

密级: 公 开



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

可见拓展的短波红外 InGaAs 探测器研究

作者姓名: 杨 波

指导教师: 龚海梅 研究员 李 雪 研究员

中国科学院上海技术物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 微电子学与固体电子学

研究方向: 半导体器件与物理

培养单位: 中国科学院上海技术物理研究所

2014 年 5 月

学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：杨波

2014 年 6 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：公开。涉密论文在解密后，以上学位论文使用授权说明适用。

论文作者签名：杨波

2014 年 6 月 3 日

指导教师签名：[Signature]

2014 年 6 月 4 日

Study on Visible-Shortwave Infrared InGaAs Detectors

By

Yang Bo

A Dissertation Submitted to

University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of

Doctor of Science

Shanghai institute of technical physics,

Chinese Academy of Sciences

May, 2014

致 谢

时间过的很快，在技物所的四年时光很快就要结束了。在这里，有快乐，有痛苦，经常失败，但也会成功，迷茫过，也有幡然醒悟。青春在这里书写，有许多的事情需要回味，也有太多的人值得记忆。谨借此机会向过去四年里帮助过、陪伴过我的人致以最诚挚的谢意。

首先我要感谢我的导师龚海梅研究员，龚老师这几年对我的鼓励和教导，让我受益匪浅，不仅使我懂得了如何学习，如何科研，也帮助我学会做人，学会生活，龚老师的踏实严谨和平易近人一直感染着我。同时我还要衷心感谢我的二导李雪研究员，当我在实验中一筹莫展的时候，李老师的指导和鼓励给了我很大的安慰和帮助，在科研上李老师言传身教，在生活中李老师也给予了很多的关心，深深的感谢李老师对我的支持和帮助。

感谢方家熊院士，微系统所的张永刚老师对我的支持和帮助。他们严谨的治学态度和渊博的学识，一直感染着我在科研的道路上前行。在这些年的学习过程中，感谢实验室给予我帮助的各位老师和师兄师姐：邵秀梅、朱龙源、洪斯敏、刘大福、张海燕、范广宇、叶丽萍、吴家荣、马伟平、刘诗嘉、王建新、陆荣、朱建妹、王琳、乔辉、贾嘉、许金通、陈郁、徐勤飞、贺香荣、汪洋、曾智江、张晶琳、汤亦聃、蔡子健、刘向阳、王妮丽、赵水平、兰添翼、储开慧、姜佩璐、张在实等，以及工程九室的危峻老师在测试方面给予的帮助。

感谢与我一起生活和学习的同学和朋友们：唐恒敬、李淘、宁锦华、黄张成、黄松垒、程吉凤、邓双燕、朱耀明、曹岚、魏鹏、邓洪海、马学亮、夏王、许中华、王云姬、朱宪亮、徐鹏霄、刘秀娟、徐斌、石铭、黄星、曹高奇、王瑞、李平、晏宏洲等。

感谢研究生部的诸位老师在学习、生活上给予的关心和帮助。

最后，我要深深的感谢我的父母和兄弟，以及我的女朋友韩娟，感谢他们对我的关爱和支持。

谨以此文献给所有关心和帮助我的家人和朋友。

杨波

2014年4月22日于上海

摘 要

短波红外 InGaAs 探测器以其在相对较高温下仍有较好的性能、可靠性好等特点, 在空间遥感、天文观测以及光谱成像等领域得到广泛的应用。本论文为了进一步扩展短波红外 InGaAs 探测器在军事和商业特别是微光夜视方面的应用, 对 InGaAs 探测器光谱响应向可见拓展的工艺方法和器件物理进行了研究。采用 InP 衬底的化学机械抛光和化学湿法腐蚀的工艺方法, 获得了低损伤的衬底减薄工艺参数; 以 32×32 元面阵探测器为对象, 研究了衬底减薄对面阵探测器性能特别是响应光谱的影响; 研究了单层增透膜以及双层增透膜对衬底减薄后器件量子效率以及暗电流的影响; 采用器件物理模型, 分析了材料参数对器件量子效率的影响, 优化可见拓展的 InGaAs 器件级材料参数设计, 实现了可见拓展的 512×128 元面阵焦平面探测器。

研究了 InP 衬底的化学机械抛光工艺, 改进了机械抛光的工艺参数。重点研究了 InP/InGaAs 的选择性湿法腐蚀, 对比分析了 InP 衬底在不同腐蚀液配比条件下的化学湿法腐蚀, 最终选择作为 InP 的选择性湿法腐蚀条件为盐酸溶液: 磷酸溶液体积比为 3: 1, 腐蚀温度为 25°C , 选择性湿法腐蚀 InGaAs 的腐蚀液配比为酒石酸溶液 (重量比酒石酸: H_2O =1: 1): H_2O_2 体积比为 5: 1, 腐蚀温度为 35°C 。

分别使用了 InAlAs 缓冲层厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 和 InP 缓冲层厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 及 $0.2\mu\text{m}$ 的外延材料制备了 32×32 元平面型 InGaAs 面阵探测器, 并将衬底减薄的方法用于制备的探测器。结果表明, 使用机械抛光和湿法腐蚀相结合的方法实现 InP 衬底的低损伤去除, 使 InGaAs 探测器的响应波段向可见方向延伸, 器件的暗电流在衬底减薄前后基本保持不变。使用 InP 缓冲层为 $0.2\mu\text{m}$ 的材料制备器件进行衬底减薄后, 响应波段为 $0.5\text{--}1.7\mu\text{m}$, 在波长为 500nm , 量子效率达到约 16%, 在波长为 850nm , 器件的量子效率约为 54%, 在波长为 1310nm 量子效率约为 94%, 在 1550nm 的量子效率约为 91%。

采用 ICPCVD highrate 工艺生长 SiN_x 薄膜作为增透膜, 在对光敏芯片进行衬底减薄后, 在表面生长单层 SiN_x 薄膜, 结果表明, 单层增透膜只对部分波段的

光响应有增强作用，在其他波段影响不大，器件的暗电流在增透膜生长前后基本不变。通过软件模拟设计了 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ 双层增透膜，并使用 ICPCVD 工艺生长，结果表明，器件在可见波段和近红外波段的量子效率都得到了提高，双层增透膜的增透效果好于单层增透膜。

采用器件物理模型，通过测试和文献获得材料参数，对背照射的 InGaAs 平面型器件的量子效率进行了理论模拟，对比了吸收层厚度分别为 $1.5\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ 的 InGaAs 平面型器件的光谱响应，理论结果与实验结果较为一致，随着吸收层厚度的增加，器件的量子效率先迅速增大，然后基本保持不变。对可见拓展 InGaAs 探测器的量子效率进行了模拟，当 InP 缓冲层为 $0.2\mu\text{m}$ 时，探测器响应光谱的实验值与理论值较为吻合。分析了缓冲层厚度、吸收层厚度以及掺杂浓度对探测器在可见波段和近红外波段的量子效率的影响，结果表明缓冲层 InP 的厚度对探测器在可见波段量子效率影响最为显著，随着缓冲层厚度的增加，InP 对入射光的无效吸收迅速增加，使得探测器在可见波段的量子效率急剧下降。减小缓冲层厚度是提高 InGaAs 探测器可见波段量子效率的一个有效途径。

将衬底减薄的方法适用于大面阵 InGaAs 焦平面探测器。首先使用 InP 缓冲层厚度为 $0.2\mu\text{m}$ 的外延材料成功制备了 512×128 元 InGaAs 面阵焦平面探测器，光敏元大小为 $23\mu\text{m}$ ，中心距为 $30\mu\text{m}$ ，并对其光电性能进行了测试，探测器的峰值响应率和峰值探测率分别为 0.56A/W 、 $1.20\times 10^{12}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。然后使用机械抛光和化学湿法腐蚀相结合的方法对焦平面探测器实现了衬底减薄。减薄后的探测器响应波段为 $0.5\text{--}1.7\mu\text{m}$ ，信号及噪声相对于减薄前都有所增大，同时盲元率和不均匀性也进一步增大，探测器的峰值响应率和峰值探测率分别增大为 0.70A/W 、 $1.48\times 10^{12}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

关键词：短波红外；InGaAs；可见；衬底减薄；增透膜；量子效率

ABSTRACT

The short wavelength infrared (SWIR) InGaAs detectors have been widely used in space remote sensing, astronomical observation and spectral imaging, due to good performance such as high detectivity, good reliability, and so on, at relatively high temperatures. In this paper, in order to further develop the application of SWIR InGaAs detectors in military and commercial field, in particularly the area of night vision, the technology and device physics for the visible-short wavelength InGaAs detectors have been researched. The chemical mechanical polishing (CMP) and wet chemical etching process for the InP substrate were investigated, and low-damage process parameters of substrate thinning were obtained. The 32×32 array detectors were fabricated with different epitaxial materials, and then the influence of substrate thinning process on the performance of array detectors, especially the response spectrum, was studied. The effect of deposition of the anti-reflection (AR) coating after substrate thinning on the quantum efficiency (QE) and the dark current of detectors was researched. Physical model was used to analyze the influence of material parameters on the quantum efficiency of detectors. Finally, the 512×128 visible-short wavelength InGaAs focal plane array detectors were fabricated.

