

分类号_____

密级_____

UDC _____

编号_____

中国科学院研究生院 博士学位论文

平面型 InGaAs 线列红外焦平面探测器技术研究

吴小利

指导教师 龚海梅 研究员

中国科学院上海技术物理研究所

申请学位级别 博 士 学科专业名称 微电子学与固体电子学

论文提交日期 2008 年 5 月 论文答辩日期 2008 年 6 月

培养单位 中国科学院上海技术物理研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席 张永刚 研究员

学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：吴小利

2008年6月6日

学位论文使用授权说明

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

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

论文作者签名：吴小利

2008年6月6日

指导教师签名：[Signature]

2008年6月6日

目录

目录.....	I
摘要.....	IV
Abstract.....	VI
第一章 引言.....	1
1.1 红外波段分类与大气窗口.....	1
1.2 红外探测器材料发展.....	2
1.3 铟镓砷短波红外焦平面器件的研究现状.....	5
1.3.1 国际研究现状.....	5
1.3.1.1 在军事方面的进展.....	5
1.3.1.2 在空间遥感领域的进展.....	5
1.3.1.3 在民用方面的进展.....	9
1.3.2 国内研究现状.....	9
1.4 铟镓砷短波红外焦平面器件的发展趋势.....	10
1.4.1 InP 层减薄.....	11
1.4.2 二维电子气的电压调制.....	12
1.4.3 吸收层 In 组分的调整.....	12
1.5 光伏型 InGaAs 红外探测器的结构分类.....	13
1.6 本论文研究目的与主要内容.....	13
参考文献.....	14
第二章 平面型铟镓砷探测器的成结工艺研究.....	17
2.1 引言.....	17
2.2 器件工艺.....	19
2.2.1 常规器件工艺.....	19
2.2.2 器件工艺改进.....	19
2.3 器件结果.....	21
2.4 小线列器件实验验证.....	24
2.4.1 线列器件的制备.....	24
2.4.2 器件的探测率测试.....	24
2.5 小结.....	26
参考文献.....	26
第三章 基于 I-V 特性的器件欧姆接触研究.....	28
3.1 引言.....	28
3.2 曲线拟合及其验证.....	28

3.2.1 I-V 曲线拟合	28
3.2.2 方法验证	30
3.3 p 电极的工艺改进.....	35
3.4 小结.....	38
参考文献.....	38
第四章 InGaAs 光伏器件 p-n 结二维电学性质表征.....	40
4.1 引言.....	40
4.2 扫描电势显微(SKPM)测试	40
4.2.1 测试原理	40
4.2.2 InGaAs 与 InP 材料参数	42
4.2.3 样品测试	43
4.2.4 p-n 结的位置.....	43
4.2.5 p 型杂质掺杂浓度	48
4.3 扫描电容显微 (SCM)测试	49
4.3.1 测试原理	49
4.3.2 结果与讨论	51
4.4 小结.....	52
参考文献.....	52
第五章 256×1 InGaAs 线列器件的制备工艺.....	54
5.1 引言.....	54
5.2 线列器件关键工艺研究.....	54
5.2.1 器件版图与工艺	54
5.2.2 器件的有效光敏元畸形	57
5.3 线列器件结构与工艺改进.....	59
5.3.1 版图改进	59
5.3.2 腐蚀误差的控制	60
5.3.3 器件的响应分布	62
5.4 器件性能参数与测试.....	62
5.4.1 等效噪声功率和探测率 ^[8]	62
5.4.2 响应率	63
5.4.3 性能测试	64
5.5 小结.....	66
参考文献.....	66
第六章 器件少子寿命测试及其与器件性能的关系.....	68
6.1 引言.....	68

6.2 μ PCD 测试.....	68
6.2.1 测试原理.....	68
6.2.2 测试结构.....	69
6.2.3 μ PCD 测试.....	70
6.3 OCVD 测试.....	71
6.3.1 测试原理.....	71
6.3.2 OCVD 测试.....	73
6.3.3 OCVD 法的测试条件.....	76
6.4 器件的量子效率与少子寿命的关系.....	77
6.5 小结.....	79
参考文献.....	79
第七章 结论.....	80
7.1 主要结论.....	80
7.2 存在的问题.....	81
博士学位期间发表的论文.....	82
致谢.....	84

摘要

InGaAs/InP p-i-n 探测器能够响应短波红外波段 (0.9~2.5 μm), 在室温下具有较高探测率, 可实现非制冷探测, 而且成熟的 InGaAs 材料外延技术为高性能器件制备提供了基础, 这些使 InGaAs 探测器在军用、民用、空间遥感、光通讯以及环境监测等领域将具有广泛的应用前景。本论文主要针对平面型 InGaAs 红外探测器的器件工艺以及器件表征方法进行了研究, 主要内容与结论如下:

采用 Zn 的闭管扩散方式制备了平面型 InP/InGaAs p-i-n 红外探测器, 改进的器件工艺改善了器件的 p-n 结特性, 降低了器件的噪声电流, 提高了器件的探测率与均匀性。将这一工艺应用于八元小线列器件的制备, 器件的峰值探测率平均值为 $8.11 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$, 不均匀性为 4.69%。这些结果为更大规模线列器件的制备与研究提供了基础。

通过两种方法研究了器件的 p 电极接触电阻: 基于器件 I-V 曲线的拟合以及器件工艺同步制备了传输线模型结构, 并计算了接触电极的比接触电阻, 结果表明, 两种方法得到的电阻值有很好的 consistency。从工艺上将器件的 p 电极从原先的 Au/Zn/Au 金属体系改为单层的 Au 层, 研究表明, 单层 Au 层作为 p 电极不仅使器件的电极工艺得以简化, 而且它与器件表面有更好的粘附性, 其接触电阻更小, 均匀性更好。

采用扫描电势和扫描电容显微技术实现了对 p-n 结二维电学性质的表征。结果表明, 两种方法都可以直观地给出 p-n 结的结区形状, 而且表征结果具有较好的一致性, 并通过理论计算得到了 p-n 结的位置。

进行了平面型 256 $\times$ 1 InGaAs 线列器件的结构设计与工艺改进, 通过设计测试结构实现了湿法腐蚀过程中对钻蚀的观察与控制, 特别是, 通过改进器件的结构很好地抑制了器件有效光敏元的畸形, 最终实现器件有效光敏元的准确定义。通过与读出电路互连, 测试了 256 $\times$ 1 InGaAs 线列组件性能, 室温下组件平均峰值响应率为 1.16 A/W, 不均匀性为 4.69%, 平均峰值探测率为 $5.58 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 。

制备了 InGaAs 大光敏元器件作为测试结构, 对其进行 μPCD 与 OCVD 两种寿命测试手段的同步测试, 对比了两种方法得到的寿命值, 结果表明, 在样品的台面区域, 两者的平均值分别为 112 ns 和 116 ns, 而对应测试点的相对偏差平均

值为 3.8%，这说明两者具有较好的一致性。同时，研究了单元器件的量子效率和 OCVD 少子寿命之间的关系。

关键词：短波红外探测器；铟镓砷；平面型；IV 曲线

作者：吴小利

导师：龚海梅 研究员

学科：电子科学与技术

专业：微电子学与固体电子学

字数：约 30000

Technique study on planar InGaAs linear infrared focal plane arrays**Abstract**

Wu Xiaoli (microelectronics and solid electronics)

Directed by Professor Gong Haimei

Covering the entire short-wave infrared spectrum from 0.9 to 2.5 μm , independent of cooling system, as well as with advanced material epitaxial technique, ternary InGaAs photodiodes found wide applications in military, commercial, space remote sensing, fiber-optic telecommunication and environment monitoring. This paper studies mainly on the process research and method development of device characterization of planar InGaAs infrared detectors.

Planar InP/InGaAs p-i-n infrared detectors were fabricated by sealed-ampoule Zn diffusion. Device process was revised to improve the device junction property, decrease the noise current and increase the device detectivity as well as its uniformity. The device process was applied to the fabrication of 8 elemental linear array and device performance was measured with the peak detectivity of $8.11 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ and nonuniformity 4.69%.

Series resistances of the p-type electrode of devices were researched by the IV curving fitting and TLM structure calculation and these two methods were shown to have good consistency. Electrode process was simplified and improved by changing the original Au/Zn/Au metal system to single Au layer which was proved to have good adhesive ability to sample surface, less resistance and better uniformity.

Electrical property mapping of pn junction was obtained by Scanning Potential Microscope and Scanning Capacitance Microscope with good consistency. Junction depth of device could be extrapolated from the potential or capacitance mapping of the pn junction.

Structure design and process improvement of 256×1 InGaAs linear array were achieved. Measurement structures were designed to monitor the wet etching process, especially, device structure was improved to suppress the abnormality of the photo active area. Device performance was measured with the peak responsivity of

1.16A/W , nonuniformity 4.69% and peak detectivity $5.58 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$.

Minority carrier lifetime was measured by Microwave Photo Conductivity Decay and Open Circuit Voltage Decay synchronously to ensure their comparability. The results showed that the lifetime average on the mesa were 112ns and 116ns respectively with the discrepancy of 3.8%, which revealed that these two method were consistent in some level. And quantum efficiency and OCVD lifetime of single elemental device were measured and their relationship was discussed.

Key word: short wave infrared detector, InGaAs, planar, I-V curve

第一章 引言

1.1 红外波段分类与大气窗口

红外线是电磁波谱的一个部分，这一波段位于可见光和微波之间。根据普朗克辐射定理，凡是绝对温度大于零度的物体都能辐射电磁能，物体的辐射强度与温度及表面的辐射能力有关，辐射的光谱分布也与物体温度密切相关。在电磁波谱中，我们把人眼可直接感知的 $0.4\sim 0.75\mu\text{m}$ 波段称为可见光波段，而把波长从 $0.75\sim 1000\mu\text{m}$ 的电磁波称为红外波段，红外波段的短波端与可见光红光相邻，长波端与微波相接。可见光辐射主要来自高温辐射源，如太阳、高温燃烧气体、灼热金属等，而任何低温、室温或加热后的物体都有红外辐射。红外波段的分类如图 1.1 所示^[1]：

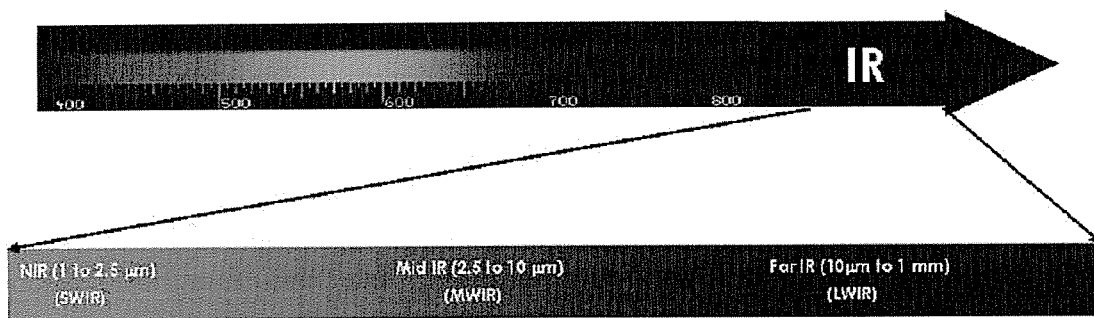


图 1.1 红外光的分类

Fig.1.1 Sorts of infrared

在红外探测器的发展过程中，军事以及航空遥感上的要求一直左右着这类器件的发展方向。在这些应用中，目标的红外辐射常常要在大气中传播相当远的距离才能到达探测系统，所以，要考虑到大气对红外光的影响。在红外波段，大气的吸收作用比散射严重得多。大气含有多种气体成份，根据分子物理学理论，吸收是入射辐射和分子系统之间相互作用的结果，而且仅当分子振动(或转动)的结果引起电偶极矩变化的，才能产生红外吸收光谱。由于地球大气层中含量最丰富的氮、氧、氩等气体分子是对称的，它们的振动不引起电偶极矩变化，故不吸收红外。大气中含量较少的水蒸汽、二氧化碳、臭氧、甲烷、氧化氮、一氧化碳等非对称分子，振动引起的电偶极矩变化能产生强烈红外吸收。

图 1.2 为海平面上约 2 公里的水平路径所测得的大气透过曲线，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。由于低层大气的臭氧浓度很低,在波长超过 $1\mu\text{m}$ 和高度达 12 公里的范围内,意义最大的是水汽和二氧化碳分子对辐射的选择性吸收,如二氧化碳在 2.7、4.3 和 $15\mu\text{m}$ 有较强的吸收带 [2]。

图 1.2 中的几个高透过区域称之为大气窗口。近、中、远红外波段的大气窗口有: $0.95\sim 1.05\mu\text{m}$ 、 $1.15\sim 1.35\mu\text{m}$ 、 $1.5\sim 1.8\mu\text{m}$ 、 $2.1\sim 2.4\mu\text{m}$ 、 $3.3\sim 4.2\mu\text{m}$ 、 $4.5\sim 5.1\mu\text{m}$ 和 $8\sim 13\mu\text{m}$ 。有时我们也粗略地认为地球大气有 $1\sim 3\mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 三个大气窗口。为了使红外探测器能够探测远距离的目标,它的工作波段应该处于大气窗口中,这也是红外材料选择的依据。

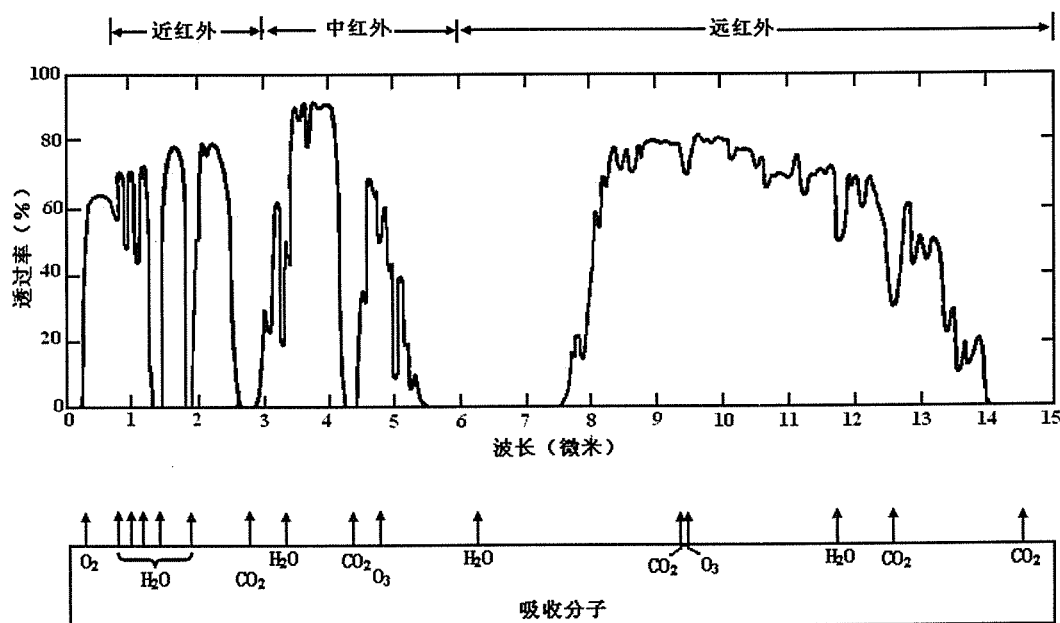


图 1.2 大气对红外光的透射

Fig.1.2 Transmission of atmosphere to infrared

1.2 红外探测器材料发展

40 年代后期到 50 年代,第一种实用的 PbS 红外探测器被研制出来,它可响应至 $3\mu\text{m}$, PbS 是在二次大战中期间在德国发展起来的,并在战争中得到多种应用。这一时期还发展了多种红外探测器材料,例如利用 $3\sim 5\mu\text{m}$ 大气窗的 PbSe、PbTe 和 InSb 材料,它们响应波长都超过了 PbS。同时出现了响应在 $8\sim 14\mu\text{m}$ 大气窗口和 $14\sim 30\mu\text{m}$ 的长波大气窗口非本征锗器件。

50年代末, III-V, IV-VI, 和 II-VI族半导体合金的概念被提出, 其中特别重要的是HgCdTe材料, 这种材料为英国皇家雷达研究所W.D.Lawson等于1959年首次报道^[3], 在此之后, 科学家们对它进行了深入研究, 发现这种材料的几乎各种基本物理性质都适宜于红外器件, 用它可能做出任何指定波段的优质红外探测器。Hg_{1-x}Cd_xTe是二元化合物CdTe和HgTe的连续固熔体, 其中CdTe是半导体, 禁带宽度约1.6eV(77K), HgTe是半金属, 禁带宽度约-0.3eV(77K), 在一定温度下, 组分x决定了材料的禁带宽度, 通过调节x值可得到不同的E_g, 其值从0eV到1.6eV连续变化, 这几乎覆盖所有重要红外大气窗口的响应波段。此外HgCdTe材料还有许多优良的物理性质, 例如电子有效质量小而本征载流子浓度低, 故反向饱和电流小, 探测器噪声低, 探测率高; 介电常数小, 减小了器件电容, 提高了频率响应; 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, 可得到表面态密度低的半导体氧化物界面; 热膨胀系数比较接近硅, 易于制造与硅CCD混成的阵列器件。

在60年代初, 许多国家先后对HgCdTe材料开展研究^[4], 到60年代中期, 研制成功了实用的HgCdTe红外探测器, 将中短波的工作温度提高到了室温或近室温, 同时8~14 μ m的探测器的工作温度提高到了液氮温度。70年代熔体生长晶体技术的提高和外延生长薄膜晶体的广泛应用促使HgCdTe红外探测器得以更迅速的发展, 对应三个大气窗口的红外探测器被研制出来^[5]。同时, 器件的规模也从原来的单元发展到线列, 与用其它材料做的同波段探测器相比, 它们的工作性能更好。进入八十年代, 随着红外系统的不断发展和使用部门不断提出的新要求, 人们研制出第三代红外探测器——红外焦平面列阵器件^[6]。焦平面列阵器件包括了探测器和处理电路两个部分, 使得从焦平面引出杜瓦瓶的引线数目降低, 杜瓦瓶结构大大简化, 同时也简化了后续的信号处理。各技术发达国家投入大量的人力和资金对焦平面探测器进行研究, 发展方向已从单色向双色或者多色发展^[7], 从致冷成像向非致冷成像发展。

虽然HgCdTe材料相对于以往的红外探测器材料来说有着许多优势, 但HgCdTe材料制作的探测器同样存在着很大的局限性, 主要表现为: HgCdTe的晶体制备困难, 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。此外, HgCdTe要求有极为精确的组分控制, 精确的确定其禁带宽度, 以

控制材料的光响应截止波长,这就要求整个晶片有很高的组分均匀性。这使得制备探测器阵列难度增大。而且 HgCdTe 材料本身存在着严重的隧道效应,用这种材料制作的器件在 77K 工作时隧道电流大,为了使其能够灵敏的探测出红外辐射量的微弱变化,必须在低温制冷条件下工作,以抑制热噪声的影响,因而装置复杂,价格昂贵,使用不方便,在应用方面受到诸多限制。此外,焦平面阵列的发展方向之一是阵列元数逐渐增大,像元间距逐渐减小,因此需要在最小的间距内获得最高的信号处理能力和最多的可存电荷。这就要求材料的质量要好,量子效率高,且探测器的光敏面积要控制精确。随着红外焦平面阵列尺寸的增大和像元间距的减小,HgCdTe 探测器阵列与硅读出电路之间热失配问题逐渐突出起来。

与 HgCdTe 相比,III-V 族的 InGaAs 材料具有直接带隙,高电子迁移率,可与 InP 晶格匹配生长等优点,由它制作的探测器量子效率高,灵敏度高,结构简单,成本低,重量轻,使用方便,此外,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制冷的制约,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。表 1.1 比较了 InGaAs 和 HgCdTe 探测器在不同探测波段及温度时的 R_0A 值^[8]。可以看到在短波区域内不同的波段及温度时,InGaAs 探测器比 HgCdTe 探测器有更好的性能。这些优势使 InGaAs 红外探测器受到广泛关注。

表 1.1 InGaAs 和 HgCdTe R_0A 比较

$\lambda(\mu\text{m})$	工作温度(K)	$R_0A(\Omega\text{cm}^2)$	
		InGaAs	HgCdTe
1.4	300	2.5×10^5	4×10^4
	220	1.3×10^5	7×10^6
1.7	300	2.5×10^5	2×10^2
	220	1.3×10^8	2×10^5
2.1	300	2.5×10^3	7×10^1
	220	6.5×10^5	7×10^3
2.5	300	1.3×10^2	1×10^1
	220	1.0×10^5	1×10^3

1.3 铟镓砷短波红外焦平面器件的研究现状

1.3.1 国际研究现状

1.3.1.1 在军事方面的进展

来自军事应用的牵引和推动使红外摄像机技术得以发展^[9],但传统的以光子型红外探测器阵列为主的红外摄像机必须以低温制冷才可以获得高性能,巨额的成本限制了它的应用。非制冷的 InGaAs 焦平面阵列,由于可以在室温下正常工作,具有广阔的应用前景,美国的传感器无限公司,在 DARPA 和 NVESD 支持下正在加速发展非致冷的大面阵 InGaAs 红外焦平面阵列和摄像机技术,主要是用在夜间微光下成像,能获得空间维和光谱维的丰富信息,在侦察、便携式武器、战场监视、夜间目标识别等都会有很大的应用。图 1.3 为该公司生产的短波红外相机在没有月亮的夜晚时,拍摄的图像,可以清晰地辨别出人和树^[10]。



图 1.3 无月光夜晚短波红外相机拍摄的图像

Fig.1.3 Image capture by short wave infrared camera on moonless night

1.3.1.2 在空间遥感领域的进展

$1\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$ 红外探测技术在空间遥感领域有着重要的应用,主要用于了解资源分布、土壤水分监测、大气成分分析、农作物估产、预警等方面。同样,制冷方法的要求给红外仪器的应用带来很大不便,一台仪器的大部分质量和功率都被焦平面制冷占据,所以无法实现红外仪器的微型化,同时也加重了发射火箭的负载。InGaAs 探测器对制冷要求比较低, $1.7\mu\text{m}$ 的 InGaAs 焦平面可在室温下工作^[11],而 $2.5\mu\text{m}$ 的 InGaAs 焦平面只需使用热电制冷器,而且 InGaAs 探测器具有高探测率,低的暗电流。“轻便、灵敏、廉价”是未来空间使用的要求,InGaAs 短波焦平面探测器具有小型化、低功耗、高探测率的优点,在机载成像光谱仪、机载超光谱成像仪和卫星有效载荷上成像光谱仪、近红外相机、卷云探测仪、月

球和深空探测等光电遥感仪器方面有重要的应用前景。

国际上首先进行空间遥感用 InGaAs 短波红外探测器研究的是法国的 THOMSON^[12], 从上世纪八十年代中期开始, 他们研制了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面, 应用在 SPOT4 卫星上。该焦平面器件工作波长为 $1.55\sim 1.70\mu\text{m}$, 室温工作, 是由 10 个 300 元 InGaAs 小线列拼接而成, 主要应用于农业和湿度的监测, 图 1.4 为利用 SPOT4 上 VEGETATION 短波红外探测器得到的中国东北森林种类和分布图。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 , 探测器的动态范围超过 4000, 非线性度小于 1%。而 SPOT5 同样有一个由 10 个 300 元 InGaAs 线列探测器拼成 3000 元 InGaAs/InP 短波红外探测器, 响应波段为 $1.58\sim 1.75\mu\text{m}$ ^[13]。

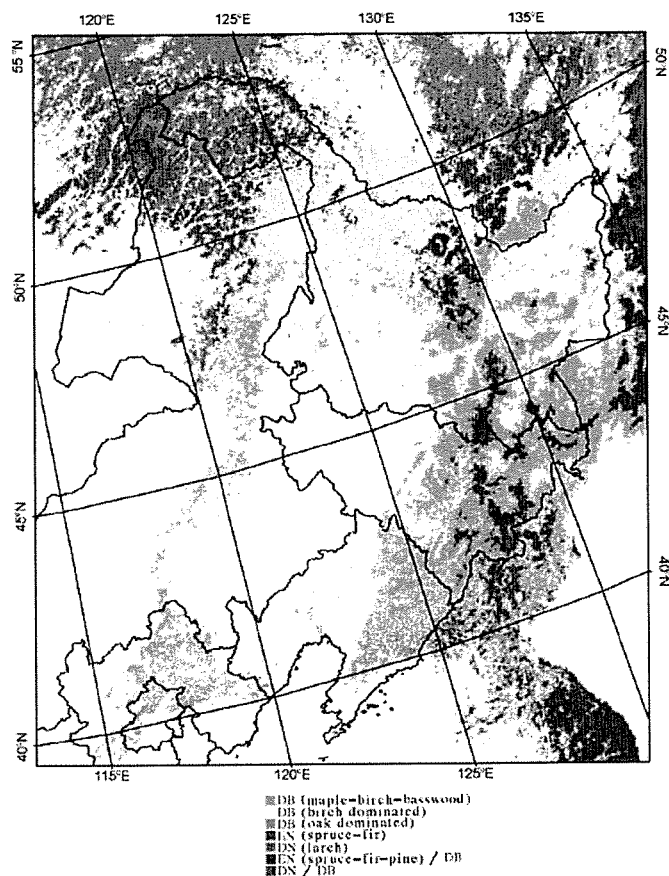


图 1.4: 利用 SPOT4 上的 SWIR 探测器得到的中国东北森林分布及种类

Fig.1.4 Forest distribution and species in northeast China by SWIR

美国^[14]在2000年NASA 发射的EO-1 环境观测卫星, 其核心部件Leisa大气

校正仪LAC 上装有3 个 256×256 元 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 光伏探测器面阵, 其像元尺寸为 $40\mu\text{m}$, 工作波段位于 $0.9 \sim 1.6\mu\text{m}$ 。

印度^[15]在 2003 年发射了环境卫星 IRS-P6, 它的 AWiFS 和 LISS-3 传感器的短波红外波段采用了 6000 元的 InGaAs 线列探测器, 光敏元尺寸为 $13\mu\text{m} \times 13\mu\text{m}$, 响应波段 $1.55 \sim 1.70\mu\text{m}$, 相邻光敏元呈品字型排列, 工作温度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。而 1995 年^[16]发射的 IRS-1C 卫星同样有一个 LISS-3 传感器, 它的短波红外波段采用了 2100 元的 InGaAs 线列探测器, 它由七个 300 元的光伏型 InGaAs 线列组成, 工作在 -10°C 。

美国的 EPITAXX 公司在 InGaAs 探测器阵列的研究上也取得了很大的进展。他们从上世纪八十年代后期开始进行研究, 先后研究了不同响应波长的 InGaAs 线列和面阵, 欧洲空间局(ESA)在新一代的环境卫星(ENVISAT)上采用的 1024 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面就是应用了他们的产品。1988 年 G.H.Olsen^[17]用氢化物汽相外延制作了响应波长为 $0.8 \sim 1.7\mu\text{m}$ 的 256 元 InGaAs 探测器阵列。该探测器主要性能: 室温条件下, 在 $1.3\mu\text{m}$ 响应率为 0.9A/W , 平均量子效率为 86%, -1V 时, 暗电流小于 100pA , -5V 时, 暗电流小于 1nA 。同年, 他们还制备了响应波长达 $2.6\mu\text{m}$ 的 InGaAs 探测器^[18]。为了使响应波长达到 $2.6\mu\text{m}$, $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 中 In 的组分 x 为 0.82, 此时 InGaAs 与衬底 InP 晶格并不匹配, 因此需要在 InP 上生长缓冲层。他们选用 InAsP 作为缓冲层, 原因是因为晶格常数相同时 InAsP 的禁带宽度比 InGaAs 的禁带宽度大, 由此造出的器件可具有更小的暗电流, 更好的性能。其它工艺基本相同。器件的基本性能: -1V 时, 平均暗电流为 $0.9\mu\text{A}$, 电容为 1.9pF , $2.5\mu\text{m}$ 时响应率为 1.0A/W , 最高量子效率 70%, 平均量子效率为 50%。

1990 年, G.H.Olsen^[19]研制了响应波长为 $1.0 \sim 1.7\mu\text{m}$ 的 128×128 InGaAs 焦平面, 主要应用于室温近红外光谱和空间成像。采用的工艺和单元结构与 1988 年制备的 256 元 InGaAs 探测器阵列相同, 每一像素大小为 $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$, 相隔 $60\mu\text{m}$ 。器件主要性能: -5V 时, 暗电流为 100pA , 电容为 0.1pF , $1.3\mu\text{m}$ 时响应率为 0.8A/W , 平均量子效率达 80%。1991 年, G.H.Olsen^[20]对他们的工作进行了总结, 认为 InGaAs 探测器在 $1 \sim 3\mu\text{m}$ 波段可以达到极好的性能, 具有极其重要的应用。

