

第一章 引言

1.1 红外技术的应用

红外辐射是波长介于可见光和微波之间的电磁波，波长从 $0.75\mu\text{m}$ 到 $1000\mu\text{m}$ ，覆盖光谱区之宽是可见光、X 光等其它有意义的电磁波段不能相比的，因而也就包含更多的内容，有更多的应用^[1]。

近半个世纪以来，红外物理和红外技术的发展非常迅速，已形成一支相对独立的学科，也造就了一个庞大的产业。当前红外技术已经在军事应用、科学研究、工农业生产、医疗卫生及日常生活中有着广泛的应用。在红外技术的众多应用中，军事应用显得更加突出。以红外成像、红外制导和红外预警为主的军用红外技术与军方实现被动式监测与夜视、武器瞄准、目标跟踪、精确制导等应用紧密联系，在现代和未来战争中都是很重要的战术和战略手段。因此为了获得和保持军事上的优势，世界各军事强国一直投入大量的人力物力开展相关的研究。早在第二次世界大战时期，红外技术就显示出其在军事应用上的巨大潜力，德国人不仅研制了硫化铅、硒化铅等红外光子探测器，同时还发展了多种实用红外系统。冷战时代，一些国家政府和工业界对军事技术进行巨大投资，再加上对半导体的不断深入研究，促进了红外技术以空前的速度和规模发展。多种高灵敏的碲化镉、砷化镉、碲镉汞及各种锗、硅掺杂半导体红外探测器、测辐射热计相继出现；新一代的红外光源如二氧化碳激光器、YAG 激光器及其它高亮度光源也不断被研制出来。目前各种精心设计、精心制造的红外系统在国防军事上被广泛地用于夜视、前视、摄影、通信、搜索、跟踪、制导、火控、目标侦察、防伪探测等方面，充分显示了红外技术保密性好、分辨率高、准确可靠、抗电子干扰性强等优越性。可以说以红外技术为基础的各种先进武器装备已成为提高现代化军队在各种复杂条件下的战斗力的重要保障。

红外遥感也是红外技术应用中的重要领域。它是指借助于专门的红外探测仪器，把遥远的物体所辐射或反射的红外辐射接收记录下来，再经过加工处理，变成人眼可以直接识别的图像，从而揭示出所探测物体的性质及其变化规律。由于遥感手段先进、客观、准确，监测覆盖面积大，不受地理条件限制，获取

信息迅速、丰富，可及时观察动态变化，因此红外遥感在天气预报、大气和海洋的温度分布、地球辐射的收支情况、农作物产量的高低、受灾面积和程度等方面也有着重要的作用。

红外技术除了在以上领域中有重要的应用之外，在国民经济领域的应用也愈来愈广、作用愈来愈大。在上世纪六十年代研制成功的建立在全新概念上的光学仪器——傅里叶变换红外光谱仪，是自用棱镜或光栅制造的光谱仪后一百多年来红外仪器的重大发展，使光谱测量的信噪比、分辨率大大提高，在物理、化学、生物、天文等学科研究中，在石油、化工、矿产、药物、同位素的分析测试以及司法鉴定中，都显示出它无可匹敌的优越性。所有这些都说明，红外科学和技术的发展愈来愈快，应用越来越广，至今势头不减。

1.2 红外探测器的发展

红外技术发展与应用的前提是人们能够察觉红外辐射的存在、测量它的强弱，这就需要红外探测器把红外辐射转化成某种可以测量的物理量。因此红外探测器是红外技术的核心部件，是红外装置的“心脏”。红外技术的发展总是与红外探测器的改进息息相关，每一种新型红外探测器的问世，必然导致红外科学技术的进一步发展。

19 与 20 世纪内研制成功并能生产的红外探测器主要有两类^[2]。其一是利用红外辐射对物体的热效应而制成的“热敏型红外探测器”。曾经研制成多种形式的热敏型红外探测器，但至今仍在广泛使用的只有两种：分别是利用半导体材料制作的“热敏电阻型红外探测器”和利用铁电材料制作的“热释电红外探测器”。红外辐射的各种波长对物体具有相同的热效应，因而热敏型红外探测器对各种红外波长，理论上没有选择性。这类红外探测器要等待敏感元的温度变化，因而响应时间比较长。另一类红外探测器是利用半导体的光电效应制成的光子型红外探测器。光电效应是半导体中的电子直接吸收入射光子而产生运动状态的改变，因而它的响应时间比较短。但光电效应要求入射光子的能量大于或等于使电子发生运动状态改变所必须的能量，因此光子型红外探测器都有一个截止波长。

在红外探测器的发展过程中，军事技术上的要求一直左右着这类器件的发展方向。由于在军事应用中，目标的红外辐射常常要在大气中传播相当远距离才能

到达探测系统。而大气中有些成份对某些波长的红外辐射有严重吸收,只剩下几个波段能让红外辐射通过,这些波段主要是 $1\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$, $8\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 三个大气窗口。因此寻找合适的材料,制备出能响应以上波长的红外探测器就成为首要的任务。

第一个实用的红外探测器是 1940 年前后研制成功的硫化铅(PbS)探测器,这是适用于 $1\mu\text{m}\sim 3\mu\text{m}$ 短波红外辐射的探测器。此后,为扩大波长范围,50~60 年代人们又研制出碲化铟(InSb)、锗掺汞(Ge:Hg)等多种红外探测器,其工作波段分别对应 $3\mu\text{m}\sim 5\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 等大气红外窗口。这其中 Ge:Hg 探测器的缺点比较严重,因为它非本征光导型,工作温度过低,敏感元厚度过大,使用不便,多元器件制造困难。为此需要寻找一种新材料,既能在相对容易获得的 77K 温度下有效工作,又能对 $8\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 波段有很好的探测性能。根据对探测器原理的分析可知,此种材料必须是禁带宽度约为 0.1eV 的半导体,可用它做成此波段的本征型光电探测器。

人们为此作了广泛的探索,在 1959 年英国皇家雷达研究所 W.D.Lawson 等^[3]首次报道半导体碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)后,科学家们很快就认识到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。这是因为 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 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),两者均随温度变化,所以 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 的禁带宽度 E_g 依赖于工作温度和组分 x 值。在一定温度下,禁带宽度可由 x 决定,从而通过调节 x 值可得到不同的 E_g ,即得到不同波段的探测器。通过连续改变其禁带宽度(从 0~1.6eV),可以获得几乎覆盖所有重要红外大气窗口的响应波段。此外 HgCdTe 材料还具有许多可贵的性质,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。因此 HgCdTe 晶体的出现,改变了红外探测器的发展面貌。

在 60 年代初,许多科学发达的国家先后对 HgCdTe 这一材料开展了研究^[4]。到六十年代中期,实用的 HgCdTe 红外探测器研制成功,使 $8\mu\text{m}\sim 14\mu\text{m}$ 的探测器

的工作温度提高到了液氮温度，同时将中短波的工作温度提高到了室温或近室温。在 70 年代内，对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料及器件的研究有了更飞速的进展。从熔体生长晶体技术的提高，到外延生长薄膜晶体的广泛应用，研制成对应三个大气窗口的红外探测器^[5]。与此同时，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。焦平面器件与原有器件相比具有无可比拟的优越性。首先，由于它的探测元数目大，密度高，因而使系统具有高灵敏度和高分辨率，可用它制作凝视型红外系统；其次，由于与信号处理电路直接相连，不再需要许多分离的处理电路，使系统设计时增加了灵活性。正是由于焦平面器件具有如此多的优点，各技术发达国家投入大量的人力和资金进行研究，而且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。

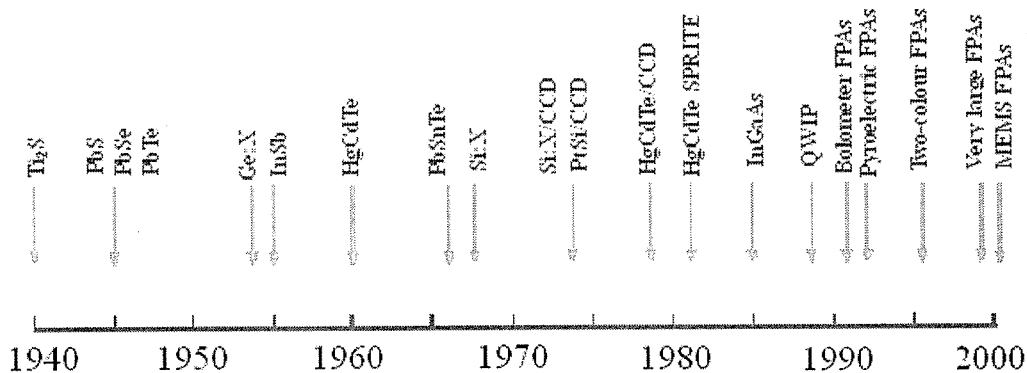


图 1.1 红外探测器的发展历程
Fig.1.1 Development of infrared detector

图 1.1 展示了红外探测器的发展历程^[8]。虽然 HgCdTe 红外探测器已经取得很大的发展，但由于 HgCdTe 晶体具有两个严重缺点：一是结构完整性差；二是合金组分不均匀，这极大的制约了器件性能的提高。为了克服这些缺点，人们又探索能替代 HgCdTe 的新材料。首先探索了三元系化合物材料，如 $\text{Hg}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ 、 $\text{Hg}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Se}$ 、 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Se}$ 等，取得了一些进展。红外探测器正向小型化、大面阵、长线列、多色性发展，现在 HgCdTe 红外焦平面已发展到了 4096×4096 元的规模， InGaAs 面阵焦平面也发展到了 1024×1280 元的规模。半导体超晶格、量

子阱(QWIP)探测器及焦平面的研究也取得了很大的进步, 512×512 和 640×480 GaAs/AlGaAs 焦平面已经诞生。由于响应率低, 响应光谱窄, 低温要求苛刻, 人们正在努力研究改进, 可望于 HgCdTe 一争高低。

