mT。ICP180 设备的腔体采用圆筒形等离子发生器,结构如图 4.2.1 所示,其采用锁定式加载,最大可刻蚀 125mm 晶片。由 ICP 功率源提供的交变电流产生的交变磁场在腔体内诱导出了一个射频电场,它能使电子被加速,从而产生高密度的等离子体^[10]。与 ECR 源相比,ICP 源的结构要简单,工作要稳定,等离子体的均匀性也更好。与只采用一个射频功率源的传统 RIE 设备不同,ICP 设备采用两个独立的射频功率源,其中一个用以控制产生等离子体的密度,另一个用以控制等离子体的能量。所以 ICP 刻蚀技术可避免传统 RIE 技术存在刻蚀速率与刻蚀损伤这一矛盾,能满足 InP/InGaAs 等材料干法刻蚀的高等离子体密度、低刻蚀能量、高均匀性和低工作压力等特殊要求。

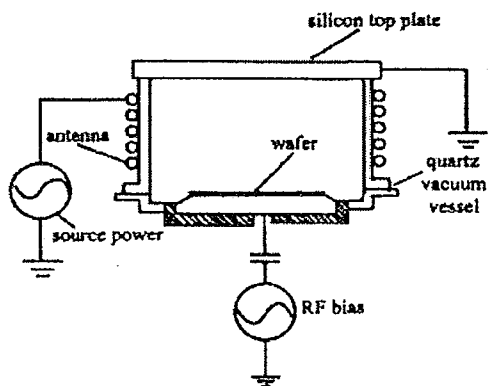


图 4.2.1 圆筒形 ICP 源的剖面图

Fig4.2.1 The profile scheme of columnar ICP source

ICP 刻蚀过程是一个刻蚀产物的挥发与沉积的动态过程,刻蚀反应所生成产物的沸点,在刻蚀气体的选择中是需要考虑的重点。对于 III-V 族的来说,采用含有卤素或者甲烷的刻蚀气体,反应生成的卤化物和甲基化合物,沸点都不是很高,表 4.2.1 给出了这几种刻蚀产物的沸点,因此,这些都是比较合适的刻蚀气体。

表 4.2.1 卤素基或 CH_4/H_2 基等离子体刻蚀 III-V 族材料可能产物的沸点^[102,103]

Tab4.2.1 The boiling point of resultant in the etching of III-V materials with radical of halogen or methane plasma

刻蚀产物	沸点 /°C	刻蚀产物	沸点 /°C	刻蚀产物	沸点 /°C	刻蚀产物	沸点 /°C
AlCl_3	183	InCl_3	600	GaCl_3	201	NCl_3	<71
AlF_3	NA	InF_3	>1200	GaF_3	1000	NF_3	-129
AlI_3	360	InI_3	NA	GaI_3	345	NBr_3	NA
AlBr_3	263	InBr_3	升华	GaBr_3	279	NI_3	爆炸
$(\text{CH}_3)_3\text{Al}$	126	$(\text{CH}_3)_3\text{In}$	134	$(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$	55.7	NH_3	-33

从表中可以看到, 对于 In 基材料来说甲基等离子体的刻蚀产物具有最好的挥发性, 特别是 $(\text{CH}_3)_3\text{In}$ 的沸点比其他卤化铟的沸点低的多。因此在刻蚀含 In 材料中 CH_4 是优选之一。中性甲基原子团与 In、Ga、Al 原子反应的化学活性比中性卤素原子要差很多, 容易形成聚合物, 这些聚合物常常沉积在表面和侧面, 表面的沉积会使刻蚀速率难以达到要求, 而侧壁的沉积将导致侧壁的钻蚀变小, 这个侧壁效应可以获得较好的各向异性。另外等离子体中存在的 H^+ 离子, 在 In 基材料中的穿透深度较大, 特别对 p 型材料产生 H 钝化^[104,105], 可能会影响材料或器件的性能。

氯化物(如 Cl_2 , BCl_3 , SiCl_4 等)是离子刻蚀 III-V 族半导体材料常采用的反应气体。但是刻蚀含 In 化合物时, 因为反应生成物 InCl_3 具有较高的气化温度 (600°C), InCl_x 的解吸附速率成为限制刻蚀速率和表面形貌的因素, 容易导致刻蚀速率缓慢、表面非化学计量以及表面污染。感应耦合等离子(ICP) 因为能够产生高密度的离子流, 可以减小氯基气体刻蚀中 InCl_x 的影响。通常在 ICP 刻蚀的氯基气体中加入氮气或氩气等惰性气体, 这些气体的加入一方面可以增强刻蚀中的物理刻蚀, 增大 InCl_x 的解吸附作用; 另一方面可以稀释化学刻蚀气体, 减小侧向钻蚀。

4.3 基于 Cl_2/N_2 气氛 ICP 刻蚀损伤机制研究

宁锦华^[106]等人对基于 Cl_2/N_2 气氛刻蚀 InGaAs 的 ICP 刻蚀技术进行了研究, 包括 ICP 功率源、偏压功率源、电极温度、腔体压强以及气体流量等主要刻蚀参数对刻蚀速率的影响, 并以此对这些参数进行优化, 最后获得了刻蚀速率均匀可控、表面形貌良好的刻蚀条件。对台面型探测器而言, 刻蚀所引入损伤对性能影响是非常大的, 是决定台面成型技术好坏的重要指标之一。因此, 对于 ICP 刻蚀

损伤的研究也是十分重要的。

ICP 刻蚀所导致的刻蚀损伤，主要可以分为三种：刻蚀中的高能电子或者离子轰击表面所引起的晶格损伤以及化学键的破坏，包括晶格原子的移位、替代或者添隙，造成表面原子的无序，另外还有离子的渗透所形成的缺陷；被刻蚀材料表面成分元素被优先去除或者缺失，导致刻蚀表面的化学剂量比变化，从而引起的化学性质改变；刻蚀气体与表面原子的化学反应生产物或者其他一些污染物沉积在刻蚀表面，形成刻蚀表面污染。

4.3.1 Raman 光谱分析

当用波长比试样粒径小得多的单色光照射气体、液体或透明试样时，大部分的光会按原来的方向透射，而一小部分则按不同的角度散射开来，产生散射光。在垂直方向观察时，除了与原入射光有相同频率的瑞利散射外，还有一系列对称分布着若干条很弱的与入射光频率发生位移的拉曼谱线，这种现象称为拉曼效应。拉曼谱线的数目、位移的大小、谱线的长度直接与试样分子振动或转动能级有关。因此，与红外吸收光谱类似，对拉曼光谱的研究也可以得到有关分子振动或转动能级的信息。目前拉曼光谱分析技术已广泛应用于物质的鉴定、分子结构的特征谱线研究^[107-109]。

表 4.3.1 外延材料结构及参数

Tab4.3.1 The structure and parameters epitaxial materials

外延层	导电类型	厚度/ μm	掺杂物质	掺杂浓度/ cm^{-3}
InP	P^+	0.6	Be	2×10^{18}
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	n^-	2.0	Si	7×10^{16}
InP buffer	N^+	1.5	Si	2×10^{18}

Raman 光谱分析实验所用 InGaAs 外延材料为 PIN 多层结构材料，材料结构参数如表 4.3.1 所示。为了研究 ICP 刻蚀对 InGaAs 吸收层的损伤机制，采用湿法腐蚀的方法去掉表面的 InP 帽层。腐蚀采用选择性腐蚀的 $\text{HCl}/\text{H}_3\text{PO}_4$ 溶液， HCl 采用的是体积百分比为 37% 的盐酸， H_3PO_4 采用的是体积百分比为 85% 的磷酸，溶液配比为体积比 1: 3，在 25°C 恒温条件下，腐蚀速率约为 $0.85\mu\text{m}/\text{min}$ 。采用去离子水冲洗表面，干净后氮气吹干，然后进行 Raman 光谱测试。测试完成后，将样品进行 ICP 刻蚀，刻蚀条件为： Cl_2/N_2 气体流量分别为 10sccm 和 60sccm ，ICP 功率源的功率为 350W ，偏压功率源的功率为 120W ，刻蚀时腔体压强为 4mTorr ，温度为 150°C ，刻蚀时间 1 分钟，InGaAs 吸收层大约被刻蚀掉 $0.5\mu\text{m}$ ，

其剩余厚度为 $1\mu\text{m}$ 。刻蚀完成后，再次进行 Raman 光谱测试。

ICP 刻蚀前后样品 InGaAs 层表面 Raman 光谱如图 4.3.1 所示，可以看出 ICP 刻蚀前后 Raman 光谱没有出现新的 Raman 峰，波数分别为 191cm^{-1} 、 214cm^{-1} 和 239cm^{-1} ，对应了 InGaAs 化合物的主要分子振动模式，刻蚀后 InGaAs 层表面分子振动模式或者转动能级没有变化，说明刻蚀表面没有因为元素缺失造成化学剂量比的变化，也基本没有刻蚀反应生产物的残留。刻蚀后表面 Raman 峰得到增强，主要是由于刻蚀引入的晶格损伤所导致的。ICP 刻蚀过程中带电基团、离子的轰击，导致原子的移位、替代或者添隙，以及表面化学键的断裂，这些都造成了晶格结构的无序，从而导致 Raman 散射峰强度增加，而且半高全宽也增大。

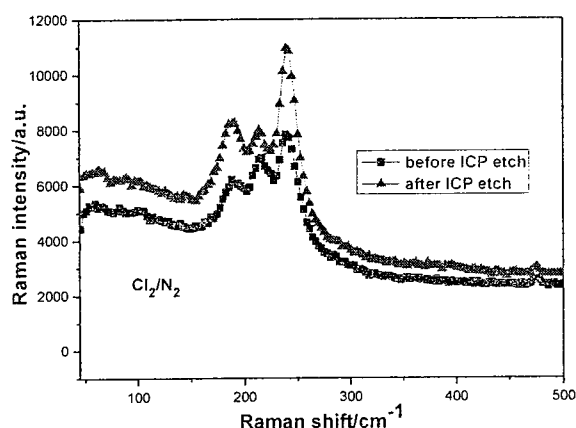


图 4.3.1 ICP 刻蚀前后 Raman 光谱

Fig4.3.1 The Raman spectrum before and after ICP etch

4.3.2 X 射线衍射分析

为了验证 ICP 刻蚀所导致的刻蚀损伤，主要是刻蚀中的高能电子或者离子轰击表面所引起的晶格损伤，包括晶格原子的移位、替代或者添隙等等，采用 X 射线衍射分析刻蚀前后表面晶格的变化。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、衍射峰半高全宽、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 峰的半高全宽 (FWHM) 通常被作为外延层晶格完整性的一个定性表征^[109]。

实验用的 InGaAs 材料与 Raman 光谱实验中所用材料相同，采用选择性腐蚀的

$\text{HCl}/\text{H}_3\text{PO}_4$ 溶液腐蚀去掉外延材料的 InP 帽层, 冲洗干净后进行 XRD 测量, 然后进行 ICP 刻蚀, 刻蚀条件与 Raman 光谱实验一样, 刻蚀完成后再次进行 XRD 测量。

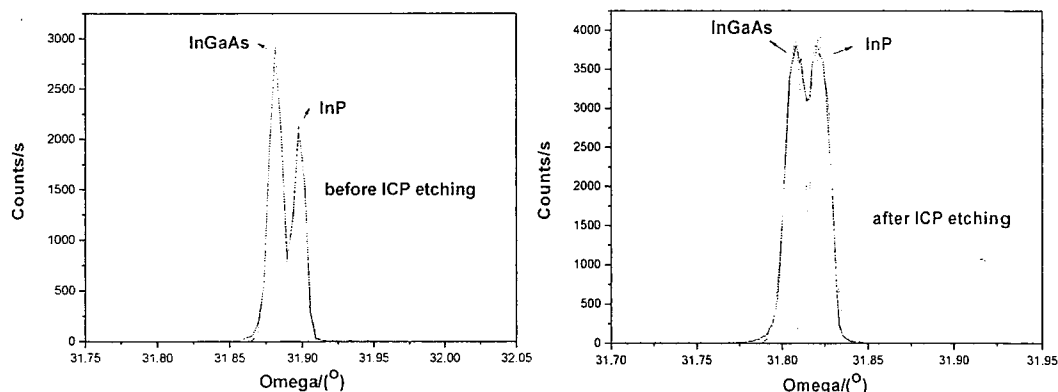


图 4.3.2 ICP 刻蚀前后 XRD 曲线

Fig4.3.2 The XRD curves before and after ICP etch

表 4.3.1 ICP 刻蚀前后 XRD 曲线 FWHM 和峰位变化

Fig4.3.1 The diffraction peak and FWHM before and after ICP etch

	Ω_{InGaAs}	W_{InGaAs}	Ω_{InP}	W_{InP}
刻蚀前	31.882	0.00897	31.898	0.00798
刻蚀后	31.807	0.01151	31.823	0.01109