The CMP process of InP substrate was studied, and the process parameters were optimized. The selectively wet etching of InP/InGaAs material was investigated. Based on the comparison of etching rates, SEM and AFM images of chemical wet etching of InP substrate with different ratios of etching solution and at different temperatures, the mixture solution of 36.5% HCl:H₃PO₄ with volume ratio of 5:1 at 25°C was chosen as the etching solution for InP from InGaAs. And the solution of tartaric acid solution (composed of tartaric and H₂O with weight ratio of 1:1):H₂O₂ with volume ratio of 5:1 at 35°C was chosen for the etching solution of InGaAs from InP.

The 32×32 array detectors were fabricated with different epitaxial materials involving an InAlAs buffer layer or an InP buffer layer. And then the process of substrate thinning was applied to them. The results indicated that the removal of InP substrate with low damage could be acquired with combination of CMP and chemical wet etching. The spectrum response of detectors was extended to visible light band, and the dark current almost remained the same. After substrate thinning process, the quantum efficiency of the detectors with InP buffer layer of 0.2 μm is approximately 16% at 500nm, 54% at 850nm, 94% at 1310nm and 91% at 1550nm.

After the substrate removal process, a SiN_x film was grown on the surface as the AR coating, by the ICP-CVD technology. The photoelectric characteristics of detectors indicated that the single SiN_x thin film worked only in certain wavelength bands and the response was enhanced. The dark current of the device was unchanged. And then a SiN_x/SiO_x double-layer coating was designed after simulation from the software of SCI Company, and was deposited by the technology of ICP-CVD, instead of the single-layer film. The results showed that the response of

detectors was improved in the visible bands, as well as the short-wavelength infrared. The AR effect of SiNx/SiOx double-layer coating was better than the SiNx single-layer coating.

The quantum efficiency of backside-illuminated planar InGaAs detectors was theoretically simulated. The relationship between the thickness of the absorption layer and the quantum efficiency was analyzed. The simulated results for the detectors with absorption layer of 1.5 μm and 2.5 μm corresponded with the experiment results. With the increase of the thickness of absorption layer, the peak quantum efficiency increased rapidly at first, and then almost remained the same. The relationships between material parameters including the thickness of the buffer layer, the thickness of the absorption layer, the doping concentration of the absorption layer and the quantum efficiency of the detectors after substrate thinning were analyzed. The results indicated that the thickness of the InP buffer layer has the most significant influence on the quantum efficiency in the visible spectrum. With the increase of the thickness of the InP buffer layer, the useless absorption of InP increased quickly, resulting in the sharp decrease of the quantum efficiency. Reducing the thickness of the InP buffer layer was an effective way to improve the quantum efficiency of InGaAs detectors in the visible bands.

The substrate removal process of large-area InGaAs focal plane array detectors was studied. The 512 $\times$ 128 planar InGaAs focal plane array detectors were fabricated on the epitaxial material with 0.2 μm InP buffer layer. The photoelectric characteristics of the FPA detectors were measured and analyzed. The results showed that the signal and noise increased with the integral time, and the average peak responsivity and average peak detectivity were 0.56A/W and $1.20 \times 10^{12} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ respectively, at the integrated time of 3ms. And then the substrate removal was achieved with the combination of CMP and wet chemical etching. The response spectrum of the FPA detector covered the wavelength band of 0.5-1.7 μm , and the signal and noise increased. The average peak responsivity and average peak detectivity were 0.70A/W and $1.48 \times 10^{12} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ respectively, at the integrated time of 3ms.

Keywords: SWIR; InGaAs; visible; substrate removal; AR coating; quantum efficiency

目 录

致 谢	I
摘 要	III
ABSTRACT.....	V
目 录	VII
1 引言	1
1.1 红外辐射及其应用.....	1
1.2 红外探测器及发展趋势.....	2
1.3 短波红外 InGaAs 探测器	5
1.4 可见拓展近红外 InGaAs 探测器	7
1.4.1 可见拓展近红外 InGaAs 探测器的意义	7
1.4.2 可见拓展 InGaAs 探测器的研究现状	9
1.4.3 可见拓展 InGaAs 探测器的发展趋势	17
1.4.4 近红外 InGaAs 探测器可见拓展的难点	19
1.5 本论文的研究目的和主要内容.....	19
2 衬底减薄工艺研究	21
2.1 衬底减薄的方法及原理	21
2.2 InP 衬底的机械抛光表征	24
2.3 InP/InGaAs 选择性湿法腐蚀研究.....	25
2.3.1 InP 衬底的湿法腐蚀	25
2.3.2 InGaAs 阻挡层的湿法腐蚀	31
2.4 衬底减薄在探测器中的应用	31
2.4.1 InAlAs 缓冲层的器件.....	35
2.4.2 InP 缓冲层的器件	40
2.5 本章小结.....	47
3 InGaAs 探测器衬底减薄后的表面处理	49
3.1 表面处理方法	49

3.2	InGaAs 探测器衬底减薄后单层增透膜研究.....	51
3.2.1	增透膜的生长及表面状态.....	51
3.2.2	光谱特性.....	54
3.2.3	增透膜对器件暗电流的影响.....	56
3.3	多层增透膜的设计与生长.....	57
3.4	本章小结.....	59
4	InGaAs 探测器量子效率模拟.....	60
4.1	量子效率模拟的方法.....	60
4.1.1	计算模型.....	61
4.1.2	材料参数.....	64
4.2	InGaAs 探测器吸收层厚度对量子效率的影响.....	68
4.3	可见拓展的 InGaAs 探测器量子效率与材料参数的关系.....	73
4.4	本章小结.....	78
5	可见拓展的 InGaAs 焦平面探测器.....	79
5.1	平面型 512×128 元 InGaAs 焦平面探测器.....	79
5.1.1	光敏芯片制备.....	79
5.1.2	焦平面特性分析.....	80
5.2	大面阵探测器的衬底减薄.....	86
5.3	可见拓展的 InGaAs 焦平面探测器.....	87
5.4	本章小结.....	89
6	全文总结和展望.....	90
6.1	全文总结.....	90
6.2	展望.....	92
	参考文献.....	93
	作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果.....	103

1 引言

1.1 红外辐射及其应用

红外辐射是波长介于可见光和微波之间的一种电磁波，又被称为红外光、红外线。红外辐射最早于 1800 年被英国天文学家 William Herschel 发现^[1]。当一个物体温度高于绝对零度 (-273°C) 时，它就会自发辐射红外线，其红外辐射的能量由物体的温度和表面条件决定，在常温下物体的自发辐射主要是红外辐射。根据不同的波长，红外波段一般被分为 4 个区域：近红外波段 $0.78\text{-}3\mu\text{m}$ ，中红外波段 $3\text{-}6\mu\text{m}$ ，中远红外波段 $6\text{-}20\mu\text{m}$ ，远红外波段 $20\text{-}1000\mu\text{m}$ 。

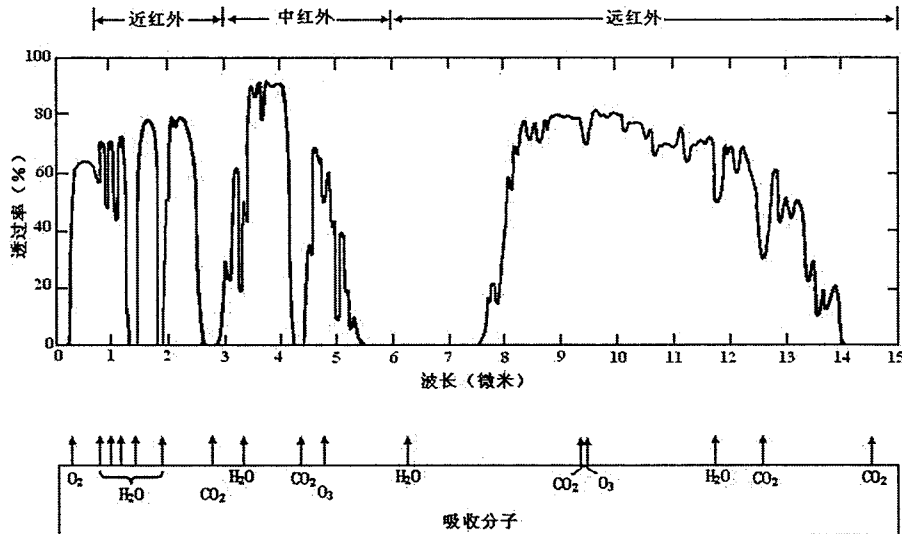


图 1.1.1 海平面大气对红外光的透射^[2]

Fig.1.1.1 Atmospheric transmission on sea level

太阳光到达地球表面的辐射能量一半左右属于红外辐射^[3]，红外辐射通过大气层的过程中会产生反射、吸收和散射等现象，并在传输过程中逐渐衰减。由于大气中包含 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CH_4 、 CO 等多原子气体分子，以及许多大小为 $10^{-1}\sim 10^{-7}\text{cm}$ 的液态和固态的悬浮物，如灰尘、烟、雾、云、雨、雪等，它们对红外辐射有强烈的散射和吸收，导致红外传输的衰减^[4]。图 1.1.1 给出了太阳光在海平面大气中通过 1 海里水平路径的透过光谱合成曲线，图中下面部分表示了水蒸汽、二氧化碳和臭氧分子所造成的吸收带^[2]。在吸收较弱的区域，红外辐射才能长距离传播，这些吸收较弱的区域被称为大气窗口。常见的红外波段大气窗

