

中国科学院上海技术物理研究所

博士学位论文

台面型InGaAs短波红外线列探测器技术研究

姓名：唐恒敬

申请学位级别：博士

专业：微电子学与固体电子学

指导教师：龚海梅

20081201

摘 要

本论文针对空间遥感用短波红外 InGaAs 探测器的要求,以制备高性能的台面型 InGaAs 线列焦平面探测器为核心,围绕器件制备中的关键技术,在本研究室现有研究成果的基础上,对器件制备过程中出现的实际问题进行了深入研究,优化并发展了器件制备的若干关键工艺,研制了高均匀性、无盲元的正照射 256×1 焦平面探测器芯片和小光敏元的背照射 512×1 焦平面探测器芯片,对光敏芯片的性能进行了表征,并对个别芯片 I-V 曲线中出现的负阻现象进行了分析,最后研究并优化了金属膜系与 p-InP 的欧姆接触工艺。本论文的主要结果如下:

1. 研究了 SiN_x 薄膜的退火效应,发现退火后 SiN_x 薄膜的透射率会增加,表面粗糙度明显降低, SiN_x/InP 界面之间的张应力明显减小。
2. 用 MIS 器件结构研究了 SiN_x 薄膜对硫化后 n 型 InP 的钝化机理,发现退火有利于减小表面固定电荷密度,退火后表面固定电荷密度和最小表面态密度分别为 $-1.96\times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 和 $7.41\times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\cdot\text{eV}^{-1}$; AES 测试结果表明硫化后 SiN_x/InP 结构界面表面固定电荷密度和最小表面态密度减小是由于元素的界面迁移造成的。
3. XPS 技术分析了硫化前后 InGaAs 表面组份及化学键的变化,研究结果表明硫化可有效地去除 InGaAs 表面的自然氧化层,同时在表面形成 Ga-S-Ga, In-S-In 等化合键;通过 MIS 器件对 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 硫化后的本征 InGaAs 生长 SiN_x 薄膜的钝化效果进行了评价,退火的引入有利于减小表面固定电荷密度,降低表面态密度,退火后表面固定电荷密度和最小表面态密度分别为 $-4.5\times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 和 $3.92\times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\cdot\text{eV}^{-1}$ 。
4. 利用激光束诱导电流(LBIC)技术研究了 p-InP/i-InGaAs 微台面 InGaAs 探测器芯片的串音和光敏元扩大问题,发现了光敏元周围存在的响应信号会引起量子效率异常问题,初步判断可能是由光在衬底的反射效应引起;设计了 p-InP 低台面结构的改进型光敏芯片,这种改进型芯片没有量子效率异常现象,而且暗电流低于常规型光敏芯片,光敏芯片在峰值波长的量子效率约为 80%。
5. 研制了 256×1 正照射 InGaAs 焦平面探测器。在优化器件响应均匀性的基础上,深入分析了盲元的成因,改进了钝化膜的制备工艺,研究了钝化膜的增透效果,研制成功高均匀性、无盲元的 256×1 台面 InGaAs 焦平面探测器,探测器芯片的峰值响应率达到 1.09 A/W ,室温下响应截止波长为 $1.71 \mu\text{m}$,平均峰值探测率为 $1.20\times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$,响应非均匀性为 3.87%,并配合系统成功实现了扫描成像。
6. 在正照射器件的研制基础上,研究了背面抛光和背面增透膜技术,并优化改进了小光敏

元制备技术，制备了拥有自主知识产权的背照射 InGaAs 线列焦平面探测器，探测器芯片的峰值响应率为 0.95 A/W ， 256×1 元背照射 InGaAs 焦平面组件的峰值探测率为 $4.5 \sim 6 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ，响应非均匀性 $3.5\% \sim 5\%$ ，盲元率 $0.4\% \sim 2\%$ ； 512×1 元背照射 InGaAs 探测器组件的平均峰值探测率为 $6.13 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ，响应不均匀性为 3.71% ，盲元率为 0.39% 。

7. 研究了由 MOCVD 生长的 F31 材料所制备 8 元和 256 元 InGaAs 探测器芯片 I-V 曲线中的负阻现象，分析了负阻现象出现的可能原因，认为是由界面缺陷引起的隧道效应造成的，并提出了一个能带模型解释了负阻现象。
8. 研究了 TiPtAu 与 p-InP 接触的电学特性，得到了 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 60 s 退火条件下接触的势垒高度 ϕ_b 和理想因子 n_i 分别为 0.51 eV 和 1.27 ，并分析了肖特基结接触和串联电阻对器件伏安特性的影响。在研究 TiPtAu 与 p-InP 接触特性的基础上，研究了优化的金属膜系 Au/Zn/Pt/Au 与 p-InP 的接触特性，利用 $\text{Au}(5 \text{ nm})/\text{Zn}(30 \text{ nm})/\text{Pt}(40 \text{ nm})/\text{Au}(30 \text{ nm})$ 金属膜系，在 $450 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 30 s 快速热退火条件下实现了与掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ p-InP 的欧姆接触，比接触电阻为 $6.56 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

关键词：InGaAs；空间遥感；短波红外探测器；焦平面；钝化；欧姆接触

Technical study on mesa structure InGaAs linear SWIR focal plane arrays

Abstract

Tang Hengjing (Microelectronics and solid electronics)

Directed by Professor Gong Haimei

In order to satisfy the urgent demand of next generation short wavelength infrared (SWIR) and linear focal plane arrays (FPAs) detector used for remote sensing application in our country, high performance InGaAs mesa linear FPAs were developed and fabricated in this dissertation. Based on existed research achievement, several key fabrication technologies have been studied and improved. The front side illuminated 256×1 and backside illuminated 512×1 InGaAs mesa FPAs were fabricated and their performances were investigated in detail. In fifth chapter, negative resistance existed in current-voltage (I-V) curve of some InGaAs detector was investigated; and metal/p-InP contact properties was studied and optimized in sixth chapter. The main results achieved in this dissertation could be summarized as follows:

1. Annealing characteristics of SiN_x passivation film were investigated by transmission spectrum, atomic force microscopy (AFM) and stress analysis. The results indicate that, after annealing, the SiN_x film has uniform and smooth surface, the film transmittance increases obviously, and tensile stress between SiN_x and InP decreases obviously.
2. The fabrication of Au/ SiN_x /InP metal-insulator-semiconductor (MIS) diodes has been achieved by depositing a layer of SiN_x on the $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ -treated n-InP. The SiN_x layer was deposited at 200°C using plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD). The effect of passivation on the InP surface before and after annealing was evaluated by I-V and capacitance-voltage (C-V) measurements, and Auger electron spectroscopy (AES) analysis was used to investigate the depth profiles of several elements. The results indicate that the SiN_x passivation layer exhibits good insulative characteristics. The annealing process causes distinct inter-diffusion in the SiN_x /InP interface and contributes to the decrease of the fixed charge density and minimum interface state density, which are $-1.96 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ and $7.41 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$, respectively.
3. Passivation of the electronic defect states at SiN_x /InGaAs interface has been achieved using $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ treatments of the InGaAs surface. The X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) technique was used to investigate the mechanism of sulfur passivation. The results indicate that sulfur treatment can effectively erase the native oxides, and S-In, S-Ga and S-As bondings are formed after sulfidation. The fabrication of Au/ SiN_x /InGaAs MIS diodes has been achieved by depositing a layer of SiN_x on $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ treated n-InGaAs using the PECVD technique. The effect of passivation on the InGaAs surface before and after annealing was evaluated by I-V

and C-V measurements. The results indicate that the SiN_x passivation layer also exhibits good insulative properties. The annealing contributes to the decrease of the fixed charge density and the minimum surface state density, which are $-4.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ and $3.92 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$, respectively.

4. The crosstalk and photoactive area of neighbor p-InP/i-InGaAs mesa InGaAs photodiodes were studied by the laser beam induced current (LBIC) technique. The obvious signals were found in the area between two neighbor pixels, and these are attributed to the reflection of the unpolished substrate. The reflection of the unpolished substrate may return to p-n junction region and cause photo-generated carriers, and thus, cause abnormal quantum efficiency. p-InP low mesa structure InGaAs photodiodes was designed. This modified structure has 80% quantum efficiency at peak response wavelength. Furthermore, it has lower dark current than that of p-InP/i-InGaAs mesa structure photodiode.
5. The dead pixels problem was analyzed, and by optimizing passivation process, high performance 256×1 front side illuminated InGaAs FPAs were obtained. At room temperature, the detector has 1.09 A/W peak responsivity and $1.71 \mu\text{m}$ cut-off wavelength. The mean peak detectivity of the 256×1 InGaAs FPAs is $1.20 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, and its non-uniformity is 3.87%. Good image is achieved successfully using the InGaAs FPAs by scanning technology at room temperature.
6. Based on the research achievement of front side InGaAs FPAs, the backside InGaAs FPAs were obtained successfully by optimizing small pixel fabrication technology, exploring substrate polish and anti-reflection technology. The peak responsivity of the backside illuminated detector is 0.95 A/W at room temperature. The mean peak detectivity, the non-uniformity of response and dead pixel ratio of the 256×1 backside InGaAs FPAs are $4.5 \sim 6 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 4.8% and 0.4%~2%, respectively, and for the 512×1 backside InGaAs FPAs, $6.13 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 3.71% and 0.39%, respectively.
7. Eight elements and 256 elements front side InGaAs detectors were fabricated by MOCVD-grown p-InP/n-InGaAs/n-InP double-heterostructure epitaxial materials (marked as F31). Negative resistance phenomenon was found in I-V curves of these devices, and was investigated in detail. The phenomenon is attributed to interface tunnel effect, and a possible band model was proposed to interpret it.
8. Electrical properties of TiPtAu/p-InP were studied. The contact barrier height and ideal factor was obtained at 400°C rapid thermal annealing in ambient nitrogen for 60 s, which are 0.51 eV and 1.27, respectively, and the effect of Schottky contact and series resistance on I-V characteristics was analyzed. Based on research of contact properties of TiPtAu/p-InP, an

improved metal electrode Au/Zn/Pt/Au was proposed. The specific contact resistance is $6.56 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ (for p-InP with an acceptor concentration of about $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) using Au(5 nm)/Zn(30 nm)/Pt(40 nm)/Au(30 nm) underwent 450 °C rapid thermal annealing in ambient nitrogen for 30 s, and metal/p-InP becomes good Ohmic contact.

Key words: InGaAs; remote sensing; SWIR detector; FPAs; passivation; Ohmic contact

学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：唐恒敬 2009年1月3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：唐恒敬 2009年1月3日

指导教师签名： 2009年1月5日

第一章 绪论

1.1 引言

红外辐射是波长介于可见光和微波之间的电磁波谱, 波长从 $0.75\ \mu\text{m}$ - $1000\ \mu\text{m}$ 之间, 覆盖光谱区之宽是可见光、X 光等电磁波段所不能相比的。红外波段包含极其丰富的信息, 获取自然界的这些重要信息可以极大程度地造福人类^[1]。

1800 年英国天文学家 Herschel 在研究太阳光谱的热效应时, 用水银温度计测量各种颜色的光的加热效果, 发现热效应最显著的部位不在彩色光带内, 而在红色光的外面, 从而第一次发现了红外辐射的存在^[2]。从此红外技术应用并造福于人类已有两个世纪的历史了。近半个世纪以来, 特别是近十几年以来, 红外技术发展迅速, 已经从过去的战术地位发展到战略地位, 从过去局部的、少数的应用发展到全面的、大规模的应用。目前, 红外技术已经在军事领域、科学研究、工农业生产、医疗卫生以及日常生活方面获得了广泛的应用。

1.2 红外技术的发展与应用

红外技术主要是指红外探测技术, 它是利用目标辐射的红外线来搜索、探测和跟踪目标的一门高技术, 它经过漫长的发展历程形成了比较完善的红外系统, 这个系统一般包括: 用于收集红外辐射、扫描成像、光学编码的光学机械装置; 进行光电—电光转换的红外探测器; 进行电信号放大处理的电子信号处理装置; 用于记录显示和伺服的驱动装置等四部分。欧美等许多国家相继发展并装备了许多型号的红外系统, 美国在“星球大战”(SDI)总体计划中也极为重视红外技术的应用和发展^[3]。

在红外技术的众多应用中, 军事应用尤为突出。先进的军用红外系统不断涌现, 性能不断提高, 应用范围日益扩大, 地位愈显重要。红外技术在军事应用中有诸多特点。一是红外技术具有比可见光更好的全天候性能, 不分白天黑夜均能使用, 适合夜战需求; 二是采用无源被动接收系统, 比用无线电或可见光装置进行探测要安全、隐蔽, 不易受干扰, 保密性强; 三是利用目标和背景红外辐射特性的差异便于目标识别、揭示出伪装目标; 四是用于制导, 体积小、造价低、命中率高, 比雷达分辨率高1~2个数量级。因为有这些特点, 世界各国纷纷投入大量的人力物力进行相关的研究, 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、通信、搜索、跟踪、制导、火控、目标侦察和防伪探测等方面。在军事需求的牵引和相关技术发展的推动下, 作为高技术红外技术, 在未来军事技术中的作用将会更加广泛和重要, 其战略地位也会愈加明显^[4]。

红外技术在红外遥感领域有着重要的应用。在航天和航空遥感应用中,可采用红外光谱仪对太空或地面进行信息采集,实现对地观测、环境监控、军事侦察和预警、海洋监控以及天文研究等重要应用。另外,由于红外遥感技术先进、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,其在气象预测和农林牧业方面的农作物估产、病虫害防治等应用领域有着独特的优势,发挥着重要作用,在国计民生中占有举足轻重的地位。

红外技术在工业领域也有着广泛的应用。在医学上,利用与病理相关的气体红外特征吸收谱线,红外技术可用于临床诊断等;在农业领域,红外技术可用于病虫害防治,灾情预警,农业估产等;在化工领域,用红外技术可进行测温、无损探伤、过程监控以及远程控制和检测等;此外,由于红外波段中一些分子特有的吸收特性,使得红外技术在环境监控和污染控制方面以及鉴别生化武器和反恐领域中也有着重要的应用^[5]。

1.3 短波红外及 InGaAs 材料的基本性质

短波红外是指 1~3 μm 的红外波段,所有物体都反射环境中普遍存在的短波红外辐射。在该波段中,很多物质具有独特的光谱特性,如岩石、矿物中含有的氢氧根^[6],农作物中的水,空气中的 CO_2 , NH_3 , H_2S , N_2O 等^[7],而且许多高温物体如飞机和火箭的发动机喷口,导弹尾焰等红外辐射能量也集中在这个波段。另外,夜天光的大部分能量集中在短波红外波段,特别是在晴朗星空的夜间,短波红外辐射亮度随波长增加,并远远超过可见光的亮度,因此短波红外焦平面及短波红外成像技术在空间对地探测领域如了解资源分布、土壤水分监测、大气成分分析、农作物估产等,以及医学成像、工业多光谱成像分析、安全防范、军事侦察和监视、红外预警和夜视成像等众多重要的民用和军事领域有着广阔的应用前景。

应用于 1-3 μm 波段的红外探测器材料包括 HgCdTe、InSb、PtSi 以及 InGaAs 等,但 HgCdTe、InSb 和 PtSi 等探测器一般都需要某种程度的制冷,不是探测器需要制冷就是光学系统需要制冷,或者两者都需要制冷。在探测器需要制冷的情况下,制冷的必要性产生于器件的基本物理性质,对于光学系统和结构来说,需要制冷是为了减少其发射的信号,也就是所谓的“仪器背景”。所用的制冷器在应用时都表现出一个明显的缺点,即它们有一定的重量和体积,在航天遥感等应用方面受到约束。制冷器的安装也增加了整个仪器的装配复杂性,以及一些难以解决的问题,例如玷污、振动、可靠性和寿命等问题。与其它类型的制冷器相比,只有热电制冷器的尺寸特别小,而且坚固可靠(无机械部件和玷污问题),对于体积和质量受到限制的仪器来说,它是一个较好的选择对象。InGaAs 探测器在室温或热电制冷下工作即具有较高的性能,因此与 HgCdTe、InSb 和 PtSi 等探测器相比,从成本、性能和制作工艺等方面考虑,InGaAs 探测器将占据有利的竞争位置。

直接带隙的三元化合物 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 是 III-V 族的Ⅲ-Ⅴ族二元系半导体材料,其能带结构如图 1.1 所示^{[8][9]}。 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 具有高迁移率、良好的抗辐照特性等优点,可由 InAs 与 GaAs 以任何配比形成,从图 1.2 可以看出,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 $6.0583 \text{ \AA}$;其禁带宽度可在 InAs 的 0.35 eV 与 GaAs 的 1.43 eV 之间变化,对应的截止波长分别为 $3.5 \text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.87 \text{ }\mu\text{m}$,很好的

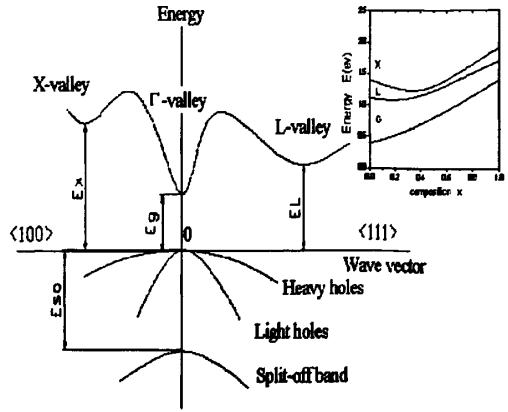


图 1.1 InGaAs 能带结构及 X、L、 Γ 随组分 x 变化关系
Fig.1.1 Band structure of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ and variation of X, L and Γ conduction band with composition

覆盖了 $1\sim 3 \text{ }\mu\text{m}$ 的大气窗口,是制备短波红外探测器的合适材料。 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 和 InP 材料可以做到完全晶格匹配,因此可以在 InP 衬底上生长出高质量的外延层,制备出性能优越的器件。调节 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 中铟的含量^[10],可使得 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 的探测波段向长波方向移动,达到为特定应用服务的目的。表 1.1 给出了 InP, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 在 300K 时的材料参数。与 InP 材料完全晶格匹配 InGaAs 焦平面器件可在室温下工作,而扩展波长的 InGaAs 焦平面也可在热电制冷温度下取得良好的性能^[11]。目前,InGaAs 材料可以利用多种先进的材料制备技术,如气相外延(VPE)^[12]、液相外延(LPE)^[13]、金属有机化合物化学气相淀积(MOCVD)、分子束外延(MBE)技术制备,各种方法均能生长出高质量的外延材料。

表 1.1 InP、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 和 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 在 300 K 时的材料参数

Table 1.1 Basic parameters of InP, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ and $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ at 300 K

参数	InP	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$
晶格结构	闪锌矿 ⁺	闪锌矿 ⁺	闪锌矿 ⁺
晶格常数($\text{\AA}$)	5.8687	5.8687	$6.0583-0.405x$
禁带宽度(eV)	1.344	0.75	$0.324+0.7x+0.4x^2$
低频介电常数	12.5	13.9	$15.1-2.87x+0.67x^2$
高频介电常数	9.61	11.6	$12.3-1.4x$
本征载流子浓度(cm^{-3})	1.3×10^7	6.1×10^{11}	
电子迁移率($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	≤ 5400	≤ 12000	$40-80.7x+49.2x^2\times 10^3$
空穴迁移率($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	≤ 200	≤ 300	
有效导带态密度(cm^{-3})	5.7×10^{17}	2.1×10^{17}	$2.5\times 10^{19}[0.023+0.037x+0.003x^2]^{3/2}$
有效价带态密度(cm^{-3})	1.1×10^{19}	7.7×10^{18}	$2.5\times 10^{19}[0.41+0.1x]^{3/2}$
电子的有效质量(m_0)	0.08	0.041	$0.023+0.037x+0.003x^2$
轻空穴有效质量(m_0)	0.089	0.052	$0.026+0.056x$
重空穴有效质量(m_0)	0.6	0.45	$0.41+0.1x$