ICP 刻蚀前后样品表面的 X 射线摇摆曲线如图 4.3.2 所示, 刻蚀前后衍射峰峰位和衍射峰的半高全宽都发生了变化。刻蚀后衍射峰的 Ω 角变小, 而且衍射峰半高全宽也是增大的, 这是因为刻蚀后表面存在缺陷、晶格不完整导致衍射拓宽, 说明 ICP 刻蚀后表面一定深度内出现了比较多的晶格缺陷。这与 Raman 光谱实验得到的结果是一致的, Cl_2/N_2 气氛 ICP 刻蚀 InGaAs 材料所引入的表面刻蚀损伤, 是由晶格缺陷损伤起主要作用的。

4.3.3 刻蚀损伤的表征

ICP 刻蚀所引入的晶格缺陷损伤, 是台面型 InGaAs 探测器表面漏电和复合电流的主要来源之一, 大量的刻蚀损伤限制了台面型探测器暗电流水平。因此, 台面型 InGaAs 探测器制备工艺流程中, 台面侧表面的状态需要严格控制。为了减小台面成型所引入的损伤, 采取了一系列的处理方法, 包括湿法腐蚀刻蚀表面层, 表面硫化处理以及氮化硅薄膜表面钝化等等。这些工艺处理流程对表面状态的改善, 对表面刻蚀损伤的消除, 主要通过器件暗电流水平体现出来的。但是, 探测器制备工艺流程步骤繁多, 影响表面状态的因素也比较多, 这些消除刻蚀损伤的处理方法的效果, 不能单独的表现出来。表面的刻蚀损伤影响着表面载流子的散射几率和复合几率, 所以可以用表面载流子的寿命直接体现表面状态的好坏,

测量表面载流子的寿命可以直接的表征刻蚀损伤,评价这些工艺处理方法的效果。

测量表面载流子寿命的方法,主要是利用非平衡载流子的弛豫过程,比如光诱导载流子衰退(PCD)、激光束诱导电流(LBIC)^[111]、电子束诱导电流(EBIC)^[112]、表面光生伏特(SPV)^[113,114]以及微波反射光电导衰退(μ PCD)^[115]等。这其中微波反射光电导衰退法,属于无接触,无损伤的测量方法。如图 4.3.3 所示,激光照射在样品表面产生光生载流子,载流子浓度变化导致表面光电导的变化,这其中少数载流子的浓度变化起到主导作用。微波反射光电导衰退主要测量原理就是利用反射微波功率的变化与材料表面电导变化成比例的特性,来测量光生载流子的弛豫时间,从而得到少数载流子寿命。

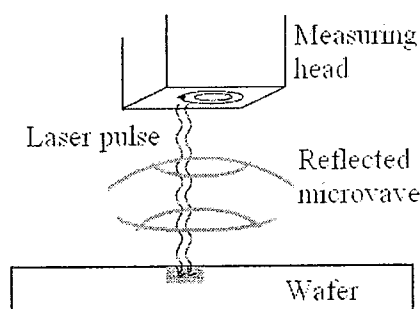


图 4.3.3 微波反射光电导衰退法原理示意图

Fig4.3.3 The theoretic scheme of μ PCD measurement

对于多层异质结薄膜样品,测量得到的载流子寿命,与理想的体内载流子寿命是有一定差异的。一方面,由于表面晶格的不连续和缺陷等因素,表面状态与体内状态是不同的,导致表面载流子复合与体内复合的机制和速率不相同,另一方面,因为材料表面光吸收指数衰减的特性,导致光生载流子浓度分布是不均匀的,载流子朝着浓度低的方向扩散,而且由于 pn 结的存在,这个过程与通常的扩散过程也存在差异。如图 4.3.4 所示,从载流子的输运过程可以知道,测量得到的载流子寿命是表面载流子寿命、耗尽区载流子寿命以及耗尽区外的扩散时间共同作用的结果。

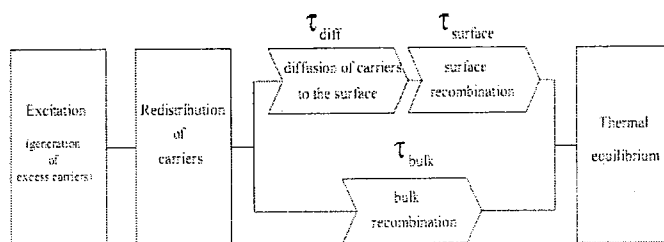


图 4.3.4 非平衡载流子输运过程和各部分寿命的关系

Fig4.3.4 The relationship between lifetimes and the transmission of unbalance carriers

虽然, 对于 PIN 多层外延薄膜材料采用微波反射光电导衰退法测量得到的不是真实表面载流子寿命, 但是当表面存在刻蚀损伤时, 表面复合较大导致表面的载流子寿命较小, 测量得到的载流子寿命主要受表面载流子寿命影响。因此, 该方法测量得到的结果可以大体上反映表面的非平衡载流子的复合情况, 表面的缺陷密度越大, 非平衡载流子复合的几率也越大, 从而表面的载流子寿命也越小, 导致测量的结果也越小。

实验用 InGaAs 外延材料的结构参数与 Raman 光谱分析所用材料相同, 将外延材料划分为两份样品, 分别为 1#、2#样品。为了研究 InGaAs 层表面的损伤在不同工艺处理后的变化, 第一步, 采用湿法腐蚀的方法去掉表面的 InP 帽层。腐蚀采用选择性腐蚀的 $\text{HCl}/\text{H}_3\text{PO}_4$ 溶液, HCl 采用的是体积百分比为 37% 的盐酸, H_3PO_4 采用的是体积百分比为 85% 的磷酸, 溶液配比为体积比 1: 3, 在 25°C 恒温下, 腐蚀速率约为 $0.85\mu\text{m}/\text{min}$ 。采用去离子水冲洗表面, 干净后氮气吹干, 然后进行微波反射光电导衰退测量。第二步, 测试完成后对两个样品都进行 ICP 刻蚀, 刻蚀条件为: Cl_2/N_2 气体流量分别为 10sccm 和 60sccm, ICP 功率源的功率为 350W, 偏压功率源的功率为 120W, 刻蚀时腔体压强为 4mTorr, 温度为 150°C , 刻蚀时间 1 分钟。InGaAs 吸收层大约刻蚀掉 $0.5\mu\text{m}$, 其剩余厚度为 $1\mu\text{m}$ 。刻蚀完成后, 再次进行微波光电导衰退法测量。第三步, 对 2#样品刻蚀后的表面进行选择湿法腐蚀, 而 1#样品不进行工艺处理。腐蚀溶液采用的是酒石酸混合溶液, 酒石酸是按质量比 1: 1 配制, 然后酒石酸与双氧水按体积比 5: 1 配制成酒石酸混合溶液。在 35°C 恒定温度下, InGaAs 腐蚀速率大约为 $0.5\mu\text{m}/\text{min}$, 腐蚀时间大约为 10 秒钟, 腐蚀深度约为 100nm。腐蚀完成后, 两个样品再次进行微波反射光电导衰退测量。第四步, 对两个样品都进行表面硫化处理, 硫化处理的工艺条件为: 硫化氨的溶液温度保持在 60°C , 硫化时间为 30 分钟, 然后去离子水冲洗干净, 氮气吹干后进行微波反射光电导衰退测量。第五步, 两个样品都进行表面氮化硅薄膜钝化, 然后再次进行微波反射光电导衰退测量。

InGaAs 层表面在 ICP 刻蚀前后、湿法处理后、硫化处理后以及氮化硅钝化后的微波反射光电导衰退时间常数, 如图 4.3.5 所示。在 300K 温度下, 两个样品表面在经过 ICP 刻蚀后测量得到的时间常数减小到 0ns, 说明此时表面的非平衡载流子复合速率非常大, 载流子的弛豫时间非常小, 因为 ICP 刻蚀 InGaAs 表

面产生了大量晶格缺陷和悬挂键，这些缺陷和悬挂键形成大量的复合中心，导致此时载流子的复合速率增大；没有经过湿法处理的 1#样品仍然为 0ns，而 2#样品经过湿法处理后，光电导衰退时间常数增大到 30ns 左右，说明经过湿法腐蚀处理的表面，表面载流子的复合速率有所降低；1#样品表面经过硫化处理后，光电导衰退时间常数从 0ns 增大到 30ns 左右，表面载流子复合速率降低，而 2#样品经过表面硫化处理后，光电导衰退时间常数变化不明显，说明直接表面硫化处理，也能减少表面的悬挂键及氧化物，降低表面载流子复合速率；表面沉积氮化硅后，光电导衰退时间常数也没有明显增大。湿法处理和硫化处理都能够去除表面的悬挂键和氧化物，以及一部分浅层次的晶格缺陷，能够降低表面载流子的复合速率，但是还不能消除刻蚀所引入深层次的损伤。

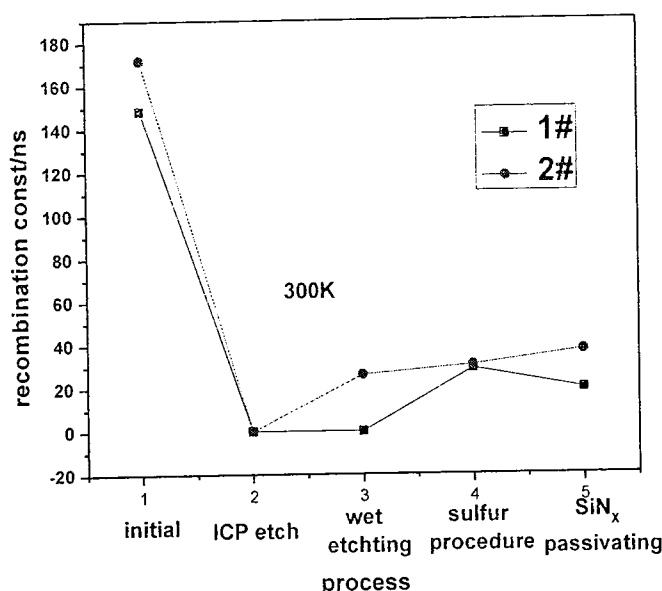


图 4.3.5 各种工艺条件下微波反射光电导衰退测量结果

Fig4.3.5 The measured result of u-PCD with different process treatments

4.4 基于 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛 ICP 刻蚀技术

从前面的分析知道， Cl_2/N_2 气氛刻蚀 InGaAs 表面损伤是以晶格缺陷和悬挂键起主要作用的，经过湿法腐蚀处理，表面硫化处理或者氮化硅钝化处理，能够减少表面浅层次的晶格缺陷和表面悬挂键，但是依然存在比较多深层次的晶格缺陷，表面载流子的复合速率仍然比较大，非平衡载流子的弛豫时间较小，最后导致台面型探测器表面的漏电和复合电流比较大，限制探测器的暗电流水平。为了进一步降低探测器暗电流水平，需要 ICP 刻蚀台面的时候所引入更少的缺陷。

ICP 刻蚀中所引入的晶格缺陷，主要是由于等离子体中的高能电子和离子轰

击表面所造成的，为了减小刻蚀所引入的晶格缺陷，需要减小电子、带电原子基团以及离子的能量。从表 4.2.1 中可以看到， CH_4/H_2 作为刻蚀气体，不仅反应产物易挥发，刻蚀的温度较低，而且分子质量小，其形成带电基团能量比 N_2 所形成的能量要小，离子轰击所造成的晶格损伤较小。采用 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 的混合气体刻蚀 InP/InGaAs 异质结材料，刻蚀作用主要以化学反应为主，离子轰击导致的物理较弱。牛津公司的邓立刚^[116]等人对 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛刻蚀 InP 材料进行了一些研究，当温度为 60°C ， $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 混合气体比例为 $0.4\text{mTorr}:0.4\text{mTorr}:0.8\text{mTorr}$ 时，自偏压小于 200V 的条件下刻蚀表面的损伤较小。合适的气体配比能够减弱 CH_4 生成聚合物，而且高温退火可以减弱 H 与 III-V 族元素之间形成的键，使得 H 钝化作用退化。

为了得到较小的损伤和较好的刻蚀形貌，对 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 刻蚀条件进行了研究和优化。ICP 刻蚀工艺条件中，可调的参数主要包括了 ICP 功率、RF 偏压功率、温度、压强以及气体流量。另外，因为 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 刻蚀的温度比较低，刻蚀过程是否使用导热硅脂也是需要考虑的。在 60°C 的条件下，对使用导热硅脂和没有使用导热硅脂的样品分别进行 ICP 刻蚀，如图 4.4.1 所示，在没有使用导热硅脂的条件下，刻蚀表面会形成针尖状的残留，说明在没有使用导热硅脂的条件下，由于温度的不均匀导致刻蚀速率不均匀，所以刻蚀过程中是有必要使用导热硅脂的。