口有：0.95~1.05 μm 、1.15~1.35 μm 、1.5~1.8 μm 、2.1~2.4 μm 、3.3~4.2 μm 、4.5~5.1 μm 和 8~13 μm 。有时也粗略地认为有 1~3 μm 、3~5 μm 和 8~14 μm 三个大气窗口。这三个大气窗口对于从事红外光谱研究、红外技术应用和研究尤为重要。

红外辐射覆盖较宽的光谱，尤其是包含三个大气窗口，通过对红外辐射进行研究，能够获得很多有用的重要信息^[5]。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、目标追踪、精确制导等应用紧密相连，在现代及未来战争中都是很重要的战术和战略手段^[6-10]。其具有很多优点，一是环境适应性好，尤其是在夜间和恶劣气候条件下；二是隐蔽性好，一般采用无源被动接受系统，与雷达和激光探测相比探测更加安全、隐蔽、不易受干扰，保密性强；三是识别能力强，利用背景和目标的温差及辐射功率差异用于分辨出伪装、便于目标识别；四是系统体积小，重量轻，功耗低，且光谱覆盖范围广。

在红外遥感领域红外技术也有着重要的应用。由于红外辐射的优势，可以利用反射的太阳辐射获取高分辨率的遥感图像，并且受白昼和天气影响较小，因此红外空间遥感技术被广泛应用于气象检测、对地观测、海洋和环境监控等方面。

红外技术除了在上述领域具有重要的应用外，在民用方面领域也越来越广泛，作用越来越大。包括农业、工业、环境以及医疗卫生等领域。在工业领域中，主要是利用红外技术进行测温、无损探伤以及过程监控。在农业领域中，主要是利用红外技术防治病虫害，预报灾情，农业估产等。在医疗卫生领域中，红外技术还可用于临床诊断等。随着红外光谱技术的发展，利用红外波段的特征吸收谱线，红外技术在环境监控和污染控制方面也有着大量的应用。另外在天文学、医学、生物学、历史学等学科方面也有着重要的应用^[11-15]。

随着科技的进步，各种结构新颖且性能优良的红外探测器也相继问世，器件性能也在逐步提高，如更高的灵敏度，更高的工作温度，更低的噪声，更宽的波长覆盖范围等^[16-19]，这些优点将使红外技术在未来得到更加广泛和深入的应用。

1.2 红外探测器及发展趋势

红外技术的核心是红外探测器。一般来说，只要能量在大约 0.1-1eV 范围内的物理现象均可以用于红外探测器的制备，包括热电效应，电导率的变化，气体膨胀，热释电，光子牵引，Josephson 效应，内发射，本征吸收，杂质吸收，低

维固体（超晶格和量子阱）和不同类型的相变等^[20]。根据能量转换方式，主要包括红外辐射的热效应和光电效应，红外探测器可以分为热探测器和光子探测器两大类。热探测器是利用固体或气体介质对温度敏感的特性，通过入射辐射的热效应引起探测器某一电特性的变化，将介质温度的变化转变成容易测量的电信号，以此来探测红外辐射的。根据所利用物理效应的不同，热探测器有下面几个类型：气动探测器、温差电偶和温差电堆、测辐射热计、热释电探测器等。热探测器是非选择性探测器，对不同波长的单位入射功率，有相同的输出信号，其优点是可探测的光谱范围较宽且不需要制冷，缺点是响应光谱仍受窗口材料限制，并且响应速度慢，探测器能力低，因此不适用于快速高灵敏度的探测。

光子探测器则是利用固体的光电效应，即固体受到红外辐射的照射后，其中的电子直接吸收红外辐射而发生运动状态的变化，从而导致该固体某种电学量的变化，通过测量这种电学量的变化就能推知入射辐射的强弱。光电效应包括电子发射、光电导、光生伏特、光磁电及光子牵引等，都能用来制造红外探测器^[5]。因此，光子探测器的光谱响应不及热探测器宽，但是具有有较高的灵敏度，并且响应时间较快，噪声低，，探测率高。常见的光子探测器包括以下类型：光电导型探测器、光伏型探测器及量子结构探测器等。这其中光电导探测器可以分为本征光电导探测器、非本征光电导探测器和自由载流子光电导探测器；光伏型探测器根据形成 pn 结方式和材料结构特点的不同又可以分为 PIN 型光伏探测器、Schottky 光伏探测器、APD 光伏探测器、MSM 结构探测器、RCE 结构探测器等；而量子结构探测器主要可以分为量子阱探测器和量子点探测器两大类。

表 1.2.1 常见红外探测器种类及其特点^[5,21,22]

Tab. 1.2.1 Classification and characteristic of ordinary infrared detectors

红外探测器种类				工作原理	优点	缺点
热探测器	气动探测器			受热膨胀	简单轻便，成本低，光谱范围宽，可室温工作	无选择性 探测率较低 响应速度较慢
	温差电偶、温差电堆			温差电效应		
	测辐射热计			电阻温度特性		
	热释电			热释电效应		
光子探测器	光电导探测器	本征型	IV-VI化合物材料	基于带间跃迁吸收光电导效应	禁带宽度窄	机械特性差 介电常数大，结电容大
			II-VI化合物材料		应用波长范围宽 技术比较成熟	缺陷密度高 成本较高
			III-V化合物材料		材料性能优良	需要合适衬底

		物材料		技术比较成熟	
		非本征型	重掺杂杂质能级跃迁, 主要应用于长波, 响应波长范围宽	成本低, 工艺简单, 可量产, 易于调节响应波长	吸收系数低, 需低温工作 量子效率较低
		自由载流子	高迁移率半导体带内跃迁, 载流子迁移率变化从而引起电导变化	成本低, 增益高, 易制备较大的二维面阵	量子效率低, 需低温工作
	光伏探测器	PIN、Schottky、APD、MSM、RCE	光生载流子产生光电压	高灵敏度和响应率, 噪声小, 功耗低	薄膜材料生长要求较高 ^[23-26]
	量子结构探测器	量子阱探测器	半导体材料相间排列形成具有量子局限效应的势阱, 子带间跃迁	波长大幅可调, 技术比较成熟, 容易实现多色探测	需特殊的光耦合方式 量子阱中基态电子浓度受掺杂限制 量子效率不高 ^[27,28]
		量子点探测器	维度很小的量子点内部电子受到局限, 产生不连续电子能级, 子带间跃迁	较小暗电流, 较大增益, 较高的工作温度	量子点尺寸、密度和均匀性的控制比较困难 ^[29]

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 $1\mu\text{m}$ - $3\mu\text{m}$ 短波红外辐射的探测器。此后, 为扩大波长范围, 50-60 年代人们又研制出锑化铟(InSb)、锗掺汞(Ge:Hg)等多种红外探测器, 其工作波段分别对应 $3\mu\text{m}$ - $5\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ - $14\mu\text{m}$ 等大气红外窗口。1959 年英国皇家雷达研究所 W.D.Lawson 等^[30]首次报道了半导体碲镉汞 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$), 通过调节 x 值可得到不同的 E_g , 使禁带宽度从 0 到 1.6eV 之间变化, 研制的探测器几乎可以覆盖所有重要的红外大气窗口。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 混成的阵列器件等。因此 HgCdTe 材料开启了红外探测器发展的新局面, 此后 HgCdTe 材料的光电导探测器成为了主流的红外探测技术, 先后研制成对应三个大气窗口的红外探测器^[31]。随着技术的进步及材料生长工艺的成熟, 各种性能

和功能的红外探测器,如 IR-CID、IR-CCD、IR-CMOS、TeS、QWIP、InAs/GaInSb 超晶格探测器、QD 等也不断出现。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^[32]。焦平面列阵器件包括了探测器和处理电路两个部分,使得焦平面的引线数目降低,简化了后续的信号处理。焦平面器件由于探测元数目大,密度高,因而使系统具有高灵敏度和高分辨率;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。焦平面器件发展方向已从单色向双色或者多色发展^[33],从致冷成像向非致冷成像发展。

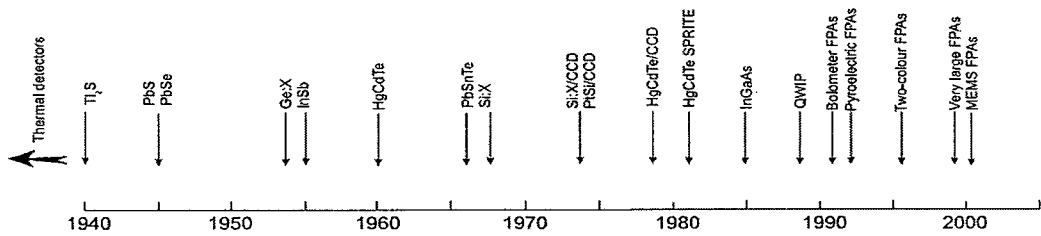


图 1.2.1 红外探测器的发展历程^[21]