1992 年, EPITAXX 公司^[21]开始为欧洲空间局(ESA)研制 1024 元 InGaAs 短

波红外扫描焦平面。K.P.Linga^[22]沿用了 G.H.Olsen 在 1989 年研制响应波长为 $2.6\mu\text{m}$ InGaAs 探测器的工艺, 采用氢化物汽相外延制方法在 InP 上生长 InAsP 缓冲层, 不同的是为了减小晶格失配位错, K.P.Linga 生长了 15 层缓冲层, 使相邻两层的晶格失配小于 0.13%。单元器件吸收层厚 $4\mu\text{m}$, 保护层厚 $1.5\mu\text{m}$, 每一像素大小为 $25\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ 。

美国的传感无限公司在 InGaAs 探测器的研究方面处于世界领先地位。1996 年 L.J.Kozlowski^[23]测试了该公司研制的 128×128 焦平面器件, 响应波长 $1.68\mu\text{m}$, 在 230K, 优值因子 R_0A 为 $2\times 10^8\Omega\text{cm}^2$, 平均探测率达 $3.5\times 10^{14}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 量子效率 63%; 在 290K, 优值因子 R_0A 约为 $10^6\Omega\text{cm}^2$, 平均探测率达 $1.35\times 10^{13}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。

1999 年, 该公司的 M.J.Cohen 等报导了他们采用改进工艺研制的 320×240 焦平面, 响应波长 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$, 器件达到了更高的性能。在 290K, 暗电流密度小于 $10^{-8}\text{A}/\text{cm}^2$, 优值因子 R_0A 大于 $10^6\Omega\text{cm}^2$, 平均探测率达到了 $10^{14}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。他们在研制过程中, 采用了几种措施, 首先是通过 p-n 结的小型化来提高探测率。其次, 他们提高了吸收层和保护层的掺杂浓度。InGaAs 吸收层的掺杂浓度从 $1\sim 5\times 10^{14}\text{cm}^{-3}$ 提高到 $5\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$, InP 保护层的掺杂浓度从 $5\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 提高到 $5\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 。这与 K.P.Linga 采用的方法类似, M.J.Cohen 认为高掺杂能补偿缺陷态, 特别是在界面的情况; 同时可以在进行 Zn 掺杂时, 阻止 InGaAs/InP 界面的 InGaAs 吸收层出现 n 型到 p 型的转变, 因为研究证明 Zn 在扩散时会在界面积累并沿着界面运动, 导致 p-n 结的面积和暗电流的增大。他们采用新工艺研制的 320×240 焦平面^[24]在 290K 时平均探测率为 $10^{14}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 在 250K 时为 $1.4\times 10^{15}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。

2004 年美国传感无限公司^[25]制备了 320×256 元铟镓砷焦平面, 用于夜间成像, 其单元尺寸为 $25\mu\text{m}\times 25\mu\text{m}$, 在 22°C , -500mV 下暗电流仅为 120fA。

2005 年美国传感无限公司^[26]制备了规模为 1280×1024 和 1024×1024 元的 InGaAs 短波红外焦平面(图 1.5), 响应波长为 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$, 光敏元尺寸为 $20\times 20\mu\text{m}^2$, 优值因子 R_0A 为 $1.5\times 10^7\Omega\cdot\text{cm}^2$ (256K)和 $8\times 10^6\Omega\cdot\text{cm}^2$ (280K), 这是迄今为止所报道的最大规模的铟镓砷焦平面。

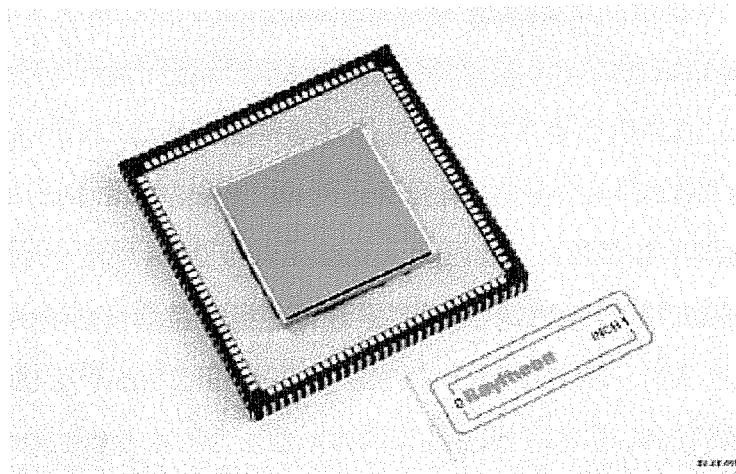


图 1.5 1024×1024 InGaAs 焦平面组件
Fig.1.5 1024×1024 InGaAs sensor chip assembly

1.3.1.3 在民用方面的进展

由于 InGaAs 器件和整机系统性能和可靠性的大幅度提高，而且实现了小型便携化，方便的常温下成像，InGaAs 短波红外焦平面阵列现已实现商用化^[27]，具有强大的竞争能力，市场潜力很大。美国、日本和欧洲一些公司生产的民用线列焦平面主要用于光谱仪器上，生产的各种型号的 InGaAs 焦平面阵列的红外摄像机在民用领域也有很大应用前景。例如在警务、民航、安全防范、激光束探测、辨认防伪标志、文物鉴定、工业温度监视等有非常大的应用空间。

在医学和生物学中，InGaAs 相机也有重要应用，例如利用观察细胞发出的较长波段($0.9\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$)的荧光来研究细胞。对可重复利用的材料分类是荧光成像技术应用不断普及的又一个例子。例如在塑料和玻璃瓶子中加入不同波段近红外的染料，这种染料在可见光不起作用，利用滤光片、InGaAs 相机和模式识别软件就可自动对其分类。 $0.9\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$ 波段室温工作的相机，由于与 InP 晶格匹配的 InGaAs 容易生长，适于低成本成像技术，这种相机将在工业中有大量的应用。

1.3.2 国内研究现状

国内也有几家研究机构在研制 InGaAs 探测器，如中科院上海技术物理研究所、中科院上海微系统与信息技术研究所、中科院长春光学精密机械与物理研究所、中科院半导体研究所、武汉邮电科学院、中国电子科技集团第 13 所和第 44

所等。中电 44 所研制用于激光探测的 $2.2\mu\text{m}$ 多元器件以及响应波长 $1.0\mu\text{m}$ ~ $1.7\mu\text{m}$ 的中规模 InGaAs 面阵焦平面样件；其他单位研究的 InGaAs 探测器主要应用于光纤通讯，其研究重点方向主要是提高器件的响应速度。

中科院上海微系统与信息技术研究所采用 GSMBE 方法研制的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ p-i-n 光电探测器，响应率在 $1.3\mu\text{m}$ 时大于 0.80A/W 。2004 年起他们还采用线性缓冲层技术对波长扩展 InGaAs 单元探测器进行了探索性研究，将 InGaAs 探测器的截止波长由约 $1.7\mu\text{m}$ 分别扩展至 $1.9\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ ^[28]，并获得了较好的器件性能，器件室温探测率分别为 $2\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 、 $3\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 和 $3\times 10^{10}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。中科院长春光学精密机械与物理所对晶格匹配的 InGaAs 红外探测材料进行了深入研究，并开展了高 In 组分的 InGaAs 材料的研究。国内其他单位，例如半导体所下属的海特公司和武汉电信器件公司主要研制用于高速 (10Gb/s) 光通信系统的 InGaAs/InP 结构光电探测器，响应率在 $1.3\mu\text{m}$ 时大于 0.80A/W 。中科院上海技物所针对航天遥感应用的特点，对原位掺杂成结和扩散成结的 InGaAs 器件进行了低频噪声和抗辐照特性的研究，并且于 2006 年报道了台面结构的 128×1 线列 InGaAs 短波红外焦平面的制备，在 278K 时平均峰值探测率为 $1.03\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，不均匀性为 18.3% ^[29]，此后又制备了 256 元正照射台面 InGaAs 线列探测器， 278K 时平均峰值探测率为 $1.33\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，焦平面响应率不均匀性为 19.3% ^[30]。

1.4 锑镓砷短波红外焦平面器件的发展趋势

30 多年来，红外探测器技术已从第一代的单元和线阵列演变到了第二代的二维时间延迟与积分 (TDI) $8\mu\text{m}$ ~ $12\mu\text{m}$ 的扫描和 $3\mu\text{m}$ ~ $5\mu\text{m}$ 的 640×480 像元 InSb 凝视阵列。目前先进的红外焦平面阵列技术正处在从第二代向第三代的转折时期。国内外各有关公司厂家研究机构正着眼于 2010 年的市场需求，并加紧确定第三代红外焦平面阵列技术的概念，现已把注意力转向第三代红外焦平面阵列传感器的发展上。

第三代红外焦平面阵列技术要满足以下几种要求：

1) 焦平面上探测器像元集成度为 $\geq 10^6$ 像元，阵列格式 $\geq 1\text{K}\times 1\text{K}$ ，至少双色工作；

- 2)工作温度高, 以便实现低功耗和小型轻量化的系统应用;
- 3)非致冷工作红外焦平面阵列传感器的性能达到或接近目前第二代致冷工作红外焦平面阵列传感器的水平;
- 4)必须是极低成本微型传感器, 甚至是一次性应用的传感器。

第三代红外焦平面阵列传感器有以下三种: (1)大型多色高温工作的红外焦平面阵列, 探测器像元集成度 $\geq 10^6$ 像元; (2)非致冷红外焦平面阵列无须温度稳定或致冷, 可用于分布孔径设计; (3)非致冷工作的微型传感器。

受到同样的驱动力, 近年来, 铟镓砷探测器在多色、量子阱及量子点探测器方面的研究十分活跃, 由于InGaAs的量子阱量子点器件其响应波长以中波和长波红外为主, 以下主要介绍了短波铟镓砷探测器在多色方面的进展, 其实现方式主要有以下几种:

1.4.1 InP 层减薄

InGaAs 材料可以吸收可见及近红外光, 可是, 为了实现对器件表面的钝化, 减小器件的暗电流, 用来制备 InGaAs 探测器的外延材料一般为 InP/InGaAs/InP 双异质结结构, 而 InP 的截止波长为 920nm, 这使得 InGaAs 器件的短波方向响应截止于 920nm, 所以可以通过对 InP 层的减薄实现 InGaAs 器件在短波方向响应的扩展。

1983 年, Paul 等人^[31]通过减薄 InP 帽层的方法, 将单元 InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP 探测器的响应波长在短波方向从 0.9 μ m 扩展到 0.5 μ m, 实现了对可见光的响应。2003 年, 美国 Indigo 公司^[32]报导了短波扩展的 InGaAs 焦平面探测器, 其规模为 320 $\times$ 256 和 640 $\times$ 512, 除了响应 0.9 μ m-1.7 μ m 的短波红外, 这种探测器对可见光和近红外光也有很好的响应。

2005 年, 美国无限传感公司^[33]报导了 320 $\times$ 240 铟镓砷多色焦平面及相机, 其基本结构为光电二极管, 它可以同时对短波红外、近红外和可见光进行成像。为了实现对可见光的探测, 他们采用与 Paul 类似的方式, 将 InP 衬底减薄, 以背照方式工作, 这种探测器的量子效率在波长 500、850、1310nm 处分别为 15%、70%和 85%。

2007 年, 美国无限传感公司^[34]为罗马的空军实验室研制了可调节响应波段的 SWIR 相机, 其焦平面为 640 $\times$ 512 InGaAs 光电二极管阵列, 单元大小为 25 μ m,

通过特殊的工艺去掉光电二极管阵列衬底,使其响应波长扩展到可见光。这种可见短波红外相机可在日光与星光下成像,可以实现战士与战场成像的切换,而且可以特定的范围内观察不同景深的事物(图 1.6)。他们将未来研究的重点放在实现电子与光学系统的小型化、增加读出电路单元带宽、提高器件的响应和降低噪声上。

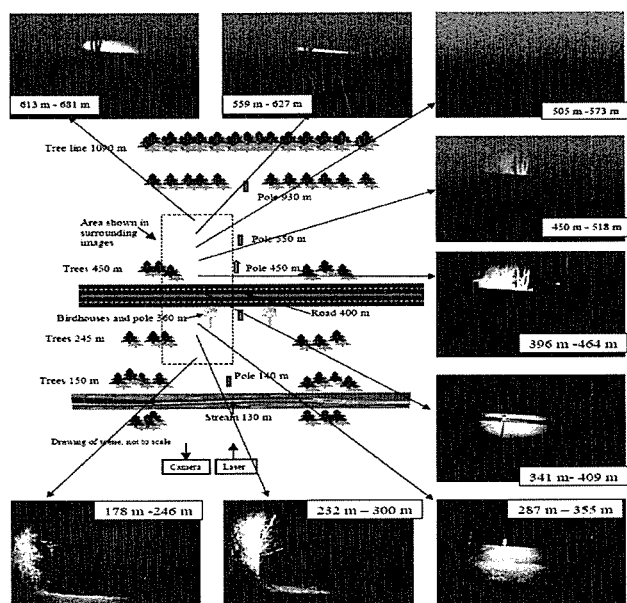


图 1.6 场景示意图及红外照片

Fig.1.6 Spot diagram and infrared images

1.4.2 二维电子气的电压调制

2004 年, Marso 等人^[35]制备了一种基于 HEMT 结构的新型铟镓砷平面型探测器,其基本结构为在 InP 衬底上生长了 InAlAs-InGaAs 的二维电子气体体系,研究表明,这一结构的响应光谱受到器件所加电压的调制,在 1300 和 850nm 处的响应比值从 1V 下的 0.03 升到 1.6V 下的 0.44。

1.4.3 吸收层 In 组分的调整

1994 年, Kim 等人^[36]制备了一种新型的响应三个波长的铟镓砷焦平面器件,这种器件包含具有三种不同 In 组分的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 吸收层,响应波长分别为 $1.65\mu\text{m}(\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As})$ 、 $2.07\mu\text{m}(\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As})$ 、 $2.64\mu\text{m}(\text{In}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As})$,吸收层之间通过 $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ 缓冲层相隔以减少晶格失配带来的暗电流,通过对不同吸收层选择性的腐蚀和扩散在各层上独立地制备 p-n 结以得到不同响应的器件,三种探测

器的量子效率介于 15% 和 95%，暗电流介于 0.01 与 10mA/cm² 之间，这些结果与独立器件的结果相近。

1.5 光伏型 InGaAs 红外探测器的结构分类

InP/InGaAs p-i-n 探测器从结构上分为两类（图 1.7）：台面型和平面型，其主要区别在于 p-n 结的制备工艺。台面型器件是在原位掺杂的 p⁺-i-n⁺ 结构材料上通过刻蚀隔离槽来隔离相邻的器件，这种方式的优点是重复性比较好，工艺简单，相邻单元器件之间的串扰比较小；缺点是隔离槽的刻蚀使得器件侧面失去保护，器件的暗电流和噪声特性变差；平面型器件是在 n-i-n⁺ 结构材料通过对 n 型 InP 层进行 p 掺杂得到，这种方法的缺点是工艺较为复杂，而优点则是器件的 p-n 结埋于 InP 层中，这样减小了器件钝化的困难，使得器件的暗电流和噪声也相对较小，更适用于航空遥感领域，国际上应用于遥感领域的 InGaAs 探测器通常选择平面型结构，而国内遥感用 InGaAs 探测器一般为工艺相对简单的台面型结构，所以，平面型 InGaAs 探测器工艺有待研究。

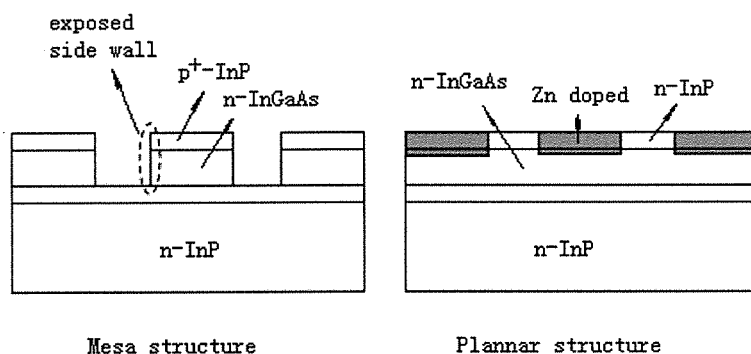


图 1.7 台面型与平面型 InGaAs 探测器结构示意图

Fig.1.7 Structure diagram of mesa and plannar InGaAs photo detectors

1.6 本论文研究目的与主要内容

本文以研制高性能 InGaAs 线列探测器为目的，沿用了国际主流的平面型 InGaAs 探测器结构，对器件工艺进行了初步研究，并且发展了针对于器件的表征方法，为 InGaAs 器件工艺研究提供了更直接的表征手段。第一章回顾了红外技术和探测器的发展，概述了短波红外及 InGaAs 焦平面的研究现状及发展趋势；第二章通过单元器件的制备，研究了器件 p-n 结的成结工艺，通过对工艺的改进实

现了平面结工艺的可重复性；第三章通过对器件IV曲线的拟合研究了器件的串联电阻，并且对器件的p电极工艺进行了改进；第四章采用扫描电势和扫描电容显微技术实现了对p-n结二维电学性质的表征；第五章主要介绍了平面型 256×1 InGaAs线列器件的结构设计与工艺改进；第六章通过测试结构的设计，研究了微波反射光电导衰退法与开路电压衰退法两种寿命测试手段的一致性；并且用开路电压衰退法测试了平面型单元器件的少子寿命，并且研究了少子寿命与器件响应率之间的关系；第七章是全文的总结。

参考文献

- [1] 张敬贤, 李玉丹, 金伟其, 微光与红外成像技术, 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- [2] 刘景生, 红外物理, 北京: 兵器工业出版社, 1992
- [3] 陈衡, 红外物理, 第一版, 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [4] 王守武主编, 半导体器件研究与进展, 第二版, 北京: 科学出版社, 1991.
- [5] A.Rogaslski, M.Razeghi, Narrow gap semiconductor photodiodes, SPIE, 1998, 3287: 2-13.
- [6] D .A. Scribner, M. R Kruer, J. M. Killiany, et al, Infrared focal plane array technology, Proc. IEEE, 1991, 79: 66-85.
- [7] J. Piotrowski, A. Rogalski, New generation of infrared photodetectors, Sensors and Actuat, 1998, 67: 146-152.
- [8] M.J.Cohen, G.H.Olsen. Room temperature InGaAs camera for NIR imaging SPIE, 1993(1946):436-443
- [9] 孙志君, 红外焦平面阵列技术的军用市场展望, 传感器世界, 1995(5): 1-8.
- [10] Alan Hoffman, Todd Sessler, Joseph Roseph Rosbeck, et al, Megapixel InGaAs arrays for low background applications, SPIE, 5783: 32-38.
- [11] Marshall J. Cohen, Gregory H. Olsen, Near-IR imaging cameras operate at room temperature, Laser Focus Word, 1993(6): 109-113.
- [12] W.D Lawson, S.Nielson, E.H.Putley et al. J.Phys.Chem.Solids, 1959, 9:325
- [13] <http://spot5.cnes.fr/gb/satellite/VEGETATION.htm>
- [14] <http://eo1.gsfc.nasa.gov/new/validationReport/Technology/Documents/Reports/LAC.doc>
- [15] Himanshu D., Chirag D., Sandip P. et al., AWiFS Camera For Resourcesat, SPIE 2003, 64050X: 1-11

- [16] <http://www.euromap.de/docs/doc013.html>
- [17] G.H.Olsen, A.M.Joshi, V.S.Ban et al. Multiplexed 256 element InGaAs detector array for 0.8-1.7um room temperature operation. SPIE, 1988, 972:279-285
- [18] G.H.Olsen, A.M.Joshi, S.M.Mason et al. Room temperature InGaAs detector arrays for 2.5um. SPIE, 1989, 1157:276-282
- [19] G.Olsen, A.Joshi, M.Lange et al. A 128×128 InGaAs detector array for 1.0-1.7 microns. SPIE, 1990, 1341: 432-437
- [20] G.H.Olsen, A.M.Joshi, V.S. Ban. Current status of InGaAs detector arrays for 1-3um . SPIE, 1991, 1540:596-605
- [21] A.M.Joshi, V.S.Ban, S.Mason et al. 512 and 1024 element linear InGaAs detector arrays for near infrared (1-3um) environmental sensing. SPIE, 1992, 1735:287-295
- [22] K.R.Linga, A.M.Joshi, V.S.Ban et al. 1024 element linear In_xGa_{1-x}As/InAs_yP_{1-y} detector arrays for environmental sensing from 1um to 2.6um. SPIE, 1993, 2021: 90-97
- [23] L.J.Kozlowski, W.E.Tennant, M.Zandian et al. SWIR Staring FPA performant at room temperature. SPIE, 1996, 2746:93-100
- [24] M.H.Ettenberg, M.J.Cohen, G.H.Olsen et al. InGaAs Focal Plane Arrays and Cameras for Man-Portable Near Infrared Imaging. SPIE, 1999, 3701:225-232
- [25] Martin H. E., Michael B., Mathew O G., High Resolution SWIR Arrays for Imaging at Night, SPIE 2004, 5406: 46-55
- [26] Alan H., Todd S., and Joseph R., et al, Megapixel InGaAs Arrays for Low Background Applications, SPIE 2005, 5783:32-38
- [27] 孙志君, 红外焦平面阵列技术的商用前景展望, 传感器世界, 1999(1):1-6.
- [28] 张永刚, 顾 溢, 朱 诚, 短波红外 InGaAs/InP 光伏探测器系列的研制, 红外与毫米波学报, 2006, 25(1):6-9
- [29] 吕衍秋, 徐运华, 韩冰 等, 128×1 线列 InGaAs 短波红外焦平面的研究, 红外与毫米波学报, 2006, 25(5): 333-337.
- [30] 韩冰, 吕衍秋, 吴小利, 李雪, 龚海梅, 256×1 线列 InGaAs 短波红外焦平面的研究, 激光与红外, 2006, 36(11):1032-1035.
- [31] PAUL P. W., GREGORY H. O., Large-Area and Visible Response VPE InGaAs Photodiodes, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES 1983, 30(4):395-400

- [32] Theodore R. H., Jeffrey B. B., Extended short wavelength spectral response from InGaAs focal plane arrays, SPIE 2003, 5074:481-490
- [33] Tara M., Peter D., Mari-Anne G., 320x240 pixel InGaAs / InP focal plane array for short-wave infrared and visible light imaging, SPIE 2005, 5726:85-91
- [34] James E. Tara J. Martin and Bora M., Develop Multipurpose InGaAs Focal Plane Array Visible/SWIR Camera for Staring and Range-Gated Applications, SPIE 2007, 6572I:1-11
- [35] M.Marso, M.Wolter and P.Kordos, A Novel Two-Color Photodetector Based on an InAlAs-InGaAs HEMT Layer Structure, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2004, 16(11):2541-2543
- [36] Dong-Su Kim, Stephen R. Forrest, et al, A three wavelength infrared focal plane array detector element, IEEE Photonics technology letters, 1994, 6(2):235-238

第二章 平面型铟镓砷探测器的成结工艺研究

2.1 引言

光伏型的光电探测器主要的电学结构是一个 pn 结，其基本结构与工作原理如图 2.1 所示^[1]。在入射光作用下，吸收区价带中的电子吸收入射光子的能量并跃迁至导带中产生电子-空穴对，形成自由载流子。这些自由载流子被 pn 结的耗尽层电场所分离，在 p、n 电极产生光电流。由此可见，p-n 结特性是影响光伏器件性能的关键因素，而 p-n 结的成结工艺是光伏型 InGaAs 探测器的关键工艺。

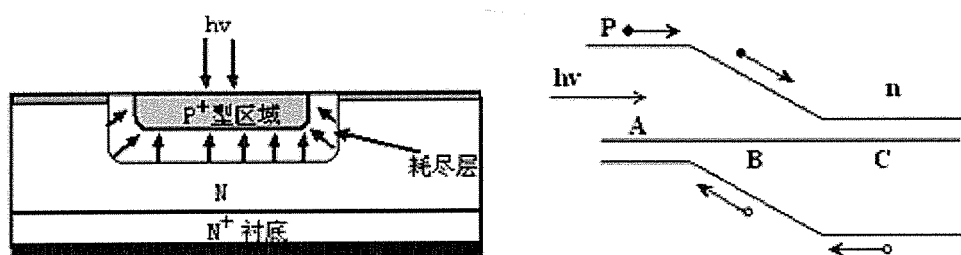


图 2.1 光电二极管结构与工作原理

Fig 2.1 Structure and operating principle of photodiode

平面型 InGaAs/InP p-i-n 红外探测器的成结工艺通常通过 Zn 的 p 掺杂形成。图 2.2 为 G. Olsen^[2]等人报道的正面照射结构的 InGaAs 探测器，其工艺过程为：首先在 100 μm 厚的 InP 的衬底上生长 3 μm 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ，然后生长 1 μm 的 InP，再生长一层 SiN 钝化层。在 SiN 层上开 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 小孔，通过 Zn 扩散形成 p 型结。p 型电极为 Au/Zn，n 型电极 Au/Sn，SiN 为抗反射层。

图 2.3 为美国传感器无限公司报道的 640×512 元背面照射 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 阵列探测器的制备工艺^[3]，在外延材料表面覆盖一层 Si_3N_4 作为钝化层和保护层，通过光刻和等离子体刻蚀在 Si_3N_4 层上开孔，以 ZnAs 作为 Zn 源通过 InP 层扩散到 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层形成 p-n 结，然后采用 Si_3N_4 重新钝化，最后进行电极生长。p 型电极为 Au/Zn，n 电极为 Au/Ge，通过钢柱与读出电路相连。

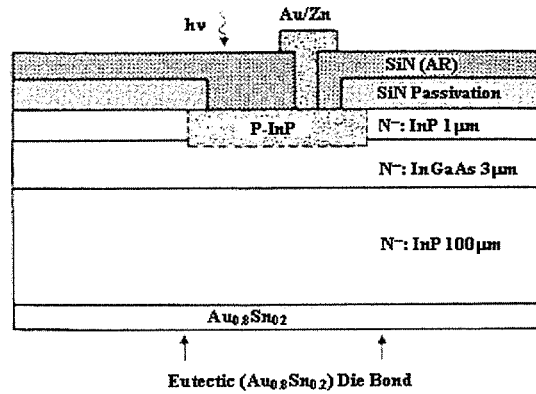


图 2.2 正照射 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ Front-illuminated $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ detector

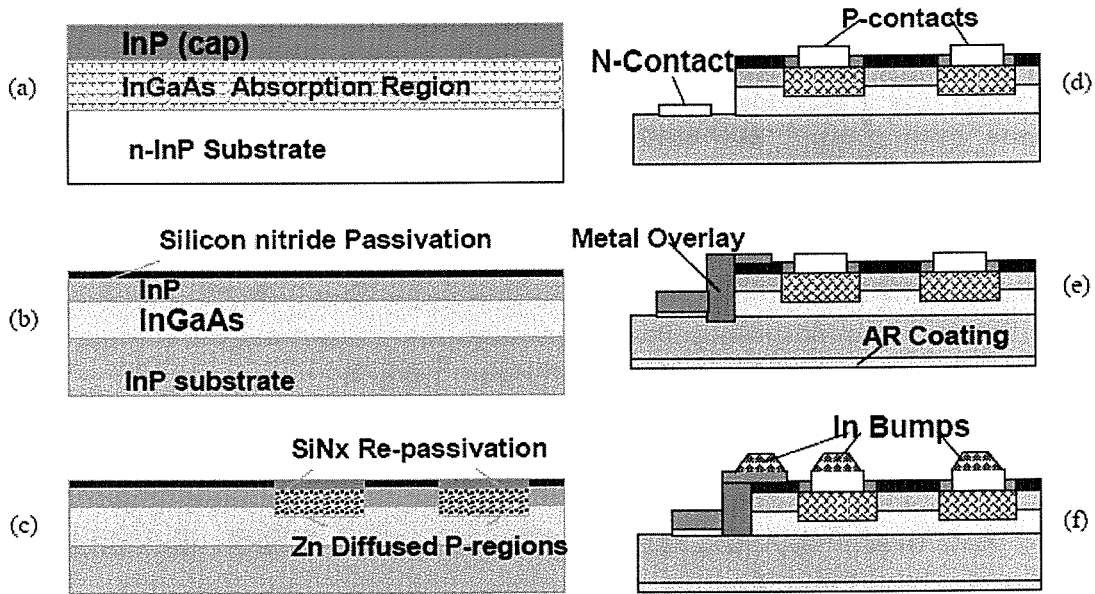


图 2.3 背照射 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器工艺

Fig.2.3 Device process of back-illuminated $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ detector