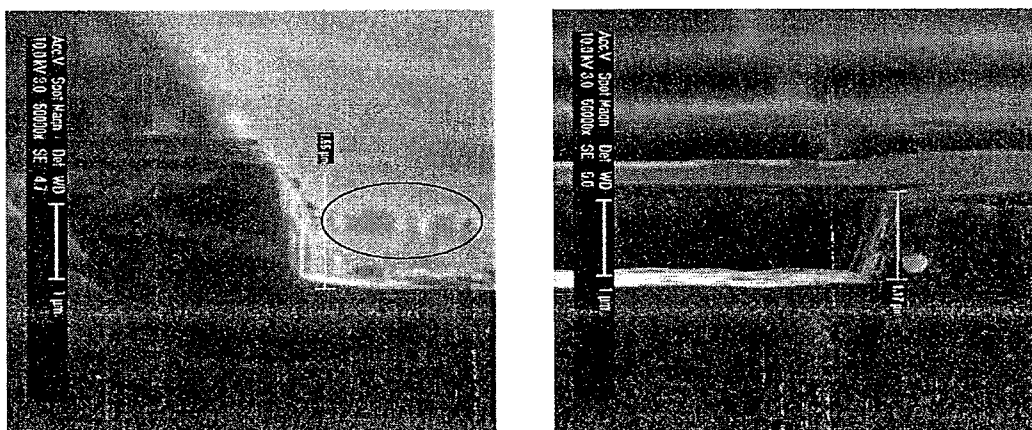


图 4.4.1 左图为没有使用导热硅脂条件下刻蚀表面，右图为有导热硅脂条件下刻蚀表面
Fig4.4.1 left) the etch surface without thermal conduct silicon resin, right) the etch surface with thermal conduct silicon resin

采用不同参数条件进行了刻蚀试验，并对刻蚀结果进行对比，研究参数对刻蚀速率、刻蚀形貌以及刻蚀损伤的影响，从而得到合适的刻蚀条件。试验中参数

的选择必须具有典型性和均匀性,因此,采用正交设计试验方法来安排试验次数和参数设置。混合气体比例固定为 0.4mT:0.4mT:0.8mT,在实验室的牛津 ICP180 设备上校正后得到气体流量比为 7sccm:8sccm:9sccm,在此气体流量比的条件下,研究 ICP 功率、RF 偏压功率、温度、压强 4 个参数对刻蚀速率、表面平滑度以及刻蚀过程中自偏压(DC bias)大小的影响。每个参数选择了 3 个条件进行试验,在正交试验设计的原则下,最少的试验次数为 9 次,试验设计参数如表 4.4.1 所示。

表 4.4.1 ICP 刻蚀正交试验设计方法工艺参数

Tab4.4.1 The orthogonal test process parameters of ICP etch

Round	T/°C	ICP/W	RF/W	P/mT	刻蚀速率 um/min	平滑度 RMS/nm	DC bias/V
1	75	700	60	6	0.196	5.164	238
2	75	600	45	4	0.15	1.813	195
3	75	500	30	2	0.114	2.197	144
4	60	700	45	2	0.16	2.390	168
5	60	600	30	6	0.091	1.249	163
6	60	500	60	4	0.15	1.874	240
7	45	700	30	4	0.104	3.235	141
8	45	600	60	2	0.151	1.686	212
9	45	500	45	6	0.1	2.463	220
速率	K1	0.153	0.153	0.166	0.129	RF 偏压功率对速率影响最大,压强影响最小	
	K2	0.134	0.131	0.137	0.135		
	K3	0.119	0.121	0.103	0.142		
	R	0.034	0.032	0.063	0.013		
平滑度	K1	3.058	3.596	2.908	2.959	RF 和压强影响较小,主要受温度和 ICP 功率影响;60°C、ICP 功率 600W、RF 功率 45W、2mT 条件下得到的平滑度最好	
	K2	1.838	1.583	2.222	2.307		
	K3	2.461	2.178	2.227	2.091		
	R	1.22	2.013	0.686	0.868		
DC bias	K1	192	182	230	207	DC bias 主要受 RF 功率和压强影响,随 RF 功率、压强增大而增大,随 ICP 功率增大而减小,而温度的影响最小	
	K2	190	190	194	192		
	K3	191	201	149	175		
	R	2	19	81	32		

试验用 InGaAs 外延材料参数为: InP 帽层的厚度为 0.5 μm , Zn 掺杂浓度为 $2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, 吸收层 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的厚度为 2.5 μm , Si 掺杂浓度为 $3\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, InP 缓冲层厚度为 1 μm , Si 掺杂浓度为 $2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。试验用材料均为同一种外延片材料, ICP 刻蚀掩膜是在氮化硅薄膜上采用湿法腐蚀的方法制作的,在不同参数条件下进行 ICP 刻蚀,刻蚀时间均为 4 分钟,然后测量刻蚀的深度和表面粗糙度。

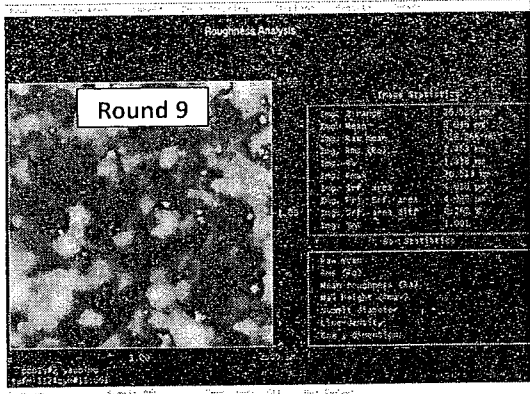
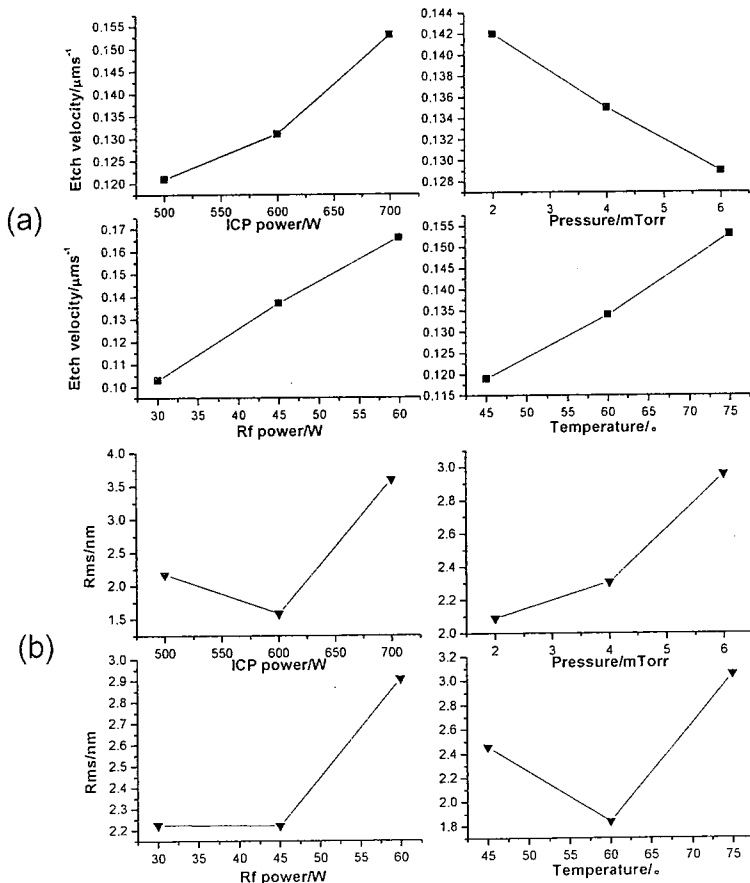


Fig4.4.2 The AFM graphs of different parameters

刻蚀温度、ICP 功率、RF 偏压功率以及腔体压强对刻蚀速率、自偏压以及表面粗糙度的影响如图 4.4.3 所示。刻蚀速率主要受 RF 偏压功率的影响，随 ICP 功率、RF 偏压功率和温度的增大而增大，随腔体压强的增大而减小；刻蚀过程中自偏压 DC bias 也主要是受 RF 偏压功率影响的，随 RF 偏压功率和腔体压强的增大而增大，随 ICP 功率增大而减小，而与温度的关系比较弱；刻蚀表面的粗糙度主要受 ICP 功率和温度的影响，而且变化关系比较复杂一些。



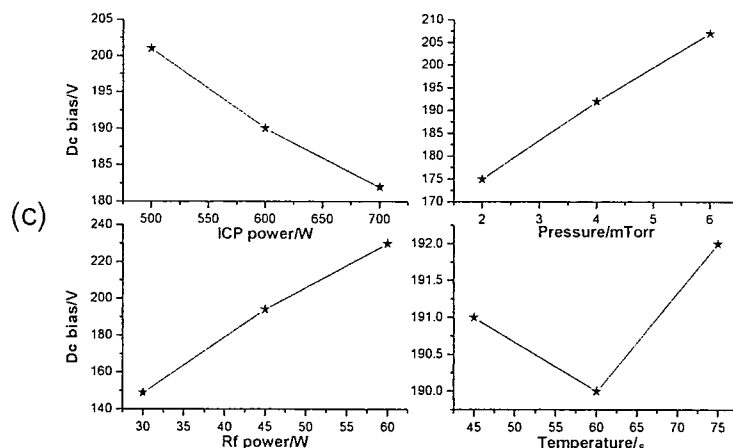


图 4.4.3 不同条件下的刻蚀状态: (a)刻蚀速率; (b)表面粗糙度; (c)DC bias

Fig4.4.3 The status of etching under different conditions: (a)etch velocity, (b)RMS, (c)DC bias

为了减小 ICP 刻蚀所造成的表面损伤,要求轰击表面的离子或者带电基团能量小,而离子或者带电基团能量主要与离子质量和 DC bias 有关。因此,刻蚀条件的选择必须保证 DC bias 不能过大,也就是要求 RF 偏压功率不能过大。另一方面,刻蚀速率又主要与 RF 偏压功率相关,所以 RF 偏压功率的选择要求在保证 DC bias 较小的前提下,刻蚀速率不能太小。因此,综合考虑刻蚀速率、表面平滑度以及离子轰击损伤,温度为 60°C 、ICP 功率为 600W、RF 功率为 45W、压强 2mT 的刻蚀条件是比较合适的。

表 4.4.1 外延材料结构及参数

Tab4.4.1 The structure and parameters epitaxial materials

外延层	导电类型	厚度/ μm	掺杂物质	掺杂浓度/ cm^{-3}
InP	P^+	0.6	Zn	2×10^{18}
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	n^-	1.5	Si	3×10^{16}
InP buffer	N^+	1.1	Si	2×10^{18}

为了比较 Cl_2/N_2 和 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 两种气氛条件下刻蚀效果,采用两片相同材料分别经两种气氛刻蚀,材料参数如表 4.4.1 所示,刻蚀前后进行 X 射线衍射测量,如图 4.4.4 所示。 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛的刻蚀条件为前面正交设计得到的合适条件,温度为 60°C 、ICP 功率为 700W、RF 功率为 45W、压强为 2mT,刻蚀时间为 5 分 30 秒; Cl_2/N_2 气氛的刻蚀条件采用的是常规工艺条件,温度为 150°C 、ICP 功率为 350W、RF 功率为 120W、压强为 4mT,刻蚀时间为 3 分 30 秒。可以看到,刻蚀后 InGaAs 层的相对衍射强度降低,衍射峰的半高全宽增大,说明刻蚀缺陷使得 InGaAs 表面晶格质量变差。采用 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛刻蚀 InGaAs 层的衍射峰强度降低幅度、以及衍射峰的半高宽增大幅度都比 Cl_2/N_2 气氛刻蚀后的要小,这

说明 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛刻蚀造成的晶格缺陷比 Cl_2/N_2 气氛要小，刻蚀后的 InGaAs 表面状态比 Cl_2/N_2 气氛要好。

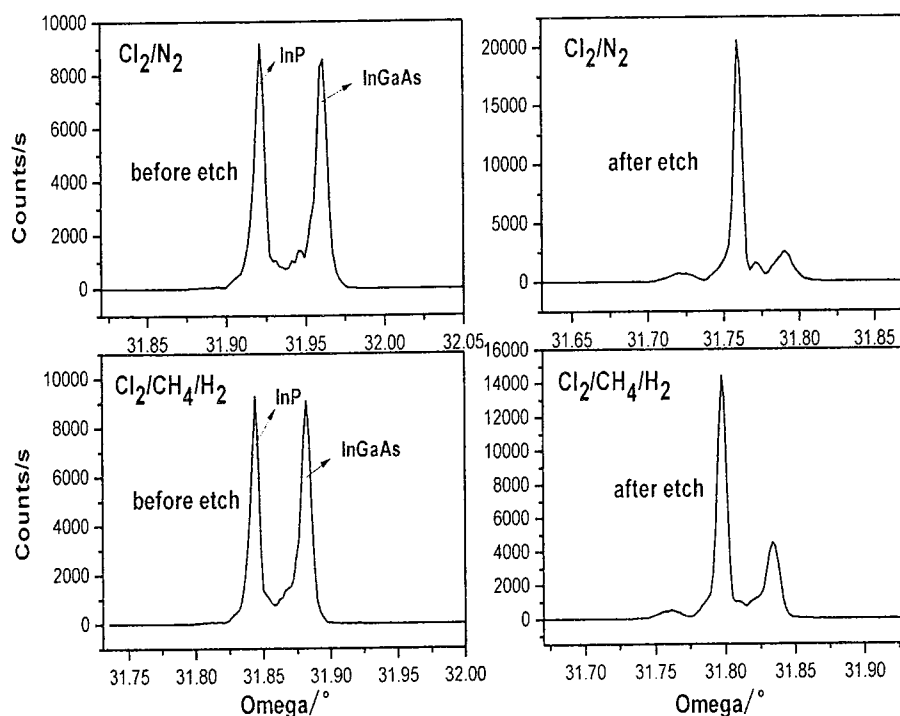


图 4.4.4 刻蚀前后 X 射线衍射曲线

Fig4.4.4 The XRD curves before and after ICP etching

采用 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛刻蚀和常规的 Cl_2/N_2 气氛刻蚀分别制备了一组探测器，探测器制备所采用外延材料的参数如表 4.4.2 所示，探测器制备工艺流程采用的是加入了室温硫化的常规台面工艺，如图 3.3.1 所示。 Cl_2/N_2 气氛刻蚀条件为： Cl_2/N_2 气体流量分别为 10sccm 和 60sccm，ICP 功率源的功率为 350W，偏压功率源的功率为 120W，刻蚀时腔体压强为 4mTorr，温度为 150℃； $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛刻蚀采用了两种不同 ICP 功率的条件，分别为 600W 和 700W，其他参数相同为：气体流量比为 7sccm:8sccm:9sccm，偏压功率源的功率为 45W，腔体压强为 2mTorr，温度为 60℃。