1.3 短波红外及 InGaAs 焦平面研究现状

在三个红外大气窗口中, 1 μm ~3 μm 波段属于短波, 由于很多物质在该波段具有独特的光谱特性, 可为光谱分析、红外成像等提供低成本、高可靠和实用性强的成像技术支持, 所以在航空航天、医学成像、产业测温、安全防范等民用领域和精确武器制导、红外报警与识别、侦察与监视等军事领域有广泛的应用前景。制备该波段红外探测器的材料主要有 InGaAs 基 III-V 族化合物半导体和 HgCdTe 等。经过多年的发展, 目前已经研制出焦平面并投入使用。如欧洲空间局(ESA)在低轨卫星高分辨成像光谱仪中采用了 140×768 像元 HgCdTe 短波红外焦平面, 其新一代的环境卫星(ENVISAT)上采用了 1024 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面^[9]; 法国的 SPOT4 和 SPOT5 卫星上采用了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面^[10,11], 其下一代卫星上将采用 6000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面; 美国传感器无限公司研制成功了 1024×1024 和 1280×1024 InGaAs 短波凝视焦平面^[11]; 洛克韦尔国际科学中心研制成功了 HOWAII-2 型 2048×2048 像元的 HgCdTe 短波红外焦平面^[12], 最新报导的规模达到了 4096×4096 像元, 主要用于天文望远镜, 代表着国际上的最高水平。我国在空间遥感用短波红外探测器的研制方面也取得了成功。如风云一号 C 星上第六通道的 1.58 μm ~1.64 μm 短波红外探测器^[13], 用于接受海洋表面和云层顶部 1.58~1.64 μm 的反射阳光, 获得地球表面土壤、海洋温度等信息, 为气象预报和环境监测提供资料; 还有载人飞船工程上的 2.15 μm ~2.25 μm 小规模短波扫描焦平面^[14]。它们都是使用 HgCdTe 体材料制作的, 均达到了国际先进水平。

1.3.1 InGaAs 探测器的优势

由于 In_{0.53}Ga_{0.47}As 截止波长为 1.7 μm , 正好可以覆盖光纤通讯常用的波长, InGaAs 光电探测器最初是用于光纤通信领域。过去的二十多年来, 在光纤通讯需求的推动下, InGaAs 材料外延和器件技术有了很大的发展, 由单元器件发展

到线阵列^[15]。目前,正向微型化、高密度和高性能红外焦平面阵列技术发展。InGaAs 红外焦平面在有效工作波长范围 $0.5\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$, 具有高的量子效率和灵敏度, 可把 60% 的近红外辐射光子转换成光电子, 其转换效率是 GaAs 第 3 代光电阴极的 20 多倍, 其空间分辨率比增强硅 CCD 摄象机还好^[16]; R_0A 值要高出 HgCdTe 的 1~2 数量级, 信噪比可提高 3~10 倍, 在常温下也可具有很高的性能, 这一优点使得 InGaAs 可以摆脱制冷的制约, 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; 成熟的 MBE 和 MOCVD 技术也提供了可靠的批量生产的技术, 比 HgCdTe 更容易生长, 并且 III-V 族衬底具有较高质量和比较坚固的性能^[17]。因此, InGaAs 红外焦平面, 特别是非制冷焦平面技术的突破, 有非常重要的意义。

1.3.2 国外 InGaAs 探测器及焦平面研究状况

目前, 美国传感器无限公司(Sensors Unlimited)在 InGaAs 探测器的研究方面处于世界领先地位, 已研制成功 640×480 焦平面, 响应波长为 $0.9\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$, 平均探测率达 $6\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 量子效率大于 70%。该公司的 256 元^[18]、512 元、1024 元、 320×240 、 320×256 、 640×512 、 128×128 等红外焦平面近红外微型相机以进入产业化, 并研制成功了 1024×1024 和 1280×1024 InGaAs 短波凝视焦平面(如图 1.2), 光敏面积都为 $20\times 20\mu\text{m}^2$, R_0A 分别为 $1.5\times 10^7\Omega\cdot\text{cm}^2(265\text{K})$ 和 $8\times 10^6\Omega\cdot\text{cm}^2(280\text{K})$ 。另外日本的滨松、美国的 Indigo、比利时的 Xenics 等公司, 也生产 InGaAs 短波 256 \times 1、512 \times 1 系列焦平面, 响应波长在 $1\mu\text{m}\sim 1.75\mu\text{m}$ 或 $1\mu\text{m}\sim 2.55\mu\text{m}$, 光敏面呈长条形, 主要用于光谱仪。

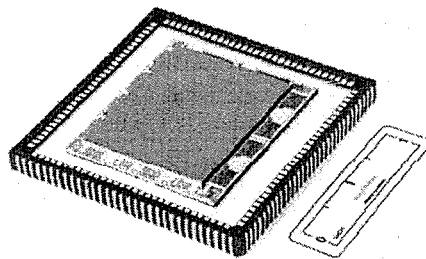


图 1.2 1280×1024 InGaAs 焦平面
Fig.1.2 1280×1024 InGaAs focal planes

InGaAs 红外焦平面在空间遥感的应用国外也起步较早^[19, 20], 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 公司, 从上个

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 和 SPOT5 卫星上(如图 1.3)。该焦平面器件工作波长为 $1.55\mu\text{m}\sim 1.70\mu\text{m}$, 室温工作,是由 10 个 300 元 InGaAs 小线列拼接而成。该探测器用 MOCVD 方法首先在 InP 衬底上生长 $1\mu\text{m}$ 的 InP 缓冲层,接着生长 $3\mu\text{m}$ 的 InGaAs,再生长 $1\mu\text{m}$ 的 InP 保护层,采用 SiO_2 作钝化层, Zn 扩散制备 p-n 结, Au-Zn 合金制作欧姆接触电极,每个像元面积为 $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$ 。该探测器的主要性能:探测率为 $6\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$,平均噪声为 0.3mV ,不均匀性优于 10%,平均量子效率为 65%,探测器动态范围超过 4000,非线性度小于 1%。延伸波长 InGaAs 焦平面器件在空间遥感领域首次应用是 2001 年欧洲空间局 (ESA) 在新一代的环境卫星 (ENVISAT) 上的有效载荷大气分布扫描成像吸收光谱仪 (SCIAMACHY)。据 Ruud W. M. Hoogeveen 介绍,其中短波红外通道 8 采用了 EPITAXX 公司研制的 $2.4\mu\text{m}$ 1024 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面,该焦平面器件在 150K 下暗电流为 $20\sim 100\text{fA}(-2\text{mV})$,优值因子 R_0A 为 $2.5\sim 12.5\times 10^6\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。EPITAXX 公司从 1989 年开始研制该种延伸波长 InGaAs 焦平面器件芯片,材料是采用氢化物气相外延制备方法在 InP 上生长 15 层 InAsP 缓冲层,相邻两层晶格失配小于 0.13%,以减小晶格失配位错。在缓冲层生长过程中进行 S 掺杂,掺杂浓度为 $1\sim 5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$,高掺杂浓度的目的是阻止位错进入 InGaAs 吸收层。InGaAs 吸收层也进行 S 掺杂,掺杂浓度为 $2\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$,目的是减小耗尽层宽度,降低产生-复合电流。保护层也进行掺杂,浓度为 $5\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$,目的是减小表面损耗宽度,降低表面漏电流。此外还对材料进行了热退火处理,进一步降低晶格失配导致的位错密度。p-n 结是采用 Zn 扩散方法形成。

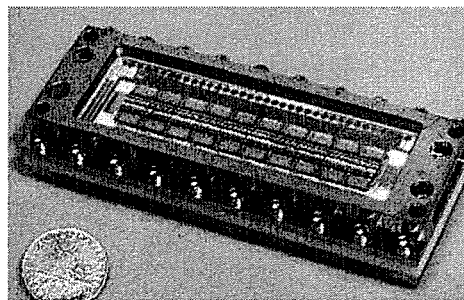


图 1.3 SPOT 卫星的 3000 元 InGaAs 线列焦平面
Fig.1.3 3000 InGaAs linear focal planes used on SPOT planets

1.3.3 国内 InGaAs 探测器及焦平面研究状况

国内 InGaAs 探测器主要研究机构有中科院上海技术物理研究所、中科院上海微系统与信息技术研究所、中科院长春光学精密机械与物理研究所、中科院半导体研究所、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 $1.0\mu\text{m} \sim 1.7\mu\text{m}$ 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，重点方向是提高器件的响应速度。

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，为 InGaAs 器件能更好的满足空间遥感领域的需求打下良好的基础。中科院上海微系统与信息技术研究所采用 GSMBE 方法研制的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ PIN 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 $2.5\mu\text{m}$ ，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 。

因为 InGaAs 探测器有效探测波段都在 HgCdTe 探测器的探测范围内，所以国内目前航天用短波红外探测器还是以 HgCdTe 为主。随着系统灵敏度的提高，对红外探测器的性能要求越来越高，国内开始注意并发展 InGaAs 红外焦平面，但目前还处于起步阶段。由于满足航天遥感用 InGaAs 探测器焦平面受到国外的封锁，着手开展长 InGaAs 短波红外焦平面的自主创新研究，对我国空间遥感技术的发展有重大意义。

1.4 InGaAs 红外焦平面类型

1.4.1 InP 衬底的 InGaAs 红外焦平面

1.4.1.1 截止波长为 $1.7\mu\text{m}$

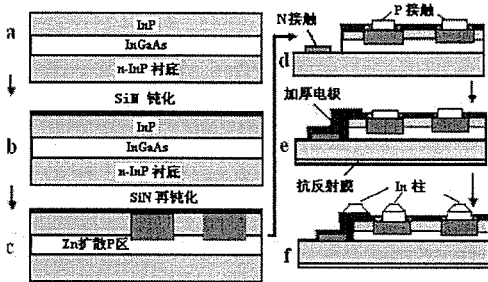


图 1.4 背照射 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器的制备
Fig.1.4 Flow chart of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ detector illuminated from back