本章采用 Zn 的闭管扩散方式制备了平面型 InGaAs 红外探测器，通过测试器件的 I-V 特性以及黑体辐射下的信号噪声，对比了两种工艺下器件的 p-n 结特性以及器件性能，并且，为了检验工艺在线列器件制备中的适用性，以改进后的工艺制备了八元小线列器件，并对其性能进行了表征。

2.2 器件工艺

2.2.1 常规器件工艺

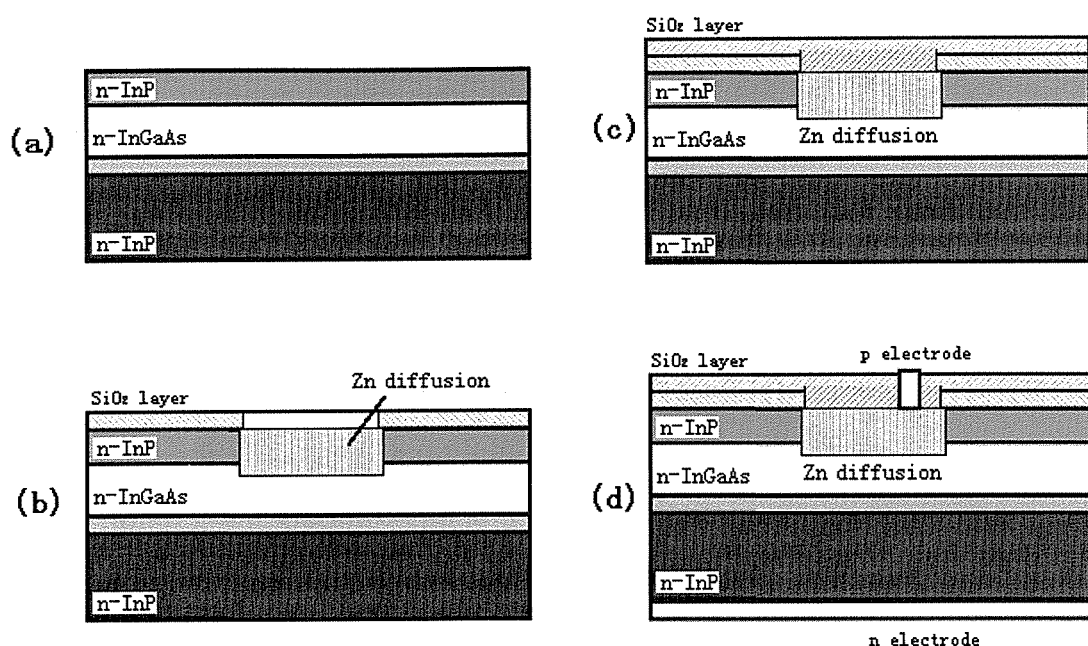


图 2.4 常规的器件工艺 (Process1): (a) InGaAs 材料, (b) Zn 扩散, (c) SiO₂ 钝化, (d) 电极制备

Fig.2.4 Conventional device process (Process1): (a) InGaAs material, (b) Zn diffusion, (c) SiO₂ passivation, (d) electrode fabrication

常规平面型 InGaAs 光伏探测器工艺(Process1)如图 2.4 所示, 图 2.4a 为 n-InP/n-InGaAs/n-InP 材料, 各层为: (1)衬底上依次 1 μ m 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 的 n 型 InP 缓冲层, (2) 2.5 μ m 的掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的 n 型 In_{0.53}Ga_{0.47}As 外延层, (3) 1 μ m 的载流子浓度为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的 n 型 InP 帽层。

在 n-InP/n-InGaAs/n-InP 材料(图 2.4a)上生长 SiO₂ 扩散掩膜, 腐蚀开扩散孔, 通过 Zn 的闭管扩散形成扩散区(图 2.4b), 扩散后的样品用 SiO₂ 重新钝化(图 2.4c)。成结钝化后的样品进行电极生长(图 2.4d): 在 SiO₂ 钝化膜上开孔, 热蒸发生长 Au/Zn/Au(200/700/200Å), 490℃下退火 15s 形成器件的 p 电极接触, 器件的 n 电极是通过对样品 n-InP 衬底抛光后溅射 Au 层得到。

2.2.2 器件工艺改进

由于 Zn 在 InP 中存在热不稳定性的问题^[4], 需要采取一定的措施阻止 Zn 向样品表面的扩散。SiO₂ 是一种很好的 Zn 扩散掩膜, 所以可以在样品扩散后生长

一层 SiO_2 ，使得样品扩散后的热处理过程在这层 SiO_2 膜的保护下进行。平面型 InGaAs 探测器工艺中存在两个主要的热处理过程：扩散过程与 p 电极的退火过程，扩散过程又可以更细致地分为恒温扩散过程与扩散后的降温过程。为了尽可能地减小热处理对样品的影响，所以要使扩散后降温时间尽可能的短，同时，要使 p 电极的退火过程在 SiO_2 膜的保护下进行。为此，工艺的改进主要从两个方面进行，首先采用新的扩散炉，更好地实现炉温的控制，新的扩散炉在退火过程中的炉温控制精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ，图 2.5 为设定 535°C 时实际炉温分布(炉温测试与李永富师弟共同完成)；同时对 p 电极的退火顺序进行了调整，在 p 电极生长后与退火前生长保护性的 SiO_2 膜。改进后工艺(Process2)主要为：(1)扩散掩膜生长；(2)腐蚀开扩散孔，闭管扩散；(3)p 电极生长；(4) SiO_2 阻止膜生长；(5)p 电极退火；(6)腐蚀加厚电极通孔，加厚电极生长；(7)背电极生长。

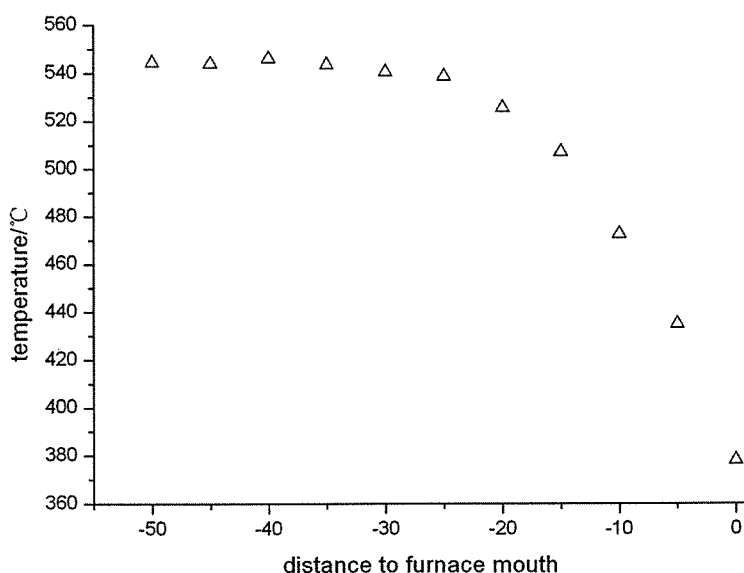


图 2.5 程控扩散炉的温度分布（设定为 535°C ）

Fig.2.5 Temperature distribution of the diffusion furnace
(set as 535°C)

二氧化硅钝化膜另一个重要的作用是阻止退火过程中器件表面的组分分解。研究表明^[5-8]，在 Metal/InP 体系的退火过程中，磷化铟表面的 In、P 元素分解，并发生单方向的扩散运动，即只有 In 元素或 P 元素向金属表面方向的扩散，而没有金属元素向 InP 中的扩散，这种单向的扩散运动需要另一方向即金属表面处空位的向里运动，以补充原有 In 或 P 元素的位置。所以，在 Metal/InP 体系表面

生长 SiO_2 能够阻止金属表面空位的产生及向里运动, 进而阻止 In 或 P 元素的向外扩散, 降低 InP 表面的元素分解。值得一提的是, 在 Au/InP 体系的退火过程中, In 元素优先向金属中扩散, 而 P 元素由于不溶于 Au 而不能在 Au 中扩散, 而在 Ag/InP 体系的退火中, P 元素更容易发生扩散。

2.3 器件结果

器件正面如图 2.6 所示, 光敏元大小为 $400\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$, 将其封装在杜瓦中, 于室温下测试其电流电压特性、信号、噪声及响应光谱。电流电压特性由一台微机控制下的 Keithley236 型可编程电流电压测试仪得到。信号噪声的测量是采用常规的黑体响应测量方法: 精密控温仪控制黑体温度于 900K, 通光孔径为 0.8cm, 调制频率 $f=1\text{KHz}$, 带宽 $\Delta f=100\text{Hz}$, 通过锁相放大器读出器件的响应电压 V_s , 挡住黑体辐射光, 可以读出器件的噪声电压 V_n 。

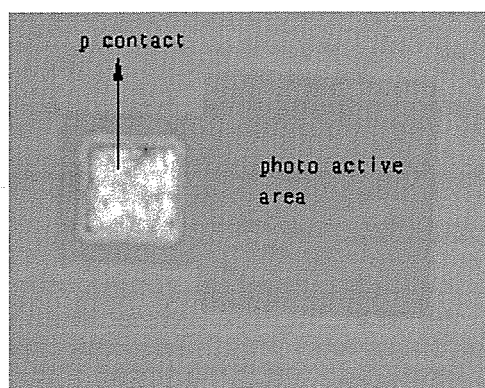


图 2.6 典型的平面型 InGaAs 单元器件照片
Fig.2.6 Photograph of typical single-elemental InGaAs detector

图 2.7 与 2.8 是同一材料不同工艺得到的器件的 I-V 曲线, 可以看到工艺 Process1 得到的器件其 p-n 结特性很差, 主要表现在它们的反向漏电很大, 而且器件与器件之间的 I-V 曲线差别较大, 相比之下, Process2 工艺其器件具有更好的 p-n 结特性, 而且, 不同器件之间的均匀性也更好。

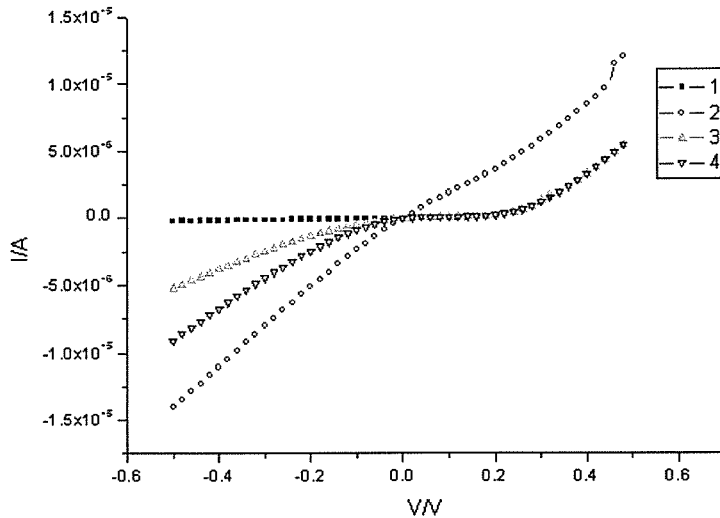


图 2.7 材料 s15 Process1 工艺器件 I-V 曲线

Fig.2.7 I-V curve of device from Process1 on material s15

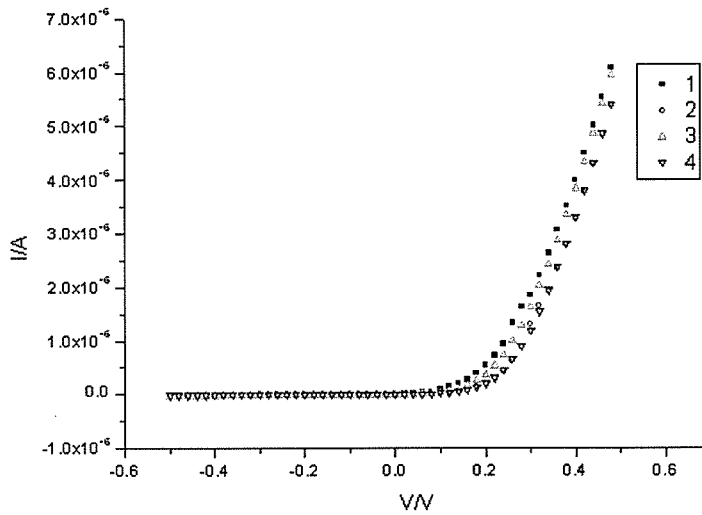


图 2.8 材料 s15 Process2 工艺器件 I-V 曲线

Fig.2.8 I-V curve of device from Process2 on material s15

不同工艺条件下探测器的器件性能也不相同,相对来说,两者的响应信号比较相近(如图 2.9),而器件的噪声却有很大的差别(图 2.10),由于 Process1 的器件 p-n 结特性很差,反向漏电很大,这使得器件的噪声电流很大,而且器件之间的噪声均匀性也很差。红外探测器的探测率与其信噪比成正比,图 2.11 为两种工艺器件信噪比的比较,可以看到无论是从其绝对值还是均匀性上来说,工艺 Process2 的结果都优于工艺 Process1。可见,工艺的改进使器件具有更好的 p-n 结特性,降低了器件的噪声电流,提高了器件的探测率与均匀性。

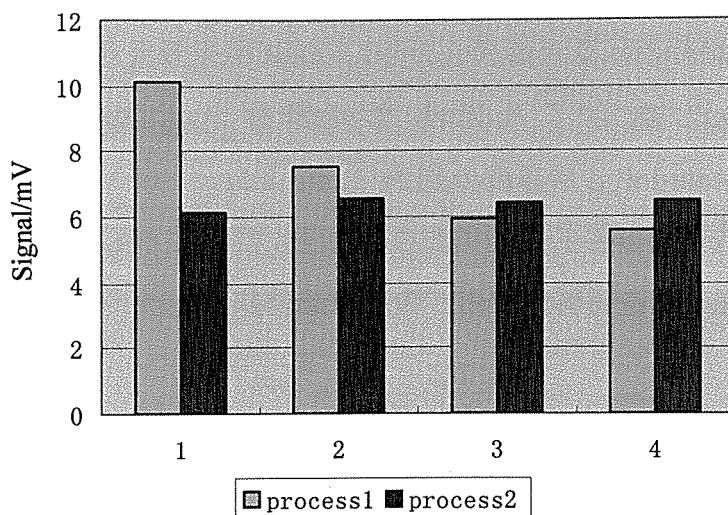


图 2.9 材料 s15 Process1 工艺和 Process2 工艺器件信号

Fig.2.9 Signal of device from Process1 and Process2 on material s15

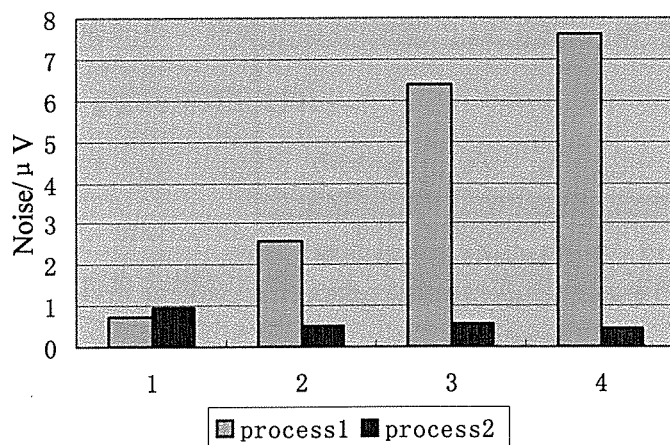


图 2.10 材料 s15 Process1 工艺和 Process2 工艺器件噪声电流

Fig.2.10 Noise of device from Process1 and Process2 on material s15

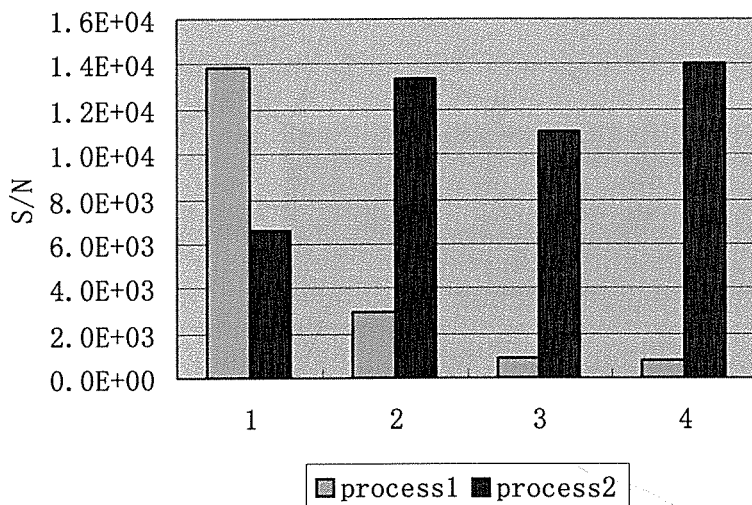


图 2.11 材料 s15 Process1 工艺和 Process2 工艺器件信噪比

Fig.2.11 Signal vs. Noise of devices from Process1 and Process2 on material s15

2.4 小线列器件实验验证

2.4.1 线列器件的制备

以工艺 Process2 制备了八元小线列器件，所用材料结构为 n-InP/i-In_{0.53}Ga_{0.47}As/n-InP, 各层厚度分别为 1 μ m, 2.5 μ m, 650 μ m, 掺杂浓度为 5×10^{16} , 5×10^{16} , 3×10^{18} cm⁻³。器件的结构如图 2.12 所示, 器件的 p 电极为 Au/Zn/Au 的合金; n 电极为 Au, 长在材料的背面, 为所有器件共用。

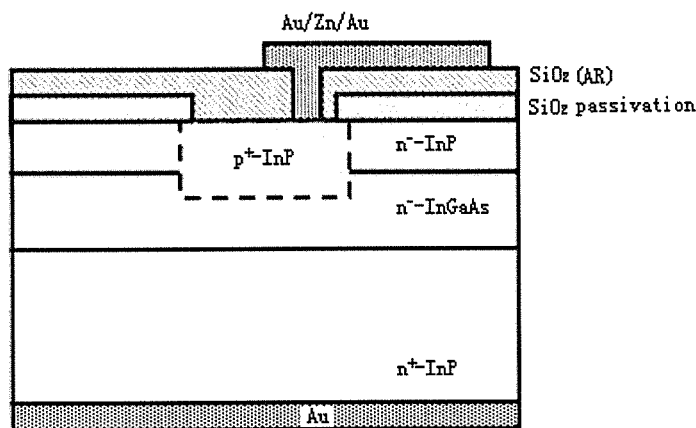


图 2.12 平面 InGaAs 器件截面图

Fig.2.12 Cross section of planar InGaAs detectors

2.4.2 器件的探测率测试

探测器阵列芯片的显微照片如图 2.13 所示。八元器件为 4 $\times$ 2 品字排列结构，光敏元面积为 100 μ m $\times$ 100 μ m，光敏元中心距为 100 μ m。中心 n 电极未用，器件实际的 n 电极在材料背面。

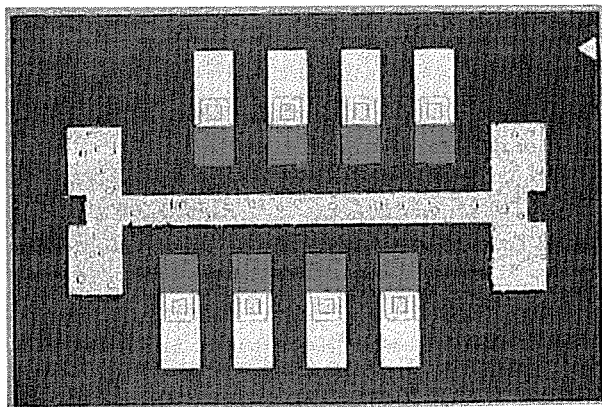


图 2.13 平面型 InGaAs 八元线列照片

Fig.2.13 Optical photograph of 8 elemental InGaAs linear detectors

器件封装于杜瓦中, I-V 特性、信号和噪声的测试过程与单元器件相同, 探测器阵列的响应光谱采用 NICOLET 红外光谱仪及其改装附件测试。

探测器的黑体探测率 D_{bb}^* 由下面公式得出^[9]:

$$D_{bb}^* = \frac{V_s}{V_n} \cdot \frac{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}}{\Phi_s} \quad (2.1)$$

其中

$$\Phi_s = \frac{\sigma(T_b^4 - T_0^4)A_b \cdot A_D}{2\sqrt{2}\pi L^2} \quad (2.2)$$

其中 T_b 是黑体温度(900K), T_0 是背景温度(300K), A_b 是黑体出射孔面积, A_D 是被测探测器光敏元面积, L 是黑体出射孔和探测器之间的距离(30cm)。 σ 是斯忒藩常数。

器件室温下典型的归一化响应光谱如图 2.14 所示, 利用器件的响应光谱得到器件的 g 因子, g 因子的定义为:

$$g = \frac{G(\lambda_p) \int_0^\infty \phi_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty G(\lambda) \phi_\lambda d\lambda} \quad (2.3)$$

其中 ϕ_λ 是黑体的单色辐射功率, $G(\lambda)$ 是响应光谱的测量曲线, λ_p 表示峰值响应波长。

通过公式(2.1)和公式(2.3), 可以得到器件的峰值探测率:

$$D_{\lambda p}^* = g \cdot D_{bb}^* \quad (2.4)$$

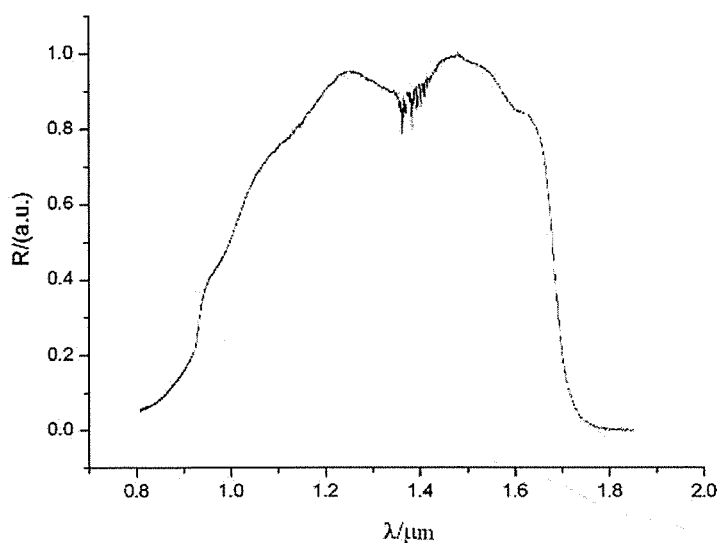


图 2.14 室温下器件典型的归一化响应光谱

Fig.2.14 Typical response spectrum at room temperature

根据公式(2.4)可以求得器件的峰值探测率(表 2.1), 其平均值为 $8.11 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$, 不均匀性为 4.69%

表 2.1 器件的性能测试

	signal/A	noise/A	g factor	$D^*_{\lambda_p}/(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1})$
D1	1.09E-09	2.2E-13	79	8.60E+11
D2	8.90E-10	2.1E-13	80	7.38E+11
D3	1.09E-09	2.2E-13	80	8.59E+11
D4	9.32E-10	2.0E-13	80	8.12E+11
D5	9.29E-10	2.0E-13	80	8.08E+11
D6	1.01E-09	2.1E-13	80	8.31E+11
D7	9.66E-10	2.1E-13	81	7.99E+11
D8	9.37E-10	2.1E-13	80	7.82E+11

2.5 小结

对于光伏型InGaAs红外探测器来说, 具备良好p-n结特性是其具有优良性能的基本条件, 本章采用Zn的闭管扩散方式制备了平面型InP/InGaAs p-i-n红外探测器, 改进了器件工艺, 结果表明, 新的工艺改善了器件的p-n结特性, 降低了器件的噪声电流, 提高了器件的探测率与均匀性。将这一工艺应用于八元小线列器件的制备, 通过对器件信号、噪声以及响应光谱的测试得到器件的峰值探测率, 其平均值为 $8.11 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$, 不均匀性为4.69%。这些结果为更大规模线列器件的制备与研究提供了基础。

参考文献

- [1]庄春泉, 遥感用 InGaAs 红外探测器的工艺研究, 中国科学院上海技术物理研究所博士学位论文, 2006.
- [2]G. H. Olsen, A. M. Joshi, V. S. Ban, et al. Multiplexed 256 element InGaAs detector array for 0.8um-1.7um room temperature operation[J], SPIE, 1988, 972: 279-285
- [3]Martin H. Ettenberg, Michael J. Lange, at al. A room temperature 640×512 pixel near-infrared InGaAs focal plane array[J], SPIE, 2000, 4028: 201-207

- [4]G.J.van Gurp, T.van Dongen, G.M.Fontijn,et al.,Interstitial and substitutional Zn in InP and InGaAsP, J.Appl.Phys. 1989, 65(2):553-560
- [5]Navid S.F. and Victor G.W., The effect of metal surface passivation on the Au-InP interaction, J. Appl.Phys.1988, 65(5):2111-2115
- [6]Navid S.F. and Victor G.W., The kinetics of the Au-InP interaction, J. Appl.Phys.1990,67(4):1934-1939
- [7]Navid S.F. and Victor G.W., Contact spreading and the Au_3In -to- Au_9In_4 transition in the Au-InP system, J. Appl.Phys.1990, 68(5):2275-2284
- [8]Navid S.F. and Victor G.W., Low resistance silver contacts to indium phosphide: Electrical and metallurgical considerations, J. Appl.Phys.1993,73(5):2353-2359
- [9]汤定元,糜正瑜等,《光电器件概论》,上海科技出版社,1989,上海

第三章 基于 I-V 特性的器件欧姆接触研究

3.1 引言

在光伏型光电二极管中,两个区域的电学性质对器件最终的性能产生重要的影响,分别是分离光生载流子的空间电荷区和样品表面的电极接触区,对接触电极的研究主要从接触电阻与界面特性着手。对于 InP 的电极接触已经有大量的研究^[1-4],主要集中在 p-InP 的欧姆接触的制备上,这是由于 p 型 InP 具有较高的接触势垒,与金属电极难以制备良好的欧姆接触。它们的研究对象多为原位掺杂的 p-InP 材料,然而,对于扩散成结的平面型 InGaAs 探测器来说, p 型 InP 的掺杂情况以及表面特性更为复杂,这使其与在原位掺杂的 p-InP 材料中得到的结果有较大的差别,而且,基于其它测试结构的测试结果不能对特定器件的接触性质给出直接的表征。二极管器件的电流电压曲线是其重要的电学特征,也是它最重要的电学表征手段之一^[5-7],本章通过拟合器件正向电流电压曲线,得到特定器件的串联电阻,并且与器件工艺同步制备了传输线模型,以此对曲线拟合结果的准确性进行了验证,从工艺上,将器件的 p 电极从 Au/Zn/Au 体系改为更为简单可靠的 Au 层。

3.2 曲线拟合及其验证

3.2.1 I-V 曲线拟合

从电学上可以将一个实际的光伏二极管器件分为空间电荷区和串联电阻区两个相对独立的部分,二极管所加电压也分别降落在这两个区域,一般来说,当流过二极管的电流较小时,空间电荷区的电阻远大于串联电阻区的电阻,也就是说串联电阻的分压作用不明显,在背景和信号光强为零的情况下,器件的电流电压关系可以采用公式^[8]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

其中, n 为理想因子, I_0 为反向饱和电流, K 为 Boltzman 常数, T 为器件温度。理想因子的数值是由电流机制决定的,对于由扩散电流支配的器件, n 取 1,对于由产生复合电流决定的器件, n 取 2,如果 n 介于 1 和 2 之间则为两种电流的

共同作用。此时, $\log(I)$ 与 V 之间存在线性关系, 其比例系数为 q/nKT , 通过对 $\log(I)-V$ 曲线的线性部分进行拟合可以得到理想因子 $n^{[9]}$ 。

当流过二极管的电流较大时, 由于器件串联电阻 R_s 的分压作用, 器件电流电压曲线会偏离式 3.1(图 3.1), 串联电阻分压 $\Delta V = IR_s$, 通过线性拟合 $\Delta V = V - V_d$ 与 I 可以得到串联电阻^[9](图 3.2), 其中, V 为器件的偏置电压, V_d 为空间电荷区的电压。