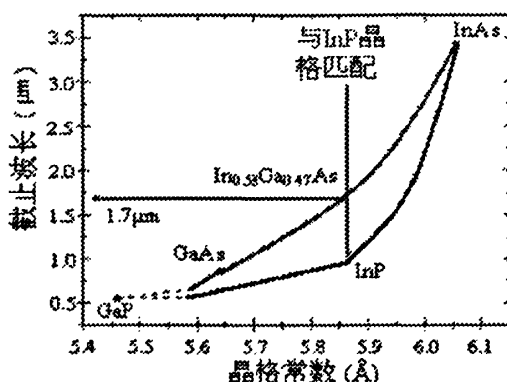


图 1.2 四种 III-V 族化合物的晶格常数与截止波长之间的关系

Fig.1.2 The relationship between the lattice constant and the long wavelength cutoff of the 4 ternary alloys in the InGaAsP family

1.4 红外探测器的分类

红外辐射占据了相当宽的电磁波段，提供了客观世界的丰富信息。获取这些重要的信息，便依赖于各种各样的红外探测器。红外探测器正是将不可见的红外辐射转化为可测量信号的器件，因此红外探测器是红外技术的核心，是红外装置的心脏。本节主要介绍各种常见的光子型半导体探测器，包括光电导、MSM、RCE、APD 和 QWIP、QDIP 光电探测器，以及 InGaAs 光子型探测器方面的研究进展。

1.4.1 光电导型探测器

光电导型探测器是光电探测器中最简单的一类，可以分为本征光电导探测器、非本征光电导探测器和自由载流子光电导探测器^[1]。本征光电导探测器的基本原理如下：光照时，能量大于半导体材料禁带宽度的光子被吸收后产生电子-空穴对，使材料的电导发生变化。利用本征光吸收做成的器件，吸收系数很高，特别对本征能隙半导体更是这样。本征型的优点是工作温度比非本征型高。

非本征和本征型光电导探测器的主要差别是前者吸收系数低，仅为 $1 \sim 10 \text{ cm}^{-1}$ ，后者约为 $10^3 \sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 。对于非本征器件要得到与本征器件相同的性能，工作温度常常需要降至更低。

自由载流子光电导探测器与一般光电导探测器不同之处在于它吸收光子后并不引起载流子数目的变化，而是引起载流子迁移率的变化。入射到高迁移率半导体上的辐射引起带内跃迁，增加传导电子的平均能量，因为载流子迁移率是电子温度的函数，所以能观察到电导的变化。

通常光导型探测器由高阻体材料制成，为了对光生载流子进行收集，器件需要一定的外加工作偏压。由于体材料通常较厚，因此光电导型探测器响应速度较慢。由于外加偏压的作用，器件的暗电流较大。为了降低器件噪声，抑制复合对光响应的影响，光电导型探测器通

常需要工作在较低温度下。对于InGaAs光导探测器的研究主要集中在上世纪七十和八十年代，在这之后，随着材料制备技术和器件制备工艺的发展，人们将研究的重点逐渐转移到了光伏型器件上。

1.4.2 MSM 探测器

金属-半导体-金属光电探测器(MSM-PD)是上世纪 80 年代中后期开始在上世纪引起重视的一种新型光电探测器，其本质相当于两个肖特基结背靠背串联，在外加偏压时，一个结处于正偏，另一个反偏，MSM-PD 的伏安特性由处于反偏的肖特基结决定。肖特基势垒光电管是一种利用金属与半导体接触势垒进行工作的器件，是多子器件，不存在少子寿命和反向恢复问题，因此开关速度非常小；而且肖特基二极管势垒高度低于 p-n 结，故器件具有较小的正向开启电压，特别适合于高频应用；其结构简单，易于实现单片光电集成，可制成大面积面阵。因此，MSM-PD 也具有响应速度快、电容小、工艺简单及容易与 FET-IC 集成等优点，在光纤通信中的光电信号转换中具有广泛的应用。

对于 MSM-PD 而言，如果肖特基势垒较低，就会引入较大的噪声。为了克服这个缺点，人们通常会在半导体和金属中间加入势垒增强层，以提高势垒，降低器件的暗电流。InGaAs MSM-PD 的带隙较窄，可以应用于长波长、远距离的通讯系统。在 InGaAs MSM-PD 研制方面，P. Kordoš 等通过在 n 型 InGaAs 表面生长不同厚度和掺杂浓度的 p-InGaAs、n-GaAs、n-InP 和 n-InGaP 的方法，提高金属和半导体接触的势垒高度，得到的有效势垒高度为 0.66 eV^[14]；朱红卫等采用双重肖特基势垒增强层技术，制作了 InGaAs MSM-PD，这种技术极大地减小了暗电流，最小达 4.7 nA (10 V)，证明是一种减小 MSM PD 暗电流的有效途径^[15]。

1.4.3 RCE 探测器

传统高速光电二极管是以带宽和响应率的折衷方案设计的。为获得一个大带宽器件，光产生的载流子越过高场耗尽区的过渡时间必须保持很小，限定了吸收层厚度的上限。对工作在几十千赫的大多数半导体器件来说，这一限制变得与吸收材料的吸收长度相当，从而要求明显牺牲响应率以获得高速工作。谐振腔(RCE)探测器可提供一种回避该折衷方案的方法—将有源器件结构置入法布里—珀罗谐振微腔中，从而使入射光在谐振腔内多次反射，多次经过吸收层，从而获得较高的量子效率。这样，可以将吸收层做的很薄以缩短光生载流子的渡越时间，从而在保持较高量子效率的同时提高了器件的响应速率。

基本RCE器件包括一个薄的—与吸收长度比较而言—安置在一个法布里—珀罗腔中的窄带隙吸收层。除了吸收层以外，还包括非吸收间隔层以容许整个腔长的调节。在共振光照射下，腔内强度急剧增加使得吸收层中耗散的光能与入射光中耗散的相差不大。器件内部量子

效率趋于1，大大地超过采用通过吸收层的单通道所得的量子效率。

RCE探测器件的第二特征是它的波长选择性。非共振波长被反射，产生很低的响应率。这一特点使RCE探测器成为波分多路复用应用中的候选者。然而，腔中损耗的存在增加信道间的串话干扰，并高于采用分离滤波器所得的串话干扰。

RCE探测器的另一特征是它可用来获得工作在低压的器件。因为耗尽层能作得较薄，需要较低电压来耗尽吸收层的设计成为可能。在长吸收层要求厚耗尽层和高偏置电压的情况下，这是特别有帮助的。

目前谐振腔增强探测器主要采用InP基和GaAs基两类材料系，其中InP基材料外延工艺成熟，且与其匹配的InGaAs材料正好覆盖了光通信波段。S. S. Murtaza等采用重掺杂的InGaAs/InP作为布拉格反射镜(DBR)，重掺杂可有效减小InGaAs的带间吸收，而且自由载流子吸收可以忽略，这样使得InGaAs/InP DBR的反射率优于97%，器件在1.55 μm 有较高的性能，峰值量子效率达到了65%^[16]。2002年，黄辉等报道了一种能够实现高速、高灵敏度的InP基谐振腔增强型(RCE)光电探测器，它采用衬底入光方式，解决了在InP衬底上外延生长的InP/InGaAsP介质膜DBR反射率低的问题，该探测器的吸收层厚度为0.2 μm ，在波长1.583 μm 处获得了80%的峰值量子效率^[17]；2004年，该课题组采用选择性湿法刻蚀，制备出基于InP/空气隙的分布DBR反射镜，并将该结构的反射镜引入RCE光电探测器，器件的台面面积为50×50 μm^2 ，制备的器件在波长1.510 μm 处获得了约59%的峰值量子效率，3 dB响应带宽为8 GHz^[18]。

1.4.4 APD 探测器

单光子探测技术在生物发光、放射探测、天文测光、高能物理、非破坏性物质分析等诸多领域都有着广泛的应用。近年来，随着量子信息技术特别是量子密钥分配技术的发展，使得单光子探测成为国内外研究的热点。目前，在1000 nm~1600 nm波段性能最好的是以InGaAs/InP雪崩光电二极管(APD)为基础的InGaAs/InP红外单光子探测器。InGaAs/InP APD是利用载流子的雪崩效应产生电子倍增的二极管：利用雪崩效应，在吸收层通过光激发产生的载流子，在经过电场强度非常高(10^5 V/cm量级)的倍增区时产生雪崩倍增放大作用，使光电流得以放大，从而大大提高了器件的灵敏度。

InGaAs/InP红外单光子探测器一般采用吸收和倍增分区、具有缓冲层的InGaAs/InP APD (SAGM APD)，其结构如图1.3所示。首先在 p^+ -InP衬底上长一层 n^- -InP作为倍增区。InGaAs层作为吸收层，厚度一般是几个微米。在300 K温度下InP材料禁带宽度是1.35 eV，InGaAs的禁带宽度是0.73 eV。由于价带不连续，在InGaAs吸收区内产生的光生空穴会在异质结面堆积。在

InP和InGaAs之间加入几十纳米宽度的InGaAsP(室温下 $E_g=1.05\text{ eV}$)可起到缓冲层的作用,有利于空穴的漂移。当入射光子能量大于 0.73 eV 而小于 1.35 eV 时,也就是波长大于 $0.92\text{ }\mu\text{m}$ 而小于 $1.7\text{ }\mu\text{m}$ 的光子可以透过InP层而到达InGaAs吸收区,产生光生电子和光生空穴。在加上适当的反向偏压的情况下,光生载流子空穴在电场的作用下迅速漂移至InP区。由于外加电压绝大部分落在 p^+-n 同质异型结上,电场很大,光生载流子通过碰撞电离引发雪崩而得到很高的增益,形成宏观可测的电脉冲。对电脉冲进行鉴别和记录,可实现单光子探测和计数^[19]。

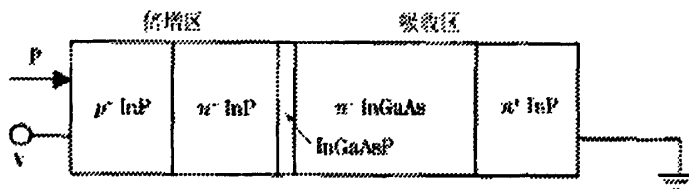


图 1.3 InGaAs/InP 材料的 SAGM APD 结构图
Fig.1.3 Structure of InGaAs/InP SAGM APD

为了获得足够大的增益,用于单光子探测的APD一般都工作在雪崩电压之上,即所谓的盖格模式(Geiger Mode)。一般情况下,暗电流的大小、雪崩电压大小和结电容大小对单光子探测用APD的性能具有重要的意义。①暗电流大小。暗电流大,预示着引起的暗计数高。选择暗电流小的管子,可有效地减小系统的暗计数。②雪崩电压大小。InGaAs/InP APD是靠倍增区的雪崩获得高增益,增益的大小与倍增区的电场大小直接相关,电场越大,增益越大。因此雪崩电压越大,所能获得的最大增益越大。另外,雪崩电压高也是材料生长质量高的一个标志,常温下InGaAs/InP APD的雪崩电压在 50 V 左右。③APD结电容的大小。APD结电容越小,反应速度越快。

在盖格模式下,APD的雪崩若不加抑制会给整个管造成击穿性损害,为保证探测器连续、正常工作,控制电路必须具有以下功能:①能捕捉到雪崩脉冲的上升沿;②能产生一个与雪崩上升沿同步的可鉴别输出;③能以足够快的速度将两端偏压降低至雪崩电压,以抑制雪崩;④在间隔一定时间之后将APD两端偏压恢复到正常工作状态。为实现InGaAs/InP APD工作在盖格模式下,常用的控制电路有无源抑制、有源抑制、门模式以及它们之间的组合。在红外单光子探测器中应用最为广泛的是门模式控制电路。门控技术的主要思想是在APD上加上一个略低于雪崩电压的偏压。在光子到达的同时,迭加一个电脉冲,使达到雪崩。然后,由雪崩抑制电路降低APD上的电压,终止雪崩。

目前,InGaAs/InP APD的研究取得了较大的进展。谢春梅等设计并研制成功背入射InGaAs APD,器件直径为 $200\text{ }\mu\text{m}$,工作在 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1.540\text{ }\mu\text{m}$ 波长时响应度为 0.64 A/W ,在 $0.9V_{BR}(V_{BR}$

为击穿电压)下的典型暗电流和噪声因子分别为30 nA和6.5^[20]。J. C. Dries等研制了32×32元面阵InGaAs/InP APD, 光敏元直径为20 μm, 1024个像元全部有效, 平均击穿电压为37.68 V, 在低于击穿电压1 V处的平均暗电流为14.4 nA, 响应波长为1.55 μm时的响应率为10 A/W, 不均匀性优于10%^[21]。Ping Yuan等报道了高性能1.55 μm盖格模式工作的单光子计数InGaAs APD, 器件规模为32×32元, 光敏元直径为25 μm, 通过采用InGaAsP缓冲层和3.5 μm的InGaAs吸收层, 优化InP倍增层和电荷层, 器件在273 K温度下达到了很高的性能, 在2 V过偏压下暗电流比率(Dark current rate)低至20 kHz, 光子探测效率(Photon detection efficiency)高于30%^[22]。M. S. Ferraro等报道了自适应的2×2元InGaAs APD, 在不牺牲响应率和带宽的基础上得到了光敏元大小为100 μm×100 μm的大面积器件, 主要用于自由空间光学通信^[23]。

1. 4. 5 QWIP 和 QDIP

1. 4. 5. 1 QWIPs

量子阱是指由两种不同的半导体材料相间排列形成的、具有明显量子限制效应的电子或空穴的势阱。量子阱的最基本特征是, 由于量子阱宽度(只有当阱宽尺度足够小时才能形成量子阱)的限制, 导致载流子波函数在一维方向上的局域化。在由两种不同半导体材料薄层交替生长形成的多层结构中, 如果势垒层足够厚, 以致相邻势阱之间载流子波函数之间耦合很小, 则多层结构将形成许多分离的量子阱, 称为多量子阱。如果势垒层很薄, 相邻阱之间的耦合很强, 原来在各量子阱中分立的能级将扩展成能带(微带), 能带的宽度和位置与势阱的深度、宽度及势垒层的厚度有关, 这样的多层结构称为超晶格。具有超晶格特点的结构有时称为耦合的多量子阱。量子阱中的电子态、声子态和其他元激发过程以及它们之间的相互作用, 与三维体状材料中的情况有很大差别。在具有二维自由度的量子阱中, 电子和空穴的态密度与能量的关系为台阶形状, 而不是象三维体材料那样的抛物线形状。

量子阱红外探测器(QWIP)是20世纪90年代发展起来的高新技术。与传统的HgCdTe红外探测器相比, 它具有以下优越性: ①波长连续可调, 通过调解量子阱宽度和势垒高度可方便地获得3~20 μm的响应; ②III-V材料生长和器件制备技术成熟, 利用MBE和MOCVD等先进工艺可获得大面积、均匀性好、低成本、高性能的大面阵III-V族量子阱红外焦平面; ③光谱响应带宽窄, 可控制在 $\Delta\lambda/\lambda \approx 10\%$, 不同波段之间的光学串音小, 因此特别适宜制备双色、多色焦平面探测器; ④抗辐射, 特别适于天基红外探测及其应用。由于有这样多的优点, 量子阱光探测器, 特别是红外探测器的研究引起人们广泛的重视, 在长波应用方面得到迅速发展^[24]。

在量子阱结构设计中, 通过调节阱宽、垒宽等参数, 使量子阱子带运输的激发态被设计在阱内(束缚态)、阱外(连续态)或者在势垒的边缘或者稍低于势垒顶(准束缚态), 以便满足不

同的探测需要, 获得最优化的探测灵敏度^[25]。根据探测波段的不同可分为短波红外探测器, 以InP衬底上生长的InGaAs/InAlAs QWIP为代表; 中、长波红外探测器以AlGaAs/GaAs QWIP为代表, 是目前研究最多的。根据掺杂材料的不同又可分为n型掺杂QWIP(载流子为电子); P型掺杂QWIP(载流子为空穴)。

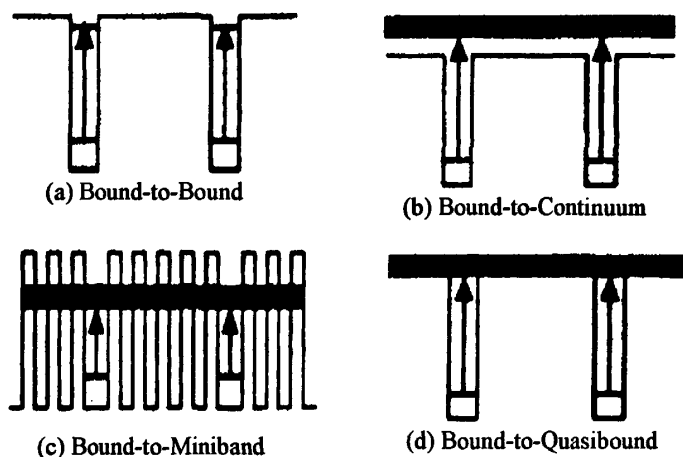


图 1.4 量子阱子带间跃迁的四种模式

Fig.1.4 Four modes of intersubband transition in quantum well

近二十年来, 国内外学者对工作在 $3\ \mu\text{m}$ ~ $5\ \mu\text{m}$ 和 $8\ \mu\text{m}$ ~ $12\ \mu\text{m}$ 大气窗口的基于子带间跃迁的QWIP进行了广泛研究。为了减小器件的暗电流, 提高探测器的灵敏度, 研究人员先后提出了束缚态到束缚态(Bound-to-Bound)、束缚态到连续态(Bound-to-Continuum)、束缚态到微带(Bound-to-Miniband)和束缚态到准束缚态(Bound-to-Quasibound)四种跃迁模式(分别简称为BTB、BTC、BTM、BTQB)的QWIP^[26], 如图1.4所示。

近些年来, QWIP焦平面阵列方面的进展迅速, 下面就InGaAs QWIP发展情况进行介绍。InGaAs QWIP可采用InGaAs/GaAs、InGaAs/InP或InGaAs/InAlAs的周期结构。A.G.U. Perera等报道了基于束缚态到准束缚态、束缚态到连续态跃迁模式的InGaAs/GaAs QWIPs^[27], 截止波长达到了 $35\ \mu\text{m}$, 在 $4.2\ \text{K}$ 温度下和 $31\ \mu\text{m}$ 波长处, 束缚态到准束缚态与束缚态到连续态跃迁模式的InGaAs/GaAs QWIPs的响应率分别为 $0.45\ \text{A/W}$ 和 $0.3\ \text{A/W}$, 峰值探测率分别达到了