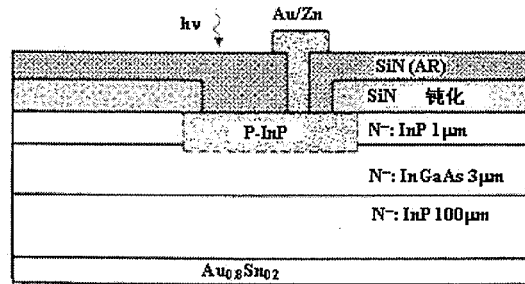


图 1.5 正照射 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器结构
Fig.1.5 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ detector structure illuminated from front

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的晶格常数与 InP 相同，因此在 InP 衬底上可生长无应变的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ，称为标准 InGaAs 。其响应波段为 $0.9\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$ ，可实现非制冷工作的高性能红外焦平面阵列。 InGaAs 阵列可采用背面照射(图 1.4)和正面照射(图 1.5)两种探测方式。图 1.4 中是美国传感器无限公司报道的 640×512 元背面照射 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 阵列探测器的制备过程^[21]，光敏面面积是 $25\times 25\mu\text{m}^2$ ，探测波段为 $0.9\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$ ，室温下 $D^* > 5\times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，盲元率小于 2%。外延结构是通过 MOCVD 或 VPE 方法生长。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，再用 Si_3N_4 盖住开孔处。p 型电极为 Au/Zn ，n 电极为 Au/Ge ，然后通过钢柱与读出电路相连。G. Olsen^[22]等人采用如图 1.5 正面照射结构，制作出 256×1 的线列焦平面探测器，探测波长 $1.0\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$ 。光敏面为边长 $30\mu\text{m}$ 的正方形，相邻元间距为 $30\mu\text{m}$ ，暗电流小于 100pA ，量子效率大于 80%。首先在 $100\mu\text{m}$ 厚的 InP 的衬底上生长 $3\mu\text{m}$ 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ，然后生长 $1\mu\text{m}$ 的 InP ，再生长一层 Si_3N_4 钝化层。在 Si_3N_4 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 ， Si_3N_4 为抗反射层。

1.4.1.2 截止波长大于 $1.7\mu\text{m}$

外延的 InGaAs 层与衬底的晶格不匹配，导致的应变会产生缺陷和位错，其作用会使暗电流增加^[23]。人们可以生长低位错密度的 InGaAs，但只有当 InGaAs 层薄于一个临界厚度时才有这种可能性，根据应变的量级，这一厚度为 100\AA 。为了制造截止波长大于 $1.7\mu\text{m}$ 的探测器，铟的克分子数要增加到 53%以上，但是这需要采取缓解或释放应变的措施。图 1.6 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。利用超晶格缓冲层技术人们在 InP 衬底上生长了铟克分子数高达 82%的 InGaAs 有效层，可制备截止波长大于 $1.7\mu\text{m}$ 的红外焦平面探测器。图 1.7 中展示了不同组分 InGaAs 量子效率，随着铟含量的增加，InGaAs 的探测波段向长波方向移动。

$\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ $a=5.5985\text{\AA}$ $\lambda=2.82\mu\text{m}$
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ $a=5.965\text{\AA}$ $\lambda=1.7\mu\text{m}$
$\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ $1\mu\text{m}/0.1(x=0.1\sim 0.5)$
InP 衬底 $a=5.869\text{\AA}$

图 1.6 InGaAs 层与 InP 衬底间的缓冲层
(每级 $\Delta a/a=0.33\%$)

Fig.1.6 Buffer layers between InGaAs and InP layers (every $\Delta a/a=0.33\%$)

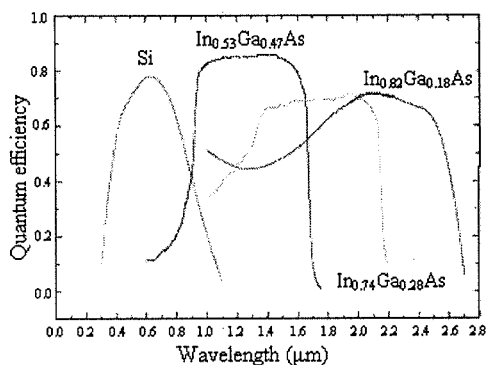


图 1.7 不同组分 InGaAs 的量子效率
Fig.1.7 Quantum efficiency of InGaAs at different composition

1.4.2 GaAs 衬底的 InGaAs 红外焦平面

因为 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 红外焦平面是一个重要的方向。为了增大 GaAs 衬底上的 InGaAs 的 In 克分子数，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。现在 Joachim John 等人^[24]已经在 GaAs 衬底上制备出 In 含量在 75%~80%之间的

InGaAs 256 元、512 元线列和 256×320 的焦平面，探测波长为 1.7 μm ~2.5 μm 。

In_{0.8}Ga_{0.2}As 是通过分子束外延技术生长在 3 英寸的 GaAs(100)衬底上，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 结构。为了更好的接触，在顶层生长一层高掺杂的 n⁺层，再生长 TiW/Au 电极，最后通过钢柱与 CMOS 读出电路相连接。在无抗反射层的情况下，In_{0.8}Ga_{0.2}As/GaAs 焦平面的 $D^* = 5 \times 10^{10} \text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。

1.4.3 单片 InGaAs 焦平面

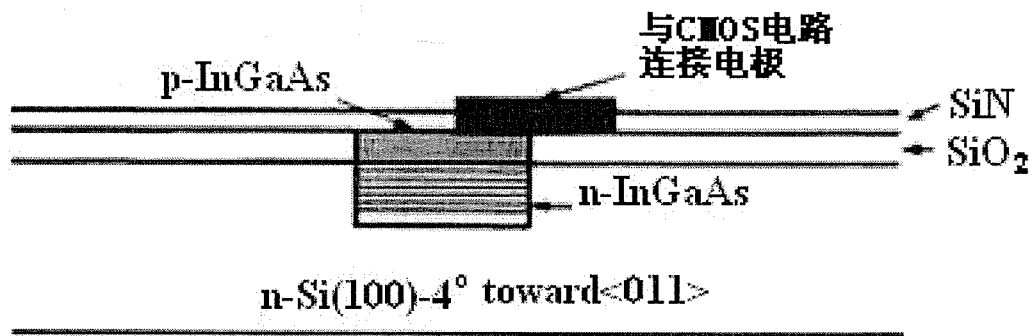


图 1.8 单片硅基 InGaAs 短波红外探测器结构
Fig.1.8 Structure of monolithic InGaAs-on-silicon short wave infrared detector

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问题，制备与硅 CCD 相似的大规模传感器是可行的。探测器列阵与读出电路连接所需过程，如钢丘焊接，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^[25]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 μm ~3 μm 。在室温下，光敏元面积为 40×40 μm^2 和 80×80 μm^2 时， R_0A 分别为 40 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 45 $\Omega\cdot\text{cm}^2$ 。为了把 InGaAs 探测器和硅技术集成在一起，他们通过在硅上限制生长面积和生长环境的“选择”外延的方法，在硅衬底上生长出高质量的 InGaAs 外延层，图 1.8 为单片硅基 InGaAs 短波红外探测器结构。为了克服 InGaAs 与 Si 的晶格失配大的困难，在两层中间先生长一层 GaAs 缓冲层。

1.4.4 InGaAs 量子阱与量子点红外焦平面

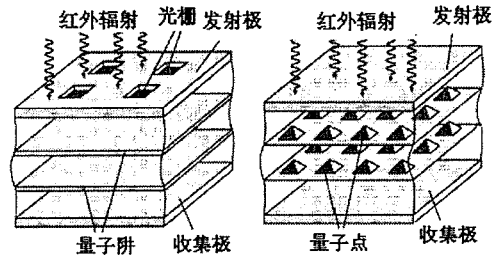


图 1.9 量子阱和量子点结构示意图

Fig.1.9 Schematic illustration of quantum wells and quantum dots

由于 InGaAs 量子阱红外探测器(QWIPs)的本征光电流反应速度快^[26]，所以它有很大的应用前景，倍受人们关注。InGaAs 量子阱焦平面可用于中长波红外成像，另外量子阱焦平面还可用于夜视等商业应用。如图 1.9 中所示，InGaAs 量子阱探测器一般采用 InGaAs 和 GaAs 的周期结构。S. Steinkogler 等人利用分子束外延的方法在[100]方向的半绝缘 GaAs 衬底上生长了这种结构。每个有效区包括 20 个周期，每个周期由 47.5nm 的非掺杂 GaAs 和 4.4nm 的掺硅的 $\text{In}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$ 量子阱组成。

据最新报导，来自美国西北大学、航空实验室和导弹防御机构的研究组制出了第一个量子点 InGaAs 焦平面^[27]，利用低压 MOCVD 制出了 256×256 元 InGaAs 量子点焦平面。以 InGaP 作为势垒层，GaAs 作为衬底，量子点是通过自组装产生，探测器和读出电路混成连接，GaAs 衬底减薄到 $30\mu\text{m}$ 。由于自组装量子点的高密度均匀性，这是小的等效噪声温差的关键。该焦平面的吸收峰位置为 $4.7\mu\text{m}$ ，截止波长为 $5.2\mu\text{m}$ 。量子点焦平面在较高温度下(120K)有望达到或超过 HgCdTe 的性能。