通过器件的 $I-V$ 曲线还可以得到器件的零偏电阻 R_0 :

$$R_0 = \left(\frac{dI}{dV} \right)^{-1} \Big|_{V=0} \quad (3.2)$$

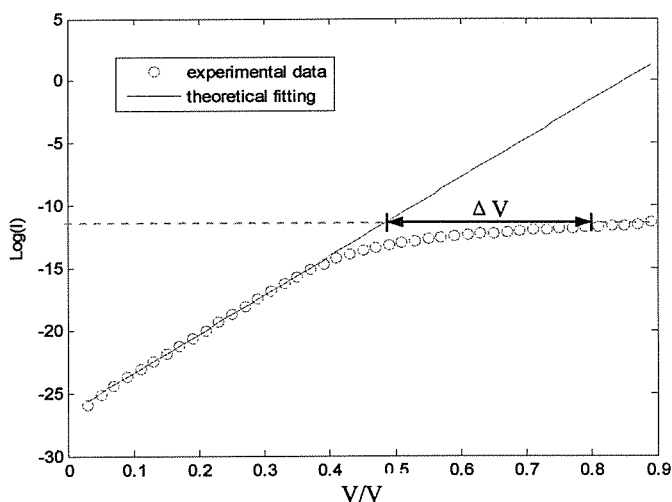


图 3.1 器件典型的 $\log(I)-V$ 曲线及线性拟合

Fig.3.1 Typical $\log(I)-V$ curve and linear fitting of the photodetector

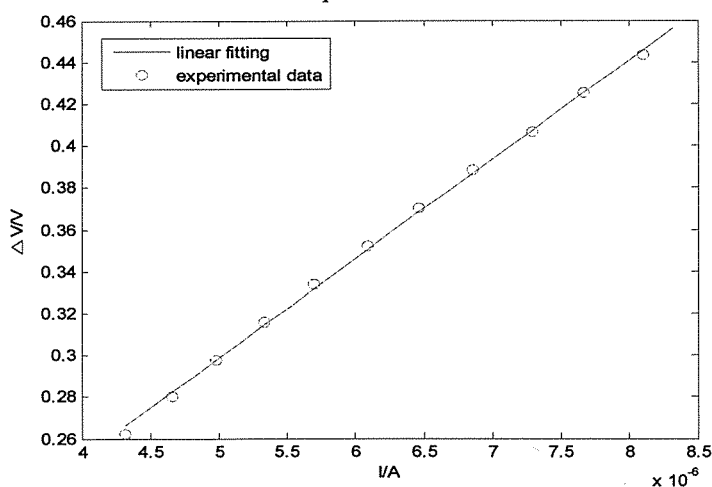


图 3.2 不同正向电流下的电压差及其线性拟合

Fig.3.2 Voltage difference at different forward current and its linear fitting

3.2.2 方法验证

图 3.3 为一组器件的正向 I-V 曲线，串联电阻的存在延缓了正向电流上升的速度，串联电阻越大，这种延缓效应就越明显，所以，通过观察器件正向 I-V 曲线的上升速度可以定性地判断器件串联电阻的大小，除了曲线 B，剩余曲线可以分为三组 NLP、JD 与 HF，它们的串联电阻应该依次增大，这与曲线拟合的结果(图 3.4)是一致的，虽然曲线 B 有较大开启电压，但它的上升速度较大，这使拟合的串联电阻较小，可见，曲线拟合结果可以定量地反映 I-V 曲线正向电流的上升速度，即串联电阻的大小。

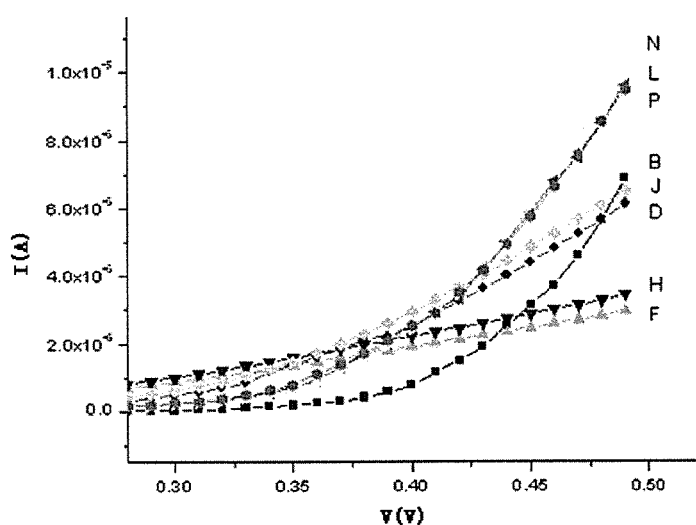


图 3.3 器件的正向 I-V 曲线

Fig.3.3 Forward current-voltage curve of devices

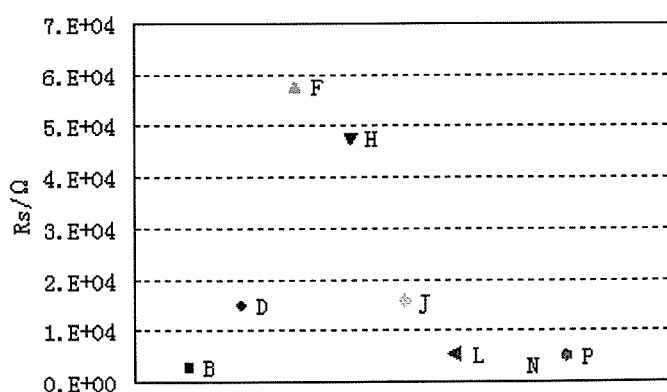


图 3.4 拟合的器件串联电阻

Fig.3.4 Series resistance of photodetectors

器件的接触电阻还可以通过其它方式加以研究,对于薄膜样品,最常用的方法是传输线模型法(Transmission Line Model),这种方法首先由 Shockley 引入,后经 Berger^[10]做了进一步改进,常用于测定薄膜材料的欧姆接触电阻。为实现 TLM 测试,需要与周围环境绝缘的条形半导体材料上制备不等距的长方形接触块,其结构如图所示:

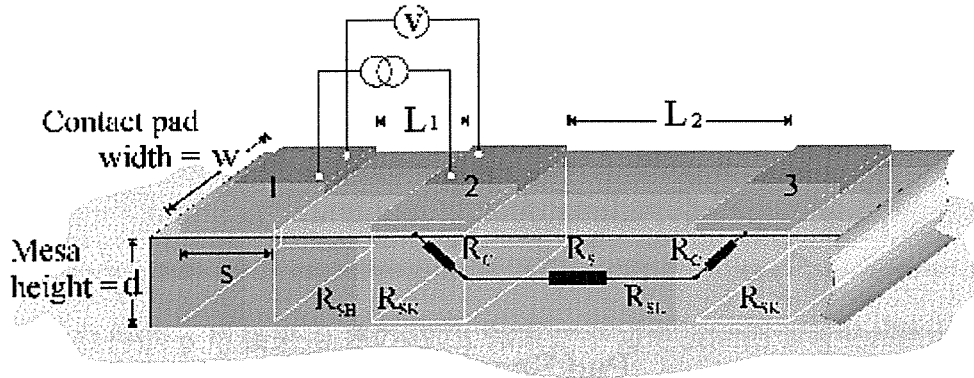


图 3.5 传输线结构的测试模型

Fig. 3.5 Schematic diagram of a semiconductor material with ohmic contact pads prepared for TLM analysis

其中 1、2、3.....分别为薄膜材料的电极接触,它们形状相同,距离不等。

两个电极之间的电阻 R_T 由三部分最成:与各自电极相联系的电阻 R_C 和电极之间的半导体体电阻 R_s' :

$$R_T = R_C + R_{s'} + R_C = 2R_C + \frac{R_{sh}l_n}{W} \quad (3.3)$$

其中, R_{sh} 为是半导体材料的方块电阻, l_n 为电极之间的距离, W 为电极宽度。

在不同距离 l_n 下可测出一系列对应的 R_T ,把这些点连接成如图 3.6 所示的一条直线,直线的斜率就是 R_{sh}/W ,在 x 轴和 y 轴的交点分别是 L_x 和 $2R_C$, Reeves 等人把 R_C 用式 3.4 表达:

$$R_C = \frac{R_{sk}L_T}{W}, \quad L_T = \sqrt{\rho_C / R_{sk}} \quad (3.4)$$

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

$$\rho_c = R_{sk} L_T^2 \approx R_{sh} L_T^2 = R_c^2 W^2 / R_{sh} \quad (3.5)$$

这可以简单计算比接触电阻。

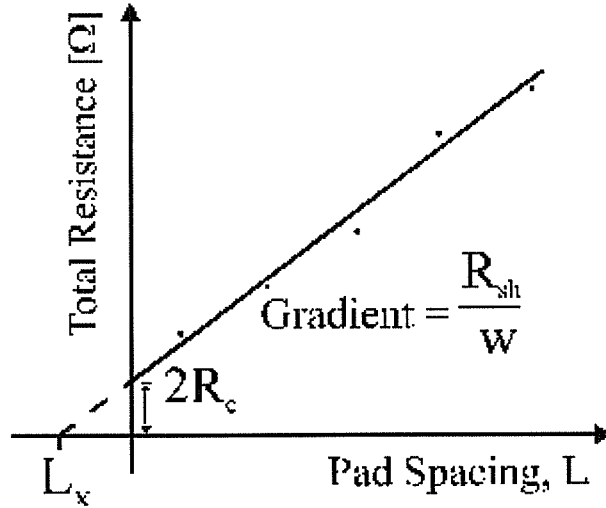


图 3.6 传输线模型结构下测量电阻与金属电极间距的关系

Fig.3.6 Plot of total resistance as a function of TLM pad spacing

比接触电阻(ρ_c) 是欧姆接触的界面电阻, 它的定义为:

$$\rho_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} \bigg|_{V=0} \quad (\Omega \cdot \text{cm}^2) \quad (3.6)$$

如果可以得到接触电阻 R_s , 通过接触电阻面积 A 可以将两者联系起来:

$$\rho_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} \bigg|_{V=0} = A \left(\frac{\partial I}{\partial V} \right)^{-1} \bigg|_{V=0} = A \cdot R_s \bigg|_{V=0} \quad (3.7)$$

将一个传输线模型设计在线列器件之间的划片槽中(图 3.7), 通过与器件工艺同步的接触电阻制备可以得到器件欧姆接触的信息。在传输线模型中, 电极为 $150\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 的长方形, 电极间隔从 $10\mu\text{m}$ 以步长 $10\mu\text{m}$ 逐渐增大。在接触电阻制备完成后通过探针压测, 得到电阻之间的 I-V 曲线, 并计算其阻值。

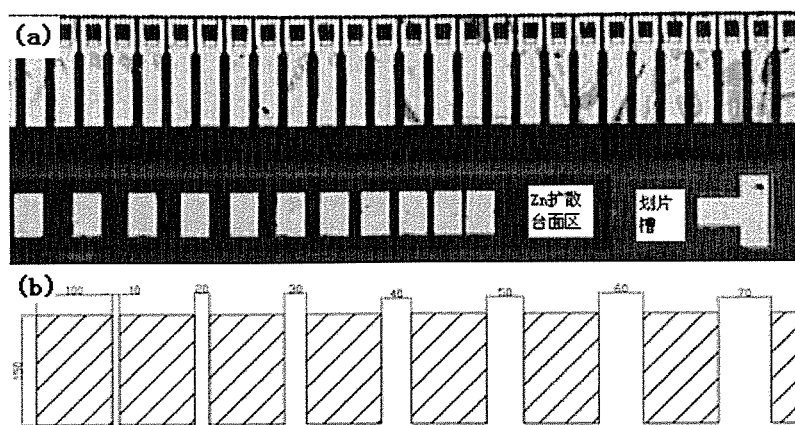


图 3.7 传输线模型测试结构: (a) 实物照片, (b) 版图
Fig.3.7 TLM measurement structure: (a) device photo, (b) photo mask

器件的 p 电极采用 Zn/Au/Zn 体系, 不同电极间的 I-V 曲线如图 3.8 所示, 在电压较大时它偏离线性, 这说明, 器件的 p 电极不是良好的欧姆接触, 其特性与肖特基接触更加接近。

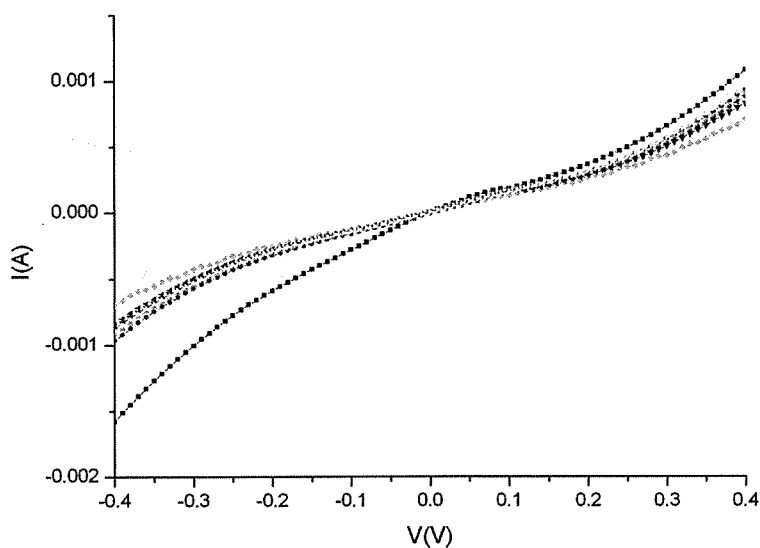


图 3.8 传输线模型电极间 I-V 曲线
Fig.3.8 I-V curves between TLM pads

传输线模型电极之间零偏压附近的 I-V 曲线为直线, 计算其阻值, 线性拟合前 6 个接触电极之间的电阻值, 结果如图 3.9 所示, 得到比接触电阻为 $2.12 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 其结果与退火条件为 400°C 下退火 5min 的 Ti/Pt/Au 电极比接触电阻相近^[11]。取 p 电极面积为 $1000 \mu\text{m}^2$, 由公式(3.7)得到器件接触电阻为

$2.12 \times 10^3 \Omega$ 。

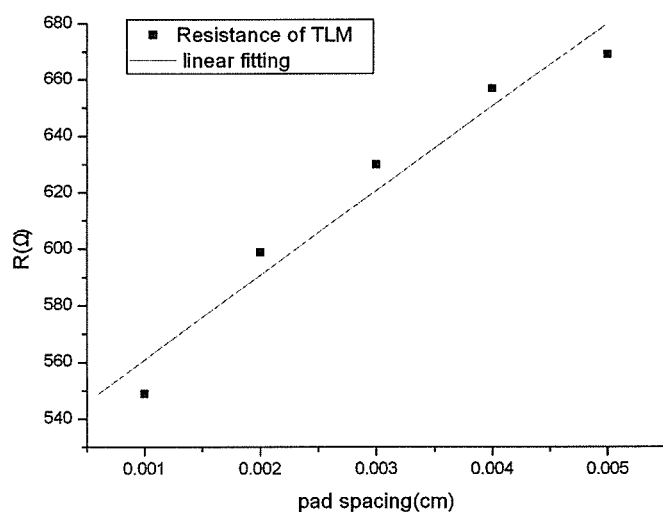


图 3.9 传输线模型电极间电阻及其拟合

Fig.3.9 resistances of TLM pad with different distances and their linear fitting

器件典型 I-V 曲线如图 3.10 所示,肖特基接触的存在使器件正向 I-V 曲线偏离理想的指数形式,在电流较高时更快地趋向线性关系。拟合器件正向 I-V 曲线得到器件的串联电阻如图 3.11 所示,可见,器件的串联电阻分布很不均匀,大部分在 1000 与 5000 Ω 之间,平均值为 3000 Ω ,这与通过传输线模型得到的电阻值在量级上相符的。

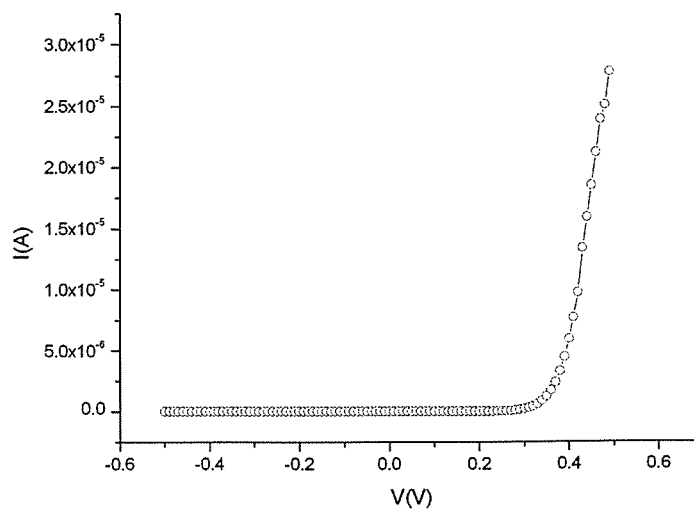


图 3.10 器件典型的 I-V 曲线

Fig.3.10 Typical I-V curve of photodetector

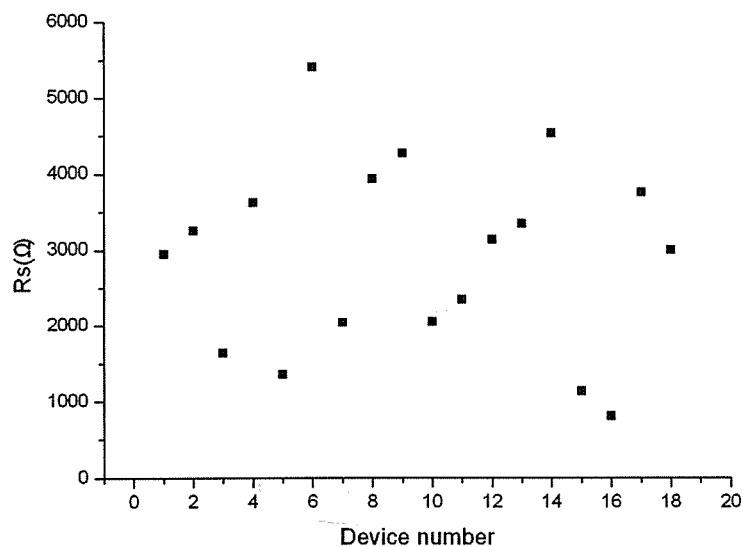


图 3.11 不同器件串联电阻

Fig.3.11 Series resistances of different devices

3.3 p 电极的工艺改进

文献报道, 对于 p-InP 材料, Au/Zn/Au 金属体系是一种良好的欧姆接触^[12,13], 可是在工艺研究中却发现这种金属体系在 InP 表面的粘附性不好, 容易在浮胶过程中从样品表面脱落(图 3.12), 而 p 电极的部分脱落将给最终器件性能的均匀性带来严重的不利影响。同时, Au/Zn/Au 金属体系表面比较粗糙, 这种粗糙的表面可能会对器件性能带来潜在的不良影响。

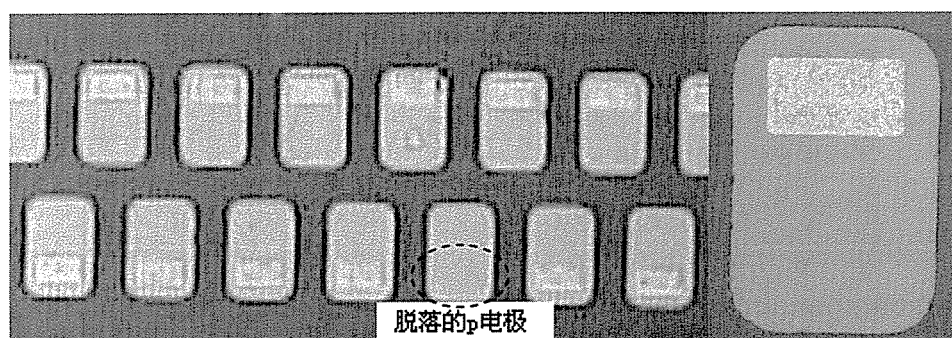


图 3.12 线列器件的 p 电极 Au/Zn/Au 体系

Fig.3.12 Au/Zn/Au p-typed contact in the linear photodetector array

为了简化工艺以及提高工艺的可重复性, 可以选择 Ar^+ 离子溅射生长的 Au 层作为器件的 p 电极, 用这种方法生长的金属与器件表面的结合力较好。

图 3.13 是通过 Ar^+ 离子溅射方式生长的 Au 层 p 电极, 可见, 以这种方式生长的 p 电极与样品表面的结合更加牢固, 在浮胶过程中没有脱落现象, 而且 p 电极表面更加光洁, 用一层 Au 层作为器件的 p 电极, 代替了原来的 Au/Zn/Au 多层结构, 也使得 p 电极生长工艺得以简化。

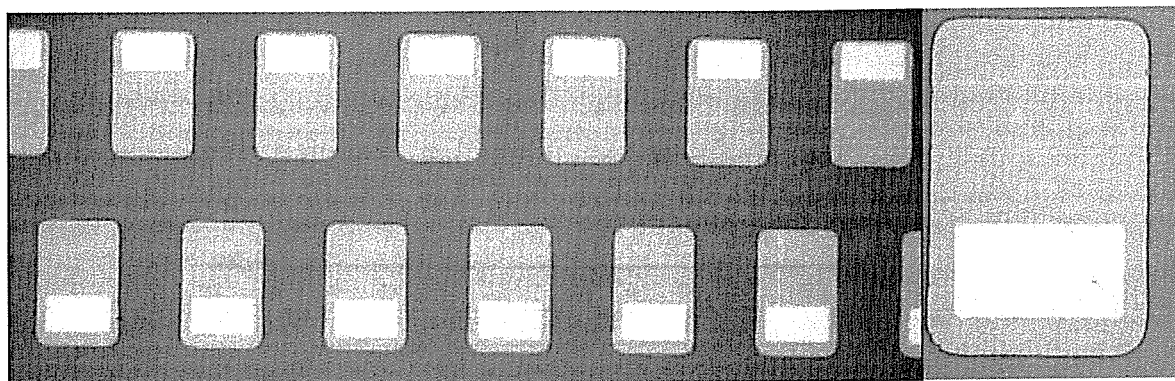


图 3.13 Au 作为器件的 p 电极
Fig.3.13 Au as the p-typed contact of the devices

图 3.14 和图 3.15 分别是采用 Au 作为 p 电极的器件的 I-V 曲线及串联电阻, 与预想不同的是, 以 Au 作为 p 电极得到的器件其串联电阻特性比 Au/Zn/Au 的 p 电极体系要好: 它的阻值比 Au/Zn/Au 体系要小, 大多分布在 100 到 300 Ω 之间, 平均值为 218 Ω , 均匀性也更好。可见, 以 Au 作为器件的 p 电极不仅简化了工艺, 提高了电极与样品表面的粘附性, 而且从电阻阻值的角度考虑也优于 Au/Zn/Au 体系。

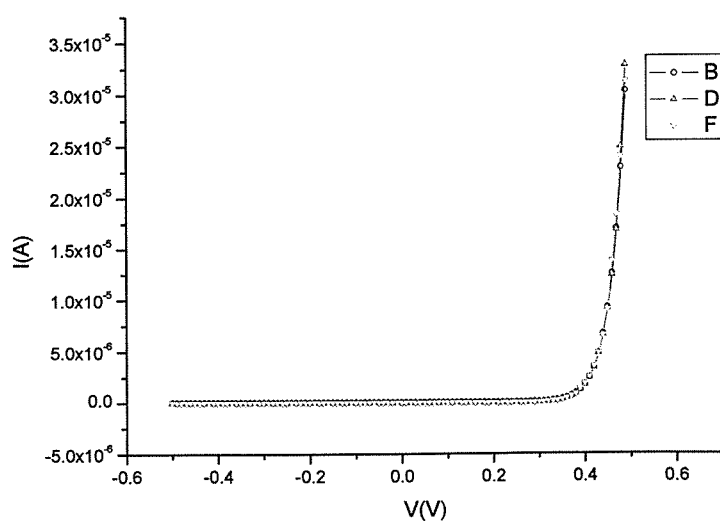


图 3.14 p 电极为 Au 的器件的 I-V 曲线
Fig. 3.14 I-V curves of the devices with the p-type contact of Au

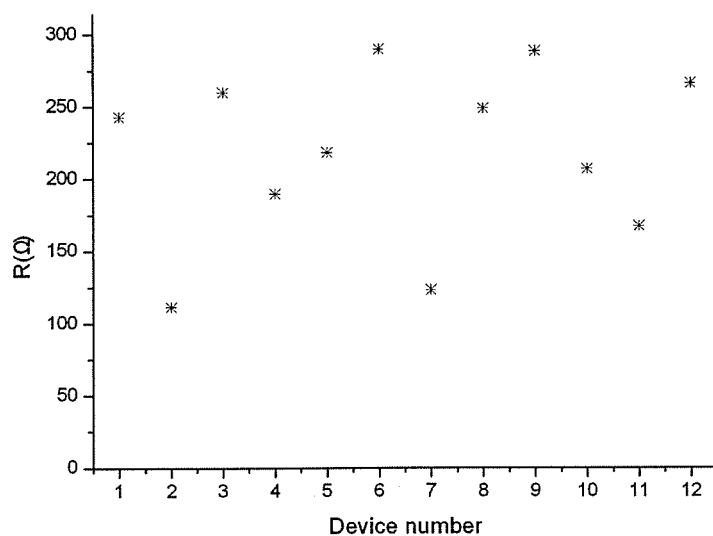


图 3.15 p 电极为 Au 的器件的串联电阻

Fig. 3.15 Series resistances of the devices with the p-type contact of Au

同样，与器件工艺同步制备的传输线模型如图 3.16 所示，电极之间的 I-V 曲线呈良好的线性(图 3.17a)，这说明器件的电极接触已是良好的欧姆接触，线性拟合不同间距的传输线电极之间的电阻(图 3.17b)，得到其比接触电阻约为 $1.7 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，取器件 p 电极面积为 $1000 \mu\text{m}^2$ ，计算其对应的接触电阻为 170Ω ，与器件 I-V 曲线拟合的结果比较相符。

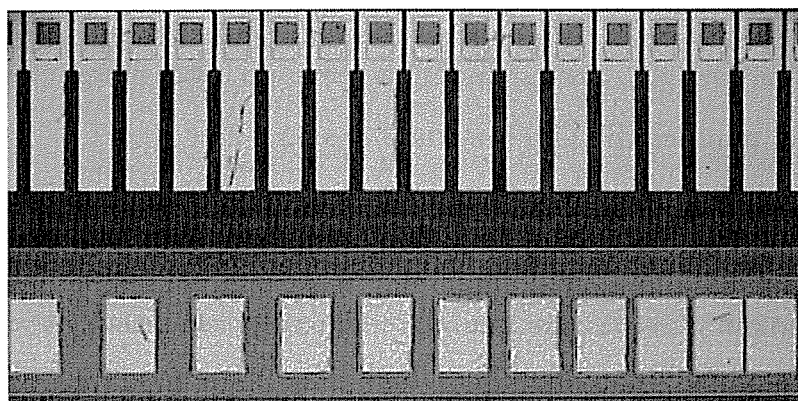


图 3.16 p 电极为 Au 的器件的传输线模型

Fig.3.16 TLM pads of the devices with the p-type contact of Au

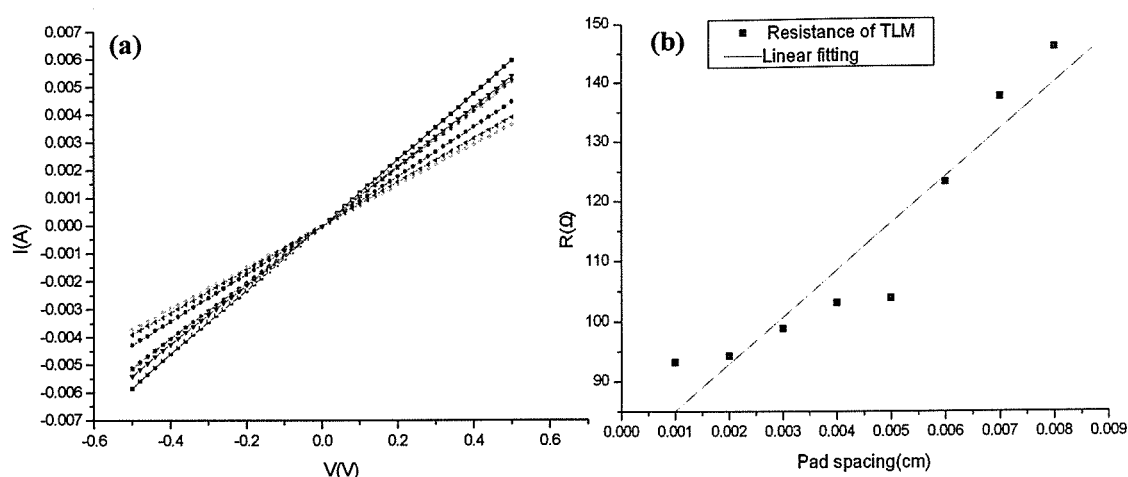


图 3.17 传输线模型 Au 电极间 I-V 曲线(a)和电阻拟合 (b)