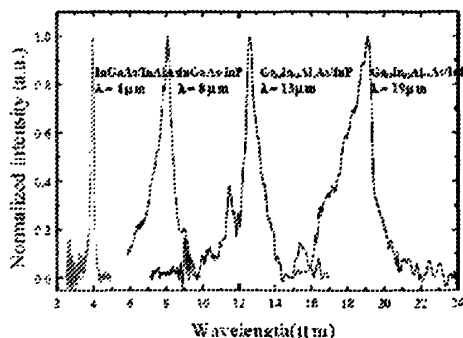


图 1.5 美国西北大学研制的InP相关QWIPs的响应光谱
Fig.1.5 InP-related QWIPs cover the range $20\ \mu\text{m} > \lambda > 3\ \mu\text{m}$

$6 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 和 $1 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$ 。Steinkogler 等用 MBE 技术在 [100] 方向的半绝缘 GaAs 衬底上生长了 InGaAs/GaAs 结构^[28], 每个有效区包括 20 个周期, 每个周期由 47.5 nm 的非掺杂 GaAs 和 4.4 nm 的掺硅 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 量子阱组成。1991 年, S. D. Gunapala 等首次报道了晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ QWIP, 器件在 77 K 温度下的峰值探测率达 $9 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$, 优于当时 GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料体系的 QWIP^[29]。土耳其的 S.Ozer 等人在 2005 年报道了 640×512 元的 InGaAs/InP QWIP 焦平面^[30], 77K 下的噪声等效温差 (NETD) 趋于 40 mK, 80 K 温度下峰值响应波长为 7.85 μm , 峰值响应率为 $2.5 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{W}^{-1}$; 2007 年, 他们报道了 640×512 元的 InGaAs/InAlAs 中红外 QWIP 面阵, 105 K 下噪声等效温差 NETD 达 23 mK^[31]。美国西北大学量子器件中心在 III-V 族 QWIPs 研究方面也取得了很大的进展, 研制的 III-V 族 QWIPs 覆盖了 3 μm ~21 μm 波段^[32], 如图 1.5 所示。

1. 4. 5. 2 QDIPs

量子点是准零维的纳米材料, 由少量的原子所构成。粗略地说, 量子点三个维度的尺寸都在 100 nm 以下, 外观恰似一极小的点状物, 其内部电子在各方向上的运动都受到局限, 所以量子局限效应特别显著。由于量子局限效应会导致类似原子的不连续电子能阶结构, 因此量子点又被称为人造原子。

东京大学的 Y. Arakawa 首先提出了将量子点应用于光电器件的概念^[33]。与量子阱探测器一样, 量子点探测器 (QDIP) 也是依靠光激发的子带间跃迁将基态电子激发到激发态或者连续态, 在外加电场下光电导增益产生光电流。与 QWIP 相比, QDIP 由于更长的载流子俘获和弛豫时间, 应具有更低的暗电流和更高的光电响应。理论预言, 量子点红外探测器具有下述优点^[34]:

- 1) 对垂直入射光敏感。在量子点中, 三维限制效应导致其态密度函数非常特殊, 为 δ 函数形式。这种态密度函数接近于原子, 并由此会引起光电性质的强烈改变, 其中最重要的一点就是量子点红外探测器对垂直入射光的响应。由于量子点中的三维限制效应, 任何偏振的红外光都可以诱导子带间跃迁的发生。
- 2) 可达到更宽的光谱响应。自组织量子点一般尺寸、组份、应力都具有不均匀性, 这使得量子点红外探测器有一个更大的响应范围。由于分立的态密度函数, 依据量子点存在的能态, 电子将遵守一系列的可能跃迁。这些跃迁对探测产生影响并导致一个更大的均匀展宽, 在很多情况下, 与响应带宽直接成比例的整个波长响应也应该会更大。
- 3) 长的激发电子寿命。当载流子被激发出来后, 可能有多种俘获和弛豫机制发生作用。但在量子点中, 如果能级间距大于声子能量时 (即出现“声子瓶颈”效应), 不仅电子-空穴散射很

大程度上被抑制，声子散射也应被禁止，电子-电子散射将成为主要的弛豫过程。由于电子弛豫足够慢，可预期达到更长的载流子寿命。所以，如果理论预言的声子瓶颈效应能在量子点红外探测器中充分地实现，长的激发电子寿命将直接导致更高的工作温度、更低的暗电流和更高的探测率。

4) 更低的暗电流。QDIP暗电流的组成包括热激发电流、隧道电流和热辅助隧道电流等。与QWIP类似，量子点红外探测器中暗电流最主要的产生机制仍然是量子点中的受限电子的热发射。载流子寿命的增加使电子热发射得到抑制，使暗电流应处于较低的数量级。通过降低掺杂浓度及使用异质结势垒作为接触层等手段，暗电流有望进一步降低。

5) 更高的响应率。对于红外探测器而言，峰值响应率是非常重要的指标，表示为： $R_{\text{peak}} = \eta g e \lambda / h c$ ，其中 η 对应吸收量子效率，即光激发载流子从量子点中逃逸出来的几率， $h c / \lambda$ 为峰值波长的能量。理想情况下，由于无表面反射，认为QDIP中每个光子都得到吸收，此时 $\eta = 1$ ；而QWIP由于无法探测正入射光，可认为 $\eta = 0.5$ 。所以理论上量子点探测器应具有比量子阱探测器更高的峰值响应。

近年来，随着MBE和MOCVD等外延技术的进步，QDIP得到快速发展，新的设计方法和设计结构不断涌现。2005年，Lin Jiang等研制了 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}/\text{GaAs}$ 和 InAs/GaAs 集成双色长波QDIPs^[35]，在40 K温度下，峰值响应波长分别为8.4 μm 和10.6 μm ，背景限(BLIP)探测率分别为 $4.52 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 和 $2.09 \times 10^9 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。密歇根大学的P. Bhattacharya等人设计了一种双势垒阻挡层^[36]，利用共振隧穿使光电流通过而将暗电流阻挡，利用该结构制备的 InGaAs 隧穿QDIP在300 K时暗电流密度为 1.55 A/cm^2 ，280 K下器件的响应度 0.16 A/W ，探测率达 $1.5 \times 10^7 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。2007年，美国西北大学的H. Lim等人研制了 InP 基 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 阱中 InAs 量子点结构(DWELL)^[37]，120 K温度下器件的峰值探测率达 $2.8 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ，量子效率达35%；由于较低的暗电流和高的光响应，器件在室温下仍有非常好的性能，峰值探测率达到了 $6.7 \times 10^7 \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。美国喷气推进实验室(JPL)的S. D. Gunapala研制了基于 $\text{InAs}/\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 材料体系的 640×512 元DWELL结构的焦平面探测器，可以同时吸收 45° 和垂直入射的红外辐射，在60 K温度下的NETD为40 mK，并进行了成像验证，效果良好^[38]。

1.5 InGaAs 短波红外焦平面的研究现状与发展趋势

1.5.1 短波 HgCdTe 与 InGaAs 探测器的性能比较

目前用于制备短波红外波段探测器的材料主要有 HgCdTe 和 InGaAs 等。由于II-VI族 HgCdTe 材料中较弱的 Hg-Te 键，其具有较高的本征缺陷密度和较差的抗辐照性能，体材料和液相外延材料的均匀性较差。为了抑制器件的热噪声，由 HgCdTe 制成的红外焦平面通常需要

低温制冷^[39]。制冷器的使用会大大增加红外系统的体积、功耗和复杂程度，且由于低温下热应力等因素的存在，会影响系统性能和使用寿命。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，已有的数据表明，在探测器波长小于2.5 μm ，InGaAs探测器已经表现出比HgCdTe探测器更高的性能。

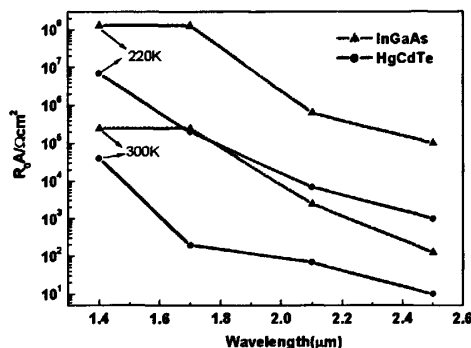


图 1.6 不同温度和截止波长下 InGaAs 和 HgCdTe 探测器的 R_0A 值
Fig.1.6 The zero bias resistance-area product R_0A of InGaAs and HgCdTe detector at different temperature and cut-off wavelength

图1.6给出了不同截止波长和温度下两种器件的优值因子 R_0A 值^{[40][41]}。在截止波长为1.7 μm ，InGaAs探测器的优值因子 R_0A 要高出HgCdTe器件三个数量级；在长波长，InGaAs的晶格常数与其衬底已经不再匹配，但其优值因子仍要高出HgCdTe一个数量级。这意味着，在低背景仪器中，信噪比将增加3-10倍。这一优点可以这样来理解：在暗电流相同的情况下(等效探测率)，InGaAs探测器的操作温度将比HgCdTe探测器提高70 K左右。这种增加了的温度裕度使得高探测率的1.7 μm InGaAs探测器可在室温下工作，而2.5 μm 的InGaAs探测器阵列只需热电制冷。

1.5.2 InGaAs 短波红外焦平面探测器的类型

1.5.2.1 台面型和平面型探测器

InGaAs p-i-n 探测器从结构上分为两类：台面型和平面型，其主要区别在于 p-n 结的制备工艺。平面型器件是在 n-i-n⁺结构材料中，采用离子注入或扩散的方法^{[42][43]}，对 n 型 InP 层进行 Be、Mg、Zn 或 Cd 的 p 掺杂得到，这种方法的优点是器件的 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，而缺点是工艺较为复杂，光敏元之间可能会存在较大的串音，并且光敏面扩大问题。

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，因而需要有效的台面成型和钝

化技术。M. R. Ravi 等采用金属有机化学气相沉积方法生长的 $p^+-\text{InGaAs}/i\text{-InGaAs}/n^+-\text{InP}$ 材料, 利用硫化加聚酰亚胺的钝化方法, 制备了台面结构的 InGaAs 探测器, 光敏元直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$, 发现硫化后用去离子水清洗, 可有效降低暴露的台面表面复合, 提高器件的长期稳定性, 在 -5 V 偏压下的暗电流为 0.5 nA , 并且在放置一个月后, 器件的暗电流几乎不变^[44]。

1.5.2.2 正照和背照结构探测器

按照光入射方式的不同, InGaAs 阵列可采用正面照射和背面照射两种方式。G. Olsen 等人采用如图 1.7 正面照射结构^[10], 制作出 256 线列焦平面探测器, 探测波长 $1.0\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$, 主要性能: 室温条件下, 在 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 响应率为 0.9 A/W , 量子效率为 86% , -1 V 时, 暗电流小于 100 pA , -5 V 时, 暗电流小于 1 nA 。

采用背照结构, 适于制备大规模面阵器件。背照射器件是采用倒装焊工艺将探测器芯片与读出电路互连, 工作时光由探测器芯片的衬底端入射。图 1.8 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^[45], 探测器总面积约 2 cm^2 , 光敏元面积是 $25\times 25\text{ }\mu\text{m}^2$, 探测波段为 $0.9\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$, 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 Au/Zn, n 电极 Au/Ge, 然后通过钢柱与读出电路相连。

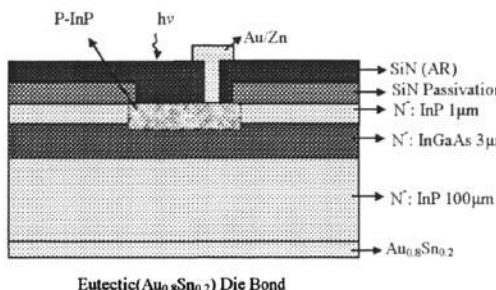


图 1.7 正照射 InGaAs 探测器结构
Fig. 1.7 Cross-section of a planar InGaAs/InP Photodiode for $0.8\sim 1.7\text{ }\mu\text{m}$ response

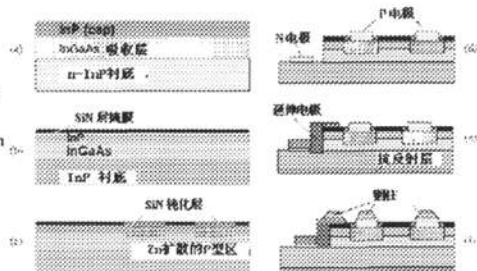


图 1.8 背面照射 InGaAs 阵列探测器的制备工艺
Fig. 1.8 Fabrication processes of backside illuminated InGaAs detector

1.5.2.3 不同衬底结构的探测器

(a) InP 衬底的 InGaAs 探测器

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 截止波长为 $1.7\text{ }\mu\text{m}$, 正好可以覆盖光纤通讯常用的波长, 而且它和 InP 材料可以做到完全晶格匹配, 因此可以在 InP 衬底上生长出质量很高的外延层, 制备出高质量的器件。在光纤通讯需求的推动下, InGaAs 红外探测器研究取得很大进展, 技术日益成熟, 由

单元器件已经发展到线阵列器件, 二维面阵器件。

(b) GaAs 衬底的 InGaAs 探测器

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^[46]。为了增大 GaAs 衬底上的 InGaAs 的铟组分, 要求超晶格缓冲层缓解释放更多的应变, 因此带来很大的挑战。现在 Joachim John 等已经在 GaAs 衬底上生长出 In 含量在 75~80% 之间的 InGaAs 的 256 元、512 元线列和 320×256 的焦平面短红外探测器, 探测波长为 1.7-2.5 μm , 其结构如图 1.9 所示^[47]。

$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 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 结结构。为了得到更好的欧姆接触, 在顶层生长一层高掺杂的 n^+ 层, 再生长 TiW/Au 电极, 最后通过铟柱与 CMOS 读出电路相连接。在无抗反射层的情况下, $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ 焦平面的探测率为 $5 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。



图 1.9 GaAs 衬底 InGaAs 探测器
Fig.1.9 InGaAs detector on GaAs substrate

(c) Si 衬底的 InGaAs 探测器

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

Abhay M. Joshi 等设计并制备出 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 1~3 μm ^[48]。在室温下, 光敏元面积为 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ 和 $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ 时, R_0A 分别为 $40 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $45 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。B. F. Levine 和 Alexandre Pauchard 分别报道了光敏元直径为 20 μm 的 Si 基 InGaAs p-i-n 探测器。B. F. Levine 制备的器件, 在 -10 V 偏压下, 暗电流低至 180 pA, 3 dB 带宽为 20 GHz^[49]。Alexandre Pauchard 制备的器件, 在 -4 V 偏压下, 暗电流低至 38 pA, 3 dB 带宽大于 11 GHz^[50]。M. N. Naydenkov 等在外延 Si(001)片上, 低温生长了一层极薄的 InGaAs 层(2-20 nm), 根据他们的预计, 用这种材料制备的光电探测器, 其响应光谱随着 In/Ga 比的增加, 向长波长方向

移动；在 632.8 nm 处器件的响应率超过 1.5 A/W，并且在紫外波段有较高的外量子效率，要超过可见波段一个数量级^[51]。

1.5.2.4 延伸波长的探测器

(a) 向长波方向延伸的探测器

一般来说，InGaAs 探测器长波方向的截止波长为 1.68 μm ，但是在许多实际应用中，需要探测器的截止波长延长。比如探测农产品水分需要 1.9 μm 的探测器，“LIDAR”系统中需要 2.05 μm 的探测器。为了使 InGaAs 探测器的探测波段延伸到长波长范围，人们做了大量的工作^[52]。如果外延的 InGaAs 层与衬底的晶格不匹配，导致的应变会产生缺陷和位错，那么会使暗电流增加。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 10 nm。为了制造截止波长大于 1.7 μm 的探测器，铟组分要增加到 53% 以上，但是这需要采取缓解或释放应变的措施。

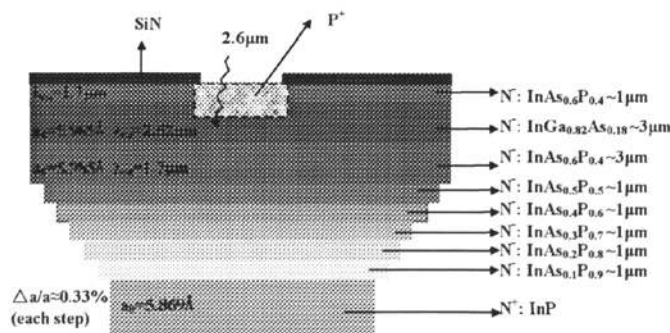


图 1.10 2.6 μm InGaAs 探测器的结构示意图

Fig. 1.10 Schematic cross-section of the 2.6 μm InGaAs photodiode

图 1.10 所示就是被成功用来缓解或释放应变的一种方法，在衬底与 InGaAs 有效区之间生长厚度约 1 μm 超晶格缓冲层来缓冲。薄层的晶格常数与衬底相同或者略微不同，在缓冲层以上生长的每个薄层都具有与 InGaAs 有效区比较接近的晶格常数，这样可使应变的位错产生于缓冲层，被超晶格之间突变的异质结捕获，从而降低有效区的缺陷密度。常用的缓冲层材料有 InAsP、InAlAs 和 InGaAs。利用超晶格缓冲层技术人们在 InP 衬底上生长了铟组分高达 82% 的 InGaAs 有效层，这样可制备截止波长大于 1.7 μm 的红外焦平面探测器。G. H. Olsen 等报道了量子效率达到 70% 的延伸波长 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($0.53 < x < 0.8$) p-i-n 探测器^[57]，在室温下，截至波长为 1.8 μm 器件的优值因子 R_0A 优于 $2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，截至波长为 2.1 μm 的器件优于 $900 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，截至波长为 2.6 μm 的器件优于 $15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

(b) 向短波方向延伸的探测器

一般来说，InGaAs 探测器光谱响应在 0.9 μm -1.7 μm ，而在实际应用中，人们希望 InGaAs

探测器不仅可用于短波红外波段成像, 而且还可以在可见甚至紫外波段成像。向短波方向延伸的 InGaAs 典型结构如图 1.11 所示。通过引入一种 InGaAs 或 InGaAsP 刻蚀阻挡层到外延基底中, 再用化学腐蚀液有选择性的湿法刻蚀掉 InP。此法不影响 InGaAs 探测器性能, 最终芯片的厚度大大减小。美国 Indigo 公司的 T. R. Hoelter 等报道了一种光谱响应延伸至 350 nm 的 InGaAs 探测器^[58], 器件响应率在短波方向得到有效增强。

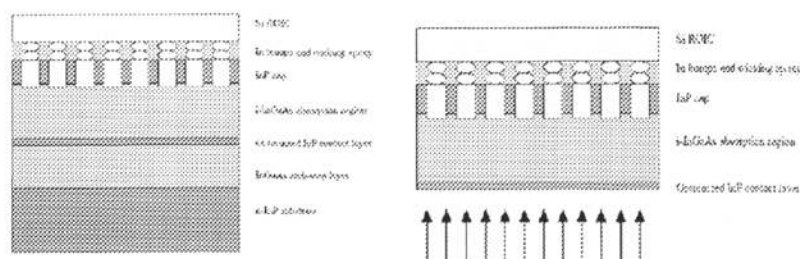


图 1.11 向短波方向延伸的 InGaAs 结构示意图

Fig. 1.11 Cross-sectional sketch extended short-wavelength response InGaAs detector