1.5 InGaAs 红外焦平面的应用

1.5.1 军用

红外摄像机技术的发展应归功于军事应用的牵引和推动^[28]，长期以来，以光子型红外探测器阵列为主的红外摄像机的应用，由于必须以低温制冷才可以获得高性能，所以难以实现低成本的便携式系统应用。低温制冷的先进光子焦平面阵列成本高，其系统价格高达 10 万美元以上，即使仅限于在坦克、飞机、舰船和

导弹等重要军事装备上应用，其数量也非常有限。非制冷的 InGaAs 焦平面阵列，由于可以在室温下正常工作，在军用市场有广阔的应用前景。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 1.10 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^[12]。



图 1.10 没有月亮夜晚情况下短波红外相机拍摄的图像
Fig.1.10 Image capture on a dark, moonless night using short wave infrared camera

1.5.2 民用

InGaAs 短波红外焦平面阵列现已实现商用化^[29]，由于器件和整机系统性能和可靠性大幅度提高，而且由于实现了小型便携化，且方便常温下成像，使其在商用市场具有强大的竞争能力，市场潜力很大。2~3 英寸的 InGaAs 阵列探测器已大批量投产，现已具备投产 4 英寸片子的能力。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的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。传感器无限公司的 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 制成 128×128 元的焦平面阵列响应波长

可扩展到 $2.5\mu\text{m}$ 以上, 采用 InGaAs 焦平面相机为红外辐射成像技术又提供了一种工具。

1.5.3 用于空间遥感

$1\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$ 红外探测技术在空间遥感领域有着重要的应用, 如岩石中的含水或氢氧根的矿物(主要为层状硅酸盐和粘土类)以及硫酸盐和碳酸盐矿物在该波段具有特征吸收, 另外许多高温物体(如飞机和火箭发动机喷口、导弹尾焰等)红外辐射能量也集中在该波段。所以在了解资源分布、土壤水分监测、大气成分分析、农作物估产、预警等方面有着重要的作用。在红外仪器中, 焦平面一般需要制冷以保证仪器的高性能, 尤其对于光谱仪来说, 高探测率是必不可少的。由于一台仪器的大部分质量和功率都被焦平面制冷占据, 只需普通制冷技术或者不需制冷的探测器技术可为实现微型红外仪器做出贡献, 同时也减轻了发射火箭的负载。高探测率的 $1.7\mu\text{m}$ InGaAs 焦平面可在室温下工作^[30], 而 $2.5\mu\text{m}$ 的 InGaAs 焦平面只需使用热电制冷器。InGaAs 探测器具有高探测率, 低的暗电流以及不仅响应 $1\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$ 短波红外波段, 同时也响应可见光波段的特征。“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(对地观察、国土资源调查、环境监测、军事侦察、导弹预警、海洋监测等)、近红外相机、卷云探测仪、月球和深空探测等光电遥感仪器有重要又迫切的需求。

国外从上世纪八十年代中期开始空间遥感用 InGaAs 传感器的研究, 目前已有成功应用的例子, 而且探测波段也突破了 $1.7\mu\text{m}$, 达到 $2.5\mu\text{m}$, 器件规模也从线列发展到面阵。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, 他们研制了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面, 应用在 SPOT4 和 SPOT5 卫星上, 主要应用于土壤和植被湿度的监测。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, 根据大气中各种成份的光谱吸收特征测定气体含量, 监测地球大气。美国 NASA 启动的新千年计划(NMP)地球观测 1 号卫星(EO-1)中, 用于大气水气变化校正及探测卷云的 LAC 采用 256×256 InGaAs 红外探测器焦平面组件, 工作波段

覆盖 $0.9\mu\text{m}\sim 1.6\mu\text{m}$ 波长范围。

我国在该波段的探测器的研制主要是以 HgCdTe 为主,对 InGaAs 探测器的研究主要集中于光纤通讯领域,还没有可用于空间遥感的 InGaAs 探测器。但我国对该波段的探测器的需求非常大,性能要求也越来越高。例如风云三号十通道扫描辐射计在风云一号的基础上,保留了 $1.58\mu\text{m}\sim 1.64\mu\text{m}$ 波段,又增加了 $1.325\mu\text{m}\sim 1.395\mu\text{m}$ 波段,用于卷云的探测;风云三号红外分光计短波红外 $1.19\mu\text{m}\sim 1.29\mu\text{m}$ 、 $1.58\mu\text{m}\sim 1.70\mu\text{m}$ 波段分别用于叶盖性质、气溶胶的探测和区分云和雾;此外还有风云三号中分辨率成像光谱仪的 $1.615\mu\text{m}\sim 1.665\mu\text{m}$ 波段;环境一号红外相机的 $1.55\mu\text{m}\sim 1.75\mu\text{m}$ 波段;风云四号扫描辐射计的 $1.36\mu\text{m}\sim 1.39\mu\text{m}$ 、 $1.58\mu\text{m}\sim 1.64\mu\text{m}$ 波段。

我国对航天遥感用 InGaAs 短波红外线列焦平面需求也非常迫切,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分辨率多光谱成像仪也对 $1.55\mu\text{m}\sim 1.64\mu\text{m}$ 的近室温工作的 InGaAs 线列焦平面提出需求。资源后续卫星上搭载的中高分辨率多光谱成像仪也有对 InGaAs 短波红外 ($1\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$) 线列焦平面的需求。此外扩展波长的 InGaAs 线列焦平面研究也有重要应用,如资源后续卫星近红外 $1.9\mu\text{m}\sim 2.5\mu\text{m}$ 需要高性能线列焦平面,随着延伸波长的 InGaAs 线列焦平面探测器关键技术的解决,将有希望满足这样的应用。环境卫星上的光电遥感仪器红外相机提出了 $1.55\mu\text{m}\sim 1.75\mu\text{m}$ 波段的探测需求,延伸波长 InGaAs 线列焦平面的研究也可以满足这样的应用需求。此外,太阳光谱的测量同样提出了对 $1.0\mu\text{m}\sim 2.4\mu\text{m}$ 波段探测器阵列的需求,我国下一步开展的月球和深空探测计划也对延伸波长 InGaAs 长线列器件有紧迫的需求。研究延伸波长的 InGaAs 线列焦平面的关键技术,还可用在新型空间对地观测和对外空的遥感系统。因此 InGaAs 探测器及焦平面在我国空间遥感将有非常大的应用前景。

1.6 本论文研究目的与主要内容

本论文是在“急国家之所需,急国家之所用”的前提下,为了满足国家下一代航天遥感用短波红外探测器及线列焦平面的迫切需求,对 InGaAs 探测器和线列焦平面制备的关键工艺和技术进行研究,以满足应用。由于航天遥感用 InGaAs

探测器与光纤通讯用 InGaAs 探测器有不同的要求：(1)航天遥感用 InGaAs 探测器要求较高的探测率，一般要高于 $10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，光纤通讯用 InGaAs 探测器要求高的响应速度；(2) 航天遥感用 InGaAs 探测器工作在零偏压和一般小于 1KHz 的低频区，光纤通讯用 InGaAs 探测器一般工作于 -5V 偏压和大于 1GHz 的高频区域；(3) 航天遥感用 InGaAs 探测器要求较高的可靠性，包括抗辐照、长寿命、抗冲击等；(4) 航天遥感用线列焦平面要求高的响应均匀性和低的相邻探测器的串音。所以要有针对性的优化器件结构，对 InGaAs PIN 台面探测器的关键制备工艺进行研究，包括材料均匀性表征、台面制作、欧姆接触、钝化等，以提高器件探测率。并对探测器的低频噪声、抗辐照能力、探测器实际光敏感区、探测器间的串音、探测器不均匀性和焦平面不均匀性进行研究。

目前，InGaAs 线列和面阵焦平面多采用 Zn 扩散平面结探测器^[31-40]，但是存在扩散工艺复杂和光敏面扩大等问题，结合我室的研究任务和现实情况，我们采用平面工艺和台面工艺两条路走的办法，我主要负责台面工艺的研究。本文重点研究了 InGaAs 台面探测器和焦平面的关键技术和工艺，以期能为 InGaAs 线列焦平面航天应用提供有益的参考。在文章的第一章中，我们回顾了红外技术和探测器的发展，概述了短波红外及 InGaAs 焦平面的发展现状，介绍了 InGaAs 焦平面的类型和应用；第二章讨论了 InGaAs 外延材料性能表征及均匀性，用 XRD、透射谱和电化学 C-V 测试外延材料性能，用微波反射光电导衰减法测量 InGaAs 吸收层的均匀性；第三章设计了新的台面制作方法，研究了 Ar^+ 离子刻蚀对 InGaAs、n-InP 和 p-InP 表面损伤及消除方法；第四章对 InGaAs 台面探测器钝化膜和钝化效果进行了研究；第五章研究了 p-InP 与 Ti/Pt/Au 接触性能，设计了新的接触结构；第六章对航天遥感用 InGaAs 探测器几点问题进行了研究，包括探测器光敏感区扩大和探测器间串音、低频噪声、抗电子辐照；第七章介绍了 InGaAs 线列焦平面的制备工艺和测试结果，研究了影响不均匀性的因素，如积分时间、温度等；最后一章是结论与展望，总结了前面章节所得到的主要结论，对下一步工作进行展望。

参考文献

- [1] 黄杨程，短波红外探测器低频噪声及抗辐照性能，中科院上海技术物理研究所博士学位论文，2005.