表 4.4.2 外延材料结构及参数

Tab4.4.2 The structure and parameters epitaxial materials

外延层	导电类型	厚度/ μm	掺杂物质	掺杂浓度/ cm^{-3}
InP	P^+	0.6	Be	2×10^{18}
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	n^-	2.0	Si	7×10^{16}
InP buffer	N^+	1.5	Si	2×10^{18}

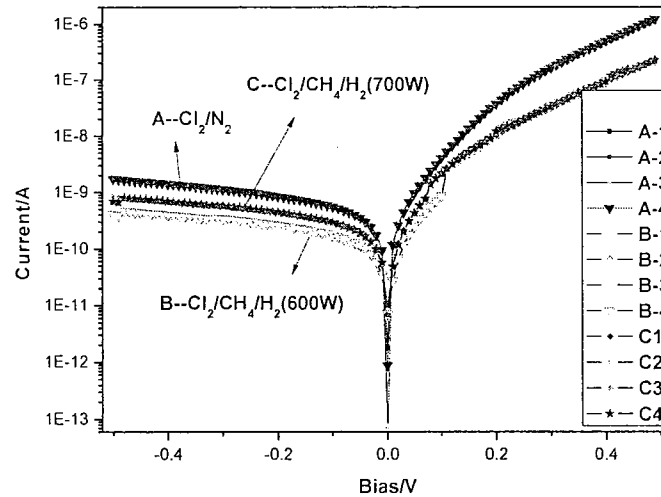


图 4.4.5 不同刻蚀条件探测器的 I-V 特性

Fig4.4.5 The I-V characteristics of detectors with different etching parameters

不同刻蚀条件所制备的探测器 I-V 曲线如图 4.4.5 所示, $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛条件下探测器暗电流要比 Cl_2/N_2 气氛低, 而且 ICP 功率为 600W 的条件下暗电流也比 700W 条件下要低。这说明了 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛刻蚀所引入的损伤较 Cl_2/N_2 气氛要小, 并且 ICP 刻蚀功率在 600W 左右时, 刻蚀的损伤较小。

4.5 本章小结

本章研究了 Cl_2/N_2 气氛下 ICP 刻蚀的损伤机理, 并利用微波反射光电导衰退法表征了不同处理工艺后刻蚀表面的状态; 采用正交设计试验方法研究了基于 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛的刻蚀条件, 并与 Cl_2/N_2 气氛进行了对比。研究结果表明, Cl_2/N_2 气氛 ICP 刻蚀损伤是以离子轰击造成的晶格缺陷和断键为主的, 采用湿法腐蚀和硫化的方法可以一定程度的减小了表面的缺陷损伤和断键, 但是深层次的缺陷仍不能避免, 正交设计试验方法得到了合适的 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛刻蚀条件: 温度为 60°C 、ICP 功率为 600W、RF 功率为 45W、压强为 2mT, 通过对比发现, 该条件下刻蚀造成的晶格损伤比 Cl_2/N_2 气氛要小一些。采用该刻蚀条件研制了短波红外 InGaAs 探测器, 研究结果表明其暗电流得到了改善。

5 高密度单片长线列 InGaAs 探测器研究

5.1 引言

随着红外探测技术的发展,目前红外探测器已经发展到了第三代。第三代红外探测器具备以下特点:大规模阵列、小光敏元、多波段工作、探测器芯片与读出电路的混合集成、低暗电流和低噪声^[117,118]。通过分析国际以及国内当前 InGaAs 焦平面探测器的发展现状、以及对 InGaAs 焦平面探测器的需求,可以发现,今后 InGaAs 红外焦平面探测器的发展将会主要集中在以下几个方面:

(1) 小光敏元、大规模阵列焦平面器件。采用焦平面器件,可以更好地满足系统的要求,同时也有利于简化系统结构、降低成本。在向更大规模的凝视型焦平面、多色探测器发展的中、长波器件已达到 640×480 元的规模,中、短波器件达到了 2048×2048 的规模。为显著提高系统的性能,今后 InGaAs 红外成像探测器将向更大面阵和甚长线列的大阵列方向发展。

(2) 低暗电流、低噪声。随着红外成像系统对功耗、系统质量以及成本等方面的要求越来越高,非制冷探测器已经成为一个发展趋势,这样对于探测器暗电流噪声的要求也越来越高,降低暗电流噪声已经成为一个研究热点。

(3) 探测器芯片与读出电路的混合集成。背照射式大规模阵列 InGaAs 焦平面器件通过 In 柱与 Si 基读出电路的连接已经成为一种主流的互连方式,这极大的简化了红外成像探测器的结构。而随着半导体材料及器件制备技术的日益成熟,混合集成 InGaAs 焦平面阵列的研制也有了很大的突破。

(4) 多波段集成。多波段集成的焦平面探测器可以获取更丰富、更精确、更可靠的目标信息。随着材料生长以及器件制备的发展,红外成像探测器将向更多的光谱波段发展,对于 InGaAs 焦平面来说,多色集成也是其重要发展方向之一。

随着空间遥感领域的发展,我国对航天遥感用短波红外 InGaAs 长线列焦平面探测器需求越来越迫切。如海洋成像仪,其光谱范围包括 8 个可见近红外通道;海洋后续卫星的有效载荷中,高分辨多光谱成像仪也对 $1.55\ \mu\text{m}\sim 1.64\ \mu\text{m}$ 近室温工作的 InGaAs 长线列焦平面探测器提出需求。此外,扩展波长的 InGaAs 线列焦平面探测器也有重要应用,如资源后续卫星,近红外 $1.9\ \mu\text{m}\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 通道所需要的高性能长线列焦平面探测器。因此,实现小光敏元、大规模的高密度、高占空比长线列焦平面探测器,并有效抑制探测器的暗电流和低频噪声是航天遥感用

InGaAs 探测器重要发展方向。

本章在应用需求的基础之上，突破了小光敏元、高密度线列 InGaAs 探测器制备的关键技术，研究了小光敏元、高密度探测器的结构设计以及串音抑制方法，制备了背照射、中心距为 $15\mu\text{m}$ 、光敏元交错排列的 1024×1 元线列探测器，和背照射、中心距为 $25\mu\text{m}$ 、光敏元一字型排列的 800×1 元线列探测器，并进而实现了探测器与读出电路的互连，测量并分析了探测器的光电性能；利用了平行光管系统测量了焦平面探测器组件的调制传递函数(MTF)。

5.2 小光敏元、高密度结构设计的关键工艺

背照射、中心距为 $15\mu\text{m}$ 、光敏元交错排列的 1024×1 元长线列探测器结构如图 5.2.1 所示，探测器光敏元采用品字形的排列。单片探测器芯片总长度为 $16090\mu\text{m}$ ，宽度为 $1350\mu\text{m}$ ，芯片长宽比大于 10。为了抑制光敏元之间沟道部分光散射所导致的串音，沟道部分保留 $0.5\mu\text{m}$ 厚度的吸收层，这种浅台面结构能够吸收部分杂散光，并通过表面复合使得光生载流子减少，降低光敏元之间的串音 [119]。

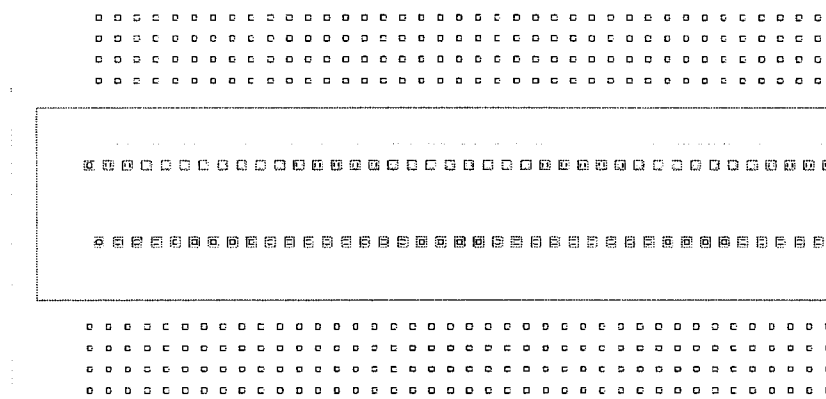


图 5.2.1 1024×1 探测器结构局部示意图

Fig5.2.1 The part of structure scheme of 1024×1 detector array

背照射、中心距为 $25\mu\text{m}$ 、光敏元一字型排列的 800×1 元长线列探测器结构如图 5.2.2 所示，探测器光敏元采用一字形的排列。光敏元大小为 $25\mu\text{m}\times 23\mu\text{m}$ ，光敏元的中心距为 $25\mu\text{m}$ ，相邻光敏元之间间隔为 $2\mu\text{m}$ ，光敏元的占空比达到了 92%。单片探测器芯片总长度为 $20053\mu\text{m}$ ，宽度为 $1300\mu\text{m}$ ，芯片长宽比也大于 10。该探测器同样采用浅台面结构，抑制光敏元之间的串音。

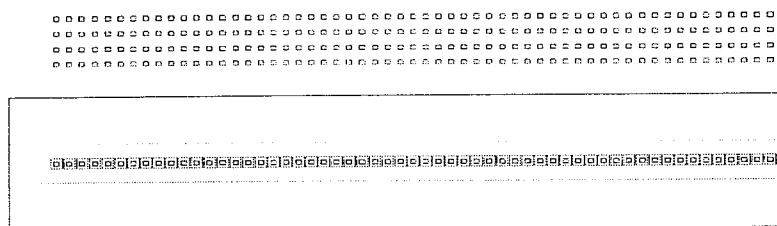


图 5.2.2 800×1 探测器结构局部示意图

Fig5.2.2 The part of structure scheme of 800×1 detector array

随着光敏元尺寸、相邻光敏元相互间隔的减小，台面成型工艺偏差所造成的影响越来越突出。因此，精确的台面定义是小光敏元、高密度长行列探测器制备的关键技术之一，对光刻、刻蚀掩膜制备提出了更高的要求。为了使光刻图形分辨率更高，采用了更薄的光刻胶，并采用高温快速烘烤的方法使光刻胶快速固化，优化了光刻曝光时间和显影时间，实现了保真度好、形貌均匀的光刻图形，如图 5.2.3 所示。另外，采用 RIE 刻蚀与湿法腐蚀相结合的方法制备刻蚀掩膜，刻蚀掩膜形状良好、尺寸失真小。如图 5.2.4 所示，经 ICP 刻蚀后，相邻光敏元已经被完全隔断，刻蚀侧壁比较垂直，不存在相互连接的现象。

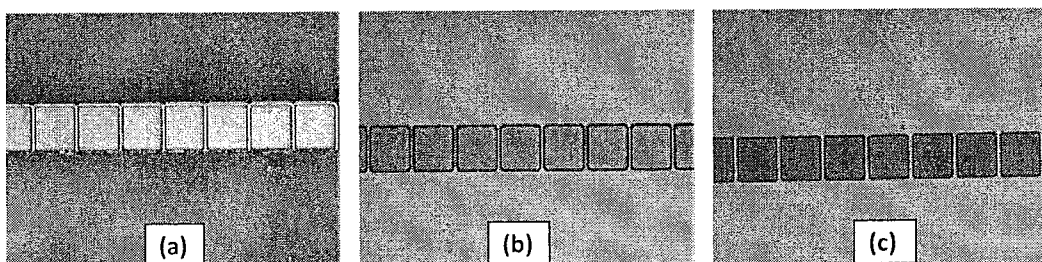


图 5.2.3 不同曝光时间和显影时间下的光刻图形: (a)4s/10s, (b)5s/8s, (c)4.5s/8s

Fig5.2.3 The lithography graphs with different exposure time and develop time: (a)4s/10s, (b)5s/8s, (c)4.5s/8s