Fig.3.17 I-V curves (a) and resistance fitting (b) of TLM with Au as pad

3.4 小结

本章通过两种方法研究了器件的 p 电极接触电阻, 首先基于器件 I-V 曲线的拟合, 得到器件的串联电阻, 其次, 与器件工艺同步制备了传输线模型, 并计算了接触电极的比接触电阻, 结果表明, 两种方法得到的电阻值有很好的 consistency。从工艺上将器件的 p 电极从原先的 Au/Zn/Au 金属体系改为单层的 Au 层, 研究表明, 单层 Au 层作为 p 电极不仅使器件的电极工艺得以简化, 而且它与器件表面有更好的粘附性, 其接触电阻阻值更小, 均匀性更好。

参考文献

- [1]Victor G.W. and Navid S.F., Low resistance silver contacts to indium phosphide: Electrical and metallurgical considerations, J.Appl.Phys.1993,73(5):2353-2359
- [2]Huang J.S. and Vartuli C.B.,The effect of Cr barrier on interfacial reaction of Au/Zn/Au/Cr/Au contacts to p-type InGaAs/InP,Thin Solid Films 2004,446:132-137
- [3]Hirokuni A.,Akira Y. and Yasuhiro I. et al., The effect of a thin antimony layer addition on PdZn ohmic contacts for p-type InP, Applied Surface Science 2000,159:174-178
- [4]Cheng J.Y.,Deng F. and Lau S.S. et al.,Low resistance $\text{Zn}_3\text{P}_2/\text{InP}$ heterostructure Ohmic contact to p-InP ,Appl.Phys.Lett.1996,68(7):952-954
- [5]Li X.Y.,Zhao J., Lu H.Q. et al., Forward current-voltage characteristics of HgCdTe p-on-n photodiodes, SPIE 1998,3379:601-607

- [6]Gopal V., Gupta S., Bhan R.K.,et al., Isolating surface and bulk contributions in an HgCdTe junction diode , SPIE 2003,5126:215-222
- [7]Tetyorkin V.V., Rutkowski J., Rogalski A., Sizov F.F., Characterization of p-on-n HgCdTe diffusion photodiodes, SPIE 1992,2372:382-387
- [8]Sze S.M., Physics of Semiconductor Devices(2nd Ed.)John Wiley&Sons(1981),N.Y.
- [9]Robert F.Pierret, Semiconductor Device Fundamentals Addison-Wesley(1996)
- [10]Berger HH. Solid State Electronics,1972,15:1451-1456
- [11]吕衍秋博士论文 航天遥感用 InGaAs 线列红外焦平面的研究 p70
- [12]Tabatabaie A. K., Choudhury A.N., and Slater N.J., et al., Very low resistance ohmic contacts on p-type InP by direct plating, Appl.Phys.Lett.1982,40(5):398-400
- [13]Fatemi N. S. and Weizer V. G., Electrical and metallurgical behavior of Au/Zn contacts to p-type indium phosphide, J. Appl. Phys. 1995,77(10):5241-5247

第四章 InGaAs 光伏器件 p-n 结二维电学性质表征

4.1 引言

p-n 结是 InGaAs 光伏器件主要的电学结构,在平面型 InGaAs 探测器制备过程中一般通过 Zn 扩散工艺在 n 型材料中进行 p 型掺杂形成,其中掺杂的浓度与深度,特别是 p-n 结的结深,对光伏器件的量子效率有着至关重要的影响,对这两个物理量的准确表征是 InGaAs 探测器工艺研究的关键。

在扩散工艺中,对杂质分布的定量表征通常采用二次离子质谱(SIMS)^[1,2],它可以准确地得到杂质在样品中的浓度分布曲线,但是, SIMS 的测试需要制备较大面积的样品,无法实现对微米量级的器件进行直接表征,而且它只能得到样品在深度方向一维的表征结果。扫描探针显微镜 SPM(scanning probe microscopy)是一种重要的材料表征方法,扫描电势分布 SKPM(scanning Kelvin probe microscopy)与扫描电容分布 SCM(scanning capacitance microscopy)是它的两种重要的扩展模式,它们可以得到样品在纳米量级上的二维电学分布图,广泛应用于硅器件的电学性能研究中^[3-7],本章采用 SKPM 和 SCM 来表征 Zn 在 InP/InGaAs/InP 材料中的扩散,并进行了初步的数据处理方法研究,为这些表征方法在 InGaAs 材料的应用提供了基础。

4.2 扫描电势显微(SKPM)测试

4.2.1 测试原理

SKPM 测试过程如图 4.1 所示^[8],它一般通过两步扫描来得到样品表面形貌以及样品与探针之间的接触电势差(CPD)。在第一次扫描中,以轻拍模式(Tapping Mode)得到样品形貌像:频率为 ω_0 的交流电压施加在压电陶瓷谐振器使探针在样品表面垂直方向上振动,当探针慢慢接近样品表面时,探针与表面原子的作用力使悬臂梁的振动减小,减小程度取决于探针与原子间的距离,所以,从悬臂梁的振动频率变化可以得到样品表面形貌。在第二次扫描时,探针以初次扫描结果运动,令样品接地,一个直流交流调制电压施加在针尖上,这样,针尖上的静电场力为:

$$\begin{aligned}
F_{tot} &= -\frac{1}{2} \frac{dC}{dz} \Delta V^2 = -\frac{1}{2} \frac{dC}{dz} (V_{ac} \sin \omega t + V_{dc} - V_{CPD})^2 \\
&= -\frac{1}{2} \frac{dC}{dz} [(V_{dc} - V_{CPD}) + V_{ac} \sin \omega t]^2 \\
&= -\frac{1}{2} \frac{dC}{dz} \left\{ (V_{dc} - V_{CPD})^2 + \frac{1}{2} V_{ac}^2 \right. \\
&\quad \left. + 2(V_{dc} - V_{CPD}) V_{ac} \sin \omega t - \frac{1}{2} V_{ac}^2 \cos 2\omega t \right\} \quad (4.1)
\end{aligned}$$

从式 4.1 可见, 针尖上的静电力有三个分量, 其中频率为 ω 的分量与直流电压和 CPD 相关, 通过反馈电路不断调整 V_{dc} , 当频率为 ω 的静电力分量为零时 V_{dc} 与 V_{CPD} 大小相等, 以这种方式可以得到针尖与样品的接触电势差, 以此可以得到半导体的费米能级(图 4.2, 式 4.2)。

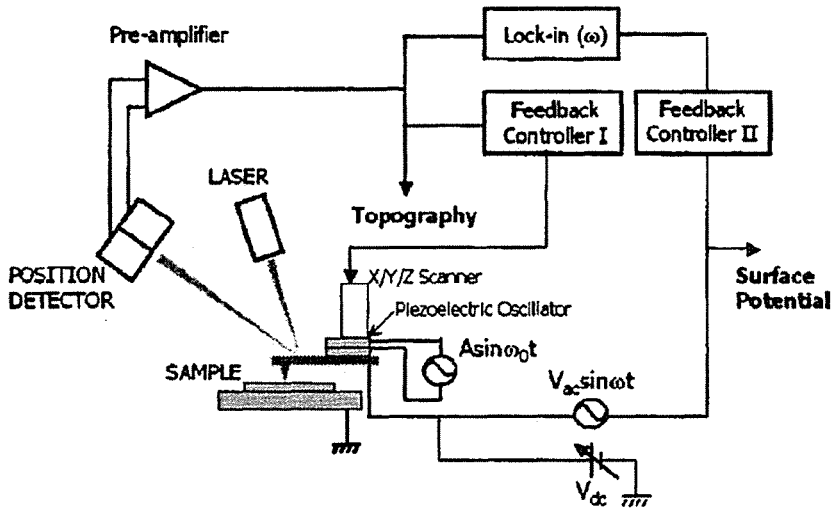
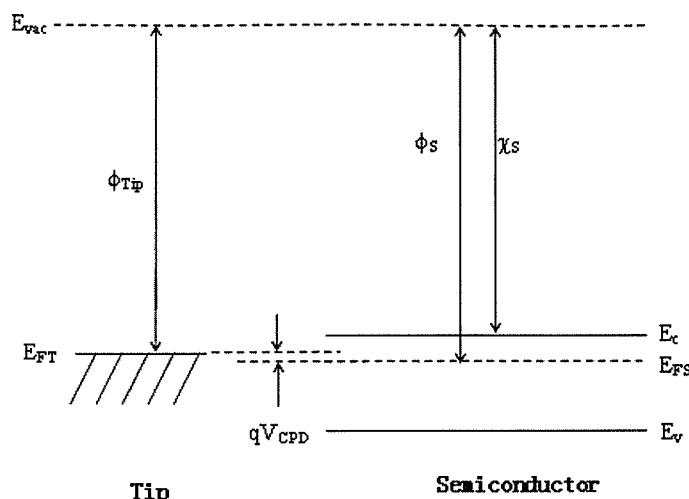


图 4.1 扫描电势显微镜测试原理示意图

Fig.4.1 Measurement setup of scanning Kelvin probe microscopy

图 4.2 测试值 V_{CPD} 与样品费米能级的关系Fig.4.2 Relationship of measured V_{CPD} and sample's Femi-Energy

$$V_{CPD} = \Delta\phi / q = (\phi_{tip} - \phi_{sample}) / q = \{\phi_{tip} - [\chi_s + (E_C - E_F)]\} / q \quad (4.2)$$

4.2.2 InGaAs 与 InP 材料参数

直接带隙半导体 InP 与 InGaAs 都是闪锌矿立方晶格结构，三元化合物 InGaAs 是 III-V 族的赝二元系半导体材料，可由 InAs 与 GaAs 以任何配比形成，其晶格常数随组分的变化近似为线性，从 GaAs 的 $5.6533\text{\AA}$ 变化到 InAs 的 $6.0583\text{\AA}$ 。一般情况下半导体光电探测器的光谱响应是波长的函数 $R(\lambda)$ ，而光电探测器的长波限与吸收层的禁带宽度有关，对于本征吸收探测器，二者的关系可以表示为式(4.3)。InGaAs 的禁带宽度可在 InAs 的 0.35 eV 与 GaAs 的 1.43 eV 之间变化，对应的截止波长分别为 $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 与 $0.87\text{ }\mu\text{m}$ ，是制备短波红外探测器的合适材料。表 4.1 给出了 InP, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 在 300K 时的材料参数。

$$\lambda = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})} (\mu\text{m}) \quad (4.3)$$

表 4.1 InP, In_{0.53}Ga_{0.47}As, In_xGa_{1-x}As 的材料参数(300K)

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

4.2.3 样品测试

测试样品为 128×2 平面型 InGaAs 线列探测器, 从 p-n 结位置处解理探测器得到表面平整的横截面, 进行测试。测试仪器为 Veeco Instr 公司的扫描探针显微镜 MultiMode SPM, 针尖为重 N 型掺杂的硅针尖, 针尖标称曲率半径小于 10 nm。SCM 测量使用带有金属涂层的硅针尖, 针尖标称曲率半径为 25~50 nm。

4.2.4 p-n 结的位置

图 4.3 为样品截面接触电势差分布图, 不考虑电势差的绝对值, 从不同颜色区域的边界形状可以大致判断扩散区的位置和形状: 在 InP 帽层中可以清楚地看到 Zn 的扩散区域, 相比之下, InGaAs 吸收层中的扩散情况却难以判断, 在等

值线图中可以看到一条-0.015eV 的弧形等值线, 表明在 InGaAs 区域同样存在着由掺杂引起的接触电势差变化, 所以, 需要寻找合适的方法从电势分布中求解杂质的扩散区域。

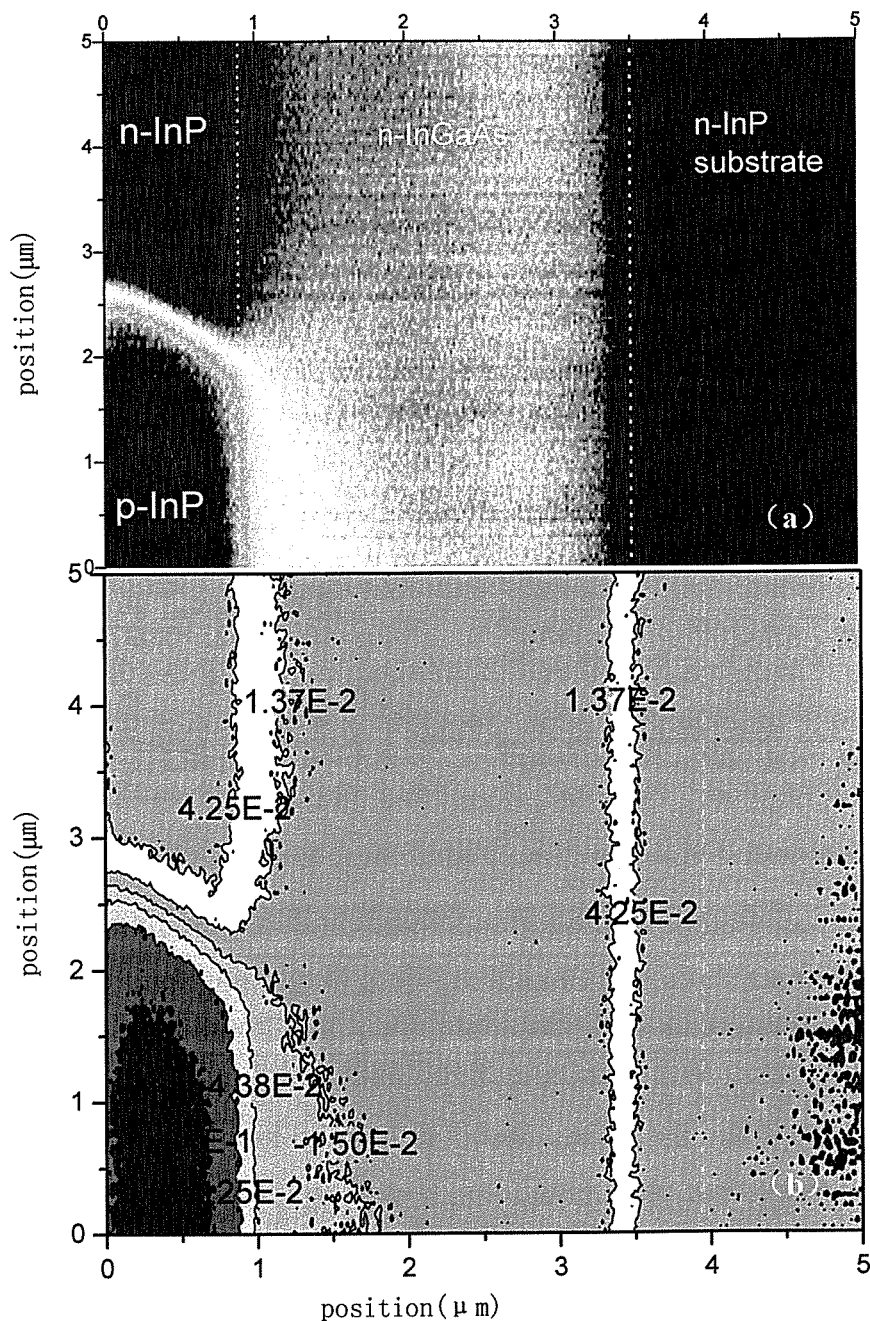


图 4.3 样品扩散截面的 SKPM 表征: (a)分布图 (b)等值线图

Fig 4.3 SKPM characterization of sample cross section: (a) image plot, (b) contour plot

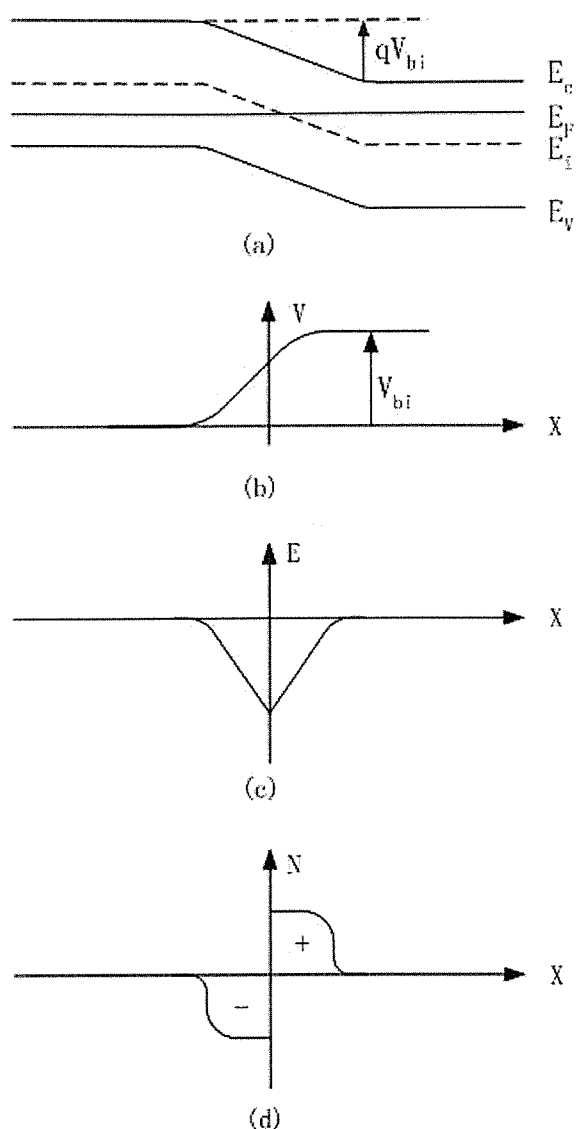


图 4.4 热平衡条件下 p-n 结中静电变量: (a) 热平衡能带图 (b) 静电势
(c) 电场 (d) 电荷密度

Fig.4.4 Electric parameters of a p-n junction in thermal equilibrium: (a) Energy-band diagram (b) electric potential (c) electric field (d) space charge density

图 4.4 为热平衡条件下同质 p-n 结的静电变量^[9], 在冶金结的两侧, 空间电荷(图 4.4d)的出现引入一个内建电场(图 4.4c), 相比内建电场的电势(图 4.4b)连续变化来说, 电场在冶金结处存在一个突变的峰值, 所以通过求解 p-n 结电场峰值的位置可以得到冶金结的位置。

在热平衡状态下的 p-n 结电场可以用式 4.4 得到:

$$E = -\frac{dV}{dx} = -\frac{d\phi_s}{qdx} \quad (4.4)$$

其中, V 为 p-n 结静电电势, χ_s 为功函数。

由式 4.2 得到:

$$\frac{d\phi_s}{qdx} = \frac{d\phi_{tip}}{qdx} - \frac{dV_{CPD}}{dx} \quad (4.5)$$

由于探针功函数 Φ_{tip} 为常数, 所以,

$$|E| = \frac{dV_{CPD}}{dx} \quad (4.6)$$

可见, 对测量电势分布的求导可以得到电场的分布。

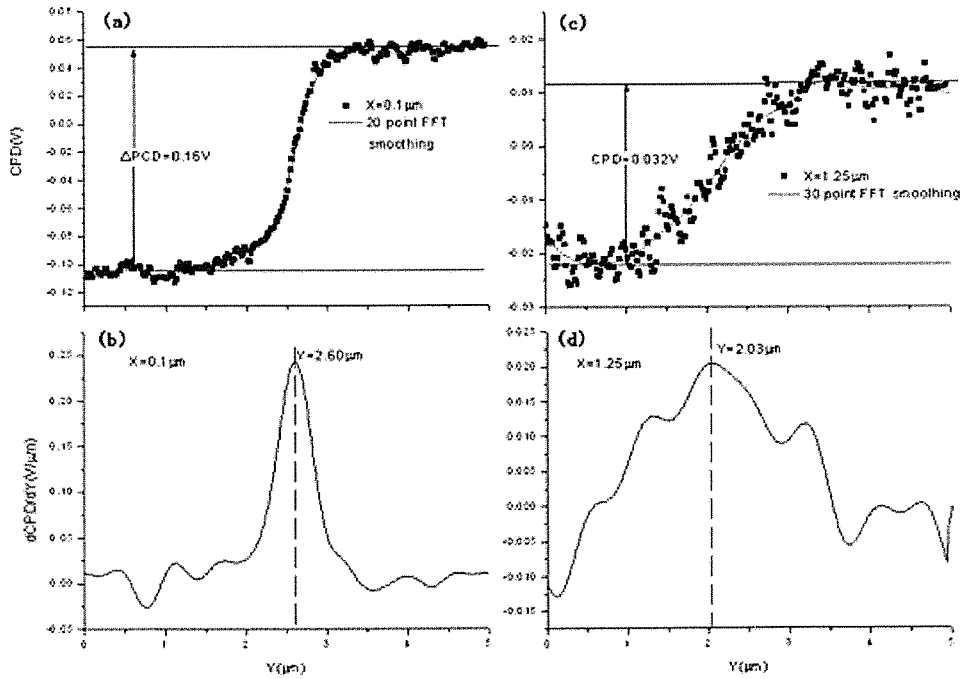


图 4.5 样品横截面 x 为 $0.1\mu\text{m}$ 和 $1.25\mu\text{m}$ 处接触电势差 (a)、(c) 及其导数 (b)、(d)
Fig.4.5 CPD (a) ,(b) and their differential (c) ,(d) of the cross section at the x points of $0.1\mu\text{m}$ and $1.25\mu\text{m}$

将垂直材料的方向作为 x 轴, 零点取在材料表面, 指向材料内部的方向为正向, 沿外延层的方向设为 y 轴, 图 4.5 为在不同深度下, 电势沿 y 轴的分布及其导数。在 InP 帽层($x=0.1\mu\text{m}$)p-n 结的电势差约为 0.16V (图 4.5a), 对其求导得到

电场的峰值位于 $y=2.6\mu\text{m}$ 处(图 4.5b), 而 InGaAs 层中($x=1.25\mu\text{m}$)p-n 结电势差为 0.032V (图 4.5c),对其求导得到电场峰值位于 $y=2.03\mu\text{m}$ (图 4.5d)。对非扩散区的电势沿 x 轴求导可以得到异质结的位置, 结果如图 4.6 所示, 得到 InGaAs 吸收层的厚度为 $2.51\mu\text{m}$, 与材料生长参数 $2.5\mu\text{m}$ 相符。对不同 x 值处的 y 方向电势求导, 统计其峰值, 可以得到 p-n 结在材料中的分布, 如图 4.7 所示, 杂质扩散的边界存在于 InGaAs 层, 图 4.8 为扩散边界在电势等值分布图中的位置, 可见, 杂质在 InGaAs 中的扩散边界与值为 -0.015 等值线相近, 所以扩散深度约为 $1.6\text{--}1.8\mu\text{m}$ 。

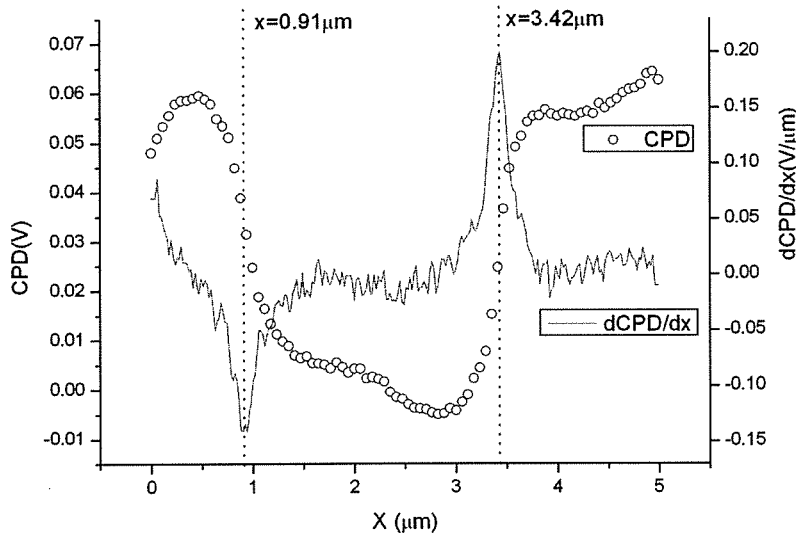


图 4.6 未扩散区域的 CPD 深度分布及其导数
Fig.4.6 CPD vertical distribution and its differential

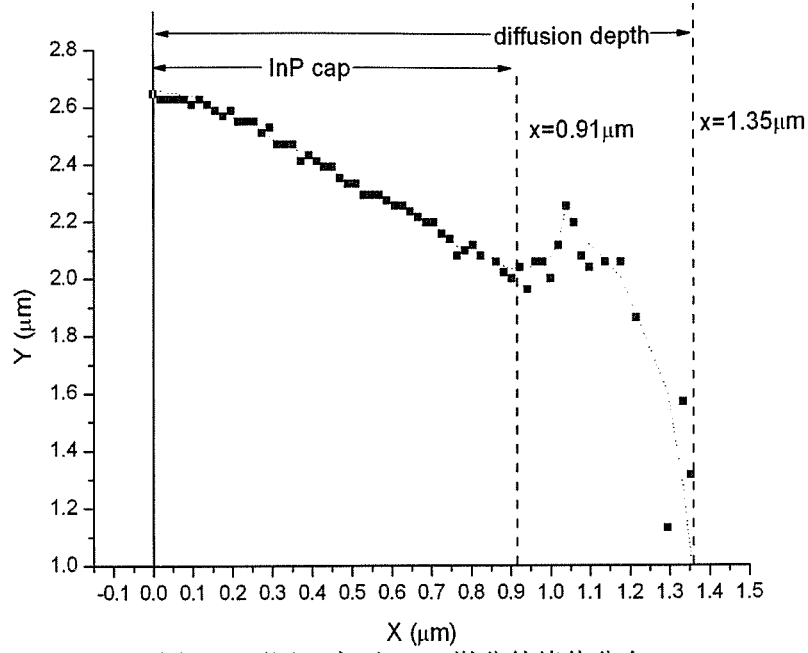


图 4.7 不同深度下 CPD 微分的峰值分布

Fig.4.7 vertical distribution of the differential peaks of CPD

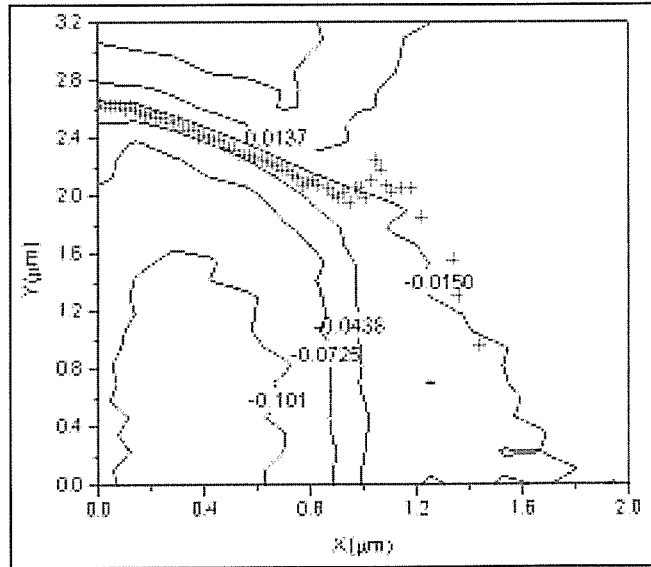


图 4.8 CPD 微分峰值分布在等值分布图中的位置

Fig.4.8 Peak distribution of differential CPD in the contour plot

4.2.5 p 型杂质掺杂浓度

在同质材料的 p-n 结中, p 区与 n 区的电势差为:

$$\Delta V_{CPD} = \Delta \left\{ \frac{\phi_{tip} - [\chi_s + (E_C - E_F)]}{q} \right\} \quad \text{其中 } \Phi_{tip}, \chi_s, E_c \text{ 为常数,} \quad (4.7)$$

所以,

$$\Delta V_{CPD} = -\frac{\Delta E_F}{q} \quad (4.8)$$

$$\frac{1}{q}|\Delta E_F| = V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (4.9)$$