- [2] 汤定元, 糜正瑜, 等, 光电器件概论, 第一版, 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989, 298-391.
- [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] A. Rogalski, Infrared detector at the beginning of the next millennium, Sensors and materials, 2000, 12: 233-288.
- [9] R. W. M. Hoogeveen, R. J. van der A, A. P. H. Goede, Extended wavelength InGaAs infrared (1.0-2.4 μm) detector arrays on SCIAMACHY for space-based spectrometry of the Earth atmosphere, Infrared Physics & Technology, 2001, 42: 1-16.
- [10] J. P. Moy, J. J. Chabbal, S. Chaussat, et al, Buttable arrays of 300 multiplexed InGaAs photodiodes for SWIR imaging, SPIE, 1986, 686: 93-95.
- [11] J. P. Moy, X.Hugon, J. Chabbal, et al, 3000 InGaAs photodiode multiplexed linear array for SPOT4 SWIR channel, SPIE, 1989, 1107: 137-151.
- [12] Alan Hoffman, Todd Sessler, Joseph Roseph Rosbeck, et al, Megapixel InGaAs arrays for low background applications, SPIE, 5783: 32-38.
- [13] 王勤, 刘激鸣, 方家熊, 空间用 1.6 μm Hg_{1-x}Cd_xTe 室温光伏探测器, 红外与毫米波学报, 1998, 17(2): 81-85.
- [14] 方家熊, 航天用红外探测器现状和发展, 上海技术物理研究所文集, 1998-1999, 13-20.
- [15] 黄杨程, 空间遥感用 InGaAs 短波红外探测器, 红外, 2004(3): 10-18.
- [16] T. N. Krabach, C. Staller, et al, InGaAs detectors for miniature infrared instruments, SPIE, 1993, 1874: 214-223.
- [17] 孙志君, 红外焦平面阵列技术的发展现状, 半导体光电, 2000, 21(3): 29-32.
- [18] G. H. Olsen, A.M. Joshi, V. S. Bon, et al, Multiplexed 256 element InGaAs detectors for 0.8~1.7 μm room-temperature operation, SPIE, 1988, 972: 279-285.
- [19] Linga K P, Joshi A M, Ban V S, et al, 1024 element linera In_xGa_{1-x}As/InAs_yP_{1-y} detector arrays for environmental sensing from 1 μm to 2.6 μm , SPIE, 1993, 2021: 90-97.
- [20] Jean-Louis Teszner, Second-generation IR arrays begin quantity production, Laser Focus World, 1994(1): 117-119.
- [21] Martin H. Ettenberg, Michael J. Lange, et al, A room temperature 640 \times 512 pixel near-infrared InGaAs focal plane array, SPIE, 2000, 4028: 201-207.
- [22] G. Olsen, A. Joshi, M. lange, et al, A 128 \times 128 InGaAs detector array for 1.0~1.7 microns, SPIE, 1990, 1341: 432-437.

- [23] G. H. Olsen, A. M. Joshi, S. M. Mason, et al, Room-temperature InGaAs detector arrays for 2.5 μm , SPIE, 1989, 1157: 276-282.
- [24] Joachim John, Lars Zimmermann, et al, Extended backside-illuminated InGaAs on GaAs IR detector, SPIE, 2003, 4820: 453-459.
- [25] Abhay M. Joshi, Rene Brown, Eugene A. Fitzgerald, et al, Monolithic InGaAs-on-silicon short wave infrared detector arrays, SPIE, 1997, 2999: 211-224.
- [26] S. Steinkogler, H. Schneider, R. Rehm, Time-resolved electron transport studies on InGaAs/GaAs-QWIPs, Infrared Physics & Technology, 2003, 44: 355-361.
- [27] John Wallace, Quantum dots allow normal-incidence imaging, Laser Focus World, 2004(6): 28.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Marshall J. Cohen, Gregory H. Olsen, Near-IR imaging cameras operate at room temperature, Laser Focus Word, 1993(6): 109-113.
- [31] C. B. Wheeler, R. J. Roedel, R. W. Nelson, et al, Reproducible leaky tube diffusion of Cd in InP at 500°C, J. Appl. Phys., 1990, 68: 969-974.
- [32] Yuan Ruixia, Yan Chunhui, Guo Hongxi, et al, InP and InAs based III-V compound materials grown by gas-source molecular beam epitaxy, Chinese Journal of Semiconductors, 1996, 17 (1): 6-11.
- [33] B. Tuck, A. Hooper, Diffusion profiles of zinc in indium phosphide, J. Phys. D: Appl. Phys., 1975, 8: 1806-1821.
- [34] C. Bocchi, P. Franzosi, C. Pelosi, et al, Structural Properties of Zn-diffused InP layers, J. Appl. Phys., 1997, 82 (11): 5416-5421.
- [35] L. Y. Chan, Kin Man Yu, M. Ben-Tzur, et al, Lattice location of diffused Zn atoms in GaAs and InP single crystals, J. Appl. Phys., 1991, 69(5): 2998-3006.
- [36] A. van Geelen, T. M. F. de Smet, et al, Zinc doping of InP by metal organic vapor phase (MOVPE), Journal of Crystal Growth, 1998, 195: 79-84.
- [37] B. Tuck, Atomic, Diffusion in Semiconductors, Adam Hilger and Bristol, 1988
- [38] K. Kazmierski, A. M. Huber, et al, The temperature-dependent diffusion mechanism of Zn in InP Using the semiclosed diffusion method, Japanese Journal of Applied Physics, 1984, 23 (5): 628-633.
- [39] Norio Wada, Katsutoshi Sakakibara, Photoluminescence and photoemission studies of defects in InP induced by Zn diffusion, Japanese Journal of Applied Physics, 1993, 32: L469-472.
- [40] Ambree P., Hangleiter A, Pilkuhn M. H., et al, Acceptor diffusion across InGaAs/InP heterointerfaces, Appl. Phys. Lett., 1990, 56 (10): 931-93.

第二章 InGaAs 外延材料性能表征及均匀性的研究

2.1 引言

InGaAs 材料可以利用多种先进的材料制备技术如气相外延(VPE)、液相外延(LPE)、金属有机化合物化学气相淀积(MOCVD)、分子束外延(MBE)制备,各种方法均能生长出高质量的材料。InGaAs 由于具有材料生长技术成熟,器件性能优良,可在室温工作等优点,得到了越来越多的重视,是目前在短波红外区域应用最广泛的探测器。外延一般采用 InP/InGaAs/InP 三层结构,作为吸收层 InGaAs 层的质量对探测器的性能起着主要的作用, InGaAs 层组分将直接影响探测器的截止波长和探测率,组分、晶格完整性、掺杂均匀性则是影响探测器响应均匀性的关键因素;三层外延层的厚度均匀性对探测器阵列的性能均匀性同样有重要的影响;另外 InP 层的掺杂浓度和均匀性,对 p 型和 n 型欧姆接触的形成非常重要。这些都是制备短波红外焦平面器件的材料前提。本章首先使用高分辨 X 射线衍射技术、红外透射谱和电化学 C-V 对外延层结晶质量、组分、载流子进行了评价;然后用微波反射光电导衰减法(μ -PCD)法通过测量 InGaAs 层的少子寿命,来评价 InGaAs 吸收层的均匀性,并对测试原理和结果进行分析。

2.2 InP/InGaAs/InP 外延结构

三元化合物 InGaAs 是 III-V 族的Ⅱ-Ⅴ系半导体材料。从图 2.1 可以看出,其禁带宽度可在 InAs 的 0.35eV 与 GaAs 的 1.43eV 之间变化^[1],对应的截止波长分别为 3.5 μ m 与 0.87 μ m。图 2.2 中是两种常用的 InGaAs 外延结构,前者为原位掺杂 p-i-n 结构,用于制备台面结构探测器,后者为 n-i-n 结构,用于扩散制备平面结构探测器。目前,我们主要采用前一种结构,截止波长为 1.7 μ m 的标准 InGaAs 外延,生长方法有 MBE 和 MOCVD 两种,在 InP 半绝缘衬底上依次生长厚度为 1 μ m 的 n-InP 缓冲层, $n \approx 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$; 厚度为 2.5 μ m 并且与 InP 晶格匹配的 n-In_{0.53}Ga_{0.47}As 吸收层, $n \approx 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$; 厚度为 0.5 μ m 的 p-InP 窗口层, $p \approx 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。n 型掺杂为 Si, p 型掺杂为 Be(MBE)或 Zn(MOCVD),为了提高探测器的探测率和减小吸收层厚度,根据已报道的优化结构设计,我们对 InGaAs 吸收层适当进行掺杂,掺杂浓度为 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 。

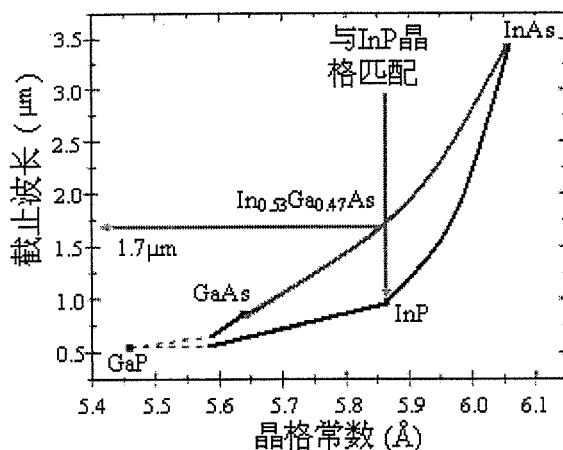


图 2.1 晶格常数与截止波长的关系

Fig.2.1 Relationship of the lattice constant and the wavelength cutoff

p+- InP 0.5μm	n- - InP 1 μm
n- - In _{0.53} Ga _{0.47} As 2.5μm	n- - In _{0.53} Ga _{0.47} As 2.5μm
n+-InP 1μm	n+-InP 0.5μm
SI-InP substrate	n+-InP substrate