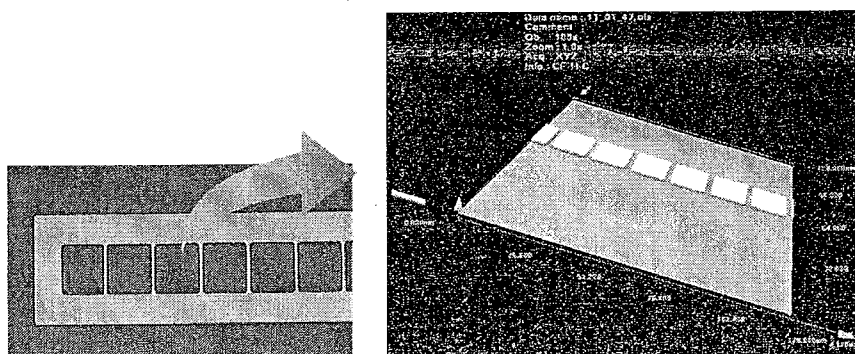


图 5.2.4 2 微米间距台面显微、共聚焦显微照片

Fig5.2.4 The microscope and confocal microscope graphs of mesa with 2μm spacing

5.3 小光敏元、高密度行列探测器制备

1024×1 元行列探测器制备所采用的 P-InP/n-In_{0.53}Ga_{0.47}As/N-InP 外延薄膜材料,是利用 MBE 生长技术在 InP 半绝缘衬底上生长的,材料参数如表 5.3.1 所示。探测器制备采用的是常规台面型探测器制备工艺流程,如图 5.3.1 所示。探测器芯片通过过渡电极板与读出电路间接倒焊,读出电路采用 2 片 512×1 电路对拼实现,焦平面探测器测试模块如图 5.3.2 所示。

表 5.3.1 外延材料结构及参数

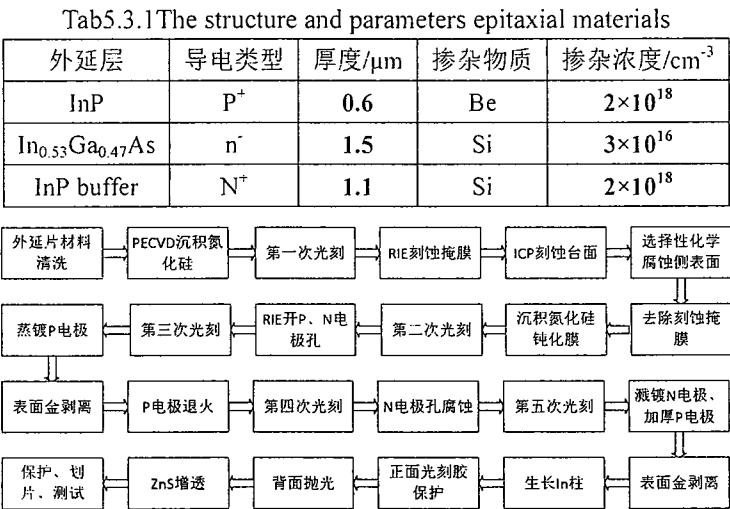


图 5.3.1 1024×1 制备工艺流程

Fig5.3.1 The fabrication process of 1024×1 detector array

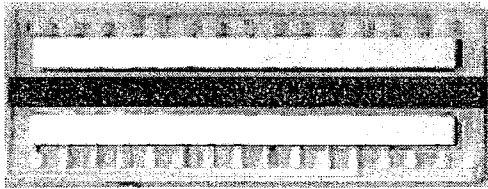


图 5.3.2 1024×1 线列焦平面测试模块

Fig5.3.2 Testing module of 1024×1 linear detector array

探测器芯片和电路与过渡电极板的倒焊压力,对焦平面模块的性能是有很大的影响的。两组不同倒焊压力下的焦平面模块,模块 1#电路倒焊压力 1.5Kg、探测器芯片倒焊压力 2.0Kg,模块 2#电路倒焊压力 1.5Kg、探测器芯片倒焊压力 2.5Kg,示波器上观察两组焦平面模块的信号如图 5.3.3 和图 5.3.4 所示。在没有光照的情况下,模块两边读出的信号都出现了过热像元存在的现象,而且许多出现这种过热现象的位置,基底在相同的位置也出现过热现象,说明了焦平面模块上出现的这种过热现象还与过渡电极板的连接有关。另外,从焦平面模块两边的信号可以看出,模块 1#和模块 2#都出现了一边状态较好、另一边状态较差的情况,采用

两片电路拼接倒焊的方法，由于压力不均衡容易造成一边倾斜的现象。因此，1024×1 高密度长行列探测器的连接方式有必要采用芯片与电路直接倒焊的方式。

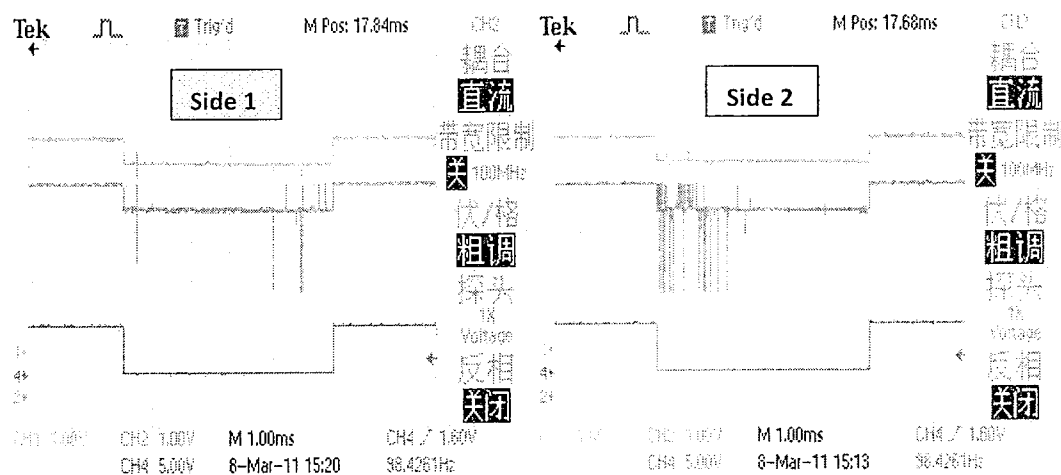


图 5.3.3 模块 1#无光照下示波器信号

Fig5.3.3 The signal on oscillograph of module 1# without illumination

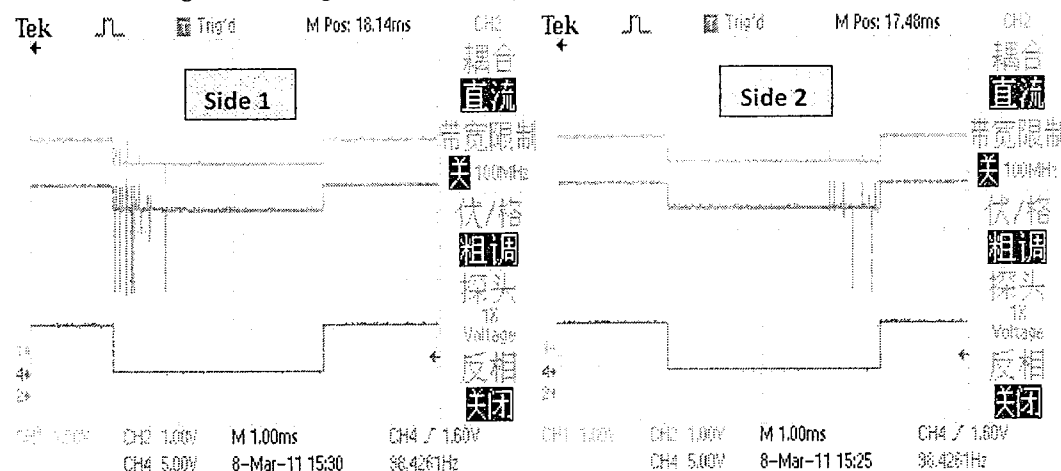


图 5.3.4 模块 2#无光照下示波器信号

Fig5.3.4 The signal on oscillograph of module 2# without illumination

选择 2#模块 side2 的 516 元进行黑体测试，借以了解行列探测器的性能。焦平面模块封装在测试管壳中，利用焦平面测试系统对焦平面模块性能进行测试，测试条件：测试环境温度 300K，黑体温度 900K，黑体孔径 10mm，孔径距焦平面探测器距离 30cm，时钟频率 20KHz。如图 5.3.5 所示，积分时间 5ms 的条件下，在假设 G 因子取 70 的情况下，焦平面峰值响应率为 0.45A/W，响应非均匀性达到了 5.31%，焦平面峰值探测率约为 $2.15 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。可以看到探测器的响应率和探测率比较小，这主要是与探测器暗电流处于较高的水平有关，光生载流子发生复合导致光信号偏小。

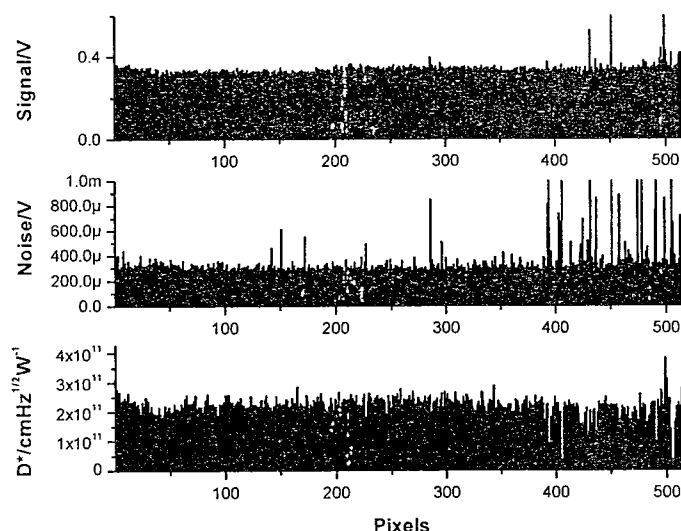


图 5.3.5 1024×1 线列焦平面探测器单边的光电性能

Fig5.3.5 The one side photoelectric performance of 1024×1 linear detector array

基于 1024×1 元线列探测器的结果, 800×1 元线列探测器制备是在常规台面工艺流程的基础上加入去除表面氧化层后室温硫化的工艺步骤, 具体流程如图 5.3.6 所示。并且探测器与读出电路采用直接倒焊的方式实现互连。探测器制备所采用材料的参数为: InP 帽层的厚度为 $0.6\mu\text{m}$ 、Be 掺杂浓度为 $2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$; $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层的厚度为 $1.5\mu\text{m}$ 、Si 掺杂浓度为 $3\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$; InP 缓冲层的厚度为 $1.1\mu\text{m}$ 、Si 掺杂浓度 $2\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。

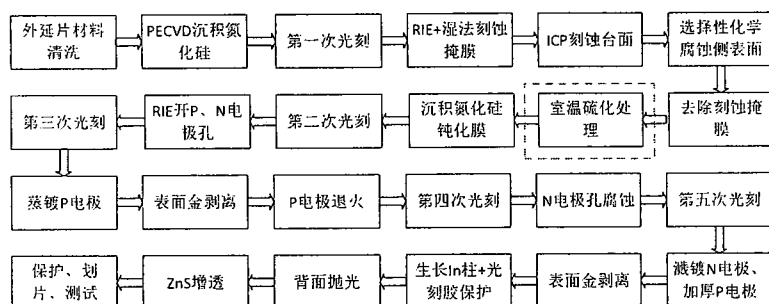


图 5.3.6 800×1 元线列探测器制备工艺流程

Fig5.3.6 The fabrication process of 800×1 linear detector array

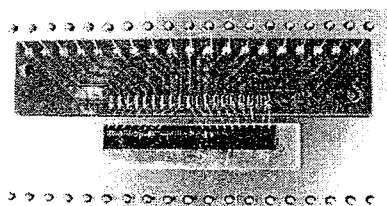


图 5.3.7 800×1 线列焦平面测试模块

Fig5.3.7 Testing module of 800×1 linear detector array

探测器芯片与 800×1 读出电路直接倒焊互连，焦平面探测器测试模块如图 5.3.7 所示。焦平面模块封装在测试管壳中，利用焦平面测试系统对焦平面模块性能进行测试，测试条件：测试环境温度 300K，黑体温度 900K，黑体孔径 10mm，孔径距焦平面探测器距离 30cm，时钟频率 20KHz。如图 5.3.8 所示，积分时间 5ms 的条件下，探测器黑体响应 G 因子为 77，响应非均匀性达到了 5.45%，平均峰值探测率达到了 $4.15 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