1.5.3 InGaAs 短波红外焦平面的研究现状

1.5.3.1 国外研究现状

国外在 InGaAs 红外焦平面方面的研究起步较早, 目前已经实现商业化, 主要的制备厂商和研究机构有美国的传感无限公司(已被 Goodrich 收购), EPITAXX, Indigo, Judson 和波音 Spectrolab 公司, 日本的滨松公司, 法国的 Thomson 和 Sofradir 公司, 比利时的 XenICs 以及俄罗斯的 Orion 和波兰的 Vigo system 等。上述公司在 InGaAs 红外焦平面的研发和生产领域拥有雄厚的实力, 推进了世界红外焦平面的研发水平。

(a) 美国传感无限公司

1993 年, M. J. Cohen 等报道了该公司研制的 128×128 焦平面器件^[41], 采用的是平面扩散工艺, 室温下, 器件的平均峰值探测率超过 $10^{13} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$; 在 230 K 温度下, 平均峰值探测率达到 $3.5 \times 10^{13} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。1999 年, M. J. Cohen 等报道了 320×240 元焦平面, 响应波长 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 光敏元为 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$, 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, 器件达到了更高的性能, 在 290 K 下平均探测率为 $10^{14} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 在 250 K 时为 $1.4 \times 10^{15} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ^{[59][60]}。在 1999 年和 2000 年, M. J. Cohen 报道了利用 InGaAs 320×240 红外焦平面进行成像的结果及其在商业和工业上的应用情况^{[61][62]}。

2000 年, 该公司的 M. H. Ettenberg 报道了 640×512 红外焦平面^[45]。2004 年, 该公司开发了用于夜视成像的 320×256 元 InGaAs 焦平面, 其单元尺寸为 $25 \times 25 \mu\text{m}^2$, 在 22°C 下, -500 mV

下暗电流仅为 120 fA ^[63]；同年，该公司的 S. Huang 等报道了集成了 320×256 元焦平面的商用微型短波红外相机，相机的体积小于 28 cm^3 ，重量小于 70 g ，功耗小于 1.3 W ^[64]。

2005 年，Tara. Martin 报道了向短波方向延伸的 640×512 红外焦平面，该器件在波长为 500 nm 处的量子效率 15% ， 850 nm 处的量子效率为 70% ， 1310 nm 处的量子效率为 85% ， 1550 nm 处的量子效率为 80% ，器件性能在可见光和短波红外波段达到了很高的水平^[65]。同年，Alan. Hoffman 等报道了规模为 1280×1024 和 1024×1024 元的 InGaAs 短波红外焦平面^[66]，响应波长为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ ，光敏元为 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ ，优值因子 R_0A 为 $1.5 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (265 K) 和 $8 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (280 K)，这是迄今为止所报道的最大规模的铟镓砷焦平面。同年，DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)为该公司投资 4500 万美元，用于研制超低噪声(室温下暗电流密度 $< 2 \text{ nA/cm}^2$) 的 1280×1024 元的 InGaAs 双色成像焦平面，可在无月光照射的情况下识别 100 米外的目标^{[67][68]}。2007 年，DARPA 又与该公司续约，资助其继续研究用于成像夜视系统的 InGaAs 焦平面^[69]。2008 年，该公司的 M. D. Enriquez 等报道了可响应 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段的低噪声 1280×1024 元焦平面，光敏元为 $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ ，有效像元大于 99% ，在 -100 mV 下， 0°C 时的暗电流为 3.51 fA ， 5°C 时为 5.96 fA ， 15°C 时为 17.7 fA ， 25°C 时为 52.5 fA ，在 35°C 时的暗电流也仅为 142 fA ，这表明焦平面具有很高的性能^[70]。



图 1.12 传感无限公司的部分探测器芯片和线列焦平面产品
Fig.1.12 InGaAs detector products of Sensors Unlimited, Inc.

美国的传感无限公司在 InGaAs 红外焦平面的研发和短波红外成像技术方面处于世界领先的地位，目前，该公司可以提供高性能的常规和向短波方向延伸 256 元、 512 元和 1024 元 InGaAs 线列焦平面和 128×128 元、 320×240 元、 640×512 元和 1280×1024 元面阵焦平面以及延伸至 $2.6 \mu\text{m}$ 的 256 元线列焦平面产品。图 1.12 为该公司生产的部分探测器芯片和线列焦平面产品。

(b) 美国 EPITAXX 公司

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。

1989 年，G.H.Olsen 采用氢化物汽相外延制作了应用于光谱仪中处理狭长光分布的 256

元 InGaAs 阵列。其中光敏面积为 $30\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$, 电极面积 $55\ \mu\text{m} \times 80\ \mu\text{m}$, 间隔距离 $50\ \mu\text{m}$ 。主要性能: $-5\ \text{V}$ 时, 暗电流为 $400\ \text{pA}$, 电容为 $0.96\ \text{pF}$, 响应率在 $1.3\ \mu\text{m}$ 为 $0.75\ \text{A/W}$, 在 $0.85\ \mu\text{m}$ 为 $0.14\ \text{A/W}$ ^[71]。同年, 他们还制备了响应波长达 $2.6\ \mu\text{m}$ 的 InGaAs 探测器^[57], 器件的基本性能: $-1\ \text{V}$ 时, 平均暗电流为 $0.9\ \mu\text{A}$, 电容为 $1.9\ \text{pF}$, $2.5\ \mu\text{m}$ 时响应率为 $1.0\ \text{A/W}$, 量子效率 70% , 平均量子效率为 50% 。

1990 年, G. H. Olsen 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^[72]。1991 年, G. H. Olsen 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^[52]。1992 年, EPITAXX 公司开始为欧洲空间局(ESA)研制 1024 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面^[73]。为了减小晶格失配位错, K. R. Linga 生长了 15 层缓冲层, 使相邻两层的晶格失配小于 0.13% ^[74]。器件在 $-10\ \text{mV}$ 偏置下, 平均暗电流为 $30\ \text{nA}$ (室温)。此后, EPITAXX 公司还进行了改进, 在 2001 年 Ruud W. M. Hoogeveen 介绍该焦平面最终应用结果时, 器件在 $150\ \text{K}$ 工作, $-2\ \text{mV}$ 下, 暗电流为 $20\sim 100\ \text{fA}$, 优值因子 R_0A 为 $2.5\sim 12.5 \times 10^6\ \Omega \cdot \text{cm}^2$, 达到了较高的性能^[75]。

(c) 美国 Indigo 公司

Indigo 公司是美国另一个研制 InGaAs 短波红外焦平面探测器的厂商。2002 年, 该公司的 Jeffrey Barton 等报道了用于成像和波分复用(DWDM)的焦平面, 面阵焦平面规模为 640×512 和 320×256 元, 线列焦平面为 512 和 1024 元, 响应波段为 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 。 320×256 元焦平面的像元大小为 $30 \times 30\ \mu\text{m}^2$, 640×512 元焦平面的像元大小为 $25 \times 25\ \mu\text{m}^2$, 可在室温到 $80\ \text{K}$ 的温度范围内工作, 在 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 波段的量子效率大于 90% , 响应非均匀性小于 5% , 有效像元大于 99.5% 。 512 元线列焦平面的像元大小为 $500 \times 25\ \mu\text{m}^2$, 1024 元线列焦平面的像元大小为 $500 \times 12.5\ \mu\text{m}^2$, 有效像元为 100% , 在 $0.9\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 波段的量子效率大于 90% , 工作温度为 $-20\ ^\circ\text{C} \sim 70\ ^\circ\text{C}$, 非线性度小于 2% 。此外, Jeffrey Barton 等还报道了该公司的三款 InGaAs 相机, 采用的是 640×512 或 320×256 元面阵焦平面^[76]。2003 年, T. R. Hoelter 等报道了响应波长延伸至 $350\ \text{nm}$ 的 320×256 元焦平面, 光敏元大小为 $30 \times 30\ \mu\text{m}^2$, 响应非均匀性为 2.6% , 有效像元达到了 99.8% , 平均响应率为 $0.35\ \text{A/W}$ ^[58]。

(d) 美国 Judson 公司

美国 Judson(Teledyne Judson Technologies)是可提供高性能红外探测器的大型研发公司, 目前该公司可以提供室温截止波长分别为 $1.7\ \mu\text{m}$ 、 $1.9\ \mu\text{m}$ 、 $2.2\ \mu\text{m}$ 、 $2.4\ \mu\text{m}$ 和 $2.6\ \mu\text{m}$ 的系列 128 元或 256 元 InGaAs 线列焦平面, 光敏元大小为 $50 \times 500\ \mu\text{m}^2$, 可室温或热电制冷下工作

2008 年, Herry Yuan 等报道了该公司红外探测器的研究进展^[78], 其中包括常规、方向延

伸和向长波方向延伸的 320×256 元 InGaAs 焦平面, 像元大小为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 。常规 InGaAs 焦平面的响应波段为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 采用的是 MOCVD 方法生长的外延材料、平面扩散工艺制备的, 器件结构和钢柱的扫描电镜照片分别如图 13(a)和图 13(b)所示。器件在 $1.35 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段的量子效率在 $80\% \sim 85\%$ 之间, 有效像元为 99.8% 。向短波方向延伸 InGaAs 焦平面的响应波段为 $0.4 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 在 $-65^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ 温度范围内, 器件在 $0.5 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 响应波段内的量子效率最低为 40% 。向长波方向延伸 InGaAs 焦平面的响应波段为 $1.4 \sim 2.6 \mu\text{m}$, 采用 InAsP 作为缓冲层和帽层, 器件的峰值量子效率优于 80% , 由于 InAsP 缓冲层的窗口效应, 当制冷至 -65°C 时, 响应波段变为 $1.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 。

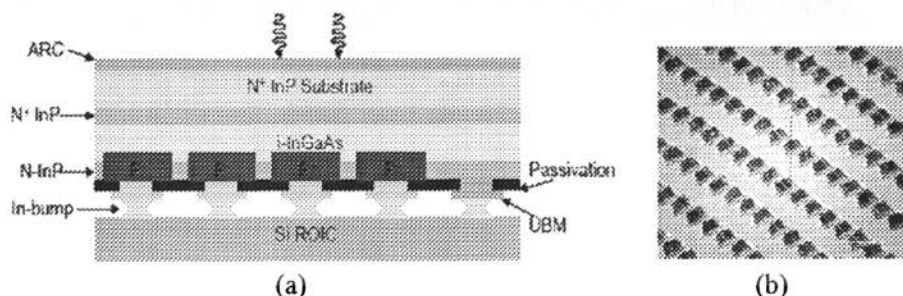


图 1.13 InGaAs 器件结构(a)和钢柱的扫描电镜照片(b)
Fig.1.13 Cross-section of $1.7\mu\text{m}$ InGaAs FPA structure(a) and SEM photo of InGaAs 2D array with In-bumps(b) at Judson

同年, Herry Yuan 等报道了大面积高速 InGaAs 单元器件^[79], 光敏元直径为 3.5 mm , 器件采用双耗尽层, 材料结构如图 1.14 所示。器件在 -40 V 下的电容为 100 pF , -15 V 下的暗电流为 10 nA (室温), 室温下 $1.0 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波段的量子效率在 $75\% \sim 80\%$ 之间, 并且器件有很好的线性度和空间均匀性, 可以满足高速应用的要求。

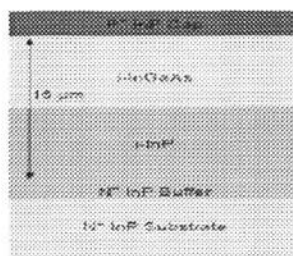


图 1.14 双耗尽层 InGaAs 探测器的材料结构
Fig.1.14 Dual-depletion region InGaAs p-i-n structure at Judson

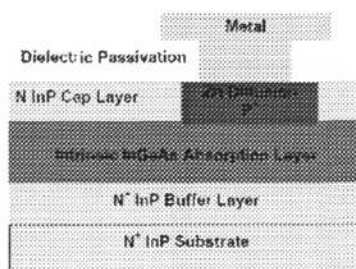


图 1.15 Spectrolab 的 InGaAs 探测器结构图
Fig.1.15 Structure of InGaAs photodiode at Spectrolab

(e) 美国波音 Spectrolab 公司

美国波音 Spectrolab 是一家生产太阳能电池、InGaAs p-i-n 和 APD 探测器和 Ge 探测器等

器件的大型研发、生产公司。2008 年, 该公司的 J. Boisvert 等报道了高量子效率、低电流的 1280×1024 元 InGaAs 焦平面, 光敏元大小为 $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ 。这项工作是在 DARPA 的 PCAR (Photon Counting Array) 项目下完成的。材料是在 2 英寸的 InP(100) 上、采用金属有机气相沉积(MOVPE)方法生长的, 器件结构如图 1.15 所示。器件在 280 K 温度下的暗电流密度低于 1 nA/cm^2 , $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的响应率为 1.1 A/W , 在 -100 mV 偏压下器件的电容为 50 fF ^[80]。

(f) 比利时 XenICs 公司

2001 年比利时 XenICs 公司的 S. Nemeth 与比利时 IMEC (Interuniversity Microelectronics Center) 合作报道了向长波方向延伸的 128 元线列 InGaAs 焦平面^[81], 光敏元大小为 $45 \times 500 \mu\text{m}^2$, 采用的是 GaAs 衬底。为了克服 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 与 GaAs 衬底之间的晶格失配, 生长了 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 厚的缓冲层。在 300 K 温度下截止波长约为 $2.5 \mu\text{m}$, 平均优值因子为 $7.4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 当制冷至 77 K 时优值因子为 $2.5 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。2002 年, 该小组报道了 320×256 元焦平面, 采用 GaAs 衬底, $5 \mu\text{m}$ 的 InAlAs 为缓冲层, 光敏元大小为 $25 \times 25 \mu\text{m}^2$, 响应波段在 $1.35 \mu\text{m} \sim 2.35 \mu\text{m}$ 之间, 峰值响应率为 0.68 A/W , 有效像元约为 97% ^[82]。2003 年, 该小组报道了 256 元和 512 元线列焦平面及 320×256 元面阵焦平面^[83], 器件的制备工艺与该小组以前的报道相同。在没有抗反射膜情况下的峰值响应为 0.6 A/W 。在 250 K 温度下, 器件的截止波长为 $2.3 \mu\text{m}$, 200 K 温度下, 器件的优值因子优于 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

目前, XenICs 的 128 元、256 元和 512 元线列焦平面以及 320×256 元焦平面已经商品化, 截止波长分别 $1.7 \mu\text{m}$ 、 $2.2 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$ 器件在室温下的探测率分别达到了 $7.5 \times 10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 、 $5 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 和 $8 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。另外, 据报道, XenICs 正在研发航天用的 InGaAs 相机, 采用的是 320×256 元焦平面, 用户分别是多伦多的约克大学和美国 NASA^[84]。此外, XenICs 还通过刻蚀外延晶片底面可以将 InGaAs 光探测器的视觉范围从红外扩展到可见光区域, 这种改进对 LED 着陆灯成像非常关键。之前由 Belgian 公司提供的标准红外成像仪, 可以用在飞行器上以增强其视觉系统、在黑夜中导航, 但由于 LED 的发射光谱较窄, 它们产生较少能让摄影仪能探测到的红外光。由于 InP 外延基底会吸收波长低于 900 nm 的光, 以前 XenICs 的探测器也不能探测到可见光和近红外光。在 Photonics West 会议上, XenICs 推出一种创新型 $400 \sim 1700 \text{ nm}$ 的 InGaAs 红外探测器, 可能解决 LED 技术在飞机跑道照明应用中出现的难题^[85]。为此 XenICs 找到了一种安全地除去 InP 基底的方法, 通过引入一种 InGaAsP 刻蚀阻挡层到外延基底中, 再用 HCl 湿法刻蚀有选择性的刻蚀掉 InP。此法不影响 InGaAs 探测器性能, 最终芯片的厚度从 $125 \mu\text{m}$ 减至 $5 \mu\text{m}$ 。

(g) 日本 Hamamatsu 公司

日本 Hamamatsu 是高性能非制冷红外光电探测器及其附件产品的领导设计者和制造商之一。据 Pedro Meledina 报道^[86]，该公司的 InGaAs 探测器可分为以下几个系列：1) 高性能低噪声近红外 p-i-n 探测器组件，光敏元直径在 0.04 mm~5 mm 之间响应波段为 0.9 μm ~1.7 μm ；2) 向长波方向延伸的探测器组件，长波截止波长可分别达到 1.9 μm 、2.1 μm 和 2.6 μm ；3) 向短波方向延伸的探测器组件，在 0.7 μm ~0.9 μm 波段的响应率得到增强，在 0.78 μm 响应波长处的响应率达到 0.25 A/W；4) 带有前置放大器的 p-i-n 探测器组件，是将探测器与跨阻抗放大器集成在一起，适合大容量、长距离光学通讯以及相关近红外探测；5) 线列成像探测器组件，是将线列探测器芯片、热电制冷器和 CMOS 读出电路耦合在一起，器件的响应波段为 0.9 μm ~1.7 μm 或 1.2 μm ~2.6 μm ，探测器规模有 128 元、256 元、512 元和 1024 元，光敏元一般为长方形，大小为 50×500 μm^2 或 25×500 μm^2 ，最近该公司推出了光敏元大小为 50×50 μm^2 的 256 元成像焦平面和光敏元大小为 25×25 μm^2 的 512 元线列成像焦平面。据报道，2003 年 9 月欧空局发射的探月卫星 SMART1 的有效载荷 SIR(SMART-1 Infrared Spectrometer)上采用了由该公司生产的 256×256 面阵延伸波长焦平面器件^[106]。

(h) 法国 Thomson 和 Sofradir 公司

法国 Thomson 公司根据 SPOT 系列卫星的发展要求，从 1985 年开始发展 InGaAs/InP 探测器阵列。1995 年，X. Hugon 报道了公司的研制进展^[87]，器件的光敏元大小为 30×30 μm^2 ，暗电流密度达到 20 nA/cm²，可获得超过 85% 的量子效率。该公司研制的 3000 元线列焦平面已成功应用于 SPOT4 卫星^{[88][89]}，主要应用于土壤和植被湿度的监测。

法国 Sofradir 是法国另外一家高性能红外探测器制造商。2003 年，该公司的报道了一种 320×256 元 InGaAs 焦平面组件^[90]，采用电容负反馈放大器形式的读出电路，封装好的组件的体积为 30.3×26.5×9 mm³，非常适合应用在小相机或光谱仪上。器件在 20 °C 温度下的截止波长为 1.69 μm ，65 °C 温度下的截止波长为 1.73 μm 。在低于 60 °C 下器件的暗电流非常低，焦平面的有效像元大于 99%。

1.5.3.2 国内现状

国内也有许多研究机构从事 InGaAs 探测器的研究工作，例如中科院的半导体所、上海冶金所，重庆光电技术研究所，武汉电信器件公司等，但他们研究的探测器主要应用于光纤通讯，重点方向是提高器件的带宽和速度。上海冶金所的刘家洲等^[91]采用气态分子束外延 (GSMBE) 方法研制的 In_{0.53}Ga_{0.47}As PIN 光电探测器，通过在器件结构中引入宽禁带 InP 窗口层和聚酰亚胺钝化工艺，减小了暗电流，提高了器件性能，室温下，在 -5 V 时，暗电流为 640

pA, 黑体探测率为 $10^9 \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。莫才平等采用 InP/InGaAs/InP 双异质结结构研制了对人眼安全的 $1.54\sim 1.57 \mu\text{m}$ InGaAs 四象限探测器^[92], 器件响应度达到 0.90 A/W , 响应时间为 2 ns , 暗电流低于 5 nA , 象限串扰达到 1% (象限间隔 $20 \mu\text{m}$), 象限均匀性为 4% 。在遥感应用方面, 上海技术物理研究所进行了一些探索性的研究工作, 先后研制成功 128×1 和 256×1 InGaAs 红外焦平面, 并成功实现了扫描成像, 图像清晰^[93]。虽然国内在 InGaAs 红外焦平面的研究方面取得了一些进展, 但与国外的差距还较大。