Fig.1.2.1 Development of infrared detector

1.3 短波红外 InGaAs 探测器

短波红外是指 $1\sim 3\mu\text{m}$ 波段的红外辐射。在该波段中,很多物质具有独特的光谱特性,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,所以短波红外探测和成像技术在航空航天、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。而且在黑暗环境中仅有的自然光,包括月光、星光、大气辉光等,大部分能量集中在这个波段,因此短波红外在微光夜视领域也有着重要的作用。

可用于 $1\sim 3\mu\text{m}$ 波段的红外探测材料主要包括 HgCdTe、InSb、InAs、InGaAs 等材料。InSb 和 InAs 材料禁带宽度较小,都是窄禁带半导体,探测器性能稳定,但室温条件下暗电流很大,探测率较低,需要低温制冷进行工作^[34]。HgCdTe 材料制备的红外探测器在短波红外波段也有较好的性能。但是 HgCdTe 材料也存在一些局限性:在短波红外波段, Hg 组分较大,材料生长难度较大,均匀性较难控制; HgCdTe 材料的本征缺陷浓度较高,在温度较高或辐射的作用下性能不稳

定; HgCdTe 材料存在严重的隧道效应, 必须工作在低温致冷条件下, 以抑制热噪声, 才能达到良好的红外探测效果^[28]。使用 HgCdTe, InAs 与 InSb 等材料制造的探测器都需要低温制冷以抑制热噪声才能达到较高的探测率, 增加了整个系统的重量和体积, 增加了功耗, 同时也增加了装配的复杂性, 以及引入可靠性和寿命等问题, 在航天遥感等应用方面受到约束。

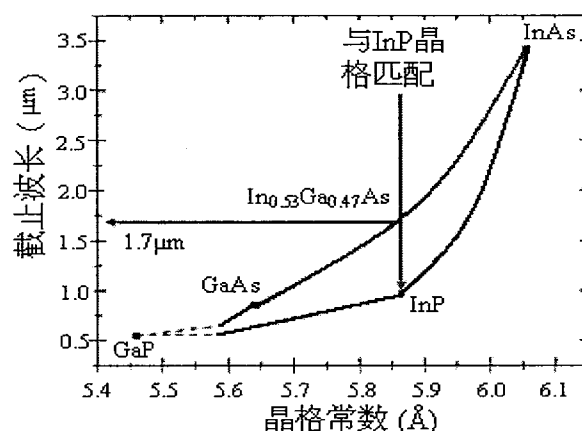


图 1.3.1 III-V 族化合物晶格常数与截止波长的关系

Fig1.3.1 The relationship between the lattice constant and the long wavelength cutoff of III-V compounds

三元化合物 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 是 III-V 族的赝二元系、直接带隙的半导体材料^[29,35], 可由 InAs 与 GaAs 以任何配比形成。如图 1.3.1 所示, 随着组分 x 的变化, 其晶格常数从 GaAs 的 5.6533Å 变化到 InAs 的 6.0583Å , 禁带宽度从 1.43eV 变化到 0.35eV , 相应的, 截止波长从 $0.87\mu\text{m}$ 变化到 $3.5\mu\text{m}$, 很好的覆盖了 $1\text{-}3\mu\text{m}$ 的大气窗口, 因此是制备短波红外探测器的合适材料。 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 材料具有高迁移率、良好的抗辐照特性等优点, 而且 InGaAs 材料制备技术非常成熟, 包括气相外延、液相外延、金属有机化合物化学气相淀积、分子束外延技术等^[36,37], 可以生长出高质量的 InGaAs 外延材料。因此 InGaAs 探测器是小型化、低成本和高可靠性的短波红外探测系统的最佳选择之一。表 1.3.1 给出了 InP、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 和 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 在 300 K 时的材料参数。InP 和 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的晶格完全匹配, 因此在 InP 衬底上可以生长出高质量的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 外延层, 研制出高性能的器件。

表 1.3.1 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^[38]

Tab. 1.3.1 Basic parameters of InP, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ and $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ at 300K

参数	InP	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$
晶格结构	闪锌矿 ⁺	闪锌矿 ⁺	闪锌矿 ⁺

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

从上世纪 80 年代开始多个国家开展了空间遥感应 InGaAs 光电探测器的研究,目前国际上的研究已从单元器件发展到焦平面探测器,性能不断提高,功能越来越多。焦平面探测器分为扫描型线列焦平面探测器和凝视型面阵焦平面。同时探测波段也由 0.9~1.7μm 延伸到 0.9~2.5μm 和 0.4~1.7μm 等,使得器件的应用范围得到极大的扩展^[39-46]。

1.4 可见拓展近红外 InGaAs 探测器

在众多短波红外波段的探测器中, InGaAs 探测器具有可在相对较高温度下仍有较好的性能、迁移率高、可靠性好等特点, 有较大的优势^[47], 长线列和面阵 InGaAs 焦平面探测器逐渐应用于空间遥感与夜视、侦察与监视、红外光谱成像等众多领域^[48-55]。InGaAs 短波红外探测器在室温下有较高的量子效率, 使其在 0.9-1.7μm 波段得到广泛的应用。为了进一步提高其在军事和商业特别是微光夜视方面的应用, 需要将其响应波段扩展到可见光。

1.4.1 可见拓展近红外 InGaAs 探测器的意义

相对于传统的 InGaAs 短波红外探测器, 向可见拓展的 InGaAs 探测器在可见光波段 (0.4-0.9μm) 有很高的量子效率, 同时在近红外波段也能保持优良的性能, 包括高探测率、高量子效率和小暗电流, 使其在微光夜视、侦查、农业检测等领域获得重要的应用。对于某些需要同时探测可见光和短波红外的应用, 需要两个分离的探测器分别进行探测, 并且需要两套分离的成像系统, 通过采用 InGaAs 可见/短波红外探测器能同时探测可见光和短波红外, 简化了成像系统, 减小了尺寸和重量^[56,57]。

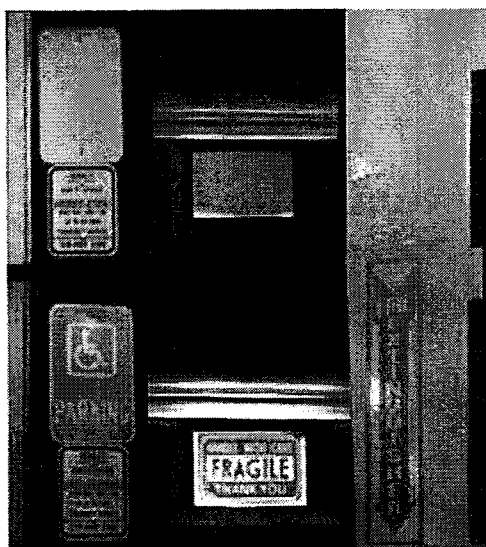


图 1.4.1 传统的 InGaAs 探测器（上）和可见/短波红外探测器（下）成像^[56]
Fig.1.4.1 Pictures taken with an InGaAs SWIR camera (top) and a visible InGaAs camera (bottom)

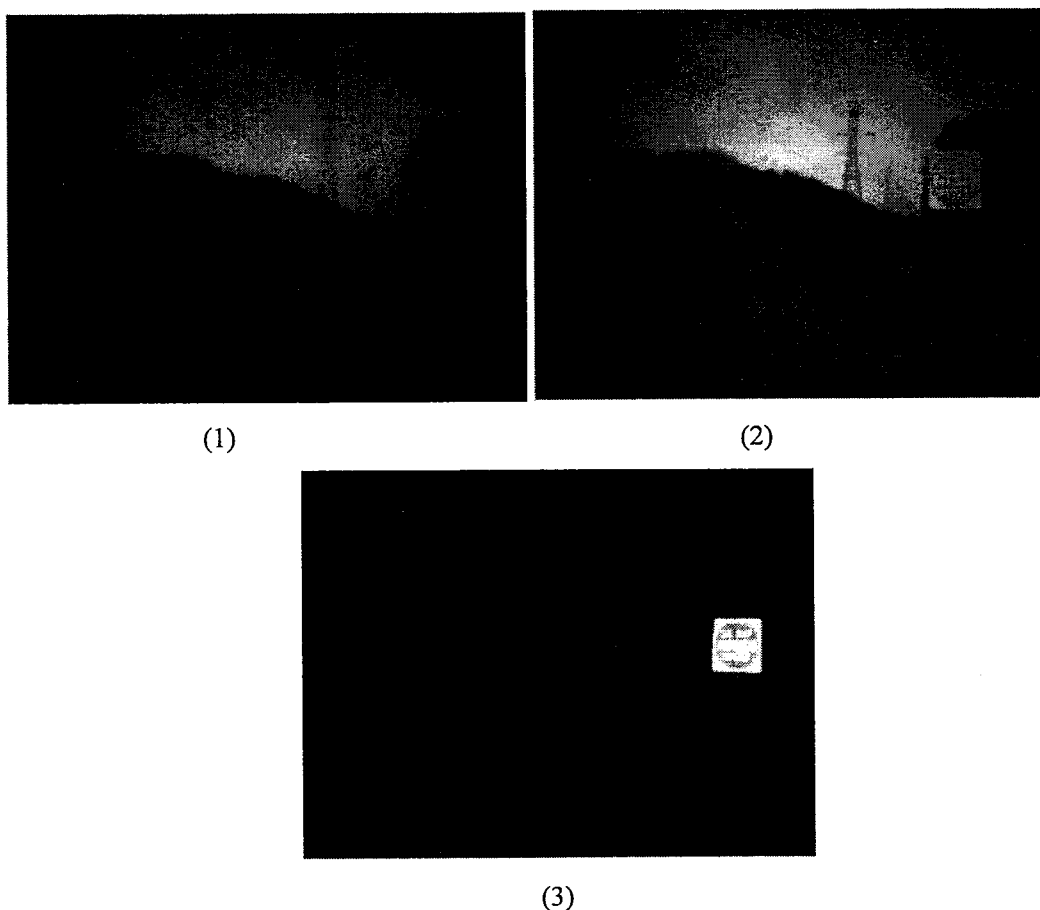


图 1.4.2 三种探测器成像对比^[56]: SWIR InGaAs 探测器 (1)、可见/短波红外 InGaAs 探测器 (2)、可见光探测器 (3)