求解式 4.8、4.9, 可得

$$N_A N_D = n_i^2 \exp\left(\frac{q\Delta V_{CPD}}{kT}\right) \quad (4.10)$$

未扩散的 InGaAs 层为 n 掺杂, N_D 为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 在 $x=1.25 \mu\text{m}$ 处, ΔV_{CPD} 为 0.032V, 由式得到 $N_A=3.28 \times 10^7 \text{cm}^{-3}$, 这一计算结果太不合理。计算未扩散区域的 InP 与 InGaAs 异质结功函数差, 其值为 0.094eV, 而测试得到的功函数差约为 0.067eV, 这说明在 SKPM 的测试值存在较大误差, 这可能与测试系统的灵敏度有关。测试误差可能影响到 p-n 结位置的计算, 为保证其准确性, 需要一个基本条件: 测试值与实际值之间满足线性关系。

4.3 扫描电容显微 (SCM)测试

4.3.1 测试原理

扫描电容显微镜是扫描探针显微术另一种重要的应用方式,主要用于二维显示载流子浓度的分布。SCM测量系统如图4.9所示,样品等效为一个MOS电容,当针尖与样品相接触时,传感器、探针和样品中针尖附近的载流子构成谐振器,即针尖和样品的电容的变化将加载到传输线终端并改变系统的谐振频率,谐振频率的微小变化在谐振传感器输出信号中产生巨大变化,系统的灵敏度约在 10^{-18}F 。

SCM测试通常有两种测试模式: 恒电容变化与恒电压变化, 两种测试模式最终都得到样品电容对电压的变化率($\Delta C/\Delta V$), 测试值 $\Delta C/\Delta V$ 与载流子浓度 N 的定性关系可由图4.10说明: 针尖与半导体之间构成的MOS电容(C_{MOS})是由表面氧化层电容 C_{OX} 和半导体电容 C_S 串联组成, C_{OX} 是固定电容, 而 C_S 电容量耗尽状态下随耗尽层厚度的变化而变化。

犹他大学和美国标准总局合作对Si材料进行了下述研究^[7],在样品横截面上

用二次离子质谱SIMS测量注入杂质离子的分布,同时用扫描电容显微镜测量样品,用式计算了SCM测试数据与掺杂浓度的关系,结果表明两种方法有较好的一致性。

$$\Delta C = \frac{\epsilon_{OX}}{T_{OX}} \left[1 - \frac{\alpha N^{1/2}}{\frac{\epsilon_{OX}}{T_{OX}} + \alpha N^{1/2}} \right] \quad \alpha = \sqrt{\frac{\epsilon_s q}{2(V_{bi} - V_{app})}} \quad (4.11)$$

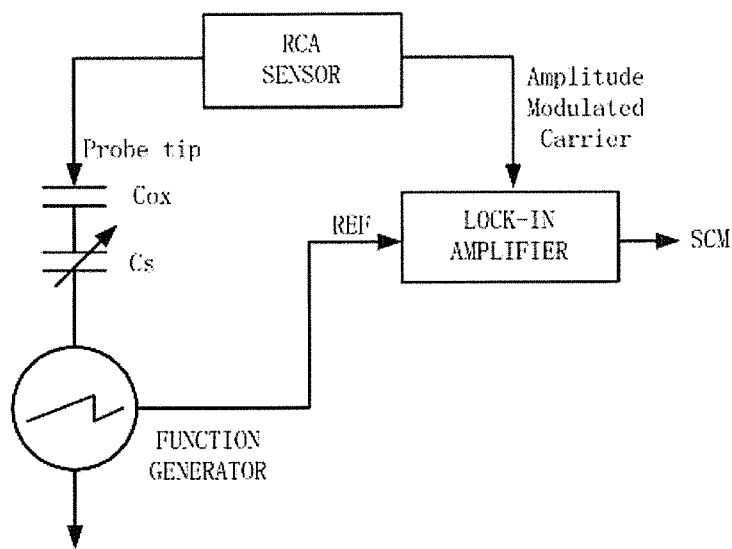


图 4.9 SCM 测试原理图

Fig.4.9 Measurement diagram of scanning capacitance microscopy

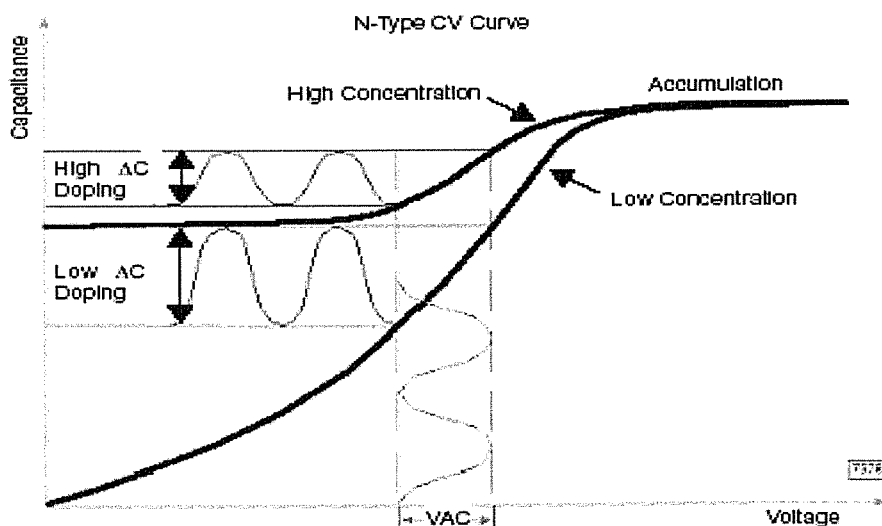


图4.10 n型半导体的电容-电压 (CV) 曲线

Fig.4.10 Capacitance versus voltage of n-type semiconductor

4.3.2 结果与讨论

需要指出的是高精度的载流子分布测定需要求解泊松方程,从所测电容量的数据来反演出掺杂分布的理论方法还未完全解决,所以SCM用作绝对测量还不成熟,而且由式4.11求解样品的载流子浓度需要首先得到氧化层厚度、氧化层介电常数和探针电压等信息,在铟镓砷样品测试中,样品表面的氧化层通过半导体表面吸附空气中的氧得到,这给氧化层厚度与介电常数的测试带来了困难。而p-n结位置的求解则不需要样品材料参数,因为对于n型半导体材料来说, $\Delta C/\Delta V$ 的值大于零,而p型材料的 $\Delta C/\Delta V$ 值小于零,所以可以将 $\Delta C/\Delta V$ 的零点位置定义为p-n结位置。

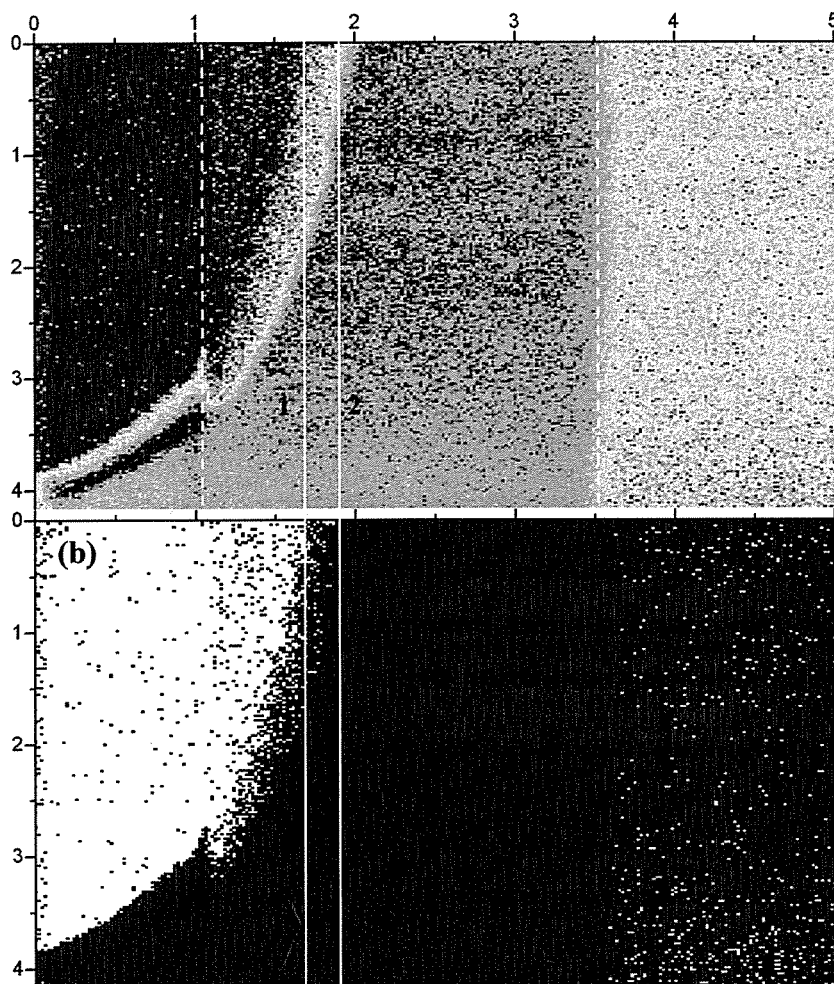


图 4.11 样品的 SCM 测试结果: (a) 扫描电容分布, (b) 数值处理
Fig.4.11 SCM measurement of the sample: (a) scanning capacitance mapping , (b) numerical treatment

样品的SCM测试结果如图4.11所示,从图4.11a中可以比较直观地看到扩散区

的形状与位置以及样品两个外延层的位置,为了得到p-n结位置,设 $\Delta C/\Delta V$ 大于零的点值为1,小于零的点值为-1,得到图4.11b,可见,p-n结的位置位于1.7-1.9 μm 之间,而异质结界面位置约为1.0 μm 。值得一提的是,在InP和InGaAs层的界面处扩散区不连续,而是在InGaAs层中出现一个尖角,这可能是源于Zn在不同外延层扩散速度的不同,更重要的是,这一现象在SKPM测试中也可以得到(图4.7),这在某种程度上说明了两种方法的一致性。

4.4 小结

对 InGaAs 红外探测器来说, p-n 结的结区表征是器件工艺研究的关键,本章采用扫描电势和扫描电容显微技术实现了对 p-n 结二维电学性质的表征。结果表明,两种方法都可以直观地给出 p-n 结的结区形状,而且表征结果具有较好的一致性,通过理论计算可以得到 p-n 结的位置。理论上, SKPM 和 SCM 都可以得到样品中杂质的掺杂浓度,对于 InGaAs 器件来说,要实现其掺杂浓度的量化仍需要进一步的实验与理论研究。

参考文献

- [1] Yun I., Hyun K. S., Zinc diffusion process investigation of InP-based test structures for high-speed avalanche photodiode fabrication, Microelectronics Journal 2000, 31: 635-639
- [2] Martin H.E., Michael J.L., Sugg A.R., et al, Zinc Diffusion in InAsP/InGaAs heterostructures, Journal of Electronic Materials 1999, 28(12):1433-1439
- [3] Todd H., Albert K. H., Chris L., et al Capacitive effects on quantitative dopant profiling with scanned electrostatic force microscopes, J. Vac. Sci. Technol. B 1996, 14(1): 457-462
- [4] Roger A., Bryant M., Michael Y., Junction metrology by cross-sectional atomic force microscopy, J. Vac. Sci. Technol. B 1996, 14(1):452-456
- [5] Kopanski J. J., Marchiando J. F., and Berning D. W., Scanning capacitance microscopy measurement of two-dimensional dopant profiles across junctions, J. Vac. Sci. Technol. B 1998, 16(1):339-343
- [6] Buh G. H., Chung H. J., Yi J. H., et al, Electrical characterization of an operating Si pn-junction diode with scanning capacitance microscopy and Kelvin probe force microscopy, J. Appl. Phys., 2001, 90(1):443-448

- [7] Shikler R., Meoded T., Fried N., et al., Potential imaging of operating light-emitting devices using Kelvin force microscopy, Appl. Phys. Lett., 1999,74,(20):2972-2974
- [8] Park S.E., Nauven N.V., Kopanski J.J.,et al., Comparison of scanning capacitance microscopy and scanning Kelvin probe microscopy in determining two-dimensional doping profiles of Si homostructures, J.Vac.Sci.Technol.B 2006,24(1):404-407
- [9]半导体器件基础 Robert F. Pierret 著 北京: 电子工业出版社.2004.11
- [10]Erickson A, Sadwick. Quantitative Scanning Capacitance Microscopy Analysis of Two-Dimensional Dopant Concentrations at Nanoscale Dimensions, Journal of Electronic Materials,1996,25(2):301-304

第五章 256×1 InGaAs 线列器件的制备工艺

5.1 引言

可在室温工作及探测率较高等优点使短波红外 InGaAs 探测器在航天遥感领域应用方面具有很大的优势。目前,国外已将 InGaAs 线列红外扫描焦平面用于遥感卫星:如法国的 SPOT4 和 SPOT5 卫星上采用了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面^[1];欧洲空间局(ESA)新一代的环境卫星(ENVISAT)上采用了 1024 元 InGaAs 短波红外扫描^[2]焦平面,对卷云探测和海洋观测的需求也推动了国内 InGaAs 线列焦平面的研制^[3-5]。由于国内遥感用 InGaAs 焦平面的研究起步较晚,其结构基本以工艺相对简单的台面型为主,而平面型的 InGaAs 探测器却是国际航天遥感领域主流的探测器结构,相对于台面型结构来说,平面型的结构在探测率与可靠性方面具有更大的优势,所以,有必要开展这方面的研究工作。

台面型的 InGaAs 探测器通过刻蚀去除光敏元之外的 p-InP 层和 InGaAs 有源层,可以比较准确地定义光敏元,而平面型工艺中光敏元通常通过扩散成结形成,横向扩散以及侧向收集效应使得光敏元扩大成为平面型工艺中一个重要的问题^[6,7],本章进行了平面型 256×1 InGaAs 线列器件的工艺探索,通过结构改进以及设计合适的测试结构对工艺进行监控,实现了线列器件光敏元的准确定义。制备了 256×1 InGaAs 线列器件,并对器件性能进行了表征。

5.2 线列器件关键工艺研究

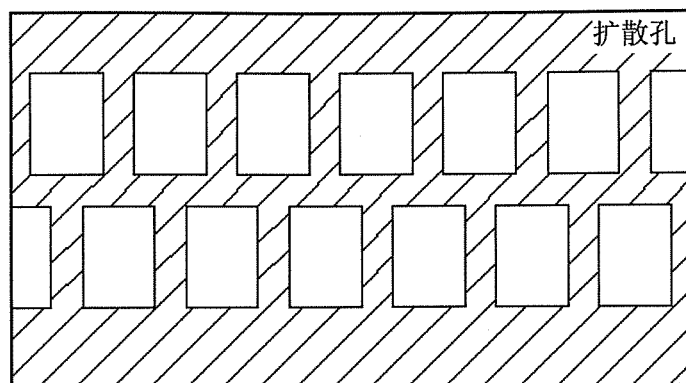
5.2.1 器件版图与工艺

版图为 256×1 线列,相邻光敏元之间呈品字排列,光敏元面积为 50μm,中心距为 100μm。

第一块版:扩散区图形

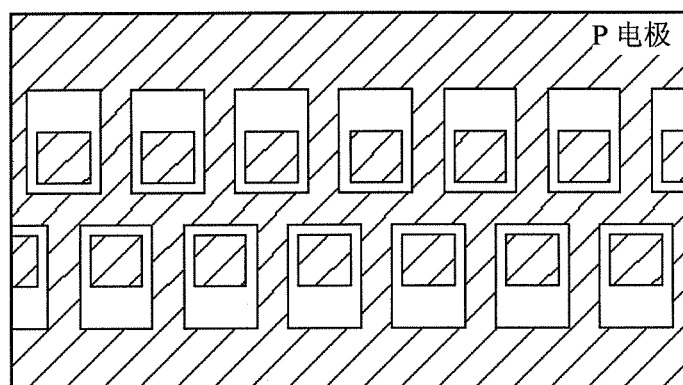
在清洗后的样品表面生长 SiO₂ 扩散掩膜,然后用此版腐蚀扩散孔,为了减小串扰,应该使扩散孔间距尽量大,此版相邻扩散窗口之间间隔 30μm,扩散窗口区呈品字型排列。扩散孔一般用 HF 酸缓冲液(HF:NH₄F:H₂O=3:6:9)腐蚀 SiO₂ 扩散掩膜得到。闭管扩散,扩散条件为:Zn₃P₂ 扩散源 300mg,真空石英管反应腔,体积约 60cm³,真空度约 1.0×10⁻³pa,在扩散炉的恒温区扩散后放入室温的水

中冷却。



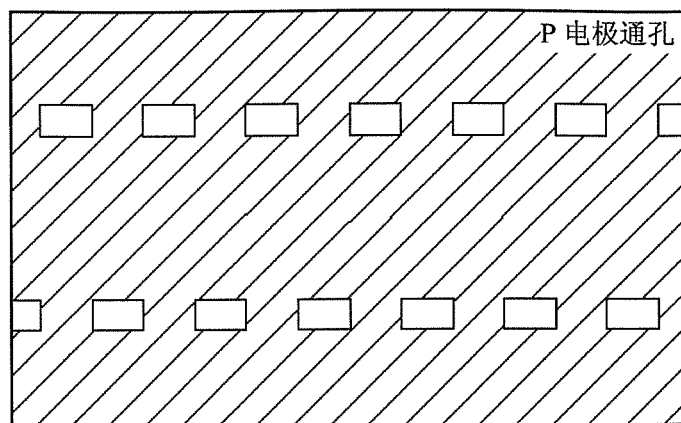
第二块版：p 电极区图形

为了保证光敏区电场分布的均匀性，将器件的 p 电极设计成环状结构，以增加 p 电极与扩散区的接触面积。在闭管 Zn 扩散工艺之后便进行 p 电极的生长，p 电极金属为 Au/Zn/Au，p 电极上生长 2300Å 的 SiO₂ 增透保护膜，在扩散热退火炉中 N₂ 气氛下进行热退火以形成欧姆接触。



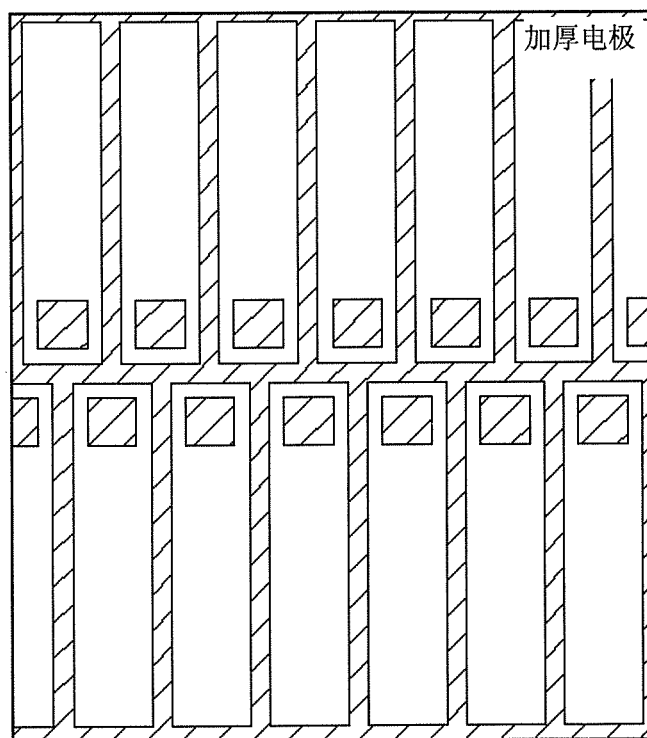
第三块版：p 电极通孔图形

通过 p 电极通孔版图对样品表面的 SiO₂ 层进行腐蚀以形成 p 电极与加厚电极之间的通孔。



第四块版：加厚电极图形

加厚电极是器件与读出电路金丝键合的焊区，在此版中加厚电极为与 p 电极类似的环状。环形的 p 电极与加厚电极在光敏元以外对入射光的反射抑制了此区域光生载流子的产生，通过这种方式以求得对有效光敏元面积的准确定义。



器件最终结构如图 5.1 所示，图 5.2 为器件的剖面图。

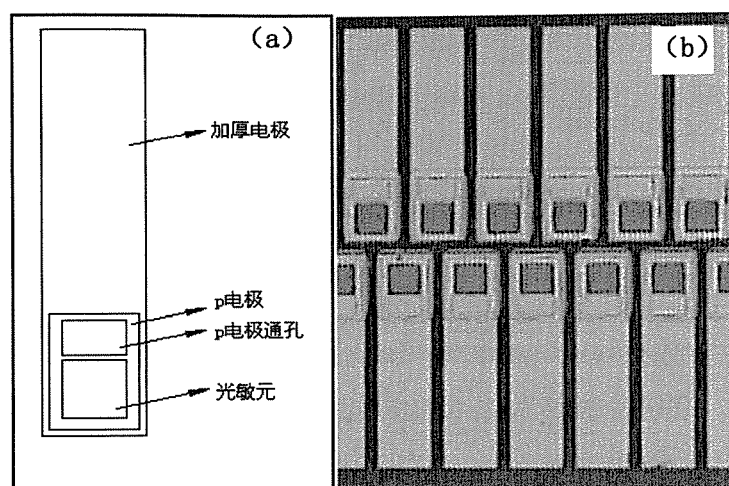


图 5.1 初始工艺光刻版 (a) 和 实物照片 (b)

Fig.5.1 Photo mask (a) and device photo (b) of original process

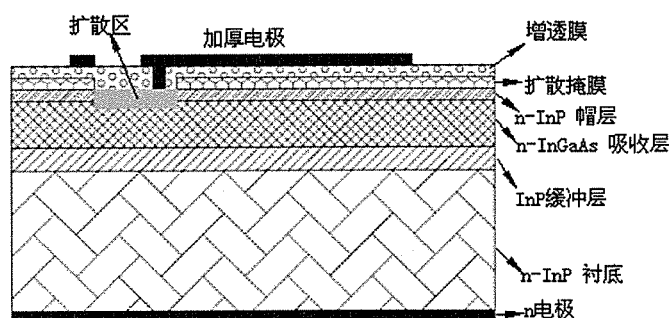


图 5.2 初始工艺器件剖面图

Fig.5.2 Cross section of device from original process

5.2.2 器件的有效光敏元畸形

器件有效光敏元的测试采用激光诱导电流检测(LBIC)系统, 该系统为 SEMILAB 公司产的 Micro LBIC 仪器, 脉冲激光波长为 980nm, 频率为 1kHz, 激光束斑直径为 $5\mu\text{m}$, 扫描步进可选择。图 5.6 是它的系统结构框图。测试时将线列器件某个单元的 p、n 电极接入系统, 这样当小光点激光扫描样品时便得到不同点的光伏响应, 最终得到器件的响应形貌。

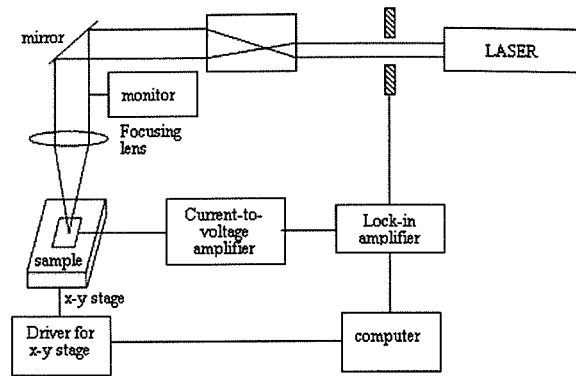


图 5.6, LBIC 检测系统结构框图

Fig.5.6 Block diagram for LBIC system

器件的小光点响应形貌如图 5.7 所示, 中心方形响应区域为期望的器件光敏元形状, 但是, 除了这一区域的响应之外, 在方形响应区域周围还存在一个环状的响应区, 通过与样品结构的对照可知, 这一区域为相邻加厚电极之间的区域。将响应分布沿器件水平中心线作图(图 5.7b), 可以看到, 环状响应区域的响应峰值与方形响应区域相近甚至更大, 这一多余响应区域面积与响应强度偏大, 使器件真实的响应形貌发生畸变, 而不是期望的方形。

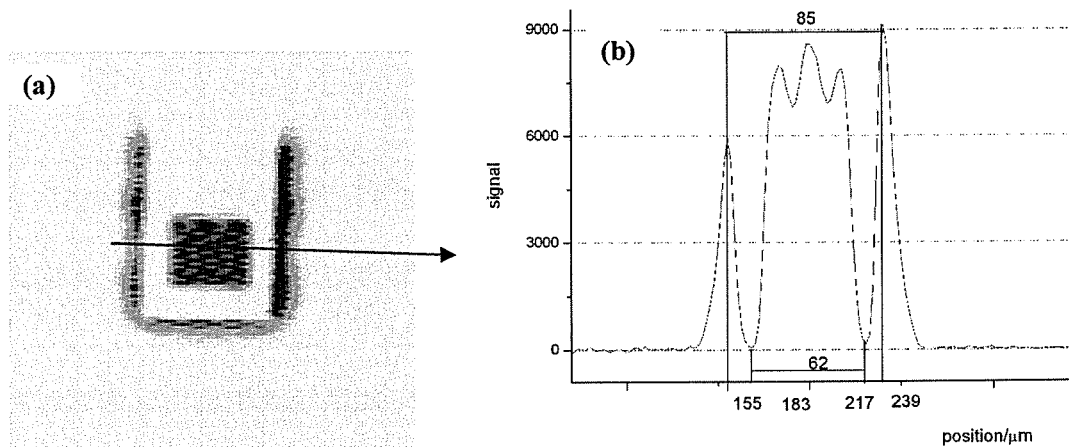


图 5.7 原始器件有效光敏元(a)及其沿中心线分布 (b)

Fig.5.7 Effective photo-active area of original device (a) and distribution along the central line (b)

样品的实物照片如图 5.8 所示。在版图设计中, 扩散孔边界与加厚电极边界重合, 忽视了扩散孔腐蚀过程中的侧向钻蚀, 造成在实际器件中扩散孔边界偏离加厚电极的边界, 这部分偏离区域因没有金属反射层的覆盖而具有很高的光生载流子注入, 致使它的响应与光敏元区域的响应相当甚至更大。而且, 设计中扩散

孔与加厚电极边界的重合没有留给光刻足够的容差,在图 5.8 的样品中,扩散孔左右边界到相应的加厚电极边界的距离不等,这是由于光刻对准时的误差造成的。腐蚀与光刻的误差最终导致样品出现多余的响应区域。但值得一提的是,加厚电极对入射光的反射作用是有效的,这一结论可以从器件实物与响应照片的对照中得到。器件光敏元的扩大由两种原因引起:未被反射层覆盖的多余扩散区的响应以及扩散区电场的侧向收集效应,与扩散区下边界的响应相比,上边界处的响应小到可以忽略,这是因为上边界处的入射光被完全阻挡,没有光生载流子的产生,而下边界则通过电场的侧向收集效应产生响应信号。

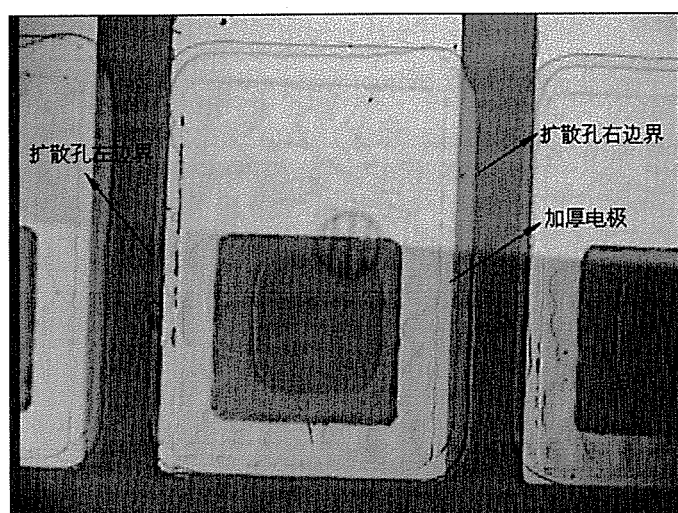


图 5.8 原始工艺器件实物照片

Fig.5.8 Device photo of original process

5.3 线列器件结构与工艺改进

5.3.1 版图改进

通过对线列器件工艺探索,发现影响有效光敏元形状的因素有:扩散孔的侧向钻蚀、光刻对准以及加厚电极对入射光的阻挡作用。针对这些问题,对器件结构进行了改进,图 5.9 为光刻版加厚电极图形,扩散孔的位置以虚线在图中标示,为了实现加厚电极金属层对光敏元形状的控制,进一步加宽了加厚电极的宽度,而且缩小了扩散孔的宽度,使扩散孔的边界与光敏元边界重合。图 5.10 为器件光刻版套视图与实物照片。