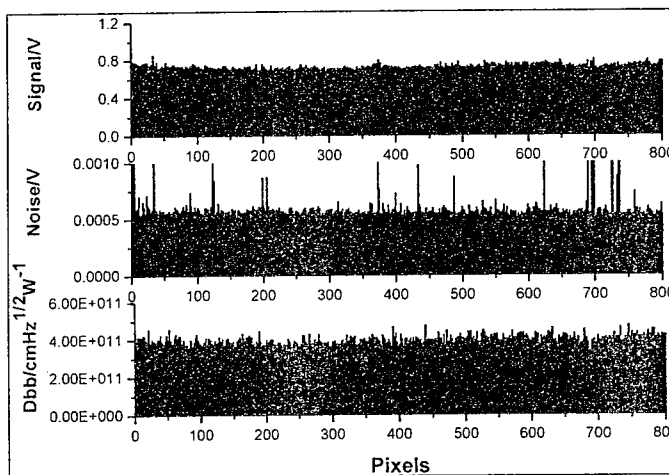


图 5.3.8 800×1 线列焦平面探测器光电性能

Fig5.3.8 The photoelectric performance of 800×1 linear detector array

5.4 2 微米间隔 800×1 焦平面探测器的 MTF

为了测量探测器的串音，采用平行光管测试系统测量了焦平面探测器组件在固定频率下的调制传递函数(MTF)。测试系统如图 5.3.9 所示，平行光管长度为 6m，测量采用的两条狭缝光阑孔径为 6.66mm，中间间隔 6.66mm，焦平面探测器模块采用的红外透镜焦距为 22.5cm。因此，通过平行光管最后到达探测器上的光源为两个宽度为 $25\mu\text{m}$ 、中间间隔 $25\mu\text{m}$ 的条形光源。当光源正好照射在光敏元上时，两个狭缝对应的光敏元光响应信号基本相同，而他们中间一个光敏元由于光阑的阻挡是没有光照的，其信号是由基底信号和旁边两个光敏元的串音组成的。如图 5.3.10 所示，信号峰值位置为两条狭缝光源照射的光敏元，中间的为无光照的光敏元，本底信号约为 300。那么，相邻光敏元之间的 MTF 可以通过下面的公式计算^[120]：

$$\text{MTF} = \frac{\pi V_{\max} - V_{\min}}{4 V_{\max} + V_{\min}} \quad (5.3.1)$$

式中的 $V_{\max}$ 为两个有光照元的信号平均值， $V_{\min}$ 为中间无光照元的信号值。在扣除本底信号的情况下，带红外透镜的焦平面模块 MTF 值约为 0.40。假设红外

透镜等光学系统 MTF 大约为 0.8, 那么可以推算出焦平面探测器的 MTF 约为 0.5 左右。

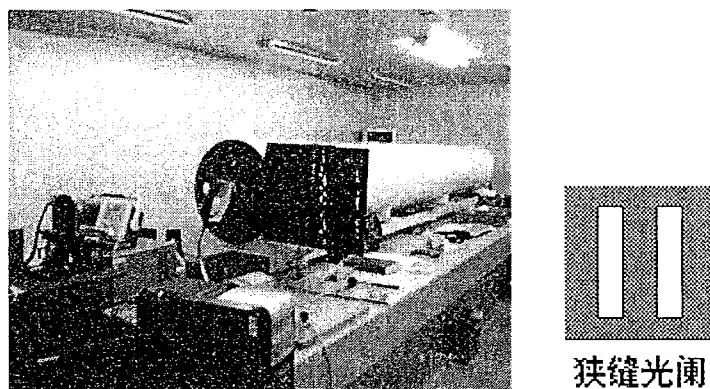


图 5.3.9 平行光管测试系统和光阑

Fig5.3.9 The test system of collimator tube and slit diaphragm

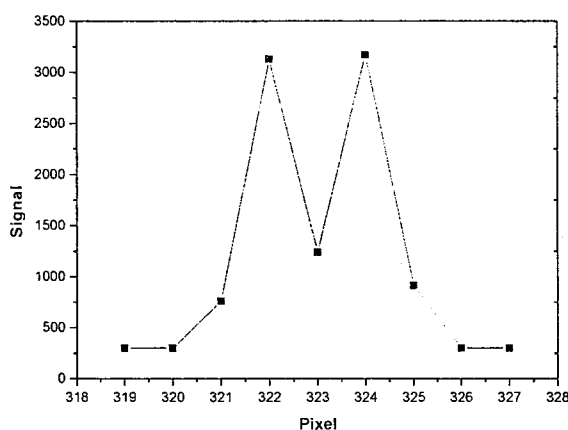


图 5.3.10 平行光管系统的测量结果

Fig5.3.10 The test result of collimator tube system

为了研究台面周围保留的吸收层对探测器光敏元的串音, 采用平行光管系统形成边长为 $25\mu\text{m}$ 的小光点, 如图 5.3.11 所示, 测量小光点沿线列探测器垂直方向移动时, 光敏元的读出信号。

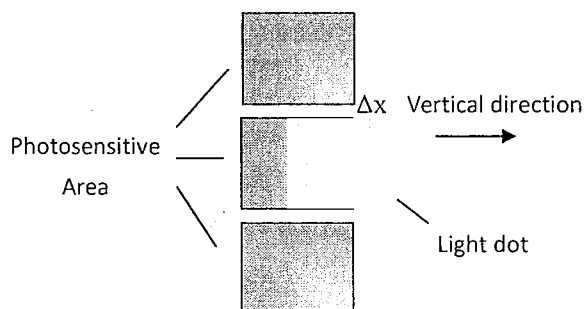


图 5.3.11 方形小光点移动过程的示意图

Fig5.3.11 Schemes of moving process of square light dot

为了能够定量计算分析光敏元周围的保留吸收层对光敏元串音的贡献, 做出

了以下三个假设：忽略读出电路以及光敏面自身对光点的反射与散射所引起的光学串音；光点照射到保留吸收层上所引起的光学串音，跟光点与光敏元的距离无关，仅与光点的强度有关；光点照射到保留吸收层上所产生的电串音是载流子横向扩散所引起的，在保留吸收层的表面载流子的复合几率是均匀分布的，不同距离下的电串音是满足指数衰减规律的。所测量的光敏元总的读出信号主要是由光敏元的光响应信号、保留吸收层的光学串音以及电串音所组成的。在以上假设的前提下，保留吸收层中光生载流子横向扩散所引起的电串音可以表示为：

$$S_e \propto \begin{cases} \int_0^{\Delta x} \exp\left(-\frac{x}{L}\right) dx = L[1 - \exp\left(-\frac{\Delta x}{L}\right)] & \Delta x \leq 25 \\ \int_{\Delta x-25}^{\Delta x} \exp\left(-\frac{x}{L}\right) dx = L\left[\exp\left(\frac{25}{L}\right) - 1\right] \exp\left(-\frac{\Delta x}{L}\right) & \Delta x > 25 \end{cases} \quad (5.3.2)$$

式中的 L 为载流子的扩散长度。光反射和散射所引起的光学串音可以表示为：

$$S_p = \begin{cases} \alpha \Delta x & \Delta x \leq 25 \\ 25\alpha & \Delta x > 25 \end{cases} \quad (5.3.3)$$

式中的 α 为光学串音的系数，是一个常数。另外，光点在光敏元上的部分会产生光响应，与这部分的光强度成正比。因此，所测量的光敏元总的读出信号可以表示为：

$$S = \begin{cases} R(25 - \Delta x) + \alpha \Delta x + \beta L[1 - \exp\left(-\frac{\Delta x}{L}\right)] & \Delta x \leq 25 \\ 25\alpha + \beta L\left[\exp\left(\frac{25}{L}\right) - 1\right] \exp\left(-\frac{\Delta x}{L}\right) & \Delta x > 25 \end{cases} \quad (5.3.4)$$

式中的 R 为光敏元的光响应率。

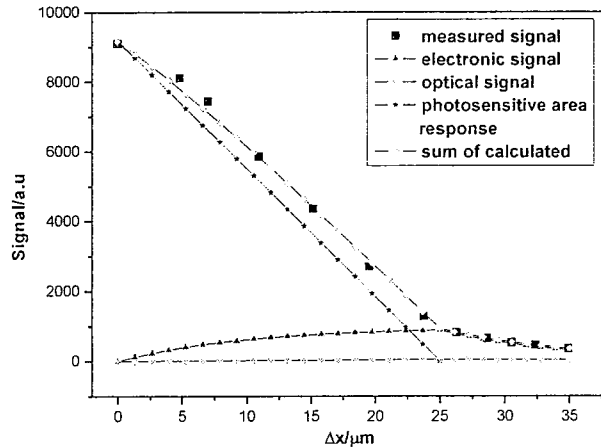


图 5.3.12 读出信号与移动距离 Δx 的关系

Fig5.3.12 The readout signal correlative with moving distance Δx

测量得到的总读出信号如图 5.3.12 所示，在 Δx 小于 $25\mu\text{m}$ 时，保留吸收层所引起的光学串音和电串音相对于光敏元的光响应是很小的，而当 Δx 大于 $25\mu\text{m}$ 时，光点完全移出了光敏元的范围，光敏元的光响应近似为 0，保留吸收层所引

起的光学串音被认为是一个常数，总的读出信号随 Δx 指数减小。可以看出，保留吸收层所产生的串音是以载流子横向扩散引起的电串音为主的，计算得到的扩散长度约为 $9.57\mu\text{m}$ ，这与吕衍秋^[121]等人测量得到的结果相近。

为了进一步减小光敏元之间、及线列垂直方向杂散光所导致的串音，引入了保护环的结构，并且保护环电极接地，使得保护环吸收杂散光产生的光生载流子被直接导走。焦平面探测器的光电性能如图 5.3.13 所示，测试条件：测试环境温度 298K，黑体温度 900K，黑体孔径 10mm，孔径距焦平面探测器距离 30cm，时钟频率 20KHz。在 5ms 积分时间下，响应非均匀性约为 4.3%，平均峰值探测率达到了 $6.4 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}(G=77)$ ，平行光管测量焦平面模块 MTF 值达到了 0.5 左右。利用该线列探测器在白天地面进行了推扫成像，如图 5.3.14 所示，所成图像比较清晰。

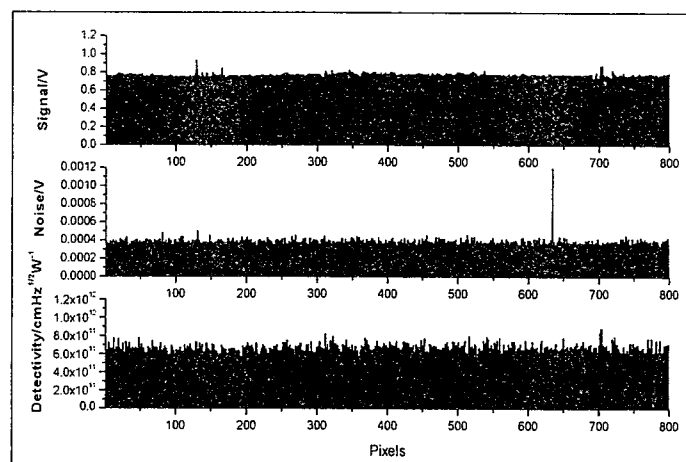


图 5.3.13 800×1 线列探测器焦平面性能

Fig5.3.13 The performance of 800×1 linear detector array



图 5.3.14 800×1 线列探测器地面推扫成像

Fig5.3.14 Scanning image by 800×1 linear detector array

5.5 本章小结

本章中研究了高密度小光敏元长线列 InGaAs 探测器制备方法和串音抑制技术。通过采用更薄的光刻胶并高温快速烘烤、以及 RIE-ICP 结合的方法, 获得了光敏元最小间距为 $2\mu\text{m}$ 、占空比优于 90% 的精确台面定义工艺规范。通过小光点测试系统, 研究了线列探测器相邻像元和垂直方向对光敏元串音的影响, 确定了电子横向扩散是引起的电串音的主要原因, 为抑制串音的台面型探测器新结构的提出提供了实验依据。实现了背照射、中心距为 $15\mu\text{m}$ 、光敏元交错排列的 1024×1 元线列探测器, 以及背照射、中心距为 $25\mu\text{m}$ 、光敏元一字型排列的 800×1 元线列探测器, 并进而实现了与读出电路互连的焦平面探测器。采用平行光管方法测量了带红外镜头的焦平面探测器组件的调制传递函数 MTF 达到了 0.4, 推算短波红外 InGaAs 焦平面探测器的 MTF 约为 0.5。

6 短波红外 InGaAs 探测器太阳光辐照的初步研究

6.1 引言

InGaAs 探测器在空间应用时, 会受到各种空间辐射, 这些空间辐射中包含了 γ 射线、电子以及各种高能粒子如质子、中子等, 这些辐射会对探测器性能造成一定影响^[122-126]。2002 年欧空局发射的 ENVISAT 卫星 SCIAMACHY 组件中的延伸波长 InGaAs 探测器, 由于空间质子流引起的材料位移损伤以及热应力导致的衰退效应, 平均每年有 50 个像元失效^[127]; Shaw^[128,129]等人研究了电子辐照对 InGaAs 探测器的影响, 电子辐照所引入的深能级导致了产生-复合电流的增大; 黄杨程^[130-132]等人研究了 辐照对 InGaAs 探测器的影响, 通过康普顿散射引入位移缺陷, 导致探测器性能衰退, 而且退火后性能不能恢复。对于姿态稳定方式采用三轴姿态稳定的静止气象卫星, 卫星定点于赤道上空 35786km 某一经度的位置, 可连续、重复不断地对其覆盖的 1/3 地球表面进行实时观测, 当卫星在太空中进行姿态翻转调整时, InGaAs 探测器会直接受到太阳强光辐照, 也可能会对探测器性能造成影响, 目前还没有这方面的研究报道。研究强太阳光辐照对器件性能的影响对于探测器实际空间应用有一定指导意义。

太阳辐射包括太阳向宇宙空间发射的电磁波和粒子流。地球所接受到的太阳辐射能量仅为太阳向宇宙空间放射的总辐射能量的二十二亿分之一, 到达地球大气上界的太阳辐射能量称为天文太阳辐射量。在地球位于日地平均距离处时, 地球大气上界垂直于太阳光线的单位面积在单位时间内所受到的太阳辐射的全谱总能量, 称为太阳常数。太阳常数的常用单位为 W/m^2 。世界气象组织 (WMO)1981 年公布的太阳常数值是 $1368W/m^2$ 。