1.5.4 InGaAs 短波红外焦平面的发展趋势

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。国内外很多公司和研究机构正着眼于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) 必须是极低成本的微型传感器, 甚至是一次性应用的传感器。

受到同样的驱动力, 今后InGaAs短波红外焦平面探测器的发展主要集中在以下三个方面:

(1)焦平面、大阵列。采用焦平面器件, 可以更好地满足系统的要求, 同时也有利于简化系统结构、降低成本。在向更大规模的凝视型焦平面、多色探测器发展的历程中, 长波器件已达到 640×480 元的规模, 中、短波器件达到了 2048×2048 的规模。美国Rockwell公司 4096×4096 元的短波红外HgCdTe混合集成FPA^[96], 其由四个 2048×2048 元焦平面拼接而成, 是当前元数最多的红外焦平面。今后, 为显著提高系统的性能, InGaAs红外成像探测器将向更大面阵和甚长线列的大阵列方向发展。

(2)集成化。集成化的红外成像探测器有利于简化结构, 能充分利用半导体材料制备技术的最新成果, 便于器件焦平面化。美国喷气推进实验室(JPL)在研制单片集成InGaAs焦平面阵列方面取得了很大的成功。早在1992年他们成功研制了单片集成的InGaAs/InP p-i-n结型场效应晶体管(JFET)焦平面阵列。1997年又研制成功了用于 $(0.5\sim 2.5 \mu\text{m})$ 成像的 16×16 元单片式InGaAs有源像素传感器短波红外焦平面阵列。至今美国JPL已经研制出了具有CMOS多路传输器读出结构的硅基 1×512 元和 1×1024 元InGaAs焦平面阵列^[97]。

(3)多色化。随着材料、器件和系统技术的进步,红外成像探测器将向更多的光谱波段发展,既包括拓宽光谱波段,也包括将光谱波段划分成更为细致的波段,以获得目标的“彩色”图像,获取更丰富、更精确、更可靠的目标信息。对于InGaAs焦平面而言,多色也是其重要的发展方向。

1994年Dong-Su Kim等制备了一种可响应三个波长的铟镓砷焦平面器件^[98],这种器件包含具有三种不同In组分的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 吸收层,响应截止波长分别为 $1.65\text{ }\mu\text{m}(\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As})$ 、 $2.07\text{ }\mu\text{m}(\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As})$ 和 $2.64\text{ }\mu\text{m}(\text{In}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As})$,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%,暗电流密度介于 0.01 与 10 mA/cm^2 之间,这些结果与独立器件的结果相近。

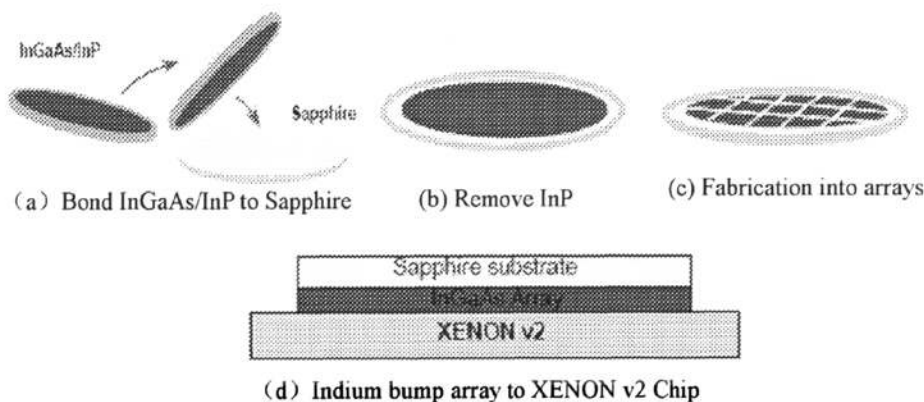


图1.16 InGaAs焦平面制备的衬底转移技术流程图

Fig.1.16 Epitaxial transfer of InGaAs to sapphire substrate for VIS-NIR FPAs

目前,向短波方向延伸的InGaAs焦平面成为研究的热点。美国无限传感公司和美国Indigo公司已有向短波方向延伸的InGaAs焦平面产品,一般采取的技术路线是将InP帽层或InP衬底减薄。最近,为了使器件响应波长向短波方向延伸,美国导弹防御局的P. Esfandiari等报道了一种衬底转移技术^[99],图1.16为技术流程图,首先将InGaAs/InP材料贴在宝石片上,然后去除衬底,再采用常规工艺制备芯片,最后倒装互连,完成焦平面的制备。这种制备技术可提供可靠的衬底,并且由于宝石衬底在可见光和近红外波段是透明的,不会影响器件的性能。

1.6 InGaAs 短波红外焦平面的应用

在军事应用方面,非制冷的InGaAs焦平面可以在室温下正常工作并具有很高的性能,可以在恶劣天气下成像,并在一定程度上可以识别伪装,因此在军事上被广泛用于红外侦察、红外夜视以及红外制导等方面。美国的传感器无限公司,在DARPA和NVESD(Night Vision Electronic Sensors Directorate)支持下正在加速发展非致冷的大面阵InGaAs红外焦平面阵列和短波成像技术,主要用在夜间微光下成像,能获得丰富的空间维和光谱维信息,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。2006 年, 该公司获得美国军方 75 万美元的合同, 用于研发 1920×1080 元焦平面, 采用 InP 衬底去除技术, 使器件可以响应可见光波段, 同时光敏元的大小也由常规的 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 缩小为 $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ ^[100]。

在民用方面, 短波红外(SWIR)波段在解决测量、监测以及过程监控中所面临的成像问题方面潜力巨大。由于 InGaAs 焦平面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, 可以方便地在常温下成像, 因此 InGaAs 短波红外焦平面在警务、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、半导体晶片检测和 underwater 探测等民用方面有非常大的应用空间^[101]。

“轻便、灵敏、廉价”是未来空间使用的要求。上世纪八十年代中期起, 世界各国纷纷开始致力于空间遥感用短波红外 InGaAs 阵列的研究。目前, 国际上由 InGaAs 红外焦平面制成的各种红外光谱仪已逐渐被应用于遥感卫星上。

国际上 InGaAs 短波红外焦平面的首次空间遥感应用是在法国的 SPOT4 卫星上。该焦平面是由法国的 Thomson 研制的, 器件规模为 3000 元, 是由 10 个 300 元 InGaAs 小线列拼接而成, 响应波长为 $1.55 \sim 1.70 \mu\text{m}$, 主要应用于农业和湿度的监测。探测器像元面积为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$, 探测率为 $6 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, 平均噪声为 0.3 mV, 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%, 器件在卫星上的工作温度为 273 K。2002 年发射的 SPOT5 卫星上同样有两个 3000 元 InGaAs/InP 短波红外焦平面探测器, 响应波段为 $1.58 \mu\text{m} \sim 1.75 \mu\text{m}$ ^[102]。

美国的 NASA 在 2000 年发射的 EO-1 环境观测卫星^[103], 其核心部件 Leisa 大气校正仪 LAC 上装有 3 个 256×256 元 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 焦平面, 其像元尺寸为 $40 \mu\text{m}$, 工作波段位于 $0.89 \mu\text{m} \sim 1.60 \mu\text{m}$, 在热电制冷的 275 K 下工作。此外, 美国的冰雪探测环境卫星 POSE、大气层检测卫星 TIMED、水星探测卫星 MESSENGER(Discovery 8)和气象卫星 NOAA-18 上都采用了 InGaAs 焦平面。

2002 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)采用了延伸波长 InGaAs 焦平面器件, 这是延伸波长 InGaAs 焦平面在空间遥感领域的首次应用^[104]。2001 年, Q. L. Kleipool 等报道了 SCIAMACHY 上延伸波长 InGaAs 焦平面的运行情况, 由于空间辐照, 延伸波长的器件每年大约有 50 个像元失效, 这说明器件的可靠性还有待于进一步研究和加强^[105]。2003 年 9 月发射的欧空局探月卫星 SMART1 的有效载荷 SIR 上采用了 256×256 面阵延伸波长焦平面器件, 响应波段 $0.94 \mu\text{m} \sim 2.55 \mu\text{m}$, 采用二级热电制冷, 在 -25°C 温度下, 暗电流 $I_d \leq 4000 \text{ pA}$ ^[106]。

2002年日本发射的对地探测卫星ADEOS2上采用了两个InGaAs焦平面,在200 K温度下工作;2007年计划发射的月球观测卫星SELENE上采用了非制冷的 320×240 元的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 面阵焦平面^[107],像元面积为 $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ 。

印度在1995年发射的IRS-1C卫星有一个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,由七个300元的光伏型InGaAs线列组成,工作在 -10°C ^[108]。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 $1.55 \mu\text{m} \sim 1.70 \mu\text{m}$,相邻光敏元呈品字型排列,工作温度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ^[109]。

国内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在光纤通讯领域,还没有可用于空间遥感的InGaAs探测器。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。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。InGaAs焦平面探测器在我国空间遥感将有非常大的应用前景。

1.7 本论文的研究目的和主要内容

本论文结合本研究室的工程任务和研究课题,针对空间遥感用短波红外InGaAs探测器的要求,以制备高性能的台面型InGaAs线列焦平面探测器为核心,围绕器件制备中的关键技术,在本研究室现有研究成果的基础上,对器件制备过程中出现的实际问题进行了深入研究,优化并发展了器件制备的若干关键工艺,期望为InGaAs焦平面的发展和应用提供有益的参考。本论文的第一章回顾了红外技术的发展和應用,介绍了几种常见的光子型探测器和InGaAs短波红外焦平面探测器的类型,概述了短波红外及InGaAs焦平面的发展现状、发展趋势和应用价值;第二章深入研究了InGaAs台面探测器的钝化技术,探索了合适的钝化方式和钝化膜;第三章设计了一种InGaAs低台面结构的探测器芯片;第四章报道了 256×1 正照射和 512×1 背照射台面InGaAs焦平面探测器的性能;第五章初步分析了部分光敏芯片I-V曲线中出现的负阻现象,并提出了一个能带模型来解释负阻现象;第六章研究了Au/Pt/Ti与p-InP及Au/Zn/Pt/Au与p-InP的接触特性;最后一章是总结和展望。

第二章 台面型 InGaAs 探测器的钝化技术研究

2.1 引言

许多半导体器件的特性都与半导体的表面性质有着密切的关系。在某些情况下,往往不是半导体的体内效应,而是其表面效应支配着半导体器件的特性^[11]。对于红外探测器件,尤其是台面型探测器而言,表面性质往往是影响器件最终性能的关键因素。表面漏电对光伏器件性能有较大的影响,表面状况的好坏是器件噪声的重要来源,是引起多元器件串音的一个重要因素,同时表面复合速度的大小又决定了光导器件性能的优劣。因此,有效的钝化技术对于改善器件性能,提高器件的稳定性,有着十分重要的意义,本章即对 InGaAs 台面型探测器的钝化技术进行了深入研究。

表面钝化问题一直是 III-V 族半导体工艺的难题之一,高的表面态密度和表面复合速率一直制约着 III-V 族半导体器件的发展,是一个迫切需要解决的问题。钝化的目的主要是保护表面不被外界污染和损伤,同时减少表面态密度、表面复合速率和侧面漏电流,从而达到减小探测器的暗电流、提高器件探测率和长期稳定性的目的。

前期工作系统地研究了单层 SiN_x 、单层聚酰亚胺、硫化+单层聚酰亚胺、硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化、硫化+ In_2S_3 /聚酰亚胺双层钝化和 SiN_x /聚酰亚胺双层钝化,并对它们的钝化效果进行了比较,其中以硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化的效果最佳,但 InGaAs 焦平面响应的均匀性不好, 128×1 焦平面响应的非均匀性为 18.3%, 256×1 焦平面响应的非均匀性为达到了 19.3%。在实际应用中,一般要求焦平面的响应非均匀性小于 10%,这样才能得到高质量的图像。这是一个十分棘手的问题,急需优化和改善。初步分析了响应不均匀性产生的原因,认为其中包括光敏元面积的不均匀性,电路的中电容、增益和偏压的不均匀性,黑体光源的不均匀性等,但主要原因还是外延材料的不均匀性和钝化效果的好坏^{[93][112]}。

本章的研究目的是深入研究 InGaAs 台面探测器的钝化技术,探索合适的钝化方式和钝化膜,期望通过钝化方式和钝化膜的改进,在实现减小表面态密度、降低器件暗电流的基础上,期望能够改善器件的响应均匀性。

2.2 SiN_x 薄膜的退火效应研究

台面型 InGaAs 探测器的 p-n 结的侧面是暴露的,加上表面的 InP 的复合系数较大,使得表面漏电流和刻蚀后耗尽区侧面漏电流均较大,这就需要对器件光敏元的表面和耗尽区的侧面进行钝化,以有效地提高器件的电学性能,并在一定程度上提高器件的量子效率和信噪比。

SiN_x 薄膜作为一种重要的薄膜材料, 具有优良的光电性能、钝化性能、机械性能和对杂质离子的掩蔽能力, 是一种高效的器件表面钝化材料, 已被广泛应用在半导体工艺中。现在工业上和实验室中一般使用等离子增强化学气相沉积(PECVD)来生成 SiN_x 薄膜, 这是因为这种方法淀积温度低, 对多晶硅中少子寿命影响较小, 而且生产时能耗较低, 淀积速度较快, 生产能力高, 工艺重复性好, 淀积薄膜均匀, 薄膜缺陷密度较低。因此, 在本章中采用 SiN_x 薄膜作为 InGaAs 台面探测器的钝化膜。

目前, 对于 SiN_x 薄膜的研究, 大多集中在太阳能电池领域薄膜的制备工艺和成份分析上^[113], 对于退火效应的研究也大多集中在薄膜折射率和半导体少子寿命变化上^[116], 而对于退火前后薄膜在短波红外波段透射特性和表面形貌变化的研究较少。本节采用 PECVD 法在宝石片上生长了 SiN_x 薄膜, 利用透射光谱和原子力显微镜(AFM)研究了退火前后薄膜特性的变化; 在 InP 上生长了 SiN_x 薄膜, 并测试了退火前后薄膜和衬底之间的应力变化。

2.2.1 实验

实验衬底选用的是无序切割的宝石片衬底, 双面抛光, 常规清洗后放入 PECVD 腔体, 生长温度为 200 °C, 射频等离子体源的频率为 13.56 MHz, 功率为 62.7 W, SiH_4 流量为 40 mL/min, NH_3 流量为 800 mL/min, 生长 SiN_x 薄膜的厚度约为 220 nm。采用 MODEL RTP 500 型退火炉在高纯氮气中对样品进行退火处理, 透射光谱是在 Thermo Nicolet 傅立叶变换光谱仪上完成的, 用原子力显微镜(AFM)来观察样品的表面形貌。

2.2.2 透射特性

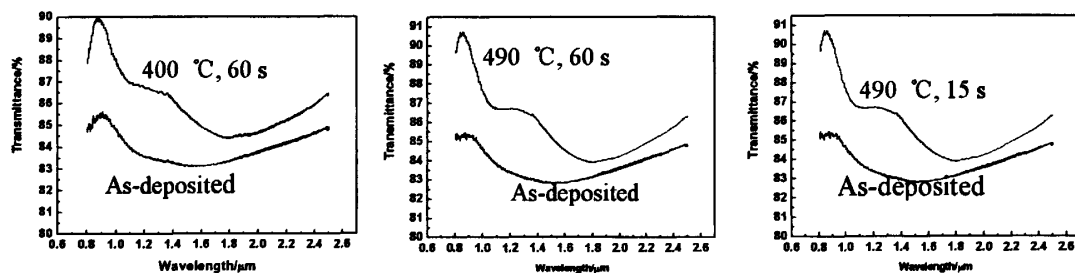


图 2.1 不同退火温度下 SiN_x 薄膜的透射光谱
Fig.2.1 Transmittance curve of SiN_x film at different temperature

为了研究退火对 SiN_x 薄膜透射特性的影响, 对三个样品分别进行了 400 °C 下 60 s 退火、490 °C 下 15 s 和 490 °C 下 60 s 退火处理。样品在 900 nm~2500 nm 波段的透射光谱如图 2.1 所示。由图 2.1 可以看出, 退火可明显改善 SiN_x 薄膜的透射特性, 这一点对于工作在短波红外波段的器件而言, 是非常重要的。分析认为 SiN_x 膜透射特性增强的可能原因是, 在退火过程中 H 会释出, 大大减弱了短波红外波段出现的 N-H 振动吸收峰, 而 H 释放后形成的硅悬挂键与 N 结合, 使得

薄膜的致密度增加,厚度减小,使得样品的透射得到增强。同时,薄膜中纳米硅镶嵌结构的部分结晶也会改善薄膜的透射特性^{[119][120]}。

2.2.3 AFM分析

表面粗糙度是衡量沉积薄膜质量的重要参数,高质量的薄膜要求沉积薄膜的表面均匀、平整。图2.2和图2.3分别为未退火和400 °C、60 s退火SiN_x薄膜的AFM照片,扫描面积均为10×10 μm²。从图中可以看出,PECVD沉积的薄膜退火后比退火前更为平整、均匀,未退火薄膜的均方根粗糙度(RMS)为16 nm,退火后薄膜的RMS减小为10 nm。这也是薄膜表面对光的散射减小,透射率增加的原因之一。

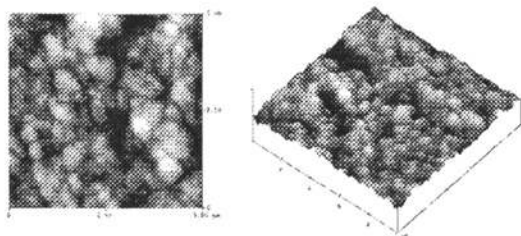


图 2.2 未退火 SiN_x 薄膜的 AFM 照片
Fig.2.2 AFM images of as-deposited SiN_x film

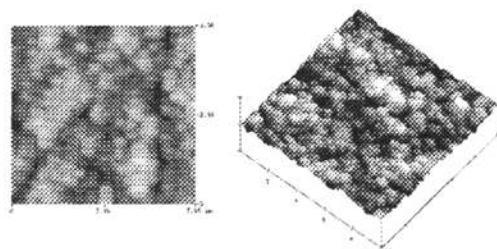


图 2.3 退火后 SiN_x 薄膜的 AFM 照片
Fig.2.3 AFM images of SiN_x film after annealing

2.2.4 SiN_x薄膜与InP衬底之间的应力分析

2.2.4.1 应力测试原理

在薄膜沉积过程中薄膜和衬底之间可能产生应力。薄膜的形变根据衬底的弯曲和压缩量确定。

利用应力测量选项, Ambios 公司的 XP2 型台阶仪可以通过测量由应力产生的弯曲或卷曲来确定沉积薄膜的应力水平。该程序通过计算轨迹的数据还原到圆来计算最小方根值得到样品的弯曲值。应力的计算方程式如下:

$$\sigma = [1/6R] [E/(1-\nu)] [t_s^2/t_f] \quad (2.1)$$

其中 $E/(1-\nu)$ 为衬底的弹性系数, E 为杨氏模量, ν 为泊松比, t_s 为衬底厚度 500 μm, t_f 为薄膜厚度 220 nm, R 为曲率半径, 测试中应力的单位为 dyn/cm², 并且 1 dyn/cm²=0.1 Pa。