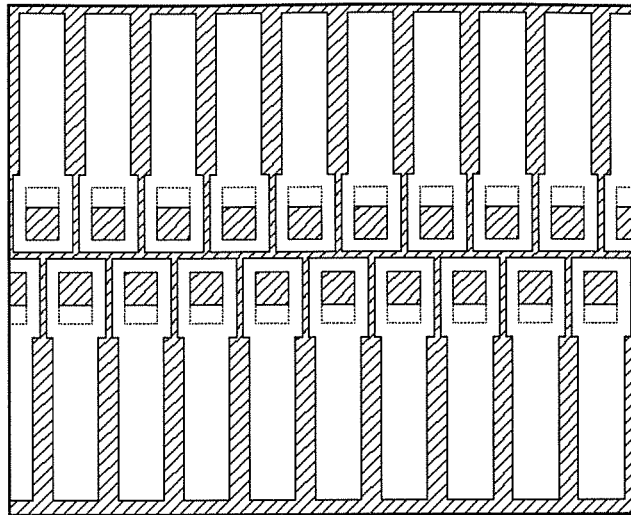


图 5.9 改进工艺器件版图

Fig.5.9 photo mask of improved process

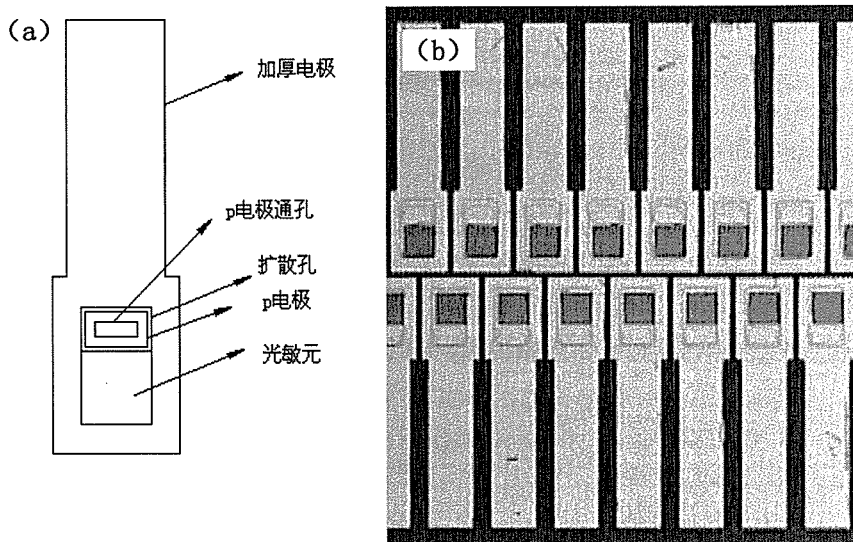


图 5.10 改进工艺光刻版 (a) 和 实物照片 (b)

Fig.5.10 Photo mask (a) and device photo (b) of improved process

5.3.2 腐蚀误差的控制

腐蚀过程中的侧向钻蚀对器件最终的结构与性能影响很大，在流片过程中，通常采用 HF 酸缓冲液对 SiO_2 层进行腐蚀，其腐蚀速率受 SiO_2 膜的材料性质、腐蚀温度以及腐蚀液组分等因素的制约，而且在通常情况下， SiO_2 膜的腐蚀会在几秒中完成，这些都对腐蚀时间的控制造成很大困难，除了在器件设计中为腐蚀工艺预留足够的容差之外，在腐蚀过程中对钻蚀的实时观察也是重要的。

在腐蚀工艺中，通常通过观察腐蚀后膜的颜色来判断腐蚀的深度，这种观察

在操作中不易控制。在腐蚀过程中，一个合理的假设是腐蚀各向同性，这一假设使我们可以将对腐蚀深度的观察转变为对钻蚀的观察。图 5.11 为扩散孔腐蚀工艺的测试结构，其中有七个与扩散孔形状相同的腐蚀孔，它们的排列形式形成两种不同间距的腐蚀孔顶角，顶角 1 的左右跨距为 0，顶角 2 的左右跨距为 $4\mu\text{m}$ 。当顶角 1 连通表示腐蚀的开始，通过连通宽度可以大致度量钻蚀大小，而当顶角 2 由于钻蚀而连通时，说明腐蚀的侧向钻蚀为 $2\mu\text{m}$ ，这时停止腐蚀可以保证扩散孔的完全腐蚀并且钻蚀被控制在 $2\mu\text{m}$ 之内。同时，测试结构中心腐蚀孔在预先通过离子刻蚀工艺形成了与扩散孔同样形状的刻蚀区，这样通过对比最终腐蚀孔与刻蚀区，可以比较准确地得到钻蚀的距离。通过这一测试结构，可以有效地实现腐蚀的控制与测量。

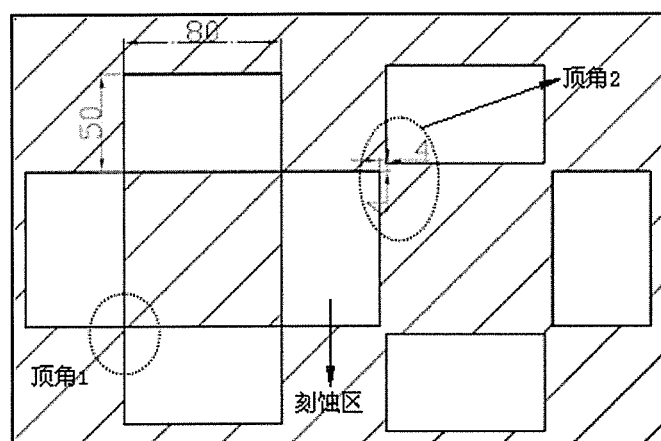


图 5.11 钻蚀控制方法

Fig.5.11 Side-etching control method

扩散孔的腐蚀结果如图 5.12 所示，通过对腐蚀时间的控制将扩散孔的钻蚀控制在 $0-2\mu\text{m}$ 之内。更好地扩散孔开孔工艺是采取刻蚀的方法，可以看到，通过反应离子刻蚀得到的扩散孔其钻蚀可以忽略(图 5.12b)，但它与湿法腐蚀相比缺点是工艺较为复杂。

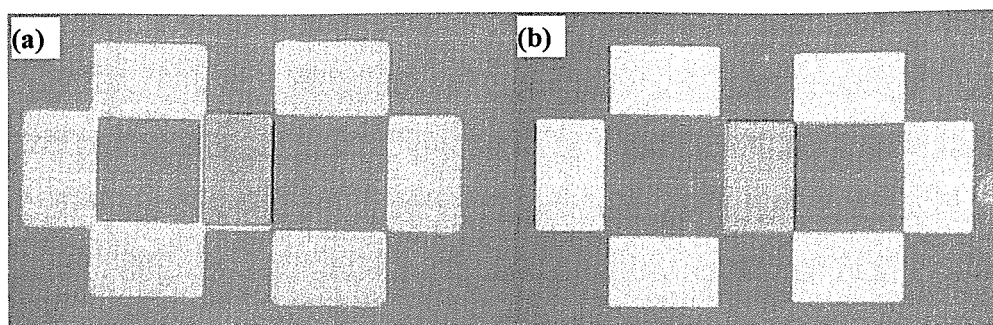


图 5.12 工艺中的钻蚀控制: (a) 湿法腐蚀, (b) 反应离子刻蚀
Fig.5.12 Side-etching control in the process: (a) wet etching, (b) REE

5.3.3 器件的响应分布

器件的小光点响应测试结果如图 5.13 所示, 除了期望的光敏元响应区以外, 在加厚电极周围仍有部分响应, 但它的峰值强度已被抑制到中心区的 30%(图 5.13b), 而且响应面积也大大减小, 可见新的器件结构对光敏元畸形有很大的改善。

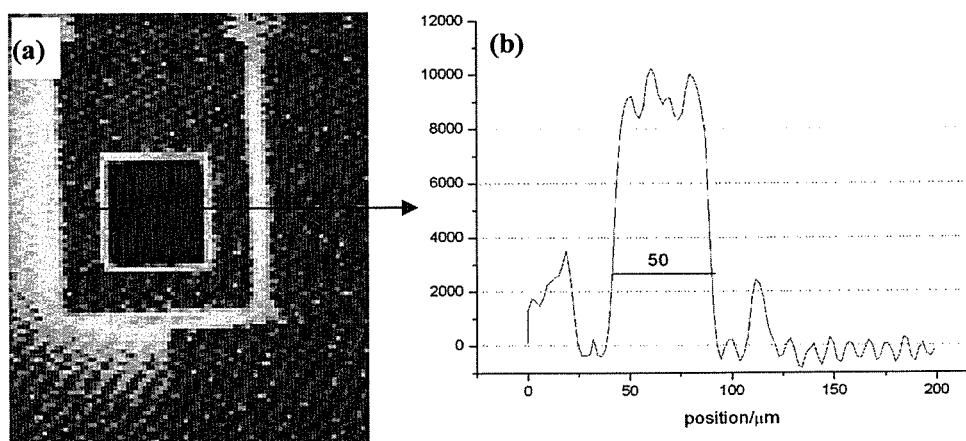


图 5.13 结构改进后的器件的小光点响应: (a) 面分布, (b) 沿器件中心线的分布
Fig.5.13 Spot responsivity of improved device: (a) mapping, (b) distribution along the central line of the device

5.4 器件性能参数与测试

5.4.1 等效噪声功率和探测率^[8]

探测器的信噪比为 1 时, 入射到探测器上的辐射功率定义为等效噪声功率, 单位为瓦。噪声等效功率是探测器能够探测到的最小功率(无调制情况下), 所以可以作为探测器灵敏度的度量手段。换句话说, 探测器的探测能力是用它在无调制情况下能够探测到的最小功率来度量的。由于信噪比为 1 时功率测量不太方

便,可以在高信号电平下测量,再根据下式计算:

$$NEP = \frac{HA_d}{V_s/V_n} = \frac{P}{V_s/V_n} \quad (5.1)$$

其中 H : 辐照度, 单位 W/cm^2 ;

A_d : 探测器光敏面面积, 单位 cm^2 ;

V_s : 信号电压基波的均方根值, 单位 V ;

V_n : 噪声电压均方根值, 单位 V ;

等效噪声功率被用来度量探测器的探测能力, 但是等效噪声功率最小的探测器的探测能力却是最好的, 很多人不习惯这样的表示方法。Jones 建议用等效噪声功率的倒数表示探测能力, 称为探测率, 这样较好的探测器有较高的探测率。因此, 探测率可表达为:

$$D = \frac{1}{NEP} \quad (5.2)$$

广泛的理论和实验研究表明, 有理由假定探测率与探测器面积的平方根成反比。探测器输出噪声包含各种频率成分, 显然, 噪声电压是测量电路带宽的函数。由于探测器总噪声功率谱在中频段较为平坦, 可认为测得的噪声电压只与测量电路带宽的平方根成正比, 即探测率与测量电路带宽的平方根成反比。以此, 可定义:

$$D^* = D(A_d \Delta f)^{1/2} = \frac{(A_d \Delta f)^{1/2}}{NEP} \quad (5.3)$$

单位: $cm \cdot Hz^{1/2} \cdot W^{-1}$ (Jones)

D^* 的物理意义可理解为 1 瓦辐射功率入射到光敏面积 1 厘米² 的探测器上, 并用带宽为 1 赫电路测量所得的信噪比。 D^* 是归一化的探测率, 也称为比探测率。

5.4.2 响应率

响应率等于单位辐射功率入射到探测器上产生的信号输出。响应率一般以电压形式表示。对以电流方式输出的探测器, 如输出短路电流的光伏探测器, 也可用电流形式表示。

$$\text{电压响应率} \quad R_V = \frac{V_s}{HA_d} = \frac{V_s}{P} \quad (5.4)$$

单位为 V/W 。

$$\text{电流响应率} \quad R_i = \frac{I_s}{HA_d} = \frac{I_s}{P} \quad (5.5)$$

单位为 A/W 。

因为测量响应率时是不管噪声大小的，可不注明只与噪声有关的电路带宽。

焦平面响应率的计算可由式 5.6-5.8 得到：

器件响应率：

$$R = \frac{I_s}{P} \quad (5.6)$$

其中： I_s 为信号电流， P 为入射功率

信号电流可以通过信号电压推算得到：

$$I_s = \frac{V_s C_{\text{int}}}{t A_v} \quad (5.7)$$

其中： V_s 为信号电压， C_{int} 为积分电容， t 为积分时间， A_v 为积分因子

入射功率 P 为：

$$P = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)d^2 A_D}{4L^2} \quad (5.8)$$

其中 T_b 是黑体温度， T_0 是背景温度， d 是黑体出射孔半径， A_D 是被测探测器光敏元面积， L 是黑体出射孔和探测器之间的距离。 σ 是斯忒藩常数。

5.4.3 性能测试

把 256 元线列探测器封装在杜瓦瓶中，等间隔抽取 11 元测试了室温下器件的 IV 特性，由此得到器件的优值因子，并且测试了各元器件信号的电压(V_s)和噪声电压(V_n)，根据探测率式 5.3 计算了器件探测率，结果如图 5.14 所示，探测率位于 $2 \sim 8 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ ，平均值为 $4.78 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 。

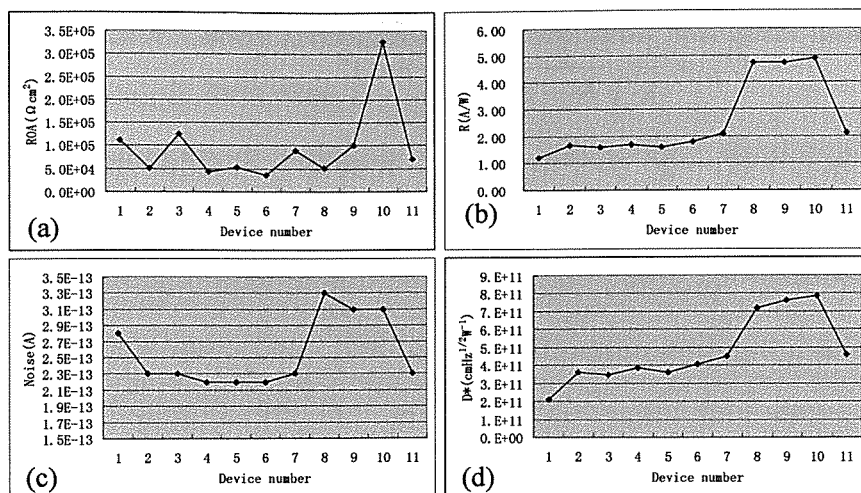


图 5.14 256 线列抽测各元的优质因子 (a)、黑体响应率 (b)、噪声 (c) 和峰值响应率 (d)

Fig. 5.14 Merit factor (a), black responsivity (b), noise(c) and peak detectivity (d) of the picked devices in the linear array

将线列器件与两个 128×1 的读出电路^[4]互联并封装在双列直插式管壳中(图 5.15)进行测试, 测试条件: 环境温度为 293K, 黑体温度为 900K, 出射孔直径 5mm, 距离 40cm, 积分时间 $1000\mu\text{s}$ 。图 5.16a 为删除盲元后线列组件峰值响应率直方图, 其平均值为 1.16A/W , 可以看到, 组件的响应有较好的均匀性, 通过公式 5.9 计算其非均匀性^[9], 结果为 4.69%, 组件噪声如图 5.16b 所示, 其平均值为 $3.64 \times 10^{-13}\text{A}$, 峰值探测率如图 5.16c 所示, 其平均值为 $5.58 \times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。与噪声的分布相比, 组件响应在线列的两边大中间小的“U”型形状, 其原因尚不清楚。

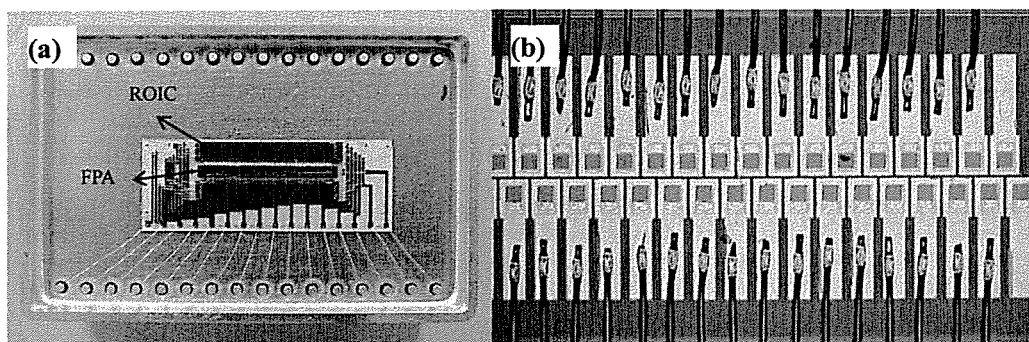


图 5.15 256 元 InGaAs 线列: (a) 组件, (b) 器件

Fig. 5.15 256 element linear detector array: (a) package, (b) device

响应率不均匀性是响应均方根偏差与平均响应率的比:

$$U_R = \frac{1}{\bar{R}} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R})^2} \quad (5.9)$$

式中 N 为探测器个数, $\bar{R}$ 为平均响应率, R_i 为第 i 个探测器响应率。

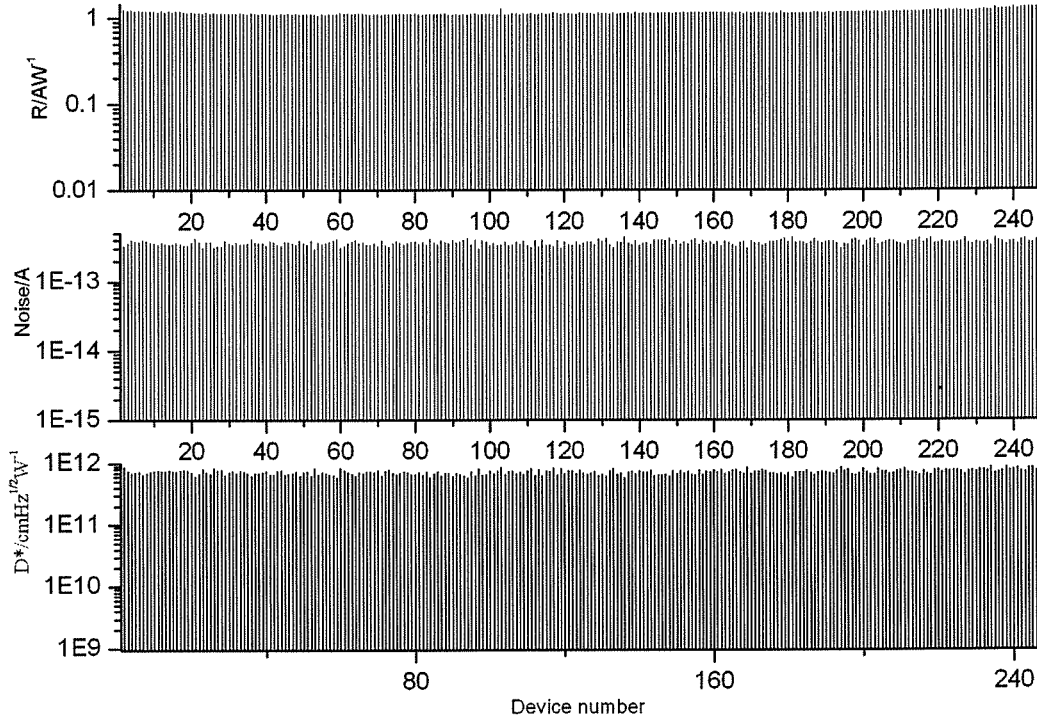


图 5.16 256 线列器件性能测试: 峰值响应率、噪声和峰值响应率

Fig.5.16 Performance measurement of linear detector array: peak responsivity, noise and peak detectivity

5.5 小结

本章主要介绍了平面型 256×1InGaAs 线列器件的结构设计与工艺改进, 通过设计测试结构实现了湿法腐蚀过程中对钻蚀的观察与控制, 特别是, 通过改进器件的结构很好地抑制了器件有效光敏元的畸形, 最终实现器件有效光敏元的准确定义。通过与读出电路互连, 测试了 256×1 InGaAs 线列组件性能, 室温下组件平均峰值响应率为 1.16A/W, 不均匀性为 4.69%, 平均峰值探测率为 $5.58 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。

参考文献

- [1]Olsen G, Joshi A, Lange M, et al, A 128×128 InGaAs detector array for 1.0-1.7 microns, SPIE, 1990, 1341: 432-437.

- [2] Moy J P, Hugon X, Chabbal J, et al, 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for the spot 4 SWIR channel, SPIE, 1989, 1107: 137-151.
- [3]庄春泉, 遥感用 InGaAs 红外探测器的工艺研究, 中国科学院上海技术物理研究所博士学位论文, 2006.
- [4]吕衍秋, 航天遥感用 InGaAs 线列红外焦平面的研究, 中科院上海技术物理研究所博士学位论文, 2007.
- [5]吕衍秋, 徐运华, 韩冰, 等, 128×1 线列 InGaAs 短波红外焦平面的研究, 红外与毫米波学报, 2006, 25(5): 333-337.
- [6] Linga K P, Joshi A M, Ban V S, et al, 1024 element linear In_xGa_{1-x}As/InAs_yP_{1-y} detector arrays for environmental sensing from 1μm to 2.6μm, SPIE, 1993, 2021: 90-97.
- [7]Olsen G H, Joshi A M, Mykietyn E, et al, Room-temperature InGaAs Arrays for 1.0-1.7μm, SPIE, 1989, 1107: 188-193.
- [8]汤定元, 糜正瑜, 等, 光电器件概论, 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
- [9]红外焦平面测试评价技术研究课题组, 焦平面探测器测试与评价, 中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 1995.

第六章 器件少子寿命测试及其与器件性能的关系

6.1 引言

应用于航天遥感领域的红外探测器对于器件的探测率具有很高的要求,所以器件响应率的提高是航天遥感用红外探测器工艺研究的目的之一。从理论分析可知,吸收层为n掺杂的光伏器件其量子效率可由式6.1得到^[1]:

$$\eta = (1 - R)(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha \sqrt{D_p \tau_p}}) \quad (6.1)$$

其中 α 为光吸收系数, D_p 为空穴扩散系数, W 为p-n结耗尽层宽度, R 为反射系数, τ_p 为空穴的寿命,在这些参数中,受器件工艺控制的主要为 R 和 W ,其中,反射系数由器件的表面性质决定,在器件工艺中可以通过抗反射膜的制备来减低器件表面对入射光的反射,p-n结耗尽层宽度 W 则取决于扩散成结工艺;而少子寿命 τ_p 是决定器件量子效率重要的材料参数,所以少子寿命的测试对于分析影响器件探测率的实际因素具有很大的帮助。

开路电压衰退法(Open Circuit Voltage Decay, OCVD)是一种比较成熟的p-n结少子寿命测试方法,被广泛地应用于Si太阳能电池等p-n结结构的寿命表征^[2-4],而微波反射光电导衰退法(microwave Photo Conductivity Decay, μ PCD)利用微波对样品光电导的检测,实现了少子寿命的非接触式测量,它的非破坏性以及方便的面扫描等特点使其在材料表征中具有很大的优势,被广泛地应用于各种半导体材料,如HgCdTe、Ge/GaAs和Si材料的研究中^[5-7]。

本章首先通过测试结构的设计,将OCVD测试耦合到 μ PCD的测试过程中,实现了两种方法的同步测试,研究了两种测试方法的一致性;其次,用开路电压衰退法测试了平面型单元器件的少子寿命,并且研究了少子寿命与器件探测率之间的关系。

6.2 μ PCD测试

6.2.1 测试原理

微波反射光电导衰退法的探测过程包括两个部分:1、非平衡载流子的注入:测试样品吸收来自仪器的垂直激光脉冲,产生非平衡的电子空穴对,由此引起样

品电导率的升高(图 6.1a), 当激光脉冲撤销后, 非平衡载流子开始复合, 由于非平衡载流子浓度的减小, 样品电导率随时间不断地降低; 2、电导率衰退的检测: 因为一个物体对微波的反射功率正比于物体的电导率, 所以可以通过检测样品反射的微波功率得到其电导率的衰退过程(图 6.1b)。

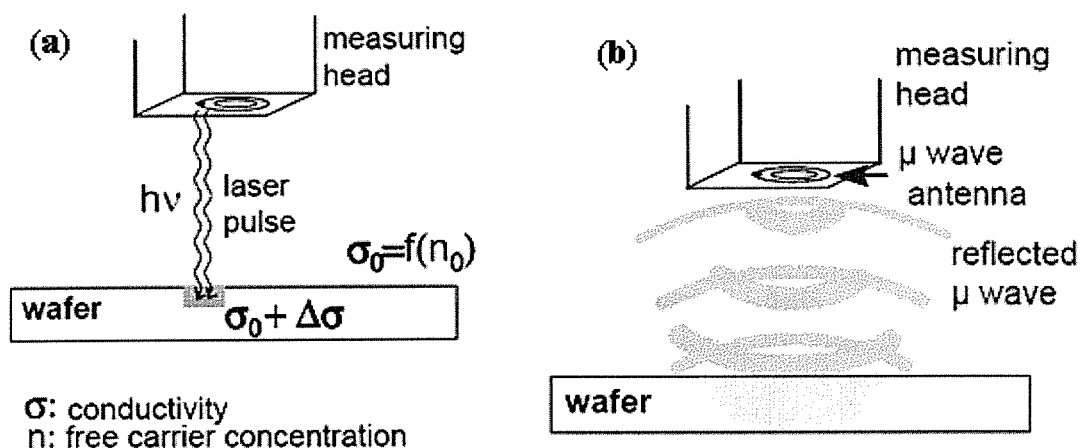


图 6.1 μ PCD 测试原理图: (a) 非平衡载流子的激发, (b) 微波探测

Fig.6.1 Measurement process of μ PCD: (a) Inducement of the excess carriers, (b) Detection of the microwave

6.2.2 测试结构

测试结构如图 6.2 所示, 所用材料为 p-InP/n-InGaAs/n-InP 结构, 在 3 英寸 InP 半绝缘衬底上依次生长厚度为 $1\mu\text{m}$ 掺 Si 的 n-InP 缓冲层, $n \approx 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$; 厚度为 $2.5\mu\text{m}$ 掺 Si 的 n-In_{0.53}Ga_{0.47}As 吸收层, $n \approx 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$; 厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 掺 Zn 的 p-InP 窗口层, $p \approx 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。在 p-n-n InGaAs 外延材料上通过刻蚀得到两个半径为 2mm 的圆形台面结构, 并生长 Ti/Pt/Au 作为 p、n 电极。

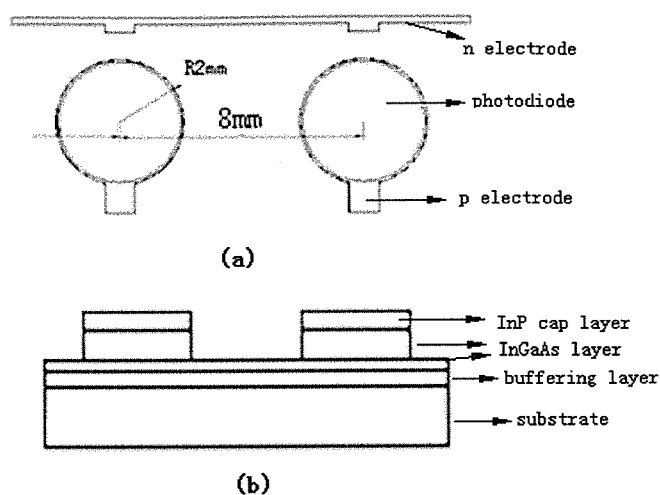


图 6.2 样品结构: (a) 正面, (b) 横截面

Fig.6.2 Structure of the sample: (a) top view,
(b) cross view

6.2.3 μ PCD 测试

μ PCD 测试包含一个设备参数的“自动设置(Autosetting)”过程,在这一过程中,测试装置不断改变微波探头的频率及激光功率,通过选择信噪比最高的衰退曲线来最终决定测试过程中所要采用的微波频率与激光功率。在本测试过程中将探头定位在样品的台面位置进行“自动设置”,结果如图 6.3 所示。