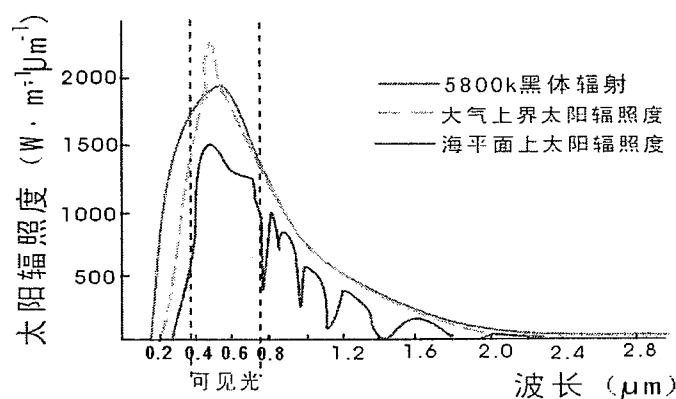


图 6.1.1 太阳辐照的波长分布以及空间分布

Fig6.1.1 The wavelength and space distribution of sunlight radiation

大气上界和到达地面的太阳辐射空间分布和波长分布如图 6.1.1 所示^[133,134]。地球大气上界的太阳辐射 99% 以上是在波长 $0.15\sim 4.0\mu\text{m}$ 之间，这其中大约 50% 能量在可见光谱区（波长 $0.4\sim 0.76\mu\text{m}$ ），7% 在紫外光谱区（波长 $<0.4\mu\text{m}$ ），43% 在红外光谱区（波长 $>0.76\mu\text{m}$ ）。太阳辐射通过大气，一部分到达地面，称为直接太阳辐射；另一部分被大气分子、大气中的微尘、水汽等吸收、散射和反射，被散射的太阳辐射一部分返回宇宙空间，另一部分到达地面，到达地面的这部分称为散射太阳辐射。到达地面的散射太阳辐射和直接太阳辐射之和称为总辐射。

到达地面的总太阳辐射能量比大气上界小得多，就全球平均而言，到达地面的太阳总辐射能量只占大气上界太阳辐射能量的 45%。其中分布在紫外光谱区的太阳辐射能量几乎绝迹（不考虑臭氧空洞现象），可见光谱区辐射能量占总太阳辐射能量的比率减少至 40%，而红外光谱区辐射能量比率增至 60%。

本章采用透镜聚焦的方式，初步地研究了太阳光直接辐照后 InGaAs 探测器性能的变化，包括 I-V 特性和光谱特性。针对 InGaAs 探测器性能的变化特点，分析产生这种变化的可能原因。

6.2 实验

6.2.1 探测器制备

为了方便的透镜聚焦进行太阳光辐照实验，需要探测器的光敏元比较大一些，因此，所要制备的探测器采取正照射的台面结构，光敏元直径 φ 为 5mm。器件制备用的外延材料由中科院上海微系统与信息技术研究所提供，材料结构参数如图 6.2.1 所示。

表 6.2.1 外延材料结构及参数

Tab6.2.1 The structure and parameters epitaxial materials

外延层	导电类型	厚度/ μm	掺杂物质	掺杂浓度/ cm^{-3}
InP	P^+	1.0	Be	2×10^{18}
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	n^-	2.5	Si	3×10^{16}
InP buffer	N^+	1.5	Si	2×10^{18}

探测器制备采用的是常规台面型探测器制备工艺流程，PECVD 沉积 SiN 薄膜，采用氢氟酸缓冲液腐蚀制作刻蚀掩膜，然后采用感应耦合等离子(ICP)刻蚀技术刻蚀出台面，刻蚀气体采用的是 Cl_2/N_2 混合气体， Cl_2/N_2 气体流量分别为 10sccm 和 60sccm，ICP 功率源的功率为 350W，偏压功率源的功率为 120W，刻蚀时腔体压强为 4mTorr，温度为 150°C ，刻蚀时间为 4 分钟，采用湿法腐蚀的方

式去除刻蚀表面浅层损伤，之后沉积 SiN 薄膜作为钝化层进行钝化，P、N 电极孔也同样采用湿法腐蚀的方式来制作，然后离子束溅射 Ti/Pt/Au 作为 P 电极，高温快速退火减小接触电阻以实现欧姆接触，在腐蚀到 N-InP 层后通过热蒸发的 Cr/Au 合金制作 N 电极并且加厚 P 电极，然后在光刻胶的保护下划片，然后进行测试。为了降低电磁干扰，将探测器芯片封装于圆形 Kovar 管壳中，如图 6.2.1 所示。

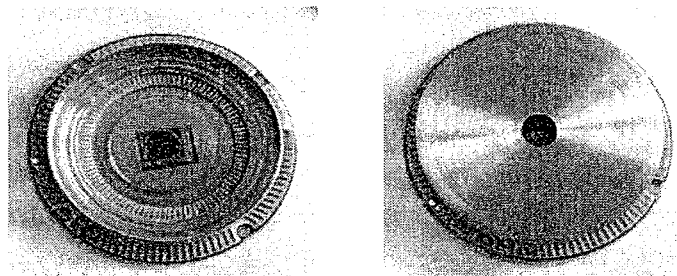


图 6.2.1 探测器芯片及封装结构

Fig6.2.1 The detector chip and package structure

在室温下，探测器的 I-V 特性如图 6.2.2 所示，探测器优质因子 R_0A 达到了 $8.1 \times 10^3 \Omega \text{cm}^2$ 。在黑体辐射的条件下测量探测器的响应，测试环境温度为 295K，黑体温度为 900K，黑体辐射的出射孔径为 5mm，孔径距离探测器芯片的距离为 25cm，当电流放大器档位为 10^6V/A 时，探测器对黑体辐射的响应信号约为 360mv，探测器对黑体辐射的响应率大约为 $1.42 \times 10^{-2} \text{A/W}$ 。

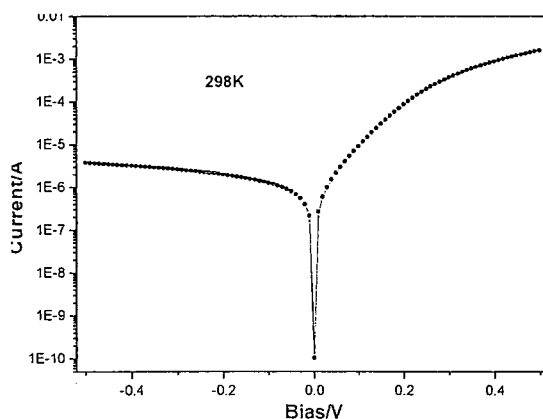


图 6.2.2 直径为 5mm 的探测器室温下 I-V 曲线

Fig6.2.2 The I-V curve of the detector with diameter of 5mm at room temperature

6.2.2 太阳光辐照实验

太阳光辐照实验采用监测太阳光辐照下探测器实时信号、以及对比辐照前后探测器性能变化的方法，分析太阳光辐照对探测器性能的影响。由于实验条件限

制，不能采用人工模拟太阳辐射试验^[135]，而是采用透镜聚焦的方法，而且太阳光辐照的能量也没有标定，只能通过探测器光响应换算为等效的黑体辐射能量。聚光透镜采用的 K9 材质玻璃，透射波段范围 $0.33\mu\text{m} \sim 2.1\mu\text{m}$ ，透射率 $\geq 85\%$ ，透镜直径 Φ 为 12.5mm 。太阳光辐照实验实时信号测量原理以及简单的测试系统如图 6.2.3 所示，太阳光经透镜聚焦后照射到探测器上，探测器响应信号经过 Keithley1211 电流放大器转化为电压信号，放大器档位为 10^6V/A ，然后由示波器读出，示波器输入阻抗为 50Ω ，所以可以忽略示波器输入阻抗的作用。太阳光辐照实验选择在太阳直射角较小的 7 月份，午间阳光比较强烈的时候进行，实验过程中太阳光照射角度随着时间的变化，需要转动聚焦透镜的方向，使得太阳光的垂直照射角度最小，探测器的响应信号最大。另外，在太阳光辐照之前、辐照之后 0 小时以及放置 24 小时之后，测量探测器电学性能和光响应特性，并进行前后对比分析太阳光辐照对探测器性能的影响。

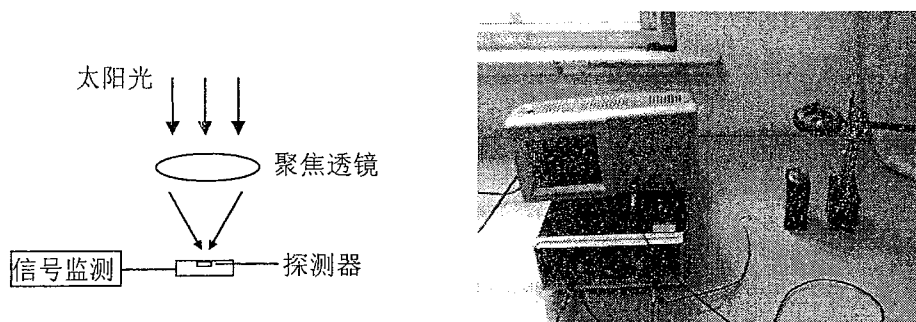


图 6.2.3 太阳光辐照实时信号测量原理及测试系统

Fig6.2.3 The measure principle and test system of real time signal of sunlight irradiation

6.3 结果分析

在实际的空间应用中，辐照的影响是作用在整个红外探测系统上的。红外探测系统包括前端光学系统和光电探测器，直接受到强辐照可能会对探测系统造成的影响也分为对前端光学系统和光电探测器造成的影响两大类。

对前端光学系统的影响：

- 1) 强辐照中滤光片不透过短波辐射部分，被滤光片吸收后使其温度升高，导致滤光片透过率严重下降，同时热传导也会导致探测器温度升高，探测器探测灵敏度严重下降，甚至导致探测器功能失效；
- 2) 当辐照强度超过光学系统破坏阈值，对光学系统前端的红外滤光片、调制盘造成永久损伤，使得光学系统失效，对探测系统探测功能造成永久失效。

对光电探测器的影响：

- 1) 当探测器具有很高灵敏度的时候, 而且动态范围一般在 3~4 个数量级, 在受到强辐照后很容易会导致探测器输出信号饱和, 造成输出信号异常;
- 2) 当强辐照超过探测器饱和阈值时, 吸收辐照产生大量热电子导致温度升高, 光生电压随探测器温度升高而减小, 从而探测器输出信号减小, 当辐照强度达到探测器永久损伤阈值时甚至造成探测器永久性破坏。

6.3.1 太阳光辐照下探测器的实时信号

在不同日期的午间(pm12:30~14:30)进行了两次太阳光辐照实验, 太阳光辐照测量的持续时间都为两个小时, 探测器实时信号的测量间隔为 5 分钟, 测量的时候转动聚焦透镜的位置使得读出的信号最大, 取这个最大值作为该时间的实时信号。在太阳光辐照条件下探测器的实时输出信号如图 6.3.1 所示。

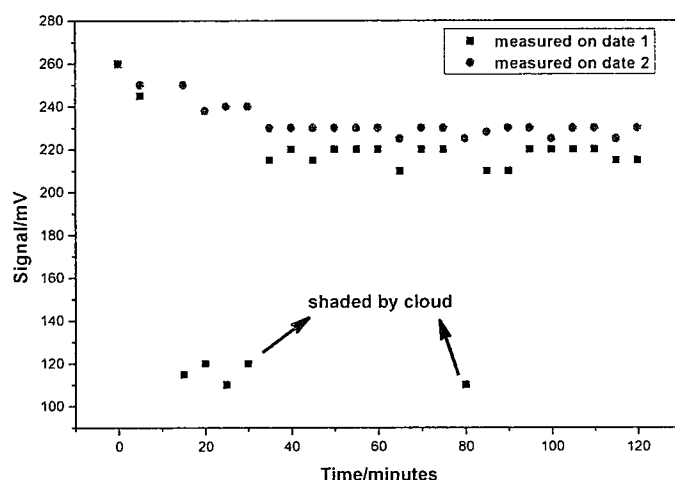


图 6.3.1 太阳光辐照下探测器实时信号

Fig6.3.1 The real time signal of detector with sunlight irradiation

在透镜聚焦太阳光辐照的情况下, 两次实验中探测器实时信号随着辐照时间的变化规律, 都是开始阶段随辐照时间的增加而减小, 然后慢慢趋于平衡, 随辐照着辐照时间的继续增加, 实时信号的变化很小。马丽芹^[136,137]等人研究发现, 当辐照强度超过饱和阈值时, 探测器吸收的辐照将产生大量热电子导致温度升高, 从而光生电压随探测器温度升高而减小, 探测器输出信号减小。这与本实验条件下的现象比较相近, 采用等效黑体辐射功率的方法计算太阳光辐照等效强度, 分析太阳光辐照的强度是否超过了探测器的饱和阈值。