图 2.2 p-i-n 和 n-i-n 外延结构

Fig.2.2 Epitaxial structure of p-i-n and n-i-n

2.3 InGaAs 外延材料基本性质测试

2.3.1 XRD 测试

高分辨X射线衍射被认为是表征晶体质量的最有效的方法，它具有快速准确和非破坏性的无以比拟的优点。X射线摇摆曲线是化合物半导体中用得最多的结构特性表征方法。它可获得外延层组份、晶格常数、失配度、全衍射峰全高半宽、应变、弛豫以及厚度精确测量等信息。在X射线双晶衍射中必须通过外延层与衬底衍射峰位置之间的差异来确定外延层晶格对衬底的失配度从而确定外延层的晶格常数^[2]。为此，必须同时记录下外延层和衬底两个衍射峰，才能反映外延层的质量。在高分辨X射线衍射中，外延层的Bragg 峰的全高半宽(FWHM) 通常被作为外延层晶格完整性的一个定性表征。我们对MBE生长的(001)InP衬底的p-i-n外延材料进行(004)晶向衍射，得到的摇摆曲线如图2.3。图中存在两个主峰，其中S

峰是衬底InP引起的, $\omega=31.64^\circ$; 另一个L峰是InGaAs引起的, $\omega=31.68^\circ$ 。计算出的成分含量为 $\text{In}_{0.522}\text{Ga}_{0.478}\text{As}$, 晶格失配为-575ppm。从图中的两个的全高半宽和计算出的成分含量, 可以看出, 外延材料结晶度高, 成分偏差较小。

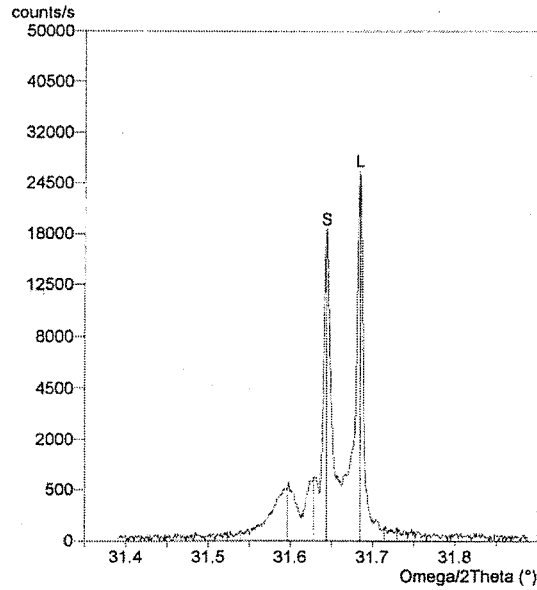


图 2.3 p-i-n InGaAs 外延材料的 X 射线衍射峰
Fig.2.3 X-ray diffraction peak of p-i-n InGaAs epitaxial material

2.3.2 透射谱测试

面积为 $10 \times 10 \text{mm}^2$ 的 MOCVD 和 MBE 两种方法生长的 p-i-n 结构材料各一片, 材料结构前面已经讲过, 不同的是, MOCVD 生长的材料衬底为 $500 \mu\text{m}$, MBE 生长的材料衬底为 $250 \mu\text{m}$ 。由于材料背面为粗糙面, 为了更好的透光, 首先对材料背面进行粗抛光和精抛光, 然后用 NICOLET 近红外光谱仪测试两个样品的透射率, 测试结果如图 2.4。截止波长 λ_c (在长波一端单色响应率下降为峰值一半时的波长) 和 InGaAs 能带宽度 E_g 关系为:

$$\lambda_c = \frac{h_c}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (\text{eV})} (\mu\text{m}) \quad (2.1)$$

在室温下 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 固溶体的禁带宽度与组分 x 的关系为^[3]:

$$E_g(x) = 1.425 - 1.501x + 0.475x^2 (\text{eV}) \quad (2.2)$$

图中可以看出, MBE 和 MOCVD 两种方法生长的材料的截止波长分别为 $1.695 \mu\text{m}$ 和 $1.666 \mu\text{m}$, 根据以上两个公式可以计算出成分分别为 $\text{In}_{0.562}\text{Ga}_{0.438}\text{As}$ 和 $\text{In}_{0.549}\text{Ga}_{0.451}\text{As}$ 。所以红外透射谱是一种方便快捷的测试吸收层组分的有效方法。

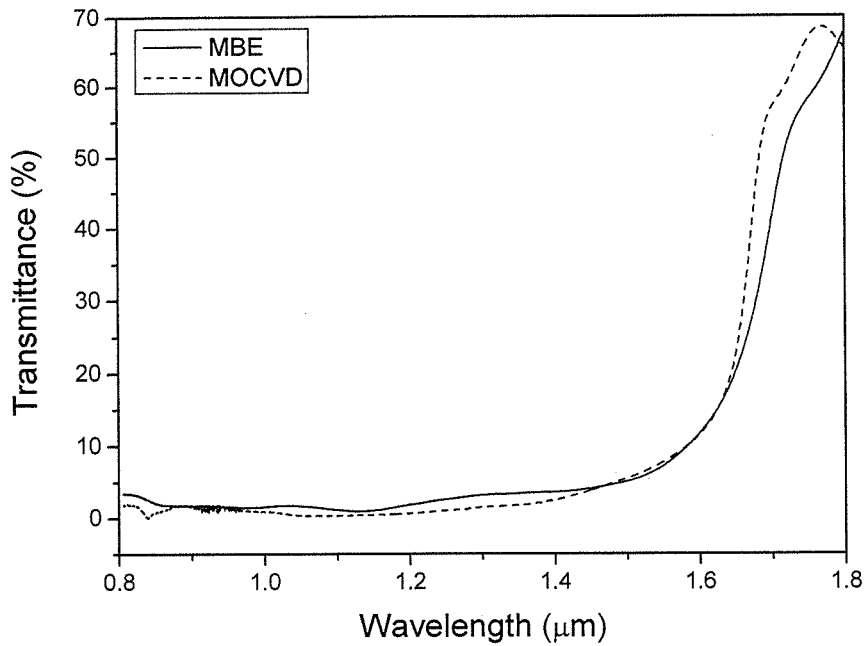


图 2.4 MOCVD 和 MBE 两种方式生长 p-i-n InGaAs 外延材料透射谱
Fig.2.4 Transmittance spectra of p-i-n InGaAs epitaxial materials grown by MOCVD and MBE

2.3.3 电化学 C-V 测试

测试 InP 和 InGaAs 层载流子浓度对外延材料生长时的掺杂工艺和器件的欧姆接触有重要的意义。电化学 C-V 法(ECV)可以通过腐蚀液腐蚀材料对载流子浓度进行深度分析，缺点是这种测试方法是对材料的破坏性测试。我们以稀 HCl 为腐蚀液，采用电化学 C-V 法对 p-i-n 样品进行载流子浓度分布测试，测试结果如图 2.5，从图中可以看出，p-InP 空穴浓度为 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ，InGaAs 层电子浓度为 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，与我们设计的材料生长参数基本吻合。由于测试的原因，在双异质结两个交界面的附近测试有些偏差，如图中在深度为 $0.5 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ 处测试误差较大。由于该测试方法在测量小于 $1 \mu\text{m}$ 深度时测试较准确，所以为了提高测试准确性，可以对三层逐层剥离测试，即对 p-InP，InGaAs 和 n-InP 三层分别测试。

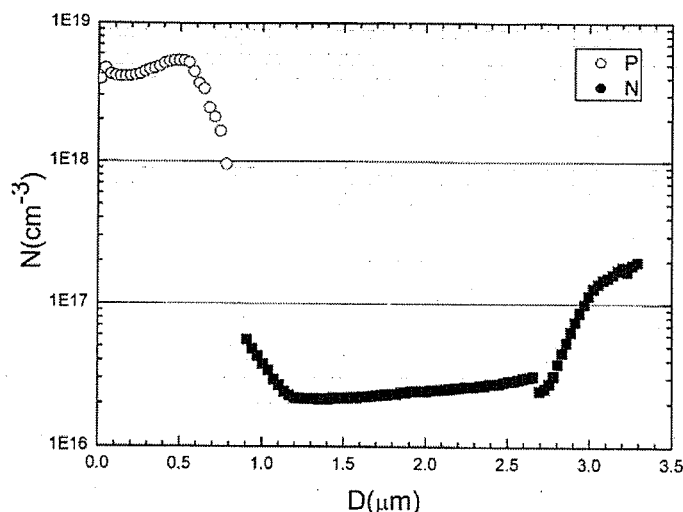


图 2.5 电化学 C-V 法测量 p-i-n InGaAs 外延材料的载流子浓度
Fig.2.5 The concentration of carriers of p-i-n InGaAs epitaxial materials measured by ECV

2.4 μ -PCD 法测 InGaAs 外延材料均匀性

用于评价 InGaAs 外延层质量的测试技术除了前边讲的三种，还有 EPD、X-ray 形貌术、光学显微镜、扫描电镜 (SEM)、光致发光 (PL)、喇曼光谱 (Raman Scattering)、透射电镜 (TEM)、红外反射谱等。但由于样品制备(背面抛光等)、对样品的破坏性或者仪器自身原因，不能对 2 英寸或 3 英寸外延片进行大面积非破坏性测试，用于检测外延层的均匀性。少子寿命是一项器件设计和器件性能表征的重要参数^[4]，寿命测量也常常作为评定材料质量的方法。因此外延层的均匀性可以通过扫描少子寿命分布图来进行表征。微波反射光电导衰减法技术在测试 HgCdTe、Ge/GaAs、掺杂 Si 和离子注入 Si 材料的均匀性得到广泛的应用^[5-7]。然而，就我们所知文献中还没报道用这种方法作为评定 InP/InGaAs/InP 外延片中 InGaAs 吸收层均匀性的方法。有人用光电导衰减法(PCD)、光致发光衰减法(PLD)、光束诱导电流法(OBIC)、微发光表面扫描技术(MSST)、开路电压衰减(OCVD)、超高频光电导衰减法(UHFPCD)等方法测试 InGaAs 层少子寿命和研究复合机理^[8,9]。 μ -PCD 非接触测量方法可以快速的扫描得到直径小于 3 英寸样品的寿命分布图，可以成功测量寿命大于 10ns 的样品。整个仪器由光激发系统和微波测试系统组成，首先用脉冲红外激光来激发样品中的少数载流子，当光激发快速停止时，电导率就会衰减，然后通过微波在样品表面的反射率来测量，因为反射微波能量与样品的电导率成正比。