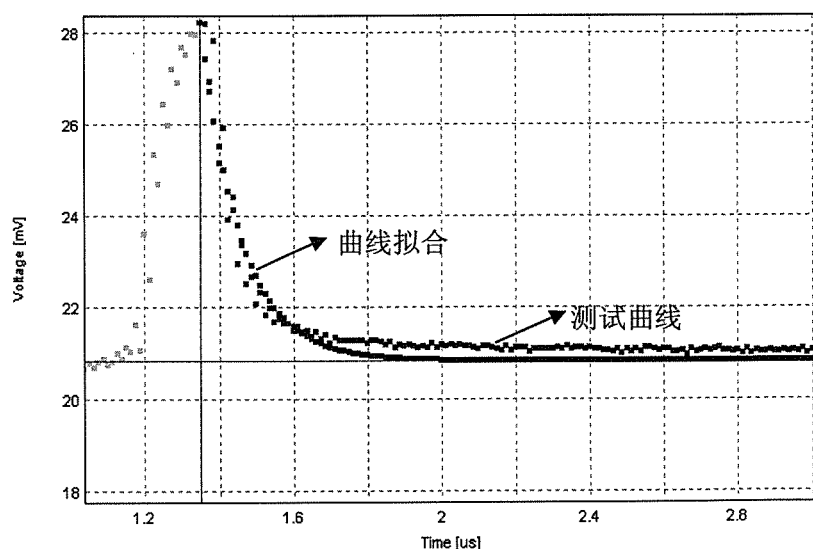


图 6.3 台面中心点自动调整后的衰退曲线及其拟合

Fig.6.3 Signal decay and its exponential fitting at the center of
the mesa structure in autosetting process

自动设置后,对样品进行面扫描,步长为 $250\mu\text{m}$,结果如图 6.4 所示。在面

扫描分布图中, 深色长寿命区域周长大约为 4mm, 与样品对照, 这个区域应该对应于器件的台面区域。中间浅色的短寿命区域为刻蚀区, 宽度约为 2mm, 刻蚀区与两个台面区之间还各有 1mm 的过渡区域。

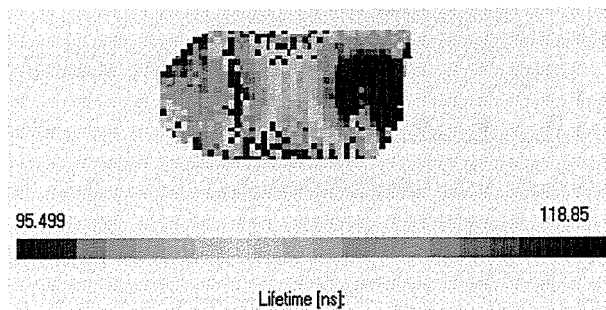


图 6.4 样品的 μ PCD 面扫描

Fig.6.4 μ PCD scanning of the sample

6.3 OCVD 测试

6.3.1 测试原理

当二极管正向偏置时, 其空间电荷区两边有正的压降和多数载流子的聚集, 并且, 多数载流子通过扩散越过空间电荷区形成少子的注入, 注入的少子边扩散边复合达到新的稳态。因为少子的复合率取决于少子的浓度, 而注入少子的浓度则又取决于二极管的正向偏压, 所以, 对于一个二极管器件来说, 其偏压最终决定了少子的复合速率。将二极管两端的偏压突然断开, 通过测试开路电压随时间的衰退可以得到少子寿命。其测试电路如图 6.5 所示。

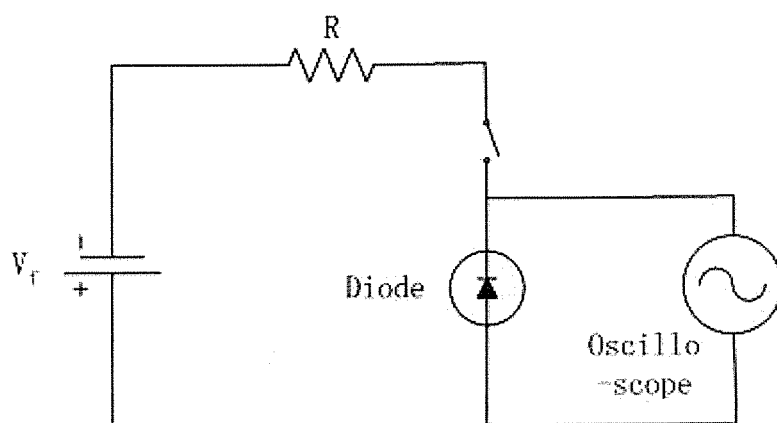


图 6.5 开路电压衰退测试示意图

Fig.6.5 Schematic diagram of OCVD measurement

J.W.Orton 等人^[8]求解了在 OCVD 测试中电压表达式,为了简化求解过程,他们提出两个假设: 1)载流子在二极管基区均匀分布; 2)器件端部的复合过程可以忽略。

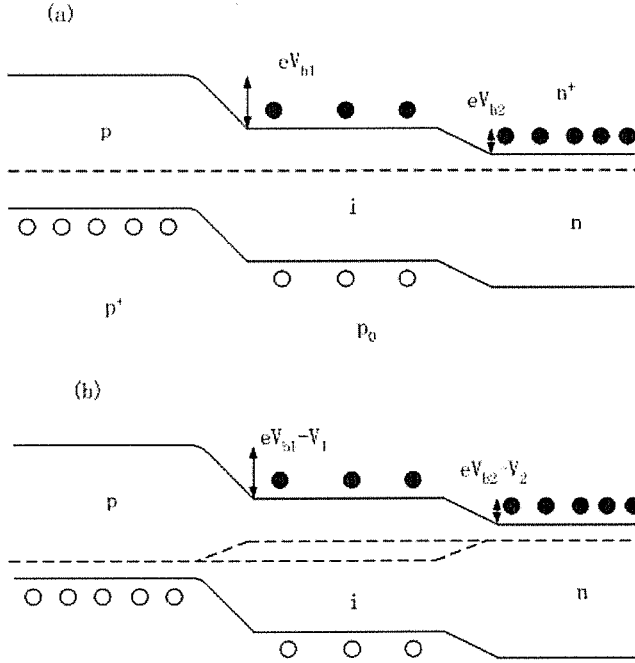


图 6.6 p-i-n 结的能带图: (a)零偏下能带图; (b)正偏下的能带图

Fig.6.6 Energy diagram of p-i-n junction: (a) zero biased, (b) forward biased

在零偏下二极管处于热平衡状态(图 6.6a), i 区的载流子浓度分别为:

$$\begin{aligned} n_0 &= n^+ \exp(-eV_{b2} / kT) \\ p_0 &= p^+ \exp(-eV_{b1} / kT) \end{aligned} \quad (6.2)$$

其中, V_{b1}, V_{b2} 分别为 p-i 与 n-i 结的内建电场电压。

当有一定的压降 V 施加在二极管两端时(图 6.6.b), i 区的载流子浓度从(n_0, p_0)变为(n, p)

$$\begin{aligned} n &= n^+ \exp\left(\frac{-e(V_{b2} - V_2)}{kT}\right) \\ p &= p^+ \exp\left(\frac{-e(V_{b1} - V_1)}{kT}\right) \end{aligned} \quad (6.3)$$

其中, $V=V_1+V_2$

从以上四个公式可以得到:

$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (6.4a)$$

其中, n_i 为本征载流子浓度, $n_i^2 = n_0 p_0$ 。

根据电中性条件:

$$n-p=(N_d-N_a)=N \quad (6.4b)$$

基区的少子(空穴)寿命可以定义为:

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p-p_0}{\tau} \quad (6.5)$$

假设 i 区 $p \gg p_0$, 上式可以写为:

$$\frac{d \ln p}{dt} = \frac{d \ln p}{dV} \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\tau} \quad (6.6)$$

求解式(6.4)可以得到:

$$\frac{d \ln p}{dV} = \frac{e}{kT} \left(1 - \frac{p}{2p+N}\right) \quad (6.7)$$

将式(6.7)代入式(6.6), 在 $p \gg N$ 时, 得到开路电压的衰退:

$$\left| \frac{dV}{dt} \right| = \frac{2kT}{e} \frac{1}{\tau_h} \quad (6.8)$$

6.3.2 OCVD 测试

对于光电二极管来说, 在开路电压衰退法测试过程中, 少子的注入除了正向偏置电注入之外, 还可以通过脉冲光注入的方式。一个光电二极管吸收入射光在其两端形成正向光生电压, 在光脉冲结束之后, 光电二极管的开路电压衰退与上述正向偏置电注入的衰退过程相同。在测试过程中采用红外脉冲光的方式注入少数载流子, 因为这样可以很好地与微波反射光电导衰退法的测试过程相耦合, 使两个测试过程的结果具有更好的可比性。其测试过程如图 6.7 所示, 在测试 μPCD 的同时, 示波器通过 pn 电极得到二极管的开路电压衰退, 这样同一个激发与衰退的物理过程被两种不同测试方法同步记录。

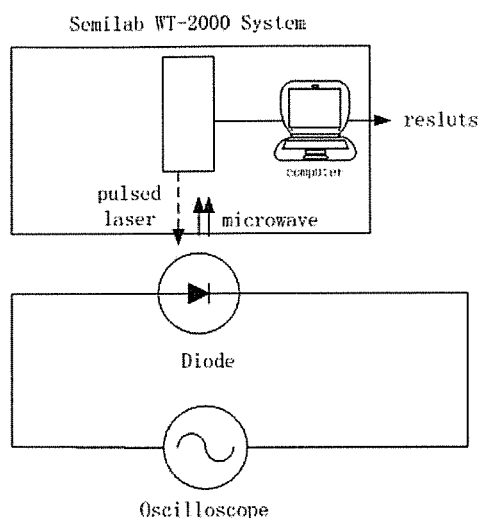


图 6.7 微波反射光电导衰退法与开路电压衰退法测试

Fig.6.7 μ PCD and OCVD measurement

沿样品右侧台面的水平中心线测试了相邻 12 个位置的开路电压衰退与微波反射光电导衰退，其中 7 个点在台面上，5 个点在刻蚀区。图 6.8 为典型的二极管开路电压衰退曲线，它分为主要的两个区域，区域 I 为激发过程，其宽度等于激发光的脉宽 200ns，区域 II 为电压衰退区域，从前面的讨论可知，当少子以指数形式复合时，二极管的开路电压线性衰退，拟合其斜率可以得到少子寿命。

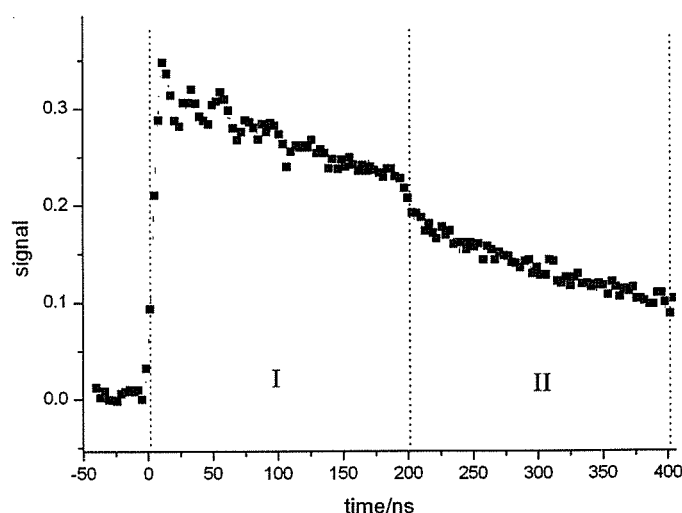


图 6.8 典型的开路电压衰退曲线

Fig.6.8 Typical decay curve of OCVD measurement

图 6.9a 为 12 个点的寿命值，图 6.9b 为 OCVD 拟合值。台面区域的 OCVD

寿命值分布在 114-120ns 之间, 平均值为 116ns, μ PCD 测试值在台面区域较为均匀, 平均值为 112ns, 图 6.9c 给出两种方法在不同点的寿命差别, 在台面区域, 对应测试点的寿命差别在 0-8ns 之间, 用式计算 OCVD 测试寿命与 μ PCD 测试寿命的相对偏差, 得到其平均值为 3.8%, 这表明两种方法得到的寿命值具有较好的一致性。

$$\Delta\tau = \left| \frac{\tau_{OCVD} - \tau_{\mu PCD}}{\tau_{\mu PCD}} \right| \quad (6.9)$$

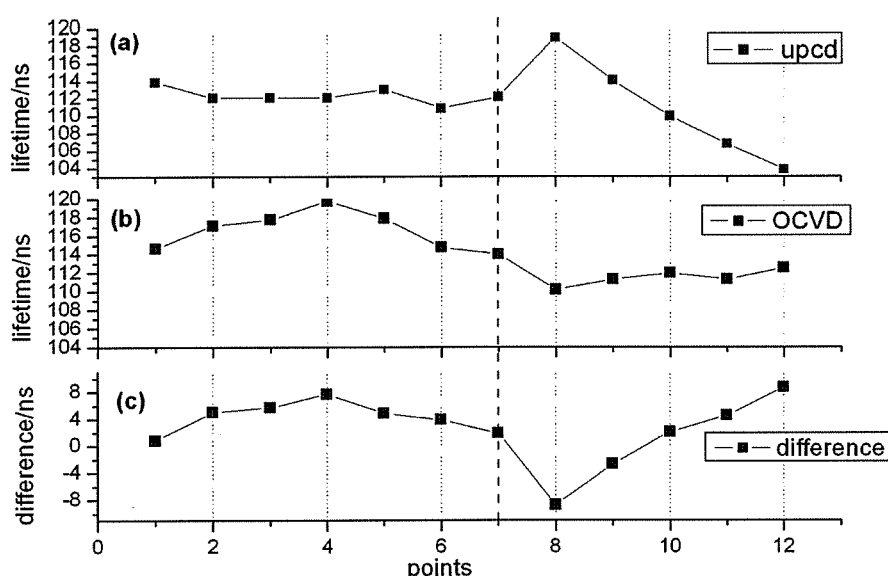


图 6.9 测试点的 μ PCD 少子寿命值 (a)、OCVD 少子寿命值 (b) 和两者之差 (c)

Fig.6.9 Minority carriers' lifetime of different spots by μ PCD measurement (a), OCVD measurement (b) and their difference (c)

1998 年 Ahrenkiel 等人^[9]用射频光电导衰退法 (RFPCD) 研究了 n-InP/n-In_{0.53}Ga_{0.47}As/n-InP 与 p-InP/p-In_{0.53}Ga_{0.47}As/p-InP 双异质结 InGaAs 材料中少子寿命随掺杂浓度的变化, 结果表明, 少子寿命有三个部分组成:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_A} \quad (6.10)$$

其中, τ_{SRH} 为 SRH 寿命, τ_R 为辐射复合寿命, τ_A 为俄歇复合寿命。在低掺杂区 ($2 \times 10^{14} - 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$), 少子复合以 SRH 为主, 在掺杂浓度为 $10^{16} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的区域,

少子以辐射复合为主，它与掺杂浓度的关系为：

$$\tau_R = \frac{1}{BN} \quad (6.11)$$

在高掺杂区，少子以俄歇复合为主，它与掺杂浓度的关系为：

$$\tau_A = \frac{1}{CN^2} \quad (6.12)$$

所以总的少子寿命：

$$\tau = [\tau_{SRH}^{-1} + BN + CN^2]^{-1} \quad (6.13)$$

下式为 Ahrenkiel 等人的经验公式：

$$\tau = [2.11 \times 10^4 + 1.43 \times 10^{-10} N + 8.1 \times 10^{-29} N^2]^{-1} \quad (6.14)$$

根据式 6.14 计算得到不同掺杂浓度下 InGaAs 材料的少子寿命分布，其中掺杂为 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的少子寿命为 136ns(图 6.10)，与 μPCD 与 OCVD 法得到的寿命值比较相近。

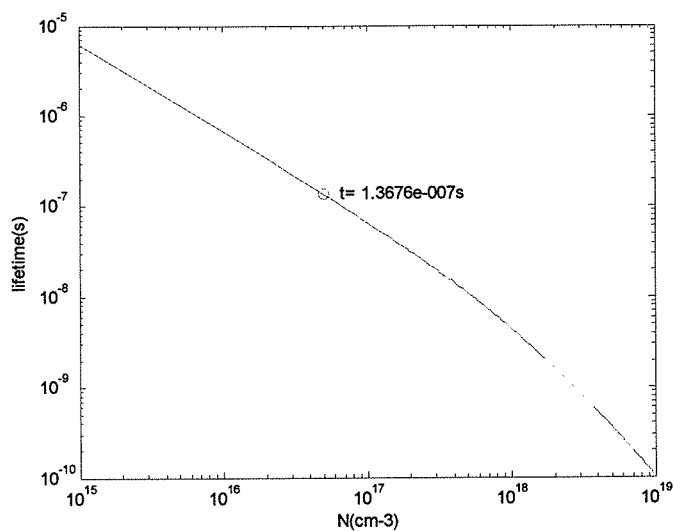


图 6.10 不同掺杂 InGaAs 材料的少子寿命

Fig.6.10 Lifetime of minority carriers in InGaAs layer with different doping concentration

6.3.3 OCVD 法的测试条件

Zemel 等人^[10]分别用开路电压衰退法和光荧光衰退法测试了 p-InP/p-n InGaAs/n-InP 双异质结材料的少子寿命,并详细讨论了少子注入水平对电压衰退过程的影响,将 pn 结电容效应考虑在内, pn 结中少子的连续性方程为:

$$\frac{dQ(t)}{dt} = I_g - \frac{Q(t)}{\tau} - C_J \frac{dV(t)}{dt} \quad (6.15)$$

其中, $Q(t)$ 为少子浓度, I_g 为光注入电流, C_J 为 pn 结势垒电容, $V(t)$ 为开路电压。 $Q(t)$ 与 $V(t)$ 的关系为:

$$Q(t) = Q_0 [\exp(qV/kT) - 1] \quad (6.16)$$

所以,

$$\left(1 + \frac{C_J}{C_d}\right) \frac{dQ(t)}{dt} = I_g - \frac{Q(t)}{\tau} \quad (6.17)$$

其中, C_d 为扩散电容

$$C_d = q/kT [Q(t) + Q_0] \quad (6.18)$$

$$V(t) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{Q(t) + Q_0}{Q_0}\right) \quad (6.19)$$

式 6.17 显示了 OCVD 的测试条件,当正向偏压足够大时, $C_d \gg C_J$, 此时 $Q(t)$ 以指数形式衰退,少子寿命为一定值,而开路电压随时间线性降低。当结正偏降到一定水平,耗尽层电容与扩散电容相当时, $V(t)$ 与时间 t 将偏离线性关系。所以 OCVD 测试必须在 $C_d \gg C_J$ 的情况下才能进行,这一点在 OCVD 测试中值得注意。在测试中的 12 个点的开路电压衰退都存在一个线性区域,也就是说,这些点的光生伏特值满足使二极管的 $C_d \gg C_J$ 。

6.4 器件的量子效率与少子寿命的关系

抽测了同一材料同一制备工艺得到的单元器件的响应率,计算得到它们的量子效率,并通过开路电压衰退法得到对应器件的少子寿命。图 6.11 是器件在 OCVD 测试中典型的衰减曲线及其拟合,将器件的少子寿命按大小排列,并将其与相应器件的量子效率作图比较,结果如图 6.12 所示。可以看到,与逐渐增大的少子寿命相比,器件的量子效率并没有相应的变化趋势,这表明在这种工艺条

件下材料的性质不是决定器件的量子效率最主要的因素, 而由器件工艺决定的器件参数, 如反射系数 R 和 $p-n$ 结耗尽层宽度 w 等可能是影响器件响应率的主要因素。可见, 对器件少子寿命表征有助于对影响器件性能的主因进行判断。

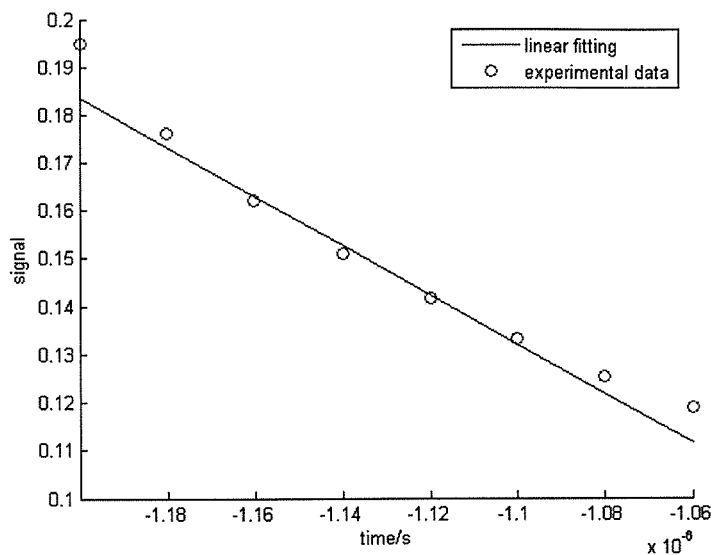


图 6.11 OCVD 测试中器件典型的衰退曲线及其拟合
Fig.6.11 Typical decay and its linear fitting of device in the OCVD measurement

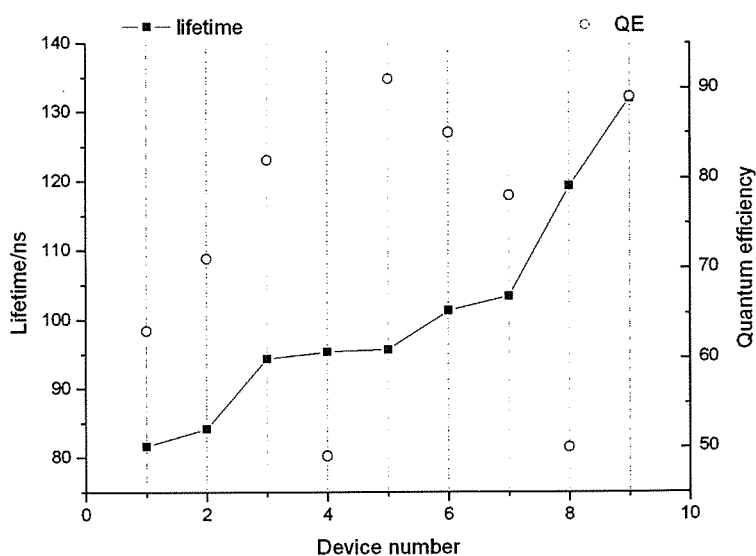


图 6.12 器件的量子效率与少子寿命
Fig.6.12 Quantum efficiency and minority carrier's lifetime of different devices

6.5 小结

制备了 InGaAs 大光敏元器件作为测试结构, 对其进行 μ PCD 与 OCVD 两种寿命测试手段的同步测试, 对比了两种方法得到的寿命值, 结果表明, 在样品的台面区域, 两者的平均值分别为 112ns 和 116ns, 而对应测试点的相对偏差平均值为 3.8%, 这说明两者具有较好的一致性。同时, 测试了同一材料同一制备工艺得到的单元器件的量子效率和 OCVD 少子寿命, 研究表明在这种工艺下的器件量子效率与少子寿命没有明显的相关性, 这说明这些器件响应率的主要决定因素可能来自工艺制备过程。

参考文献

- [1]Sze S M, Physics of Semiconductor Devices, New York: Willey, 1981.
- [2]Mahan J.E. and Barnes D.L., Depletion layer effects in the open-circuit-voltage-decay lifetime measurement, Solid-State Electron. 1981,24: 989-994
- [3]Green M.A., Minority carrier lifetimes using compensated differential open circuit voltage decay, Solid-State Electron. 1983, 26: 1117-1122
- [4]Joardar K., Dondero R.C., and Schroder D.K., A critical analysis of the small-signal-voltage-decay technique for minority carrier lifetime measurement in solar cells, Solid-State Electron.1989, 32: 479-483
- [5]Chen M C., Photoconductivity lifetime measurements on HgCdTe using a contactless microwave technique. J. Appl. Phys., 1988, 62(2): 946-947
- [6]Ichimura M, Hirano M, Tada A, et al. Characterization of Si wafers by μ -PCD with surface electric field. Mat. Sci. Eng. B, 2000, 73: 230-234.
- [7]Sontag D, Hahn G, Geiger P, et al. Two-dimensional resolution of minority carrier diffusion constants in different silicon materials. Sol. Energ. Mat. Sol. C., 2002, 72: 533-539.
- [8]Orton J.W. and Blood P. The electrical characterization of semiconductors: measurement of minority carrier properties Academic press,1990, p.173
- [9]Ahrenkiel R.K., Ellingson R.,S.Johnston et.al., Recombination lifetime of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ as a function of doping density, A.P.L. 1998,72(26):3470-3472
- [10]Zemel A. and Gallant M., Carrier lifetime in InP/InGaAs/InP by oen-circuit voltage and photoluminescence decay J.Appl.Phys. 1995,78(2):1094-1100

第七章 结论

7.1 主要结论

平面型 InGaAs 红外探测器可在室温下工作, 具有较高探测率, 适用于航天遥感领域, 本论文主要针对平面型 InGaAs 红外探测器关键工艺和技术进行了研究, 主要工作内容与结论如下:

(1) 采用 Zn 的闭管扩散方式制备了平面型 InP/InGaAs p-i-n 红外探测器, 改进了器件工艺, 结果表明, 新的工艺改善了器件的 p-n 结特性, 降低了器件的噪声电流, 提高了器件的探测率与均匀性。将这一工艺应用于八元小线列器件的制备, 通过对器件信号、噪声以及响应光谱的测试得到器件的峰值探测率, 其平均值为 $8.11 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$, 不均匀性为 4.69%。这些结果为更大规模线列器件的制备与研究提供了基础。

(2) 通过两种方法研究了器件的 p 电极接触电阻, 首先基于器件 I-V 曲线的拟合, 得到器件的串联电阻, 其次, 与器件工艺同步制备了传输线模型, 并计算了接触电极的比接触电阻, 结果表明, 两种方法得到的电阻值有很好的 consistency。从工艺上将器件的 p 电极从原先的 Au/Zn/Au 金属体系改为单层的 Au 层, 研究表明, 单层 Au 层作为 p 电极不仅使器件的电极工艺得以简化, 而且它与器件表面有更好的粘附性, 其接触电阻阻值更小, 均匀性更好。

(3) 采用扫描电势和扫描电容显微技术实现了对 p-n 结二维电学性质的表征。结果表明, 两种方法都可以直观地给出 p-n 结的结区形状, 而且表征结果具有较好的一致性, 通过理论计算可以得到 p-n 结的位置。理论上, SKPM 和 SCM 都可以得到样品中杂质的掺杂浓度, 对于 InGaAs 器件来说, 要实现其掺杂浓度的定量化仍需要进一步的实验与理论研究。

(4) 进行了平面型 256×1 InGaAs 线列器件的结构设计与工艺改进, 通过设计测试结构实现了湿法腐蚀过程中对钻蚀的观察与控制, 特别是, 通过改进器件的结构很好地抑制了器件有效光敏元的畸形, 最终实现器件有效光敏元的准确定义。通过与读出电路互连, 测试了 256×1 InGaAs 线列组件性能, 室温下组件平均峰值响应率为 1.16A/W , 不均匀性为 4.69%, 平均峰值探测率为 $5.58 \times 10^{11} \text{cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 。

(5) 制备了 InGaAs 大光敏元器件作为测试结构, 对其进行 μPCD 与 OCVD

两种寿命测试手段的同步测试,对比了两种方法得到的寿命值,结果表明,在样品的台面区域,两者的平均值分别为 112ns 和 116ns,而对应测试点的相对偏差平均值为 3.8%,这说明两者具有较好的一致性。同时,测试了同一材料同一制备工艺得到的单元器件的量子效率和 OCVD 少子寿命,研究表明在这种工艺下的器件量子效率与少子寿命没有明显的相关性,这说明这些器件响应率的主要决定因素可能来自工艺制备过程。

7.2 存在的问题

在课题的研究过程中,除了上述取得的一些成果,尚有许多问题有待解决,主要包括:

(1) 对于退火过程中 p-n 结退化的物理过程缺乏直接的试验研究,如能通过合适的表征手段对热处理后器件 pn 结电学特性作更细致地研究将对 p-n 结的退化机制有更深入理解。

(2) 扫描电势和扫描电容显微技术可以直观地得到器件的二维电学性质,对器件工艺的研究有很大的帮助,可是,仍需要更多的理论与试验工作来实现表征结果的定量化研究。

(3) 对于 InGaAs 线列器件,主要问题是器件的探测率与均匀性有待于进一步提高,这有赖于研究扩散浓度与深度对器件性能的影响以及对扩散工艺更好的控制。