Fig.1.4.2 Pictures taken with three different cameras: an InGaAs SWIR camera (1), a visible InGaAs camera (2), and a visible camera(3)

在夜暗环境中存在着少量的夜微光，如月光、大气辉光、星光等，能量集中在可见-短波红外波段。图 1.4.3 为晶格匹配的 InGaAs 探测器量子效率与夜天光辐射的对比，InGaAs 焦平面探测器响应波段在短波红外区域，与微光夜视的光谱范围较好吻合^[58]。InGaAs 焦平面探测器可见拓展后，可以较大的改善可见波段的光谱响应，使其更好的覆盖微光夜视所需的光谱范围。因此可见拓展的 InGaAs 焦平面探测器在微光夜视领域有着良好的应用前景。

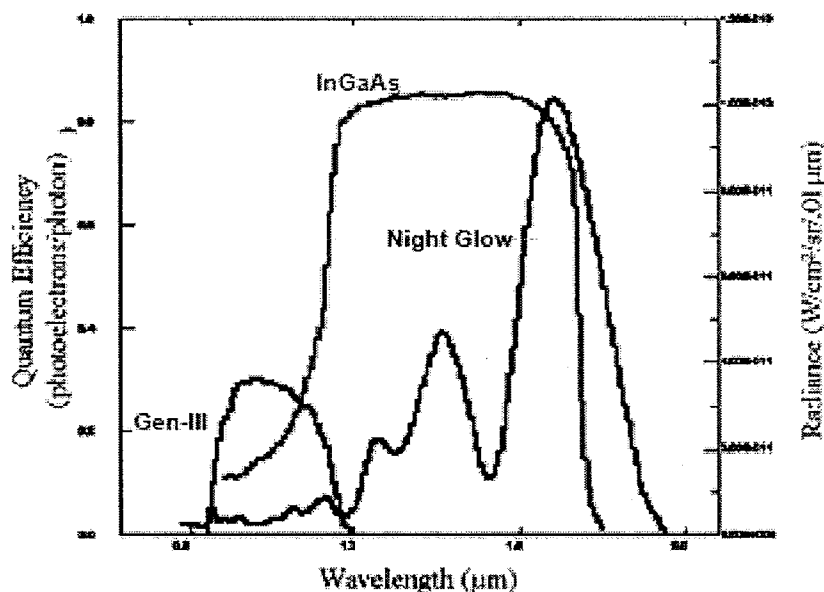


图 1.4.3 常规 InGaAs 探测器量子效率与夜天光辐射的对比^[58]

Fig.1.4.3 Comparison of QE of SWIR InGaAs detectors and illumination in dark sky

向可见拓展的 InGaAs 探测器与传统的 Si 器件相比也有一定的优势。Si 的禁带宽度为 1.12eV，所以 Si 器件的截止波长为 1.1 μm ，只能探测可见波段的目标。Si 是间接带隙材料，因此器件的量子效率较低，而 InGaAs 为直接带隙材料，具有较高的响应率和量子效率。另外，Si 具有较低的吸收系数，其扩散长度大于吸收深度。当像元尺寸减小到 10 μm 甚至更小时，接近 Si 的吸收深度，因此在器件中会产生较大的串音，为了减小串音，必须减薄吸收层的厚度，而这将导致量子效率的降低。而 InGaAs 具有较大的吸收系数，能够在像元尺寸较小时依然具有较高的响应率和较低的串音。

1.4.2 可见拓展 InGaAs 探测器的研究现状

① 可见拓展的方法

目前 InGaAs 探测器一般采用 PIN 型结构。对于正照射的 InGaAs 探测器，在到达吸收层之前，光要通过 InP 帽层；对于背照射的 InGaAs 探测器，光需要

通过 InP 衬底。对于典型的 InGaAs 器件，帽层厚度为 $1\mu\text{m}$ 量级，而衬底的厚度为几百 μm 。从图 1.4.4 中正照射和背照射的比较可以看到 InP 层厚度对量子效率的影响^[56]。因此需要减小 InP 层的厚度，从而提高可见波段的量子效率。

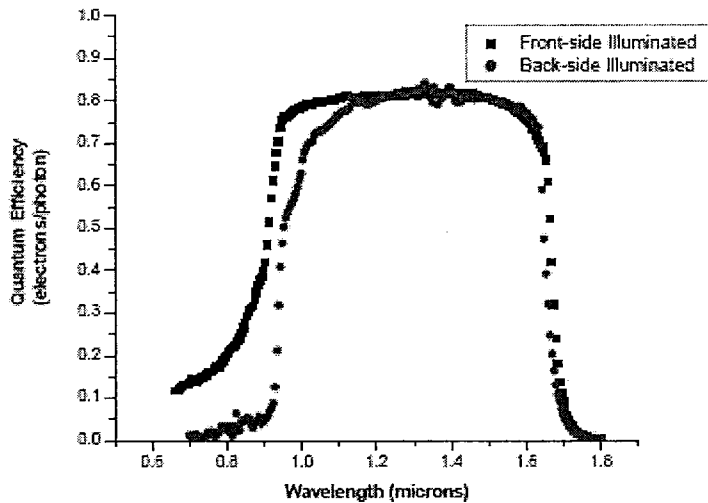


图 1.4.4 正照射和背照射量子效率的比较

Fig.1.4.4 QE of frontside-illuminated and backside-illuminated InGaAs detectors

对于背照射 InGaAs 器件，可以通过移除 InP 衬底的方式将响应波长延伸至可见光波段。要尽可能多的减少 InP 衬底对可见光部分的吸收，但也要保留足够厚度的 InP 以提供钝化和阴极接触。为了保持量子效率的一致性，接触层必须保证很好的均匀性，因此 Marshall J. Cohen 等人优化了传统的 InGaAsPIN 材料结构，在原有的外延层中加入一层阻挡层^[59]。具体的外延层结构如图 1.4.5 所示。

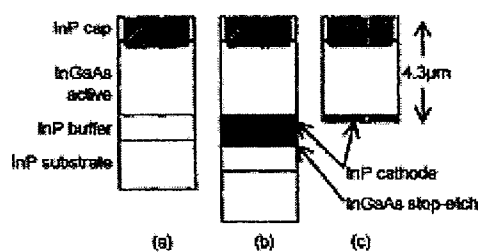


图 1.4.5 标准的 InGaAs 探测器外延材料结构(a)，优化的外延结构 (b)，衬底减薄后的结构 (c)

Fig.1.4.5 Structure of epitaxial material used for standard InGaAs SWIR detectors (a), optimized structure of epitaxial material (b), structure of detectors after substrate removal

在此基础上制备器件，Marshall J. Cohen 等人采用了一种机械抛光和湿法腐蚀相结合的衬底减薄的方法。衬底减薄步骤如下：用机械抛光的方法去除大部分 InP 衬底，然后用腐蚀液 $\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4$ (3:1) 腐蚀掉剩余的 InP 衬底和 InP 缓冲

层, 这一步腐蚀停止在 InGaAs 阻挡层, 然后用 25% $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7:\text{H}_2\text{O}_2(5:1)$ (5:1)腐蚀掉 InGaAs 阻挡层, 最后 InGaAs 探测器阵列包括 $1\mu\text{m}$ InP 帽层、 $3\mu\text{m}$ InGaAs 吸收层和 $0.3\mu\text{m}$ InP 接触层。最后探测器的响应波段为 $0.5\mu\text{m}$ - $1.7\mu\text{m}$ 。波长为 1500nm 的量子效率为 80%, 800nm 的量子效率为 50%, 500nm 的量子效率为 15%。

Goodrich 公司的 Tara Martin 等人采用类似的外延材料制备了 320×240 元 InGaAs 焦平面阵列^[56]。在器件制备完成后, 通过 In 柱与读出电路倒焊, 在器件和读出电路之间充入环氧树脂, 然后采用机械抛光和湿法腐蚀相结合的方法去除 InP 衬底, 衬底减薄前后器件结构的变化如图 1.4.6 和 1.4.7 所示。