2.4.1 理论基础

红外光电传感器是基于少数载流子的器件，因此复合或少子寿命是非常重要的参数。器件峰值探测率与量子效率(η)关系可以表示为^[10]：

$$D_{\lambda}^* = \frac{\eta \lambda q}{hc} \left(\frac{4kT}{R_0 A} + 2\eta q^2 \phi_B \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

式中 q 为电子电量； k 为Boltzmann常数； c 为光速； h 为Planck常数； T 为结的温度； A 为光敏面面积； R_0 为动态电阻； ϕ_B 为单位面积光通量。在空穴为少数载流子的器件中，少子寿命 (τ_p) 是决定量子效率的重要参数之一，寿命越高量子效率也越高：

$$\eta = (1 - R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha W}}{1 + \alpha \sqrt{D_p \tau_p}} \right) \quad (2.4)$$

式中 α 为光吸收常数， D_p 为空穴扩散系数， W 为耗尽层宽度， R 为反射常数。

在激光激发和停止激发后，载流子都会发生重新分配。测量得到的复合寿命的特点可以用以下几个公式来表示^[11]：

$$\frac{1}{\tau_{meas}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{1}{\tau_{diff} + \tau_{surf}} \quad (2.5)$$

$$\tau_{diff} = \frac{d^2}{\pi^2 D_p} \quad (2.6)$$

$$\tau_{surf} = \frac{d}{2S} \quad (2.7)$$

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

微波反射衰减测量值与指数曲线拟合，衰减到最初值的 $1/e$ 所经历的时间为测量的寿命值。由于体寿命表征的是材料内部的性质，所以我们测试的目的是获得体寿命。正如上面公式所描述的，样品表面由于存在表面复合，对寿命有很大的影响。表面复合由两个过程组成：自由载流子扩散到表面和自由载流子在表面复合。假如表面没有钝化层，表面复合速度就很快，也就是说 τ_{surf} 很小，这时载流子扩散为主， τ_{diff} 占据了表面复合的整个过程，体寿命越长扩散寿命对测试

结果影响越大。如果表面复合速度过高(如无钝化层时), 并且体寿命比扩散寿命大的多(如低掺杂) 时, 测试结果就是扩散寿命。因此要想测到不受表面污染等因素影响的体寿命, 表面复合需要通过表面钝化来消除。一般来说, 有两种表面钝化方法: 热氧化和化学钝化。有效的表面钝化, 才能成功准确地测出体寿命。

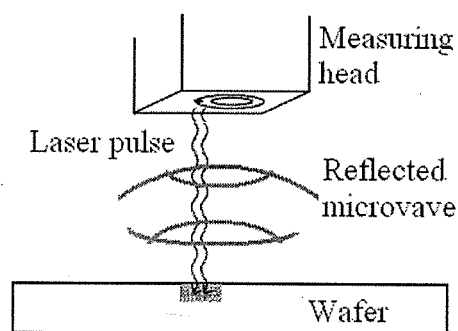


图 2.6 μ -PCD 测试示意图

Fig.2.6 Schematic illustration of the μ -PCD measurement

2.4.2 实验

测量仪器为 SEMILAB 公司生产型号为 WT-2000 的 μ -PCD 寿命扫描仪, 图 2.6 为 μ -PCD 测量方法示意图。把样品放到样品台上, 样品台在一个封闭的腔体中, 抽真空后, 用液氮降低样品的温度, 并且用电脑自动控制扫描面积, 探头上红外半导体激光器产生的红外光可以透过腔体上边的透明玻璃对样品扫描。我们对 MBE 和 MOCVD 两种方法生长 p-InP/InGaAs/n-InP 结构外延片, 分别为 2 英寸和 3 英寸。并对 ZnS/InGaAs/n-InP 外延结构进行测试, 该结构只有 2000Å 厚的 ZnS 窗口层不同外, 其它结构和成分都和 p-InP/InGaAs/n-InP 结构一样, 生长完 n-InGaAs 层后, 用浓度为 20% 氢氟酸溶液去掉表面氧化层, 再放入 60°C 水浴加热的 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液中硫化 30 分钟, 然后用热蒸发法生长厚度为 2000Å 的 ZnS 钝化层。激发光源为激光二极管产生的 904nm 的脉冲红外激光, 脉冲宽度为 200ns, 每个脉冲 1.2×10^{13} 个光子, 这种红外光可以透过 InP 或 ZnS 窗口层激发 InGaAs 中的少数载流子。微波探测器的频率为 10.2 GHz。测量载流子寿命时, 激光束在样品表面的直径为 1mm, 因此横向载流子扩散(约 0.1mm) 对测量结果影响很小。

2.4.3 结果和讨论

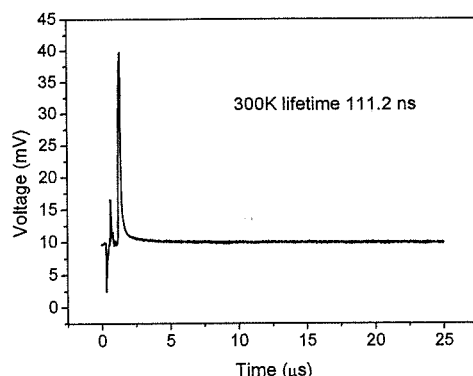


图 2.7 300 K 时 p-InP/InGaAs/n-InP 双异质结电压衰减图
Fig.2.7 Decay of voltage p-InP/InGaAs/n-InP double-heterostructure at 300K

图 2.7 为 p-InP/InGaAs/n-InP 双异质结外延片上一个点在 300 K 时典型电压信号衰减图，电脑通过控制衰减曲线的峰值为衰减起点，与指数曲线拟合，衰减到峰值的 $1/e$ 所经历的时间定义为测量的寿命值。我们用微波反射光电导衰减法分别在 300K 和 85K 测试了 2 英寸 p-InP/InGaAs/n-InP 异质结外延片上面积为 $22 \times 35 \text{mm}^2$ 的寿命分布图。图 2.8 为 300K 时寿命分布图及各段寿命的百分比，平均寿命为 168.2 ns。我们的测试是建立在以下的理论假设之上：波长为 904 nm 的红外激光在 p-InP 窗口层完全透过，在 InGaAs 吸收层完全吸收，并且吸收层厚度小于少子扩散长度。也就是说 0.5 μm 厚的晶格匹配的 p-InP 窗口层起到了很好的钝化作用，使层间的复合变得可以忽略不计。在这种情况下，测试结果为 InGaAs 吸收层的体寿命，寿命分布图可以表征 InGaAs 层材料的均匀性。R. K. Ahrenkiel 等人分析了不同掺杂浓度时 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层复合寿命的机理，他们认为在低掺杂(小于 10^{16}cm^{-3})时，复合主要是 Shockley-Read-Hall 效应为主；中等掺杂($10^{16} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$)时，以辐射复合为主；高掺杂(大于 10^{18}cm^{-3})时，复合方式以俄歇复合为主^[12]。中等掺杂时，寿命随 $1/N$ 而变化， N 为掺杂浓度，寿命可以表示成：

$$\tau_p = \frac{1}{BN} \quad (2.8)$$

对于 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ，辐射复合系数 B 为 $1.43 \times 10^{-10} \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ 。由于 InGaAs 层掺杂浓度为 $4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，根据以上方程，经过计算的寿命值为 174.8ns，基本与我们的测试结果相吻合，证明我们理论假设的合理性。图 2.8 清晰的表明寿命分布基本

均匀, 寿命大部分在 118.9 到 119.1ns 之间, 也有少部分寿命大于 250ns, 表明 MBE 生长的 p-InP/InGaAs/n-InP 外延结构吸收层小面积(1cm² 内) 均匀性良好, 生长整个 2 英寸均匀性良好的外延片还有一定的挑战性。从寿命分布图中, 我们可以容易的通过颜色的均匀性来判断材料的均匀性, 因为它们代表了不同的寿命值。InGaAs 层寿命的大小主要取决于掺杂浓度和内部的位错等缺陷, 随着掺杂浓度的增加, 寿命逐渐减小。InGaAs 吸收层的均匀性取决于掺杂和缺陷的均匀性, 当然也存在其它一些因素影响测试均匀性, 例如污染的分佈、钝化的不均匀性、或者由于吸收和反射的不均匀性引起的结的变化。

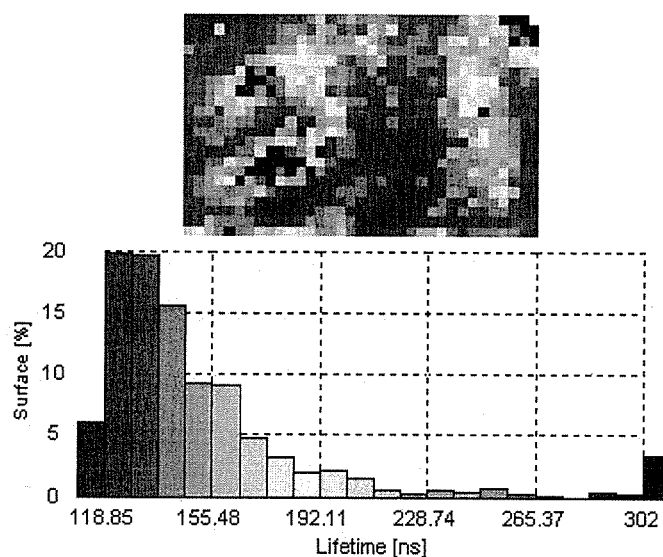


图 2.8 300 K 时 p-InP/InGaAs/n-InP 双异质结中寿命分布图
Fig.2.8 The lifetime map and distribution in p-InP/InGaAs/n-InP DH at 300 K