太阳光辐照下探测器初始时刻的输出信号 $S_{init}=2.6\times10^{-4}\text{mA}$, 假设探测器对太阳光辐照响应的量子效率与黑体辐射测试条件下的量子效率相同, 对太阳光的响应率近似等于黑体辐射下的响应率 $1.42\times10^{-2}\text{A/W}$, 那么太阳光辐照的功率近似

等效的黑体辐照功率约为 $1.83 \times 10^{-5} \text{ W}$ 。根据前面 6.2.1 探测器室温下黑体辐射测试的结果可以知道,在黑体温度 900K,出射孔径 5mm,探测器芯片距离黑体 25cm 的情况下,探测器接受到的黑体辐照功率为:

$$P = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)A_D d^2}{2\sqrt{2}L^2} = 2.53 \times 10^{-5} \text{ W} \quad (6.3.1)$$

式中 σ 为斯忒藩常数。可以看到,太阳光辐照的等效黑体辐射功率是小于黑体辐射测试条件下的辐射功率的,说明太阳光辐照强度没有超过探测器的饱和阈值。因此,探测器实时信号随辐照时间增加而减小的现象并非是辐照强度超过饱和阈值所引起的。

探测器受辐射后局部温度升高的原因可能有两种,一是辐射的剂量超过了某个阈值后,多余的辐射能量不是转化为输出信号,而是通过电子的声子散射传递给晶格,导致局部的温度升高;另外一种原因就是辐射的光子能量较大,激发的电子具有比较大的能量,在发生声子散射时传递给晶格的较大能量,从而导致了局部温度的升高,光生电压随探测器温度升高而减小,从而探测器输出信号减小。

6.3.2 太阳光辐照前后探测器性能的变化

从 6.3.1 的分析结果可以知道,太阳光辐照对探测器是有一定影响的。为了研究这个辐照对探测器性能的影响,测量了辐照前后探测器的 I-V 特性、光谱特性。

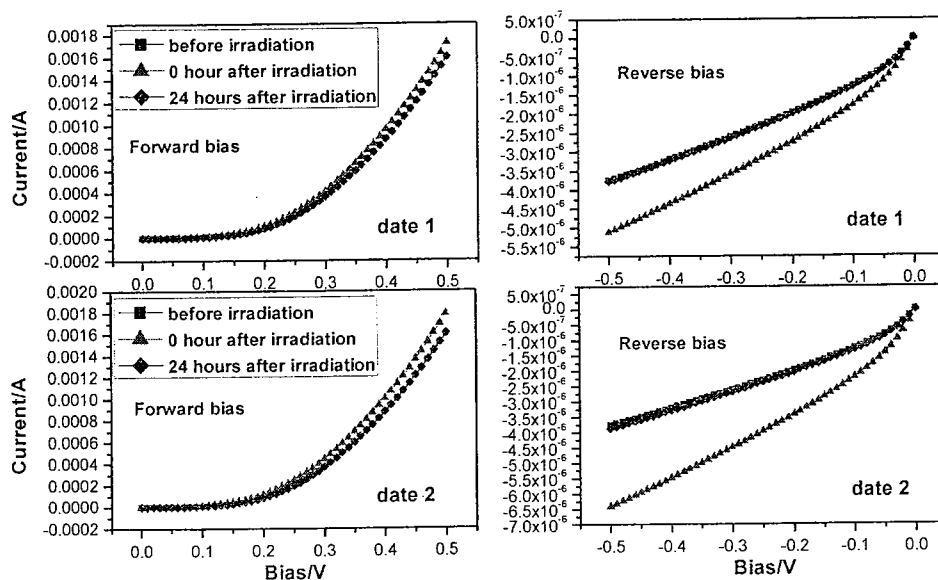


图 6.3.2 太阳光辐照前后探测器 I-V 特性

Fig6.3.2 The I-V characteristic of detector before and after sunlight irradiation

太阳光辐照前后探测器 I-V 特性变化, 如图 6.3.2 所示, 辐照后立即对探测器的 I-V 特性进行测量, 发现探测器正向偏压下暗电流变化不是很明显, 而反向偏压下则是显著增大, 这说明在太阳光辐照后探测器的漏电和复合电流增大。将辐照后的探测器放置 24 小时后, 再次测量探测器 I-V 特性, 辐照前后探测器的 R_0A 如表 6.3.1 所示, 发现探测器暗电流与辐照前几乎是一样的, 这说明由于辐照所产生的效应在放置 24 小时的过程中逐渐消失, 表明这种太阳光辐照所产生的效应是暂时性效应, 探测器性能在一定时间内能够得到恢复。

表 6.3.1 太阳光辐照前后探测器 R_0A Tab6.3.1 The R_0A product of detector before and after sunlight irradiation

$R_0A/\Omega\cdot\text{cm}^2$	Date1	Date2
辐照前	0.81×10^4	
辐照后 0 小时	0.57×10^4	0.47×10^4
辐照后 24 小时	0.81×10^4	0.79×10^4

在辐照前和辐照 2 小时后, 测量了探测器响应光谱。如图 6.3.3 所示, 辐照前后响应光谱的截止波长和峰值波长相差都很小, 在测量误差允许的范围内, 归一化后峰值 G 因子相差也很小。这说明太阳光辐照对探测器的响应光谱特性几乎没有影响。

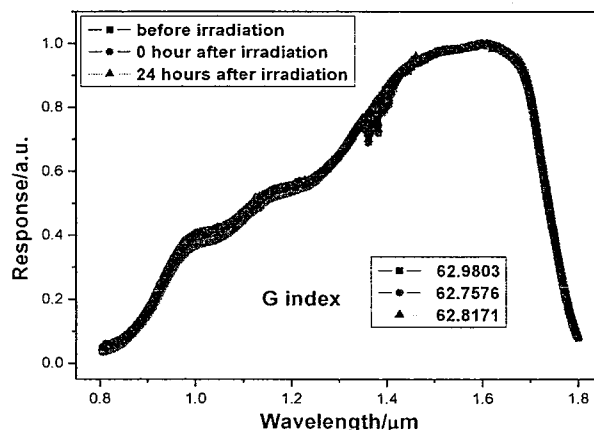


图 6.3.3 辐照前后响应光谱特性

Fig6.3.3 The characteristic of response spectrum before and after sunlight irradiation

6.4 本章小结

空间应用中 InGaAs 探测器可能会受到强太阳光直接辐照, 本章研究了太阳光直接辐照前后探测器性能的变化。研究结果表明, 强太阳光直接辐照下探测器实时响应信号随时间增加而减小, 辐照后探测器的暗电流暂时性增大, 但经过一定时间后可以恢复, 响应光谱基本没有变化。

7 全文总结与展望

7.1 全文总结

短波红外 InGaAs 探测器具有稳定性良好、抗辐照和工作温度高等特点，在红外系统小型化、低成本等方面具有较强的竞争力，被广泛用于空间遥感、光通讯和环境监测等众多领域。基于 InGaAs 探测器发展趋势和国家对于空间遥感用 InGaAs 探测器的迫切需求，本论文在已有的基础之上对台面型 InGaAs 探测器暗电流进行了成分分析，并从探测器制备工艺方面提出了一些改进方法，以降低探测器的暗电流，并重点研究了 ICP 刻蚀台面成型技术的损伤机理，以及较小损伤的新刻蚀工艺；突破了高密度、小间距的长线列 InGaAs 探测器制备关键工艺，实现了背照射式 1024×1 元交错排列线列焦平面探测器，以及背照射式 $2\mu\text{m}$ 间距的 800×1 元一字型排列线列焦平面探测器，测试并分析了焦平面探测器的光电性能。所取得的主要研究成果如下：

1. 台面型 InGaAs 探测器暗电流分析

- 1) 利用台面型 InGaAs 探测器暗电流各成分各自不同的温度、电压特性，从探测器的测量特性进行反演，计算出了各主要电流成分，明确了台面型 InGaAs 探测器暗电流过大的主要来源，为降低台面型探测器暗电流提供了理论依据。对于 InP 帽层的常规台面型工艺制备的 InGaAs 探测器，其暗电流以表面复合电流和分路电流为主，主要来源于吸收层的界面处和台面的侧表面；而采用宽禁带的 InAlAs 作为帽层的 InGaAs 探测器，其漏电引起的分路电流得到了有效的抑制。
- 2) 分析了台面型 InGaAs 探测器暗电流与光敏元周长面积比的关系，来自台面侧表面的电流密度约为 $8.86 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ，载流子的扩散长度约为 $5.6\mu\text{m}$ ，当空穴的扩散系数取为 $7.5 \text{ cm}^2/\text{s}$ 时，台面侧表面的少子寿命约为 41.8 ns 。

2. 台面型 InGaAs 探测器制备工艺改进

- 1) 采用了热处理的方法释放刻蚀损伤引入的应力、并消除刻蚀表面的电荷堆积，探测器暗电流平均减小了 19.8%，探测率平均提高了 29.7%。
- 2) 采用了室温下去除氧化层后硫化的方法，消除刻蚀表面的断键，探测器暗电流平均减小了 57%，探测率平均提高了 23%。
- 3) 采用了先退火后钝化的工艺流程，避免了电极退火过程中对钝化膜的影响，提高探测器制备的成品率。但是，在目前工艺基础上，由于延伸波长台面型探测

器材料较高的位错密度，该方法对其不适用 InGaAs 探测器台面成型技术研究。

3. InGaAs 探测器台面成型技术研究

- 1) 采用 Raman 光谱技术和 X 射线衍射(XRD)技术，研究了 Cl_2/N_2 气氛刻蚀 InGaAs 的主要损伤机制，确定了以晶格缺陷损伤为主的；采用微波反射光电导衰退的方法表征了不同处理工艺下表面的缺陷损伤，刻蚀表面湿法腐蚀和硫化的方法都一定程度的减小了表面的缺陷损伤和断键，但是深层次的缺陷仍不能避免。
- 2) 采用正交设计试验方法研究了 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛刻蚀 InGaAs 材料的低损伤工艺新方法，获得了优化的工艺条件：在温度为 60°C 、ICP 功率为 600W、RF 功率为 45W、压强 2mT 的刻蚀条件下，刻蚀的表面平滑、离子轰击损伤较小。采用该刻蚀条件研制了短波红外 InGaAs 探测器，研究结果表明其暗电流的得到了改善。

4. 高密度单片长线列 InGaAs 探测器的研制

- 1) 通过减薄光刻胶厚度、高温快速烘烤的方法，优化光刻曝光和显影时间，并且采用 RIE 刻蚀与湿法腐蚀结合的方法，实现了精确的台面定义。
- 2) 采用平行光管测试系统测量了带红外镜头的焦平面探测器的调制传递函数，大约为 0.4，同时利用平行光管产生的小光点研究了线列探测器垂直方向保留吸收层对光敏元串音的贡献，发现光学部分的串音基本可以忽略，主要是电子横向扩散引起的电串音起作用。
- 3) 实现了背照射、中心距为 $15\mu\text{m}$ 、光敏元交错排列的 1024×1 元线列探测器；实现了背照射、中心距为 $25\mu\text{m}$ 、光敏元一字型排列的 800×1 元线列探测器，与读出电路直接互连的焦平面探测器响应非均匀性约为 4.3%，平均峰值探测率达到了 $6.4\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

5. InGaAs 探测器太阳光直接辐照的初步研究

研究了太阳光直接辐照对探测器性能的影响，太阳光直接辐照下探测器实时响应信号随时间增加而减小，辐照后探测器的暗电流暂时性增大，经过一定时间后可以恢复，而探测器的响应光谱基本没有变化。

7.2 展望

虽然本论文工作取得了一定的研究结果，研究了台面型 InGaAs 探测器暗电流成分、制备工艺等问题，但仍然有大量的问题需要解决，需要继续开展大量的

研究工作，以实现性能优良的 InGaAs 探测器、甚至广泛的空间应用。

1. 宽禁带 InAlAs 帽层材料的欧姆接触

根据前面研究结果可以看到，宽禁带的帽层可以有效的抑制漏电，降低探测器的暗电流，但同时为电极接触的制作增加了难度。因此，有必要研究适合宽禁带帽层材料的金属膜系以及退火条件，实现电极的欧姆接触，或改善接触层材料设计，如增加高掺杂浓度的 InGaAs 帽层。

2. 界面导致漏电的抑制

目前台面型 InGaAs 探测器暗电流是以表面复合电流和漏电引起的分路电流为主的，吸收层界面的位错缺陷等也是引起漏电的重要因素，因此，优化材料结构设计和生长技术，有利于降低探测器的暗电流。

3. 进一步优化 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛的刻蚀条件

本论文只是初步得到了 $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛的刻蚀条件，但关于 CH_4 聚合和 H 钝化作用对刻蚀损伤的影响，还有待进一步的研究；另外，对于 InAlAs 帽层的 $1.7\mu\text{m}$ 材料以及延伸波长 $2.4\mu\text{m}$ 材料的刻蚀条件，也需要进一步的研究。

总之，空间遥感用台面型 InGaAs 探测器的研究取得了一些进步，仍需要进行大量的研究工作。一方面是探测器材料结构设计、生长，以及探测器的制备工艺方法；另一方面，则是探测器与读出电路之间的耦合、封装等问题，以期得到性能优良的探测器组件。