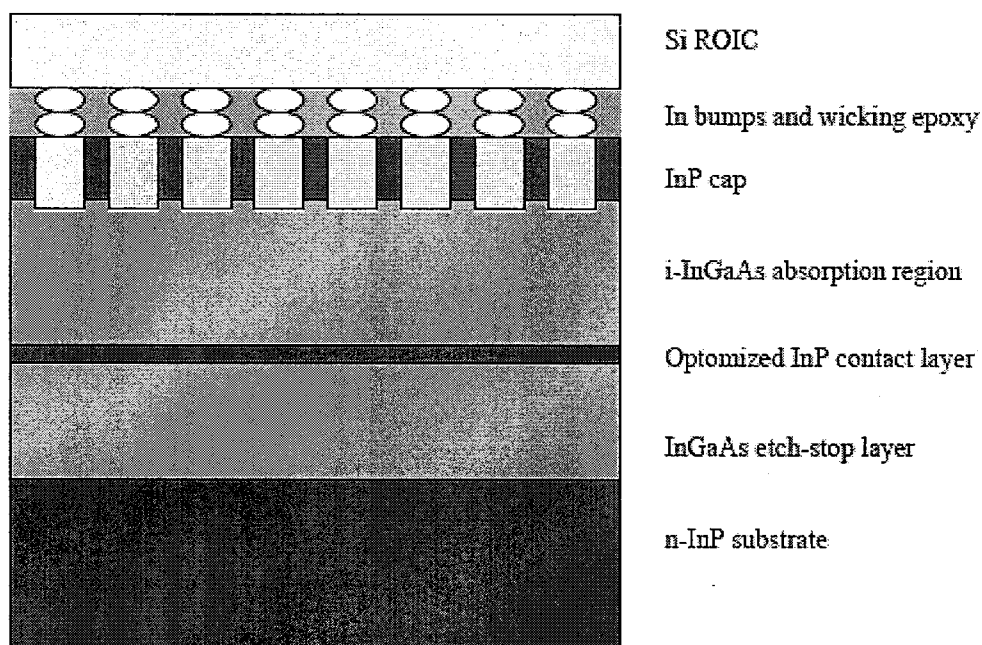


图 1.4.6 衬底减薄前的外延结构

Fig.1.4.6 The structure of detectors before substrate removal

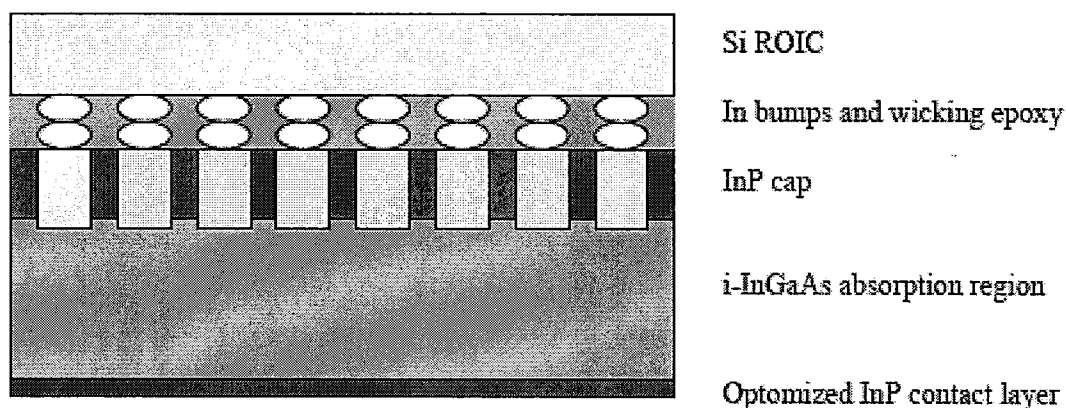


图 1.4.7 衬底减薄后的外延结构

Fig.1.4.6 The structure of detectors after substrate removal

在衬底减薄后测得的量子效率如图 1.4.8 所示。

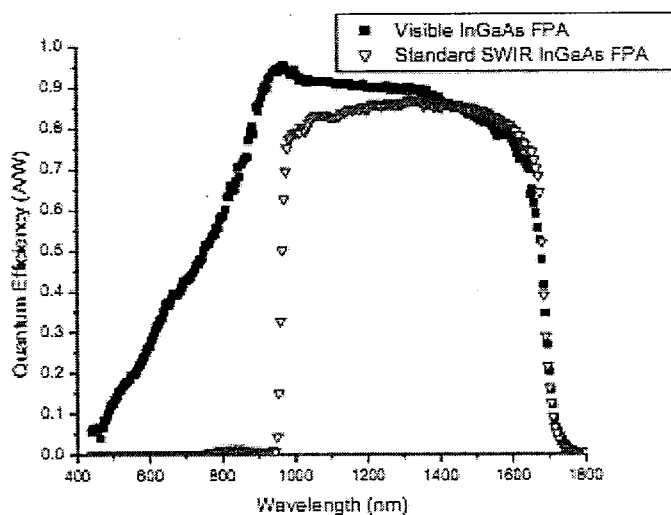


图 1.4.8 可见拓展后的与传统的 InGaAs 探测器量子效率的比较

Fig.1.4.8 QE of traditional SWIR InGaAs detectors and substrate-removed detectors

在 Air Force Research Labs 的支持下, Tara Martin 等人又将该衬底减薄的方法应用于 640×512 元 InGaAs 焦平面阵列^[60], 像元尺寸为 $25\mu\text{m}$, 响应波段同样为 $0.5\text{-}1.7\mu\text{m}$, 在 500nm 处的量子效率为 15%, 在 850nm 处的量子效率为 70%, 在 1310nm 处的量子效率为 85%, 在 1550nm 处的量子效率为 80%。在 DARPA (Defense Advanced Projects Agency) 的支持下, Goodrich 公司的 J. Battaglia 等人进一步将 InGaAs 焦平面探测器的面阵扩大到 1280×1024 元, 像元尺寸为 $15\mu\text{m}$, 响应波段为 $0.4\text{-}1.7\mu\text{m}$ ^[61]。

Indigo 公司的 Theodore R. Hoelter 等人也实现了 320×256 元 InGaAs 焦平面探测器的可见拓展, 光敏元大小为 $30\mu\text{m}$, 响应波段为 $0.35\text{-}1.7\mu\text{m}$ ^[62]。

为了进一步提高可见波段的量子效率, Tara J. Martin 等人优化外延材料结构, 将接触层的厚度减小到 $0.2\mu\text{m}$ ^[63]。光敏元尺寸为 10, 12, 15, $18\mu\text{m}$, 减薄后器件的背面形貌如图 1.4.9 所示, 响应波段为 $0.4\text{-}1.7\mu\text{m}$, 在可见波段的量子效率为 15%-50%, 在 $0.8\text{-}1.65\mu\text{m}$ 波段的量子效率超过 60%, 在 -1V 偏压下的暗电流小于 1pA , 在 -5V 偏压下暗电流小于 10pA , 在 0V 偏压下的电容小于 110fF , 在 -5V 偏压下的电容小于 90fF 。

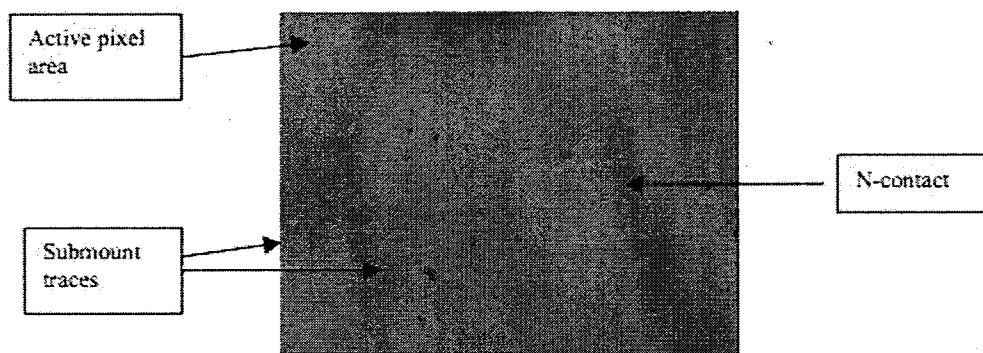


图 1.4.9 衬底减薄后器件的表面形貌

Fig.1.4.9 The image of detectors after substrate removal

在移除衬底的方法中,选择性腐蚀 InP/InGaAs 是非常重要的一种。李献杰^[64]等人通过不同配比和不同温度下的工艺实验,确定了 $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (2:3:30,30°C)和 37% $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$ (0°C)两种腐蚀液,分别作为对 InP 高度选择的 InGaAs 腐蚀液和对 InGaAs 高度选择的 InP 腐蚀液。