该程序利用最小二乘法的算法计算曲率半径, 结果可以用以下的方程式来进行修正:

$$R = L^2/8B \quad (L \gg B) \quad (2.2)$$

这里 B 为弦间距(扫描的弯曲轨迹与弦的最大间距), L 为弦长(扫描长度)。

2.2.4.2 结果分析

实验衬底采用的是 p-InP(100)体材料, 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。在衬底上淀积 220 nm 的 SiN_x 薄膜, 工艺条件与上文相同。对于 InP(100)而言, 弹性系数 $E/(1-\nu)$ 为 95.5 GPa, 杨氏模

量 E 为 $6.11 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$ ，泊松比 ν 为 0.36，衬底厚度 t_s 为 $500 \mu\text{m}$ ，薄膜厚度 t_f 为 220 nm 。研究了两种不同退火条件样品的应力变化，样品 1 退火条件为 400°C ， 60 s ，试验结果如表 1 所示；样品 2 的退火条件为 490°C ， 15 s ，试验结果如表 2 所示。退火前后， SiN_x/InP 界面之间的应力均为张应力^[121]，退火后界面之间的应力明显降低，说明退火很好地改善了界面之间的应力。

表 2.1 样品 1 退火前后的应力变化表
Table 2.1 Variation of Stresses between SiN_x and InP substrate before and after annealing at 400°C for 60 s

样品 1	Unit: MPa	Stress Type	Average Stress	Center Stress
	退火前	Tensile	857.6 dyn/cm^2	735.4 dyn/cm^2
	400°C ， 60 s 退火	Tensile	99.8 dyn/cm^2	337.2 dyn/cm^2

表 2.2 样品 2 退火前后的应力变化表
Table 2.2 Variation of Stresses between SiN_x and InP substrate before and after annealing at 490°C for 15 s

样品 2	Unit: MPa	Stress Type	Average Stress	Center Stress
	退火前	Tensile	898.6 dyn/cm^2	2272.5 dyn/cm^2
	490°C ， 15 s 退火	Tensile	553.9 dyn/cm^2	672.3 dyn/cm^2

2. 3 $\text{Au}/\text{SiN}_x/\text{InP}$ MIS 器件的制备与性能测试

InP 系列 III-V 族化合物半导体是红外传感器中的重要材料，其在航天遥感领域中具有广泛的应用，然而其表面钝化是半导体工艺的难题之一。1978 年，Sandroff 等发现硫化物的水溶液可以有效去除 III-V 族半导体材料表面本征氧化层并能将其活性表面钝化^[122]，硫化成为 III-V 族半导体表面钝化技术中的主要研究对象，并且发展了多种硫化方法^[123]。硫化后的 III-V 族半导体表面性能不稳定，很容易被氧化而导致表面性能变差，这就需要在材料表面淀积能同时起到增透作用的钝化层。氮化硅薄膜具有优良的光电性能、钝化性能、机械性能和对杂质离子的掩蔽能力，在半导体工艺中应用广泛。

R. Iyer 等研究了不同硫化氨溶液的钝化效果，发现加入单质硫的硫化铵溶液对 InP 有很好的钝化效果，并且重复性好^[127]；Kapila 等研究了干法 H_2S 钝化的 SiN_x/InP 的界面特性，发现 H_2S 对 InP 表面有较好的钝化效果^[123]；庄春泉等在 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 硫化后的 n-InP 衬底上热蒸发 ZnS 薄膜制得 $\text{Au}/\text{ZnS}/\text{InP}$ MIS 器件，测得最低表面态密度约为 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ ^[128]；W. D. Chen 等利用光致发光谱技术对硫化后的 InP 表面进行了分析，发现利用 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 处理 InP 表面后，进行快速热退火可实现对 InP 表面的有效钝化，退火增强了 S-In 键但对 S-P 键的增强效果不明显^[129]；D. N. Gnoth 等比较了 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 和 S_2Cl_2 对 InP 和 GaAs 的钝化效果，发现 S 和 III 族元素结合的比较紧密^[130]。但是对于 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 硫化后，利用 PECVD 方法生长的 SiN_x 与 InP 界面电学特性的研究报道较

少。本节在硫化的基础上,制备了 SiN_x/InP 结构的MIS器件,利用I-V、C-V和AES测试等深入分析了 SiN_x 钝化膜对InP的钝化机理。

2.3.1 实验

实验所用的材料是n型InP晶片,载流子浓度约为 $(1-3) \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (Hall测试结果),厚度为 $350 \mu\text{m}$,对样品进行常规清洗后,采用S含量为8%的 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 溶液对样品硫化30分钟,然后用去离子水清洗,去除表面残余的S原子,氮气吹干后,立即用PECVD的方法沉积220 nm的 SiN_x 薄膜,沉积条件与2.3节中相同。然后将样品解理为两片,其中一片未进行退火,为N1;另一片进行了 400°C ,60 s快速热退火处理,记为N2。采用HF酸缓冲液腐蚀出欧姆接触图形,然后将样品放入离子束溅射系统淀积In/Au作为欧姆接触电极,浮胶后再光刻并淀积Au作为栅极电极,制成金属-绝缘层-半导体(MIS)器件,栅极直径为 $400 \mu\text{m}$ 。采用Keithley236源测量单元测试器件的I-V曲线,采用HP4195A多频LCR测量仪测量C-V曲线,在扫描速度为 200 mV/s 下,得到了不同频率的C-V曲线。利用俄歇电子能谱PHI-700 AES扫描系统测试了 SiN_x/InP 结构纵向的元素分布图,溅射速率为 20 nm/min 。

2.3.2 结果与讨论

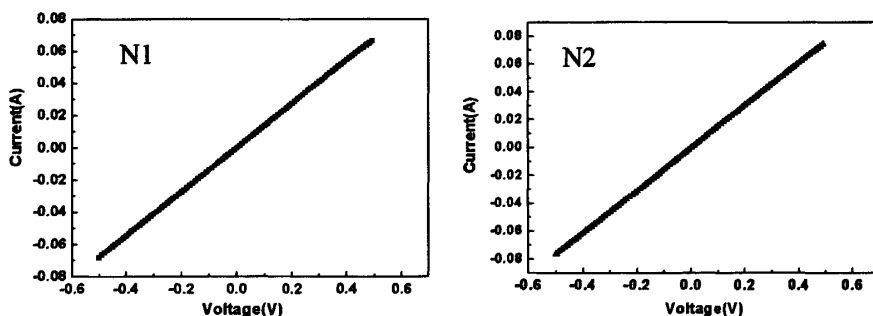


图2.4 In/Au和n-InP的欧姆接触性能
Fig.2.4 The ohmic contact of In/Au to n-InP

MIS器件要求欧姆接触电极要具有极好的性能,因此首先采用伏安特性表征了欧姆接触电极的性能。图2.4表明In/Au所形成的欧姆接触具有很好的性能,接触电阻约为 7Ω 。

好的介质膜性能是取得好的钝化效果的前提之一,采用I-V测试评价 SiN_x 介质膜的性能,在-5 V到5 V范围内对MIS结构进行扫描得到I-V曲线,如图2.5所示,未退火的样品在

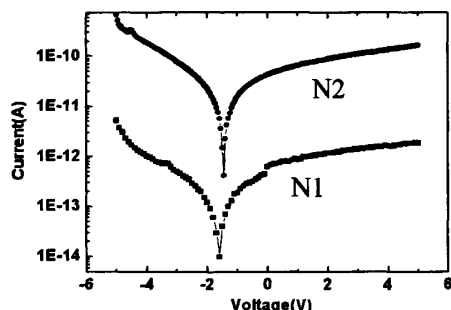


图 2.5 MIS 器件的 I-V 曲线
Fig.2.5 I-V characteristics of MIS diodes

零偏压下的电流为 6.2×10^{-13} A，在 5 V 时的电流为 1.86×10^{-12} A；对于 400 °C 退火的样品，零偏压下的电流为 4.3×10^{-11} A，在 5 V 时的电流为 1.66×10^{-10} A。退火后 SiN_x 薄膜的绝缘特性有所降低，但薄膜仍具有很好的绝缘性能。

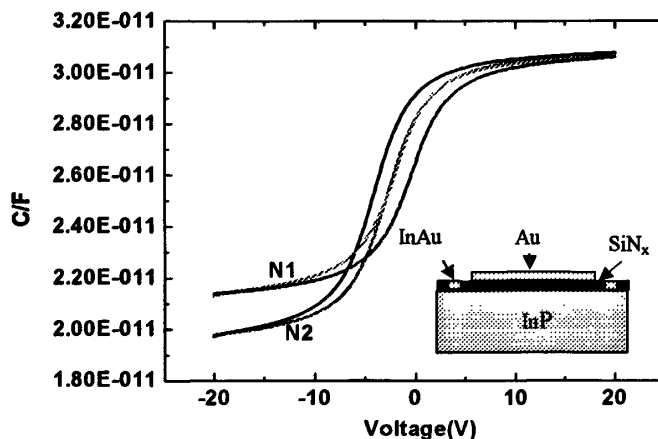


图 2.6 高频下 N1 和 N2 MIS 器件的 C-V 特性
Fig.2.6 C-V characteristics of MIS diodes at high frequency

图2.6为高频下样品的双扫描结果。由高频下的双扫描结果可以看出，退火和未退火样品的C-V特性均存在滞后效应。这是由 SiN_x 与InP界面附近的慢界面陷阱引起的。当从正偏压向左(负电压方向)扫描时，慢界面陷阱中的正电荷还很少，所以曲线下降，随着偏压向负电压方向移动，则半导体的表面电势愈负，能带愈向上弯曲；费米能级相对于陷阱能级(界面附近的)向下移动，则慢界面态中的正电荷密度就会增大。当扫描电压又向正电压(向右)移动时，陷阱能级中的正电荷来不及减少，仍对应于正电荷较多的情况，故C-V特性比原来向左偏移，所以形成了滞后现象。从图中还可以看出，退火后样品的C-V曲线变的细长，说明退火后，绝缘层表面固定电荷和界面态密度有所降低。从C-V曲线可推算未退火和退火样品的绝缘层电容分别为30.6 pF和30.7 pF，由 $C_i = \epsilon_i S/d$ 可得1 MHz下 SiN_x 薄膜的介电常数均为5.5左右，这说明400 °C，60 s退火处理基本上未改变 SiN_x 薄膜的介电常数。

图 2.7 为 1 MHz 下未退火样品的 $1/C^2$ - V_g 曲线。从图中可以看出，在耗尽区内 $1/C^2$ - V_g 有很好的线性度，拟合得到 $d(1/C^2)/dV \approx 1.27 \times 10^{20}$ ，表明该频率下测得的 C-V 曲线已呈高频特性。由公式 $d(1/C^2)/dV = 2/(A^2 q N_d \epsilon_s)$ [131]，其中 A 为栅电极的面积， N_d 为半导体的载流子浓度， ϵ_s 为半导体的介电常数，可以得到 $N_d \approx 5.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，与 Hall 测试结果符合的较好。

由表面固定电荷决定的表面势垒是影响器件性能的重要因素之一，光伏器件总是需要尽可能低的表面势垒，即较小的表面固定电荷密度。根据公式 [132]

$$N_f = (V_{FB} - W_{ms}) \cdot C_i / q \quad (2.3)$$

其中 W_{ms} 为 InP 的功函数(4.49 eV)与接触金属 Au 的功函数(4.8 eV)之差, V_{FB} 为平带电压, C_i 为绝缘层的高频电容。经计算可得到未退火和退火条件下表面固定电荷密度分别为 $-2.23 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 和 $-1.96 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, 退火有利于减小表面固定电荷密度, 实验结果表明采用 PECVD 方法制备的 SiN_x 薄膜在一定程度上能够减小 InP 系列红外传感器的表面势垒。

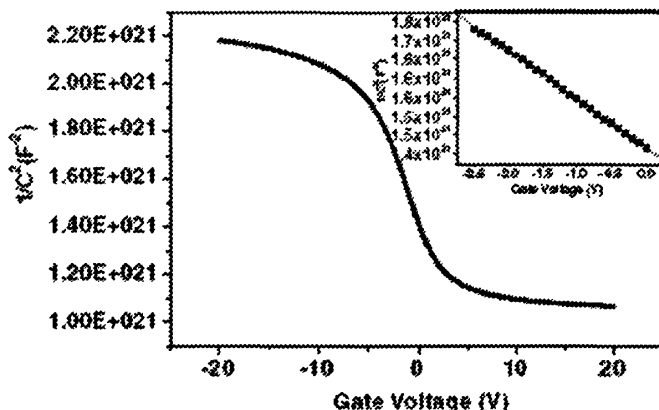


图 2.7 1 MHz 下样品 N1 的 $1/C^2-V_g$ 曲线(插图为耗尽区内 C^2-V 曲线及其拟合曲线)

Fig.2.7 C^2-V curve of the unannealed sample at 1 MHz (the insert is fitted curve in the depletion mode)

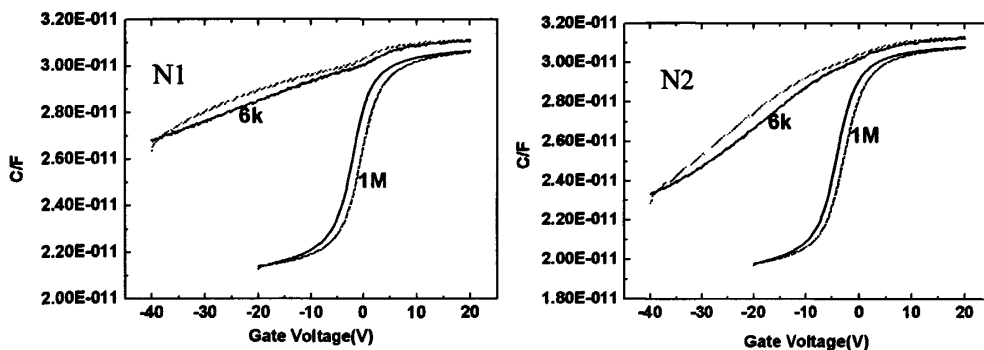


图 2.8 样品 N1 和 N2 在 6 KHz 和 1 MHz 的频率下的双扫描 C-V 特性

Fig.2.8 C-V characteristics of MIS diodes at 6 kHz and 1 MHz

为了进一步的计算表面态密度, 利用高低频法测试 MIS 器件的 C-V 特性, 图 2.8 为未退火样品 N1 和退火样品 N2 在 6 kHz 和 1 MHz 的频率下的双扫描 C-V 测试结果, 表面态密度可由下式计算^[133]:

$$N_{ss} = \frac{1}{qS} \left(\frac{C_{lf}}{1 - C_{lf}/C_i} - \frac{C_{hf}}{1 - C_{hf}/C_i} \right) \quad (2.4)$$

式中的 C_{hf} , C_{lf} 分别为在高频和低频时的电容。根据公式 2.4, 未退火条件和退火条件下最小表面态密度分别为 $1.75 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ 和 $7.41 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$, 即退火有效降低了表面态密度。从

理论上来看, 采用高低频法计算态密度的过程中低频只到 6 kHz, 并没有低到所有慢态都可以响应的频段, 因此计算得到的态密度与实际的态密度有一定的误差, 但这样计算仍能反映退火的效果。图 2.9 为 SiN_x/InP 界面各元素的 AES 纵向分布图, 可以看出, 退火后 Si、N、In 和 P 有明显的界面迁移, 认为这是表面固定电荷密度和表面态密度减小的原因。

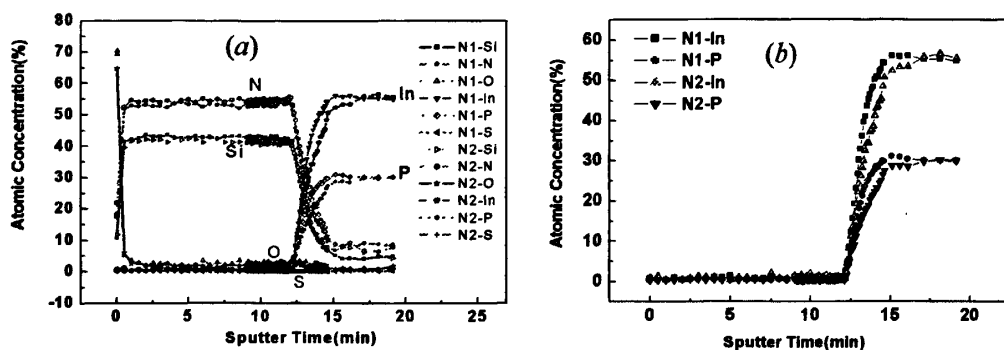


图 2.9 (a)元素的纵向分布图和(b)P 与 In 元素的深度分布
Fig.2.9 (a) Depth profile of several atoms by the AES measurement and
(b) depth profiles of P and In.