一般来说, 少数载流子寿命取决于半导体的中性区域, 这样由于 InP/InGaAs/InP p-n 结内电场的存在, 就不方便用传统的方法分析少子寿命。特别是 p-InP 和 n-InGaAs 层间复合速度由于电场的存在影响较大。而且 0.5 μ m 厚的掺杂 p-InP 窗口层也会吸收红外光和降低微波的反射, 但是这种影响可以对寿命衰减曲线的指数拟合可以消除。不管怎么说, 即使测量的绝对值没有真正的意义, 也可以用这种测试方法来检验材料的均匀性, 寿命的均匀性间接的反映了材料的均匀性。

μ -PCD 测试系统的第二项功能是可以对样品进行从 85K 到 300K 变温测试。变温测试可以为确定少子复合提供必要的信息, 也可以为器件的低温应用提供数据。用温度作为变量可以提供更多的信息用于研究复合机理, 也可以提供低温的

器件性能。图2.9为p-InP/InGaAs/n-InP结构在85K时寿命分布图，平均寿命为149.4ns。与300K时对比发现，寿命在77K低温下减小了18.8ns，有下降的趋势，但与非掺杂的InGaAs相比，寿命的减小并不明显。非掺杂 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 少子寿命在297K和77K时分别为 $18.5\mu\text{s}$ 和 $1.2\mu\text{s}$ ^[13]。我们认为这种差别是由于掺杂引起的少子复合机理的不同引起的，非掺杂时Shockley-Read-Hall效应为主，中等掺杂时辐射复合为主。在高掺杂时寿命为 $\tau_n+\tau_p$ ，在低掺杂时寿命为 τ_p 。随着掺杂浓度的增加，少子寿命逐渐减小，掺杂浓度为 $2\times 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ 时，寿命是 $47.36\mu\text{s}$ 以Shockley-Read-Hall复合为主，掺杂浓度为 $2\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ 时，寿命为25 ps，以俄歇复合为主。不同的复合机制决定了寿命虽温度的变化。85K时的寿命分布与300K时相比发生了明显的变化，除几个寿命比较大的位置没有变化，占多数的寿命区间扩大为从121.6ns到169.9ns。它们并不是随温度降低成比例的降低，这是因为InGaAs层中杂质和缺陷的分布不均匀引起的。图2.10展示了p-InP/InGaAs/n-InP结构外延片上两个点从85K到300K的寿命升温曲线，寿命随着温度的升高而增大，从85K到300K两个点寿命分别增加了5ns和25ns，增加值不一样是由于掺杂不均匀等引起的。低温下InGaAs的能带 E_g 比室温下大，所以低温下热平衡自发产生率 G_R 增加而寿命减小。从85K到300K寿命增加幅度较小，我们认为辐射复合在低温和中等掺杂的情况下仍然占主导地位。

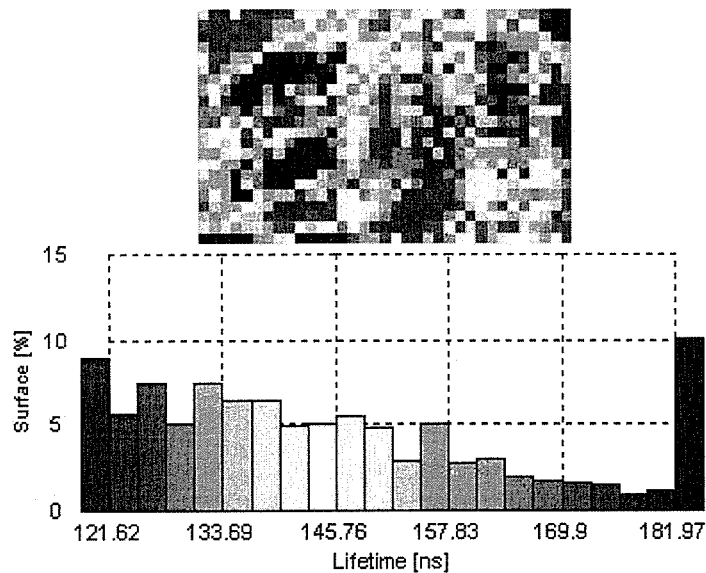


图 2.9 85 K 时 p-InP/InGaAs/n-InP 双异质结中寿命分布图
Fig.2.9 The lifetime map and distribution in p-InP/InGaAs/n-InP DH at 85 K

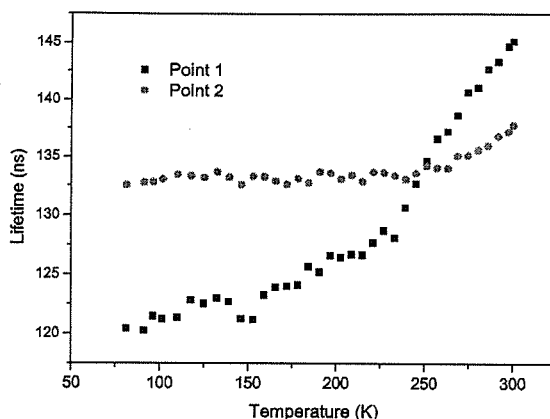


图 2.10 p-InP/InGaAs/n-InP 双异质结中两点的寿命变温曲线
Fig.2.10 The lifetime of two points on p-InP/n-InGaAs/n-InP DH with increasing temperature from 85 K to 300 K

为了证明我们的测试方法和测试理论的假设，我们制备了另外一个与 p-InP/InGaAs/n-InP 结构类似的 ZnS/InGaAs/n-InP 结构，2000 Å 厚的 ZnS 窗口层和 InP 层作用一样，起钝化作用，904nm 的红外激光可以完全透过。寿命分布图测试结果表明，平均寿命在 300K 和 85K 时分别为 140.9ns 和 119.1ns，结果和 p-InP/InGaAs/n-InP 结构吻合的很好。从而证实了 μ -PCD 测试方法对于这种三层结构的外延片，可以快速地无接触测量 InGaAs 吸收层的寿命分布，可作为制备大线列和面阵 InGaAs 探测器大面积外延材料均匀性的评估方法。

表 2.1 MOCVD 生长 p-i-n InGaAs 外延片参数
Table 2.1 Parameter of p-i-n InGaAs grown by MOCVD

参数	数值	单位
表面缺陷密度	<20(直径大于 2 μ m 颗粒)	/cm ²
边缘排除	5	mm
中心目标厚度	$\pm 10\%$	Angstroms
厚度均匀性	$\pm 10\%$	σ/μ
中心目标掺杂浓度	$\pm 30\%$	cm ⁻³
掺杂均匀性	$\pm 10\%$	σ/μ

我们对 InGaAs 外延片进行整片测量，图 2.11 是 MBE 生长的外延片在室温下测量的寿命分布图，平均寿命为 105ns；图 2.12 是 MOCVD 生长的外延片在室

温下测量的寿命分布图，平均寿命为 237ns。两个片子寿命不同，主要是因为吸收层的掺杂偏差引起的，当然也与生长方式有关。因为掺杂浓度增加，少子寿命就会减小。总的来说，MBE 生长的外延片寿命均匀性不如 MOCVD，表 2.1 中列出了 MOCVD 方法生长的外延片厂家提供的参数，供给参考。但是寿命的不均匀性对器件的影响有多大，文献中也没有报道，与器件不均匀性很难对应，因为测试光斑为 1mm，而探测器光敏面积为 $56 \times 56 \mu\text{m}^2$ 。目前 $\mu\text{-PCD}$ 测试方法还有一定的局限性，InP 窗口层 $0.5 \mu\text{m}$ 时，可以测出寿命衰减曲线，当 $1 \mu\text{m}$ 时，寿命衰减曲线较弱，毕竟激发光源为激光二极管产生的 904nm 的脉冲红外激光，InGaAs 响应较小，InP 窗口层也有吸收，而且微波的测试深度等都有影响。如果采用 $1.3 \mu\text{m} \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的激光源，并可把光斑缩小到 $10 \mu\text{m}$ ，这样可期望测试出更好更准确的结果。

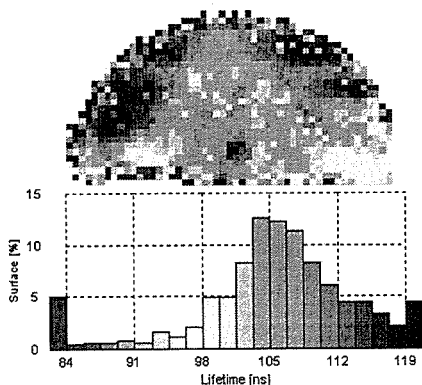


图 2.11 MBE 生长 p-i-n InGaAs 外延材料室温下寿命分布图
Fig.2.11 The lifetime map and distribution of p-i-n wafer at room temperature grown by MBE

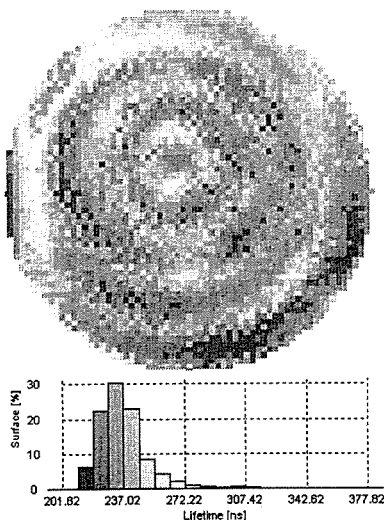


图 2.12 MOCVD 生长 p-i-n InGaAs 外延材料室温下寿命分布图
Fig.2.12 The lifetime map and distribution of p-i-n wafer at room temperature grown by MOCVD