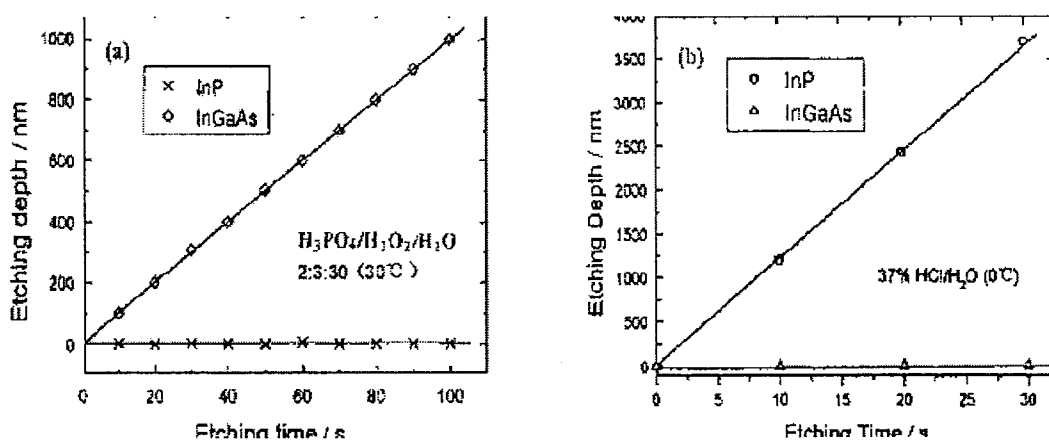


图 1.4.10 两种溶液对 InGaAs 和 InP 的腐蚀深度随时间的变化

Fig.1.4.10 The etching depth of InGaAs and InP versus time in two different etching solutions

从图 1.4.10 中可以看到, $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀液对 InGaAs 的腐蚀速率达到 10nm/s,而对 InP 几乎不腐蚀;37% $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$ 腐蚀液对 InP 的腐蚀速率达到 120nm/s,而对 InGaAs 几乎不腐蚀。因此该腐蚀液具有良好的选择性,且腐蚀面均匀光滑。

除了采用将器件和读出电路倒焊后减薄的方法,另外还有一种向可见拓展的方法即衬底转移技术^[65],先将 InGaAs/InP 材料贴在双面抛光的宝石片上,然后采用机械抛光和湿法腐蚀相结合的方法完全去除 InP 衬底,再采用台面成型的工艺制备芯片最后倒装互连,如图 1.4.11 所示。

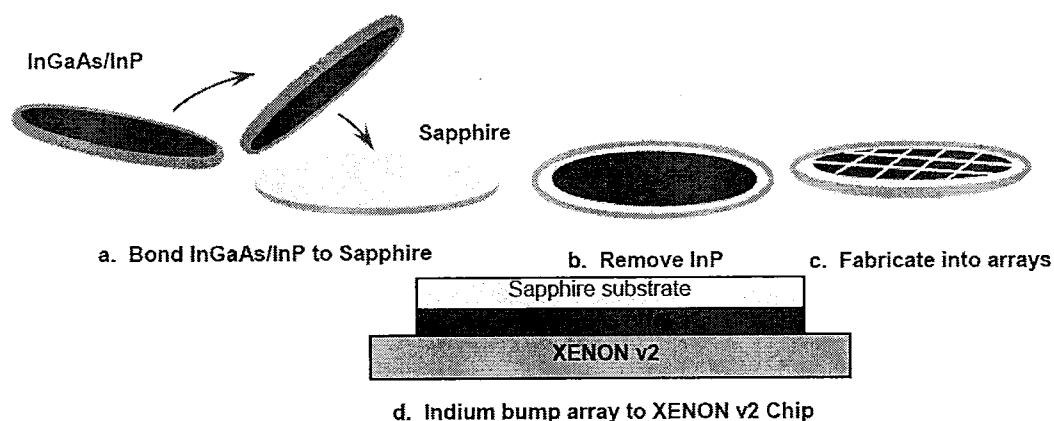


图1.4.11 InGaAs焦平面制备的衬底转移技术流程图

Fig.1.4.11 The process flow of substrate transfer of InGaAs FPAs

② 可见拓展对器件性能的影响

移除 InP 衬底之后, InGaAs 探测器的响应波长扩展到可见光波段, 同时在 $0.9\text{--}1.7\mu\text{m}$ 波段也能保持和传统的 InGaAs 一致的性能, 包括量子效率、暗电流、可靠性等。

Tara Martin 等人通过机械抛光和湿法腐蚀相结合的方法获得了 320×240 ($40\mu\text{m}$) 的可见/短波红外探测器阵列, 在 300mV 偏压下像元的暗电流小于 1pA 。Tara Martin 等人对可见拓展的 InGaAs 焦平面阵列进行了可靠性试验, 将 FPA 置于 300mV 工作电压下, 放入 80°C 烘箱中 400 小时后, 像元性能没有发生明显的改变^[56]。

Tara Martin 等人制备了像元大小为 $25\mu\text{m}$ 的 640×512 的焦平面阵列, 探测范围为 $0.4\text{--}1.7\mu\text{m}$, 像元响应率距离中间值小于 30% 的比例高于 99%, 并且测量了移除衬底后像元的暗电流。从图 1.4.12 中可以看到, 外延层改变和衬底移除并没有影响像元暗电流^[60]。

Theodore R. Hoelter 等人对衬底减薄后, 响应率的平均值为 0.35A/W , 与常规的 InGaAs 探测器相当, 盲元率为 0.2%, 甚至要低于常规的探测器, 说明向可见延伸并没有对器件的响应产生负面影响^[62]。

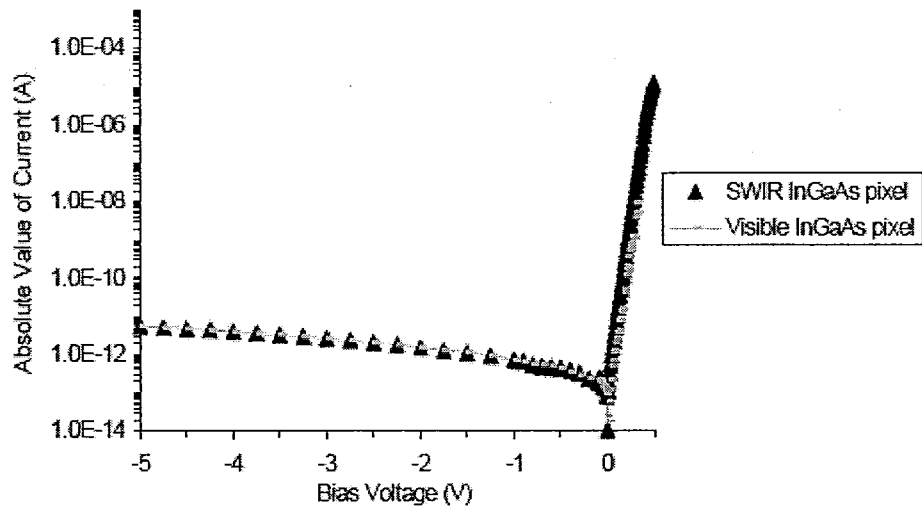


图 1.4.12 可见拓展后的与传统的 InGaAs 探测器暗电流的比较

Fig.1.4.12 I-V characteristics of traditional SWIR InGaAs detectors and substrate-removed detectors

Bora M.Onat 等人分析了探测器暗电流的成分，包括扩散电流和产生复合电流，通过采用更小的像元和优化 InGaAs 吸收层的厚度可以减小暗电流，减小像元大小，可以同时减小扩散电流和产生复合电流，较小吸收层厚度可以减小 n 区的扩散电流，同时减小两者的体效应，但是会降低量子效率。通过采用不同形状和尺寸的光敏元（圆形、长方形、正方形），研究了周长面积比对暗电流的影响。测量暗电流采用传感无限公司 Alessi 半自动探针。通过优化设计，在 12.3℃ 和 100mV 负偏压下暗电流密度为 $2\text{nA}/\text{cm}^2$ [66]。

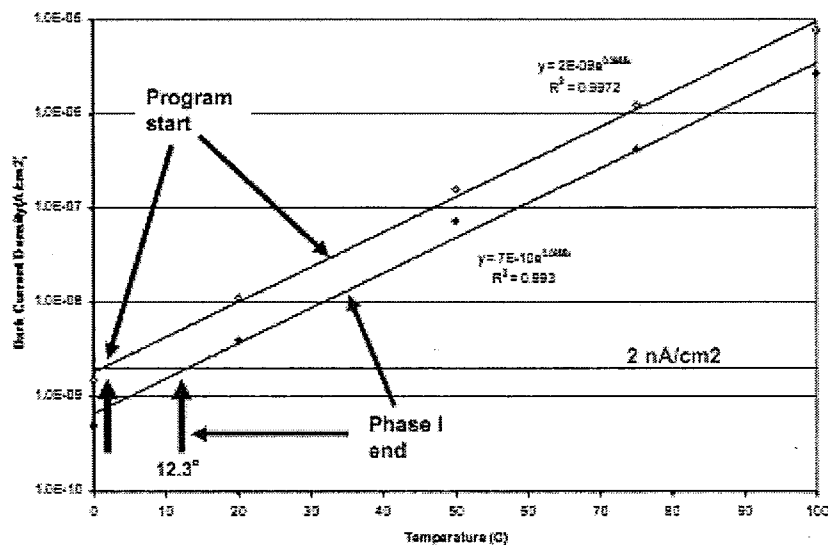
图 1.4.13 在 100mV 负偏压下像元暗电流随温度的变化^[56]