2.3.3 小结

本节采用 MIS 器件结构研究了 SiN_x 介质膜对 n 型 InP 的钝化机理。研究结果表明, SiN_x 薄膜具有很好绝缘性能, 退火的引入基本未改变 SiN_x 薄膜的介电常数, 但有利于减小表面固定电荷密度; 退火后表面固定电荷密度和最小表面态密度分别为 $-1.96 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 和 $7.41 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$; 硫化后 SiN_x/InP 结构界面表面固定电荷密度和最小表面态密度减小是由于元素的界面迁移造成的。这些结果表明采用 PECVD 方法制备的 SiN_x 薄膜有利于减小 InP/InGaAs/InP 短波红外传感器的表面势垒。

2.4 Au/SiN_x/InGaAs MIS 器件的制备与性能测试

InGaAs 在室温下具有很高的电子迁移率, 同时禁带宽度又与光通信使用的长波长相匹配, 因此其在制作高速数字、模拟、微波、光电等器件和大规模集成电路, 以及电荷耦合器件方面有着广泛的应用。但是 InGaAs 具有较高的表面态密度, 它们对载流子起着散射中心和非辐射复合中心的作用, 并引起费米能级钉扎, 会严重影响器件的电学和光学性质, 因此需要对表面进行钝化以控制表面态。

S. Suzuki 等采用在 HF 处理后的 InGaAs 表面利用 MBE 方法生长 Si 界面控制膜的办法, 有效的降低了界面态密度^[134]; A. Piccirillo 等利用 C-V 测试和电子回旋共振方法研究了 $\text{SiN}_x/\text{InGaAs}$ 界面态问题, 发现了两个杂质能级^[135]; Chih-Cheng Lu 等利用 MIS 结构研究了 $\text{SiN}_x/\text{InGaAs}$ 的电学特性, 发现退火可提高其电学性能^[136]。但是对于硫化后 InGaAs 的表面特

性以及硫化后 $\text{SiN}_x/\text{InGaAs}$ 界面特性的研究较少。本文首先利用 XPS 分析了未处理和硫化处理后 InGaAs 的表面性能, 然后利用硫化后的 InGaAs 材料制作了 $\text{SiN}_x/\text{InGaAs}$ MIS 结构, 研究了 $\text{SiN}_x/\text{InGaAs}$ 界面特性。

2.4.1 实验

实验所用的材料是用 MBE 方法生长的 InGaAs 外延材料, 衬底为半绝缘 InP, 厚度为 350 μm 。InGaAs 外延层为非故意掺杂, 载流子浓度约为 10^{16} cm^{-3} , 厚度为 2 μm 。首先对材料进行化学清洗, 依次用三氯甲烷、乙醚、丙酮、无水乙醇清洗, 然后用去离子水清洗干净, 用高纯氮气吹干后直接放入 XPS 样品室进行测试。测试完成后硫化, 硫化所需的 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 溶液是常规的含 S 量为 8% 的黄色硫化物, 将样品放入 60 $^\circ\text{C}$ 恒温的 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液 30 分钟, 然后用去离子水冲洗样品严格清洗, 高纯氮气吹干后再次放入 XPS 样品室进行测试。

在 InGaAs MIS 器件的制备工艺引入硫化处理, 以去除表面的自然氧化层, 减小表面态密度。硫化后的样品立即放入 PECVD 腔体沉积 200 nm 的 SiN_x 。沉积后, 一片样品不进行退火处理, 记为 S1; 另外一片进行 400 $^\circ\text{C}$, 60 s 快速热退火处理, 记为 S2。然后对样品进行光刻, 利用 50 $^\circ\text{C}$ 的 $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O}=6:3:10$ 的 HF 缓冲溶液腐蚀出欧姆接触图形, 再将样品放入电子束蒸发真空腔体淀积 20/30/300 nm 的 Ti/Pt/Au 作为欧姆接触电极。淀积好欧姆接触电极后浮胶, 然后光刻直径为 400 μm 栅电极图形, 长栅极 Au。

XPS 测试仪器为美国 PHI 公司的 PHI5000C ESCA System; 采用条件为铝/镁靶, 高压 14.0 kV, 功率 250 W, 真空优于 1×10^{-8} Torr。采用 Keithley236 源测量单元测试器件的 I-V 曲线, 采用 HP4195A 多频 LCR 测量仪测量 C-V 曲线, 在扫描速度为 100 mV/s 下, 得到了不同频率的 C-V 曲线。

2.4.2 结果与讨论

2.4.2.1 硫化后 InGaAs 表面的 XPS 分析

InGaAs 表面态的产生与表面吸附物及表面所发生的化学反应有密切的关系, Brillson 等用 X 射线光电子能谱(XPS)对(100)晶向的 InGaAs 表面进行了研究^[137], 他们发现, 清洁的 InGaAs (100) 表面不存在费米能级钉扎, 禁带中不存在本征表面态, 表面能级的弯曲主要源于表面反应形成的组份, 与空气接触、氧气接触和金属接触三种情况下表面费米能级的位置都是不同的。自然状态下 InGaAs 表面的吸附物主要是氧, 同时表面会与氧发生化学反应生成氧化物。因此氧原子在 InGaAs 表面被吸附和表面被氧化是产生 InGaAs 表面态的主要原因。所以对于 InGaAs 而言, 钝化的目的, 就是使其表面附着一层特殊的原子层, 隔离氧和表面的接触, 替换已经吸附在表面的氧, 去除表面所存在的自然氧化物, 消除氧的作用, 减小表面

态, 从而提高器件的电学和光学性质^[138]。

XPS 技术能有效地提供钝化膜与 InGaAs 表面的相互反应和各种化学键的信息。以 $C1s = 284.6 \text{ eV}$ 为基准进行结合能校正, 分析 As 3d, In 3d5/2, Ga 2p3/2 及 S 2p 的中心能级, 硫化前后的 In 3d5/2, Ga 2p3/2, As 3d 的 XPS 谱图如图 2.10 所示。图中清晰的表明, 暴露在空气中的样品表面由 In、Ga 和 As 的氧化物形成了数纳米厚的自然氧化层。这层氧化层是引起表面非辐射复合缺陷中心的主要因素。经计算机分峰拟合处理后, 无论在 In 3d5/2, Ga 2p3/2 还是在 As 3d 谱中都可观察到硫的存在。In 3d5/2 谱中分解的两个峰, 一个位于 443.8 eV , 另一个位于 445.9 eV 。前者与清洁的单晶 InGaAs 中 In 3d5/2 的结合能一致; 后者则对应于 In 的硫化物 In-S。Ga 2p3/2 谱中分解的两个峰, 一个位于 1116 eV , 另一个位于 1117.8 eV 。前者对应于 InGaAs 中的 Ga 2p3/2; 后者对应于 Ga 与硫的化合物 GaS。As 3d 谱分解的两个峰, 一个位于 41.6 eV , 一个位于 40.9 eV 。前者与 InGaAs 中的 As 3d 结合能一致; 后者对应于 As 与 S 的化合物 As-S, 与 InGaAs 中的 As 3d 约有 0.7 eV 的化学位移。由硫化后的 XPS 能级谱及数据分析可以看出, 硫化基本上能够有效的去除表面的氧化层, 并且 S 与 In 和 Ga 原子形成了 Ga-S-In、Ga-S-Ga、In-S-In 等化学键^[130]。

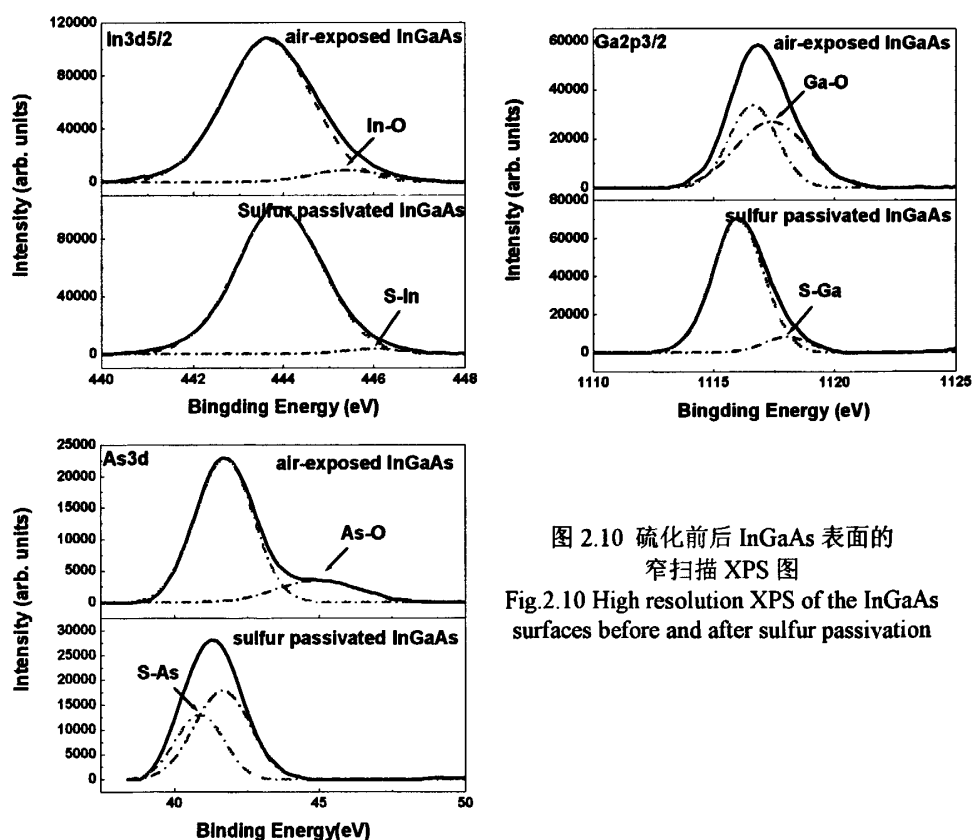


图 2.10 硫化前后 InGaAs 表面的
窄扫描 XPS 图

Fig.2.10 High resolution XPS of the InGaAs
surfaces before and after sulfur passivation

图 2.11 是未处理和硫化处理后 InGaAs 表面氧含量图。图中表明，经过硫化处理后表面 O 的含量明显降低。未经处理的 InGaAs 表面与空气接触，在表面会形成数纳米厚的 In、Ga 和 As 的氧化物，表面的 O 含量 28.3%，而经硫化处理后的表面氧含量可降为 15.1%。

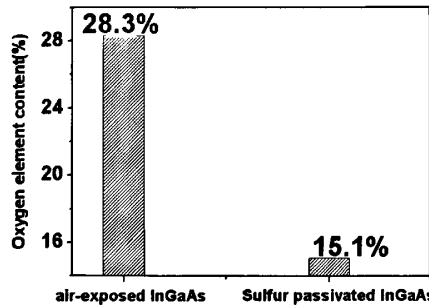


图 2.11 硫化处理前后 InGaAs 表面的氧含量
Fig.2.11 Oxygen content of InGaAs surface before and after sulfur treatment

2. 4. 2. 2 SiN_x/InGaAs MIS 结构器件性能分析

图 3 为 Ti/Pt/Au 和 InGaAs 的接触的 I-V 曲线，表明 Ti/Pt/Au 所形成的欧姆接触具有很好的性能，接触电阻约为 4.5 Ω。

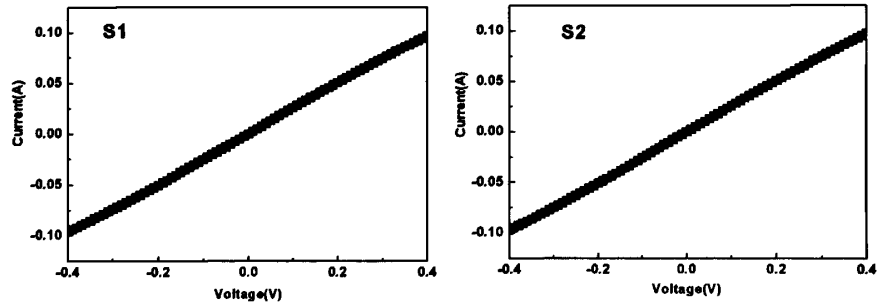


图2.12 Ti/Pt/Au和InGaAs的欧姆接触性能
Fig.2.12 Ohmic contact of Ti/Pt/Au to InGaAs

采用I-V测试的方法评价SiN_x介质膜的性能，在-7 V到7 V范围内对MIS 结构进行扫描得到I-V曲线，如图2.13所示，未退火的样品在零偏压下的电流为 2.39×10^{-11} A，在7 V时的电流为 6.10×10^{-11} A；对于400 °C退火的样品，零偏压下的电流为 9.67×10^{-11} A，在5 V时的电流为 3.50×10^{-10} A。退火后SiN_x薄膜的绝缘特性有所降低，但薄膜仍具有很好的绝缘性能。漏电流最小值出现的位置有变化，

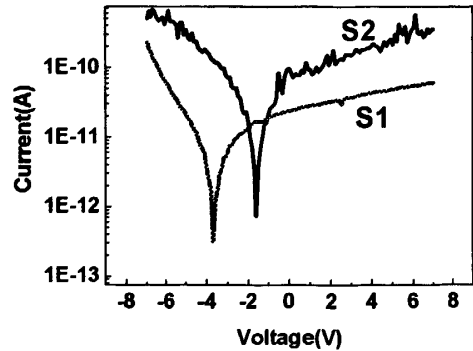


图 2.13 InGaAs MIS 器件的 I-V 曲线
Fig.2.13 I-V characteristics of InGaAs MIS diodes

可能是由于慢界面态或界面电荷引起的界面电场造成的，但这需要进一步的研究。

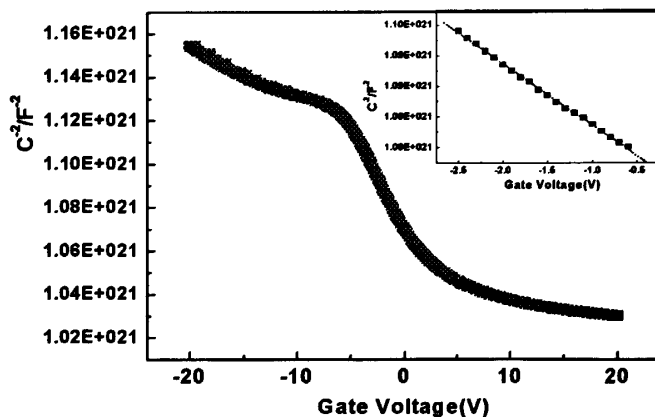


图 2.14 1 MHz 下 S1 样品的 $1/C^2$ -V 曲线(插图为耗尽区内 C^2 -V 曲线及其拟合曲线)

Fig.2.14 The C^2 -V curve of the unannealed sample at 1 MHz
(the inset is a fitted curve in the depletion mode)

图 2.14 为 1 MHz 下 S1 样品的 $1/C^2$ - V_g 曲线。从图中可以看出，在耗尽区内 $1/C^2$ - V_g 有很好的线性度，拟合得到 $d(1/C^2)/dV \approx 1.0 \times 10^{19}$ ，表明该频率下测得的 C-V 曲线已呈高频特性。在较高的频率下得到的高频 C-V 曲线是 InGaAs 材料的少子响应频率高，亦即界面态密度和陷阱密度低的结果。图 2.15 为高频下样品的双扫描结果。由高频下的双扫描结果可以看出，退火和未

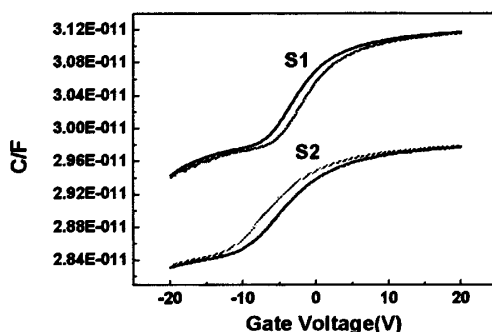


图 2.15 高频下 S1 和 S2 两样品的 C-V 曲线
Fig.2.15 C-V characteristics of MIS diodes at high frequency

退火样品的 C-V 特性均存在滞后效应。这是由 SiN_x 与 InGaAs 界面附近的慢界面陷阱引起的。

从图中还可以看出，退火后样品的 C-V 曲线没有明显的细长现象，这和 Chih-Cheng Lu 等^[136]报道的结果有所不同，说明退火后，绝缘层表面固定电荷和界面态密度变化不明显。这可能是由于退火的气氛不同造成的，本节中的使用的样品是在 N_2 中退火，而 Chih-Cheng Lu 等的样品是在 H_2 下退火的。在 H_2 下退火可能优于在 N_2 下退火，这是因为 H_2 是还原性气体，而且分子体积小，在高温下由于较大的动能而透过 SiN_x 层与界面附近的本体氧化层发生反应，易生成游离的 III 族金属元素，并与 V 族的游离元素结合而减少界面处的单质 V 族元素 As，从而使界面态密度降低^[139]。从 C-V 曲线可得到高频积累状态下，未退火和退火样品的绝缘层电容分别为 31.2 pF 和 29.8 pF，由 $C_i = \epsilon_r S/d$ ，其中 C_i 为绝缘层的高频电容；S 为栅电极面积，d 为绝缘层厚度。计算可得到 1 MHz 下未退火 SiN_x 的相对介电常数为 5.6；退火后相对介电常数略有降低，

为5.4。这说明400 °C，60 s退火后SiN_x薄膜的介电常数有所降低，可能是由于SiN_x/InGaAs界面处的元素互扩散引起的。

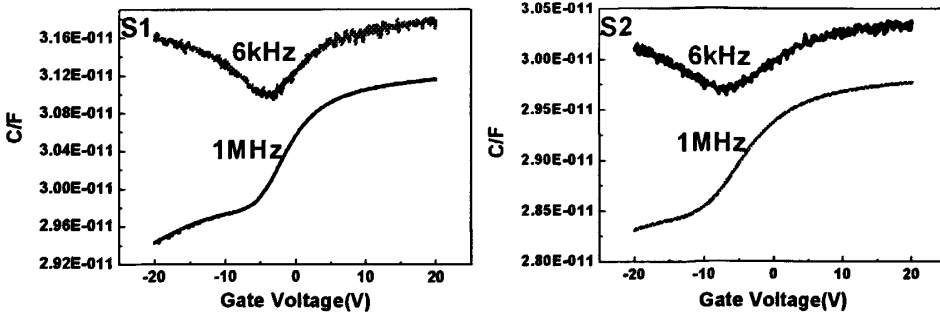


图 2.16 S1 和 S2 在 6kHz 和 1MHz 的频率下的双扫描 C-V 特性
Fig.2.16 C-V characteristics of InGaAs MIS diodes at 6 kHz and 1 MHz

表面固定电荷可由公式 2.3 计算。经计算样品 S1 的平带电压为 3.55 V，样品 S2 的平带电压为 2.95 V，可得未退火条件和退火条件下表面固定电荷密度分别为 $-5.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 和 $-4.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ ，退火有利于减小表面固定电荷密度。为了进一步的计算表面态密度，利用高低频法测试了 MIS 器件的 C-V 特性，图 2.16 为未退火样品 S1 和退火样品 S2 在 6 kHz 和 1 MHz 的频率下的双扫描 C-V 测试结果，根据公式 2.4 计算出未退火条件和退火条件下最小表面态密度分别为 $4.59 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ 和 $3.92 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ ，即退火有效降低了表面态密度。

2.4.3 小结

在本节中，通过在 $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$ 硫化后的本征 InGaAs 生长 SiN_x 介质膜达到钝化的目的，通过 XPS 技术分析了硫化前后 InGaAs 表面组份及化学键的变化，并通过 MIS 器件的 I-V、C-V 特性对钝化效果进行了评价：硫化可有效地去除 InGaAs 表面的自然氧化层，同时在表面形成 Ga-S-Ga，In-S-In 等化合键；SiN_x 薄膜具有很好绝缘性能，退火的引入降低了 SiN_x 薄膜的介电常数，并且有利于减小表面固定电荷密度，降低表面态密度。

2.5 硫化+SiN_x钝化在器件上的应用

采用硫化加 SiN_x 钝化的工艺条件，制备 256×1 元台面型 InGaAs 短波探测器。光敏芯片与两路 CTIA 式运放积分型输入级 128 元读出电路芯片等平面耦合，电路的积分电容(C_{int})为 1 pF，开始脉冲起始扫描过程，并将储存的电荷信号经采样，差分放大和多路传输后顺序输出。在室温下 256×1 元扫描型 InGaAs 短波探测器组件的响应直方图如图 2.17 所示，焦平面组件输出了 256 元信号，根据响应非均匀性的计算公式：

$$U_s = \frac{1}{\bar{V}_s} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_s - \bar{V}_s)^2} \quad (2.5)$$

其中 V_s 和 $\bar{V}_s$ 分别为输出信号及其平均值，得到响应非均匀性 U_s 为 4.81%，盲元率为 0.78%。
256×1 焦平面组件的响应非均匀性有了较大改善^{[93][112]}。

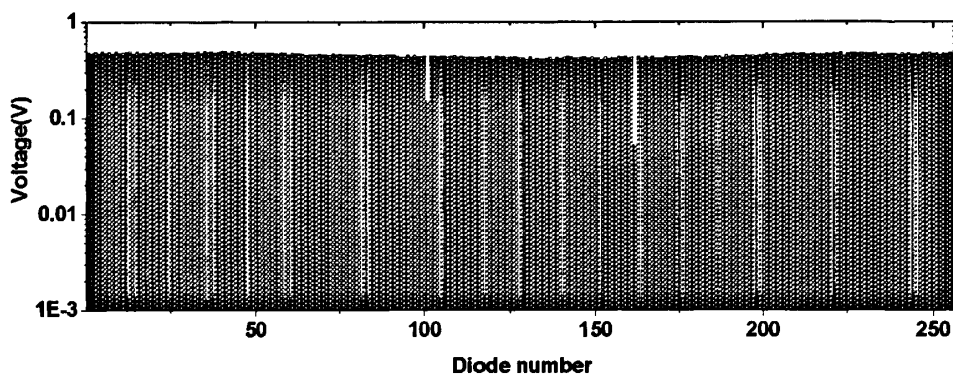


图 2.17 256×1 扫描型 InGaAs 短波探测器组件的响应直方图

Fig.2.17 The histogram of the response signal of the 256×1 element InGaAs detector

2.6 本章小结

本章首先对 InGaAs 台面探测器制备的关键工艺进行了概述，然后针对焦平面组件响应非均匀性高的问题，对其关键工艺—钝化技术进行了深入研究。在详细研究 SiN_x 薄膜的退火效应的基础上，制备了 InP 和 InGaAs 基 MIS 器件，证明了硫化后淀积 SiN_x 薄膜、然后进行快速热退火的钝化方式，可以有效地降低表面固定电荷密度和表面态密度。采用硫化加 SiN_x 钝化的工艺条件，制备了 256×1 元台面型 InGaAs 短波焦平面，器件的响应非均匀性低于 5%，达到了项目的要求。

第三章 InGaAs 低台面探测器结构设计

3.1 引言

目前 p-i-n InGaAs 探测器主要分为平面型和台面型两类。平面型 p-i-n InGaAs 探测器大多采用 Zn 扩散的方法在 n-InP/ InGaAs/n-InP 的帽层 InP 实现 p 型掺杂。这种方法能够得到较高探测率的 InGaAs 探测器，但它具有一些不可避免的缺点：扩散工艺复杂、光敏面扩大及 Zn 扩散会在 InP 层中造成大量的缺陷，这些都限制了 InGaAs 探测器性能的提高。一般来说，台面型 InGaAs 探测器是将外延材料中的 p-InP/InGaAs 刻蚀成一个台面，帽层 p-InP 较薄，一般为 0.1~0.5 μm ，InGaAs 吸收层较厚，一般为 1.5~3 μm 。这种结构的优点是工艺较为简单，缺点是较厚吸收层的侧面暴露引入大量的界面态，这在很大程度上限制了器件探测率的提高，而且不良的侧面钝化会使器件的可靠性降低。

本章设计了一种 InGaAs 低台面探测器，通过降低台面的高度来减少暴露的吸收层侧面区域，即将外延层中的 p-InP 刻蚀成一个台面，而保留 i-InGaAs 吸收层^[140]。采用这种器件结构，一方面能够降低台面器件的暗电流，另一方面可对所制备器件的量子效率异常问题进行分析、验证。

3.2 量子效率异常现象

3.2.1 黑体响应率测试

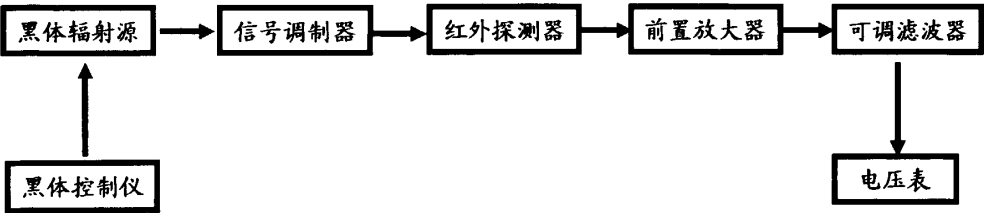


图 3.1 黑体响应率测试系统示意图
Fig.3.1 Measurement system of blackbody responsivity

由于实际应用中连续可调的单色光源及其功率标定的困难，通常采用较易实现的黑体辐射源来对探测器的响应率进行测量表征。由于黑体辐射的能谱分布与黑体温度满足普朗克定律，结合黑体辐射的特性可比较容易地计算出探测器峰值响应率和探测率，因此黑体测试成为标定红外探测器响应特性的重要手段。所用的黑体测试系统如图3.1所示。采用小信号调制技术，通过选频消除环境辐射引入的测量误差。黑体源发出的红外辐射经过调制盘上的小孔照射在待测探测器上，测得的电流信号经跨阻放大器放大成电压信号，通过数字电压表读出，

整个过程由示波器监控。假设探测器的光敏元面积为 A_D ，则照射在探测器上的功率为：

$$P = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{2\sqrt{2}\pi L^2} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot A_D \quad (3.1)$$

其中 T_2 、 T_1 分别为黑体和环境的温度， σ 为斯忒藩常数， d 为黑体孔径， L 为探测器与黑体之间的距离。黑体响应率 R_b 和峰值探测率 R_{λ_p} 为：

$$R_b = \frac{I_S}{P} \quad (3.2)$$

$$R_{\lambda_p} = G R_b \quad (3.3)$$

其中 I_S 为测试得到的光电流大小。 G 因子表示的是峰值响应率和黑体响应率的比值，可由相对响应光谱与黑体辐射谱进行叉乘得到，定义为^[141]：

$$G = \frac{G(\lambda_p) \int_0^\infty \phi(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)} d\lambda} = \frac{G(\lambda_p) \sigma T^4}{\int_0^\infty G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)} d\lambda} \quad (3.4)$$

其中 $G(\lambda_p)$ 为相对峰值响应率， $G(\lambda)$ 为相对单色响应率， T 为黑体温度，第一辐射系数 $C_1 = 3.742 \times 10^4 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4 \cdot \text{cm}^{-2}$ ，第二辐射系数 $C_2 = 1.439 \times 10^4 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ 。InGaAs 探测器的理论响应率 R_i 为：

$$R_i = \frac{\lambda \eta}{hc} qg \quad (3.5)$$

式中 η 为量子效率， g 为光电增益，对于光伏型探测器 g 取 1。在室温下峰值波长 $1.60 \mu\text{m}$ 附近，理想情况下量子效率取 100% 时，理论响应率的最大值约为 1.30 A/W 。

3.2.2 测试响应率与理论响应率的比较^[142]

采用的 p-InP/n-InGaAs/n-InP 材料，是用 MBE 技术在 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， $n > 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ；厚度为 $2.5 \mu\text{m}$ 掺 Si 的 n-In_{0.55}Ga_{0.45}As 吸收层， $n \approx 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ；厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 掺 Be 的 p-InP 窗口层， $p > 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。清洗干净的外延片经过 p-InP/InGaAs 台面制作、钝化和电极生长、退火处理等工艺制备出 InGaAs 探测器芯片，表面和侧面有 SiN_x 钝化层，p 型接触电极为 Ti/Pt/Au，n 型接触电极为 CrAu，其结构如图 3.2 所示。探测器芯片响应信号是在黑体测试系统上完成的；InGaAs 焦平面是在 256 元 InGaAs 阵列探测器芯片的两侧用金丝互连两个 L128CTIA 读出电路，封装在 32 引脚的陶瓷管壳中，然后采用实验室搭建的 128×1 InGaAs

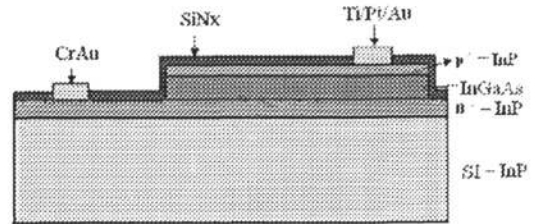


图 3.2 InGaAs 常规探测器结构图
Fig.3.2 Structure of standard InGaAs detector

FPA 器件性能测试系统测试电路及焦平面的性能。

室温下, InGaAs 探测器的典型归一化响应光谱如图 3.3 所示, 根据公式 3.4 计算得到 G 因子约为 70。

焦平面的响应电流 I_s 为:

$$I_s = \frac{V_s C_{int}}{t A_V} \quad (3.6)$$

其中 V_s 为焦平面的响应信号, C_{int} 为积分电容, t 为积分时间, A_V 为电路增益。

探测器芯片的响应信号测试中设定黑体温度为 900 K, 黑体孔径 d 为 8 mm, 孔径到待测探测器芯片的距离 L 为 30 cm, 电流放大器的档位置于 10^{-8} A/V, 测得芯片的响应信号如图 3.4 所示。

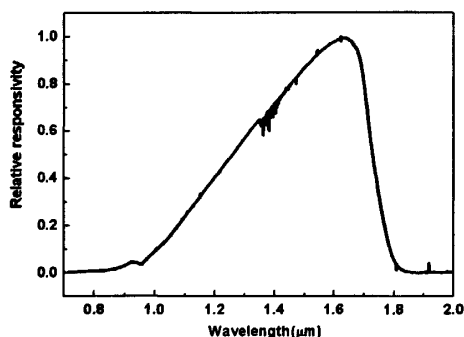


图 3.3 InGaAs 探测器的典型归一化响应光谱
Fig.3.3 Typical relative response spectrum of InGaAs detectors

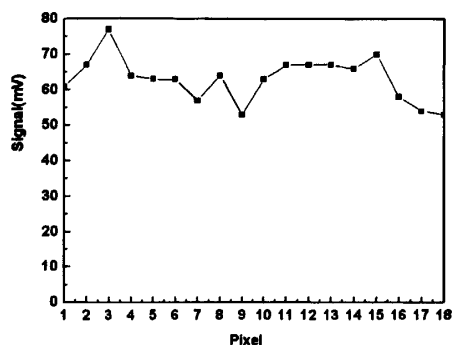


图 3.4 InGaAs 探测器芯片的响应信号
Fig.3.4 Measured signal of InGaAs detectors

InGaAs 焦平面的响应信号测试中设定黑体温度为 900 K, 黑体孔径 d 为 10 mm, 孔径与待测探测器芯片的距离 L 为 30 cm, 电路积分电容 C_{int} 为 1 pF, 电路增益 A_V 为 0.78, 测得焦平面的响应信号 V_s 如图 3.5 所示。

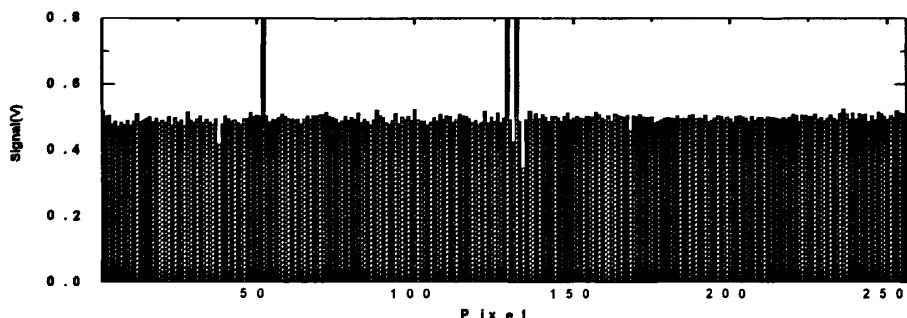


图 3.5 InGaAs 焦平面响应直方图
Fig.3.5 Response histogram of InGaAs focal plane arrays

探测器芯片和焦平面的峰值响应率可由公式(3.3)和(3.6)计算得到, 如图 3.6 所示。根据峰值响应率计算得到, 器件在峰值波长处的量子效率在 300%~400%之间, 这显然是不正常的。为了研究这个问题, 利用激光束诱导电流技术(LBIC)研究了器件光敏元扩大问题。

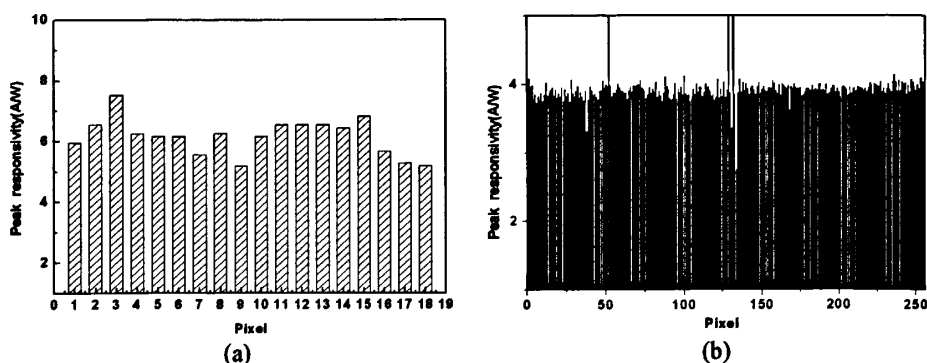


图 3.6 探测器芯片(a)和焦平面(b)的峰值响应率
Fig.3.6 Peak responsivity of the InGaAs detectors and focal plane arrays

3.3 LBIC 测试

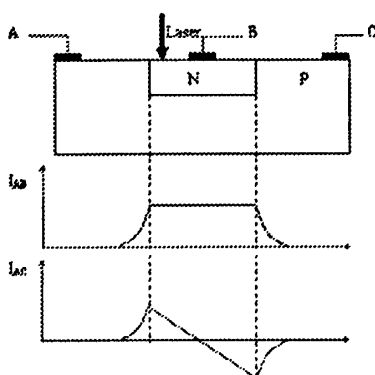


图 3.7 LBIC 信号原理图
Fig.3.7 Schematic illustration of signal and theory by LBIC

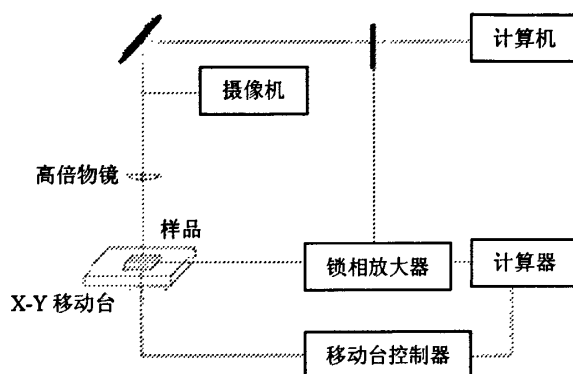


图 3.8 LBIC 测试系统
Fig.3.8 Measurement system of LBIC

激光束诱导电流技术(LBIC)是一种高效、非破坏性的,用来研究材料空间结构和电活性区域以及缺陷的光学方法。该方法的原理是基于 1956 年 Wallmark 发现的水平光伏效应(LPV),即当 p-n 结受到不均匀光照时,会在平行于 p-n 结方向产生电场,其大小和方向与 p-n 结的类型、光照的波长、强度和位置有关。国外在 1980 年代末由美国的 Rockwell 公司率先将该项技术应用于碲镉汞焦平面器件的均匀性和盲元检测方面^[143]。在样品的两边各做一个欧姆接触的电极,然后用一束低功率的激光束聚焦在样品的特定区域产生电子-空穴对。通过观察两侧电场的变化,可以确定电活性的杂质、缺陷簇和材料的不均匀性等。利用 LBIC 技术可以测试 p-n 结结深、载流子的扩散长度及均匀性等,还可以分析表面状况等因素对器件特性的影响,是一种很有用的无损测试分析工具, LBIC 信号产生的机理如图 3.7 所示。激光束在 p-n 结表面扫描时,若连接 A 和 B 电极,光生载流子扩散到空间电荷区边缘会立刻被电极收集,产生光伏响应信号 I_{AB} ;若连接 A 和 C 电极,光生载流子扩散到空间电荷区边缘后被分离,电子向 n 区移动,空穴留在 p 区,由于电子的迁移率比空穴高,考虑 n 区的导电性比 p 区好,可看成等势体,电子能不断地在 n 区内快速地趋于均匀分布,致使光入射点之外的各点电势

偏离平衡状态, n 区中的电子重新注入 p 区, 会产生水平电场, 产生如图所示的激光束诱导电流 I_{AC} , 水平电场的方向与光斑位置有关, 图中所示的方向为光斑在图中的位置时所产生的。

本章中所用的测试设备为 SEMILAB 公司产的 MicroLBIC 仪器, 其系统如图 3.8 所示, 脉冲激光波长为 980 nm, 频率为 1 kHz, 激光束斑直径为 5 μm , 分辨率为 1 μm , 扫描步进可选择。

图 3.9 为待测 InGaAs 器件的俯视图, 其中在 $p\text{-InP}/i\text{-InGaAs}$ 微台面的局部区域上置有与 $p\text{-InP}$ 欧姆接触的 P 电极区 1, 在线列微台面边上有一刻蚀至 $n\text{-InP}$ 层并置于 $n\text{-InP}$ 层上的公共电极区 2, 即 N 电极区。除 P、N 电极区 1、2 外, 整个外延片上覆盖有氮化硅钝化层, 在 P 电极区上置有与读出电路互连的电极互连层 3, 该电极互连层覆盖部分微台面, 并从微台面延伸至平面。微台面上没有覆盖电极互连层的为探测器的光敏感区 4。

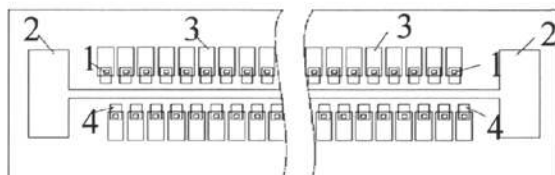


图 3.9 InGaAs 线列探测器的俯视图
Fig.3.9 Top view of the InGaAs linear detectors

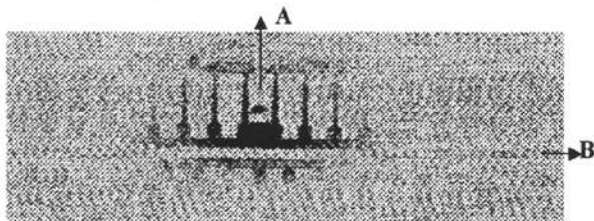


图 3.10 步进为 5 μm 时器件的 LBIC 扫描图
Fig.3.10 Photograph of LBIC scan signal with 5 μm scanning rate

将 P 电极 A 和 N 电极 B 引出, 得到了器件的 LBIC 扫描图像和信号分布曲线, 其中图 3.10 为步进为 5 μm 时得到的图像, 图 3.11 为待测器件附近的 LBIC 扫描图和信号分布曲线。由图 3.9 和 3.10 可以看出, 光敏元上及其周围存在明显的响应信号, 但相邻光敏元上的信号非常小, 说明这种台面结构可以很好的控制相邻光敏元之间的串音。光敏元周围存在明显的信号, 也就是说在刻蚀后露出表面的 $n\text{-InP}$ 上存在信号。由于 InP 的禁带宽度为 1.35 eV, 对应的吸收波长为 920 nm, 小于激光器的波长 980 nm, 因此 InP 本身不会吸收光, 那么 $n\text{-InP}$ 区域存在信号可能是由于光在衬底的反射效应引起。为了研究量子效率异常问题, 设计了低台面结构探测器, 即在器件制备工艺过程中, 刻蚀 $p\text{-InP}$ 微台面, 而保留 $i\text{-InGaAs}$ 吸收层; InGaAs 可以吸收 0.9 μm ~1.7 μm 波段的光, 所以 $i\text{-InGaAs}$ 上不会有响应信号。下节将详细介绍低台面器件的结构设计和性能测试。