Fig.1.4.13 The dark current of pixel versus temperature at bias of minus 100mV

A. Rouvié 等人得到了像元尺寸为 $15\mu\text{m}$ 的 640×512 元 InGaAs 焦平面阵列, 通过化学腐蚀减薄 InP 层, 使光谱响应延伸到 $0.4\mu\text{m}$ 。由于质子辐照, 某些像元的暗电流变得不稳定, 在几个既定值之间转换, 这种行为称为 RTS 噪声。要减小 RTS 噪声, 有以下两种途径: 优化材料质量以减少缺陷密度; 在零偏压下工作。A. Rouvié 等人通过测试不同直径 (从 $4\mu\text{m}$ 到 $18\mu\text{m}$) 二极管的暗电流, 得到暗电流随直径变化的关系曲线 (如图 1.4.14), 表明在优化材料质量减小缺陷密度后, 暗电流大小与光电二极管直径成比例关系。对于较低的反向偏压 ($<0.2\text{V}$), 暗电流由少数载流子扩散电流决定; 对于较高的反向偏压 ($>0.2\text{V}$), 暗电流由表面 SRH 机制决定。最后得到, 对于小直径 ($6\mu\text{m}$) 二极管 (光敏元大小为 $15\mu\text{m}$), 在 293K 和 -0.2V 偏压下, 暗电流密度为 $30\text{nA}/\text{cm}^2$ [67]

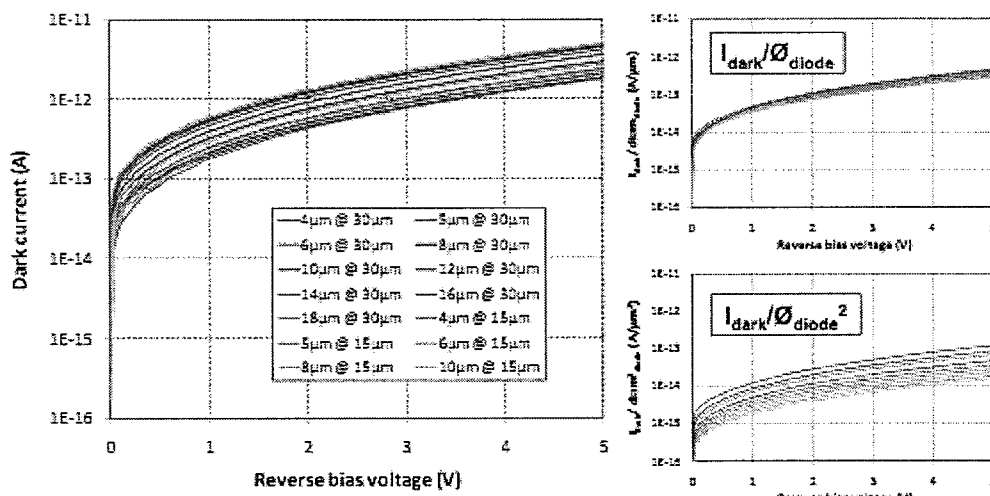


图 1.4.14 不同直径下暗电流随偏压的变化 [57]

Fig.1.4.14 Dark current as a function of reverse bias voltage (left) and demonstration of dark current perimeter dependence (right) for VisSWIR InGaAs structure

Jonathan Getty 等人指出, 在对传统的 InGaAs 探测器进行衬底减薄后, 探测器暴露在空气中的表面钝化困难, 导致接近表面的光生载流子被束缚住, 使探测器在 $0.4\text{-}0.9\mu\text{m}$ 波段的量子效率较低, InP 衬底的去除对器件光响应的改善比较有限 [68]。

③ 可见拓展后性能改善

在对 InGaAs 焦平面阵列进行衬底减薄之后, 为了进一步提高可见波段的量子效率, 需要减小表面的反射, 因此需要在减薄后的表面生长增透膜。Tara Martin 等人在衬底减薄后在表面生长了单层增透膜, 中心波长为 1000nm , 通过对比增

透膜前后的光谱, 长膜后减小了 600nm-1700nm 波段的反射, 但降低了 600nm 波长以下器件的量子效率^[56]。T. Pencheva 等人在对 InGaAs 焦平面阵列进行衬底减薄后设计了不同的多层增透膜结构, 包括采用不同的层数 (2, 3, 4, 5, 6) 和不同折射率 ($n_H=2.2, 2.25, 2.30, 2.40, 2.45$ 和 $n_L=1.38, 1.45, 1.50, 1.55, 1.60$) 的材料, 不同的排列结构 (空气/LH.../衬底和空气/HL.../衬底), 各层厚度选择遵循以下原则: 各层光学厚度 (nd) 相同; 总的光学厚度为 $\lambda_0/4, 3\lambda_0/4, 5\lambda_0/4$ (λ_0 为中心波长)。共设计了 900 种不同的结构, 从理论上计算透过率, 在响应波段 0.4-1.7 μm 中取 130 个 λ 值, 然后计算 Q 因子:

$$Q = \sqrt{1/N \sum_1^N (T(\lambda_i)_{\text{CALCULATED}} - T(\lambda_i)_{\text{DESIRED}})^2} \quad (1.4.1)$$

其中 $T(\lambda_i)_{\text{DESIRED}}$ 取值为 100%。Q 值越小, 抗反射的效果越好。最后通过比较计算结果得到了较优的多层增透膜结构^[69]。

1.4.3 可见拓展 InGaAs 探测器的发展趋势

近年来, 国外的研究机构在 InGaAs 可见延伸领域取得了一系列的成果。美国传感无限公司 (Sensors Unlimited Inc) 相继制作了 320x240 (40 μm)^[56]、640x512 (25 μm)^[60]、1280 x 1024 (15 μm)^[61] 元可见拓展 InGaAs 探测器, 响应波长为 0.4 μm -1.7 μm , 并且表现出较高的量子效率: 500nm 量子效率为 15%, 850nm 时为 70%, 1310nm 为 85%, 1550nm 为 80%。并且制作出了较为成熟的相机产品, 如图 1.4.15 所示, 其中 320x240 元 InGaAs 相机质量 (不带镜头) 小于 300g, 尺寸为 5cmx6cmx9.5cm, 而 640x512 元 InGaAs 相机质量 (不带镜头) 小于 1Kg, 尺寸为 18.1cmx7.6cmx7.6cm, 均能在 0-40 $^{\circ}\text{C}$ 下工作。

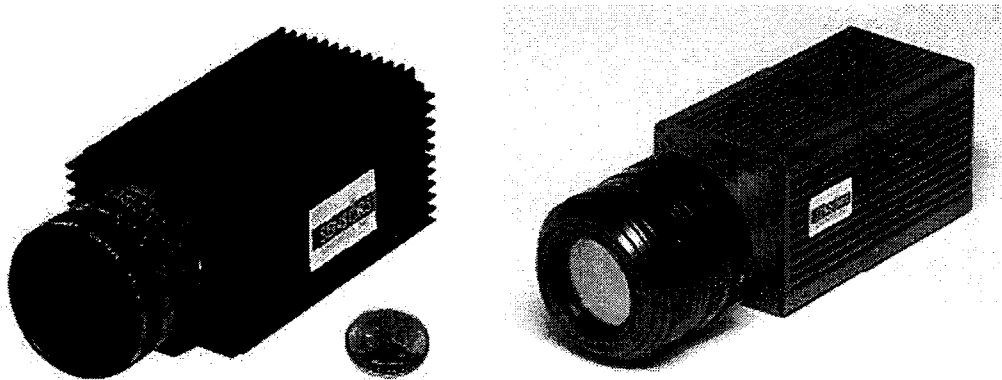


图 1.4.15 Goodrich 公司 320x240 元 InGaAs 相机 (左) 和 640x512 元 InGaAs 相机 (右)
Fig.1.4.15 320x240 InGaAs camera (left) and 640x512 InGaAs camera(right) of Goodrich

Indigo公司也制作出响应波长为 $0.35\mu\text{m}$ - $1.7\mu\text{m}$ 的InGaAs探测器（取名为VisGaAs）^[59]。法国III-V Lab制作了 640×512 ($15\mu\text{m}$)的探测器，响应波段为 $0.4\mu\text{m}$ - $1.7\mu\text{m}$ ^[67]。Judson也制作了 320×256 ($30\mu\text{m}$)的探测器，响应波段为 $0.4\mu\text{m}$ - $1.7\mu\text{m}$ ^[70]。Raytheon公司也通过对探测器进行衬底减薄改善光响应，探测器响应波段为 $0.5\mu\text{m}$ - $1.7\mu\text{m}$ ^[68]。



图1.4.16 III-V实验室 640×512 元可见拓展InGaAs探测器的成像图

Fig.1.4.16 Picture taken by the 640×512 visible InGaAs camera fabricated by III-V lab

在国内,可见拓展的 InGaAs 短波红外探测器的这个领域内未见有相关报道。

对于可见拓展的 InGaAs 短波红外探测器,近期的发展方向主要集中在接触层的优化,包括优化工艺进一步降低接触层厚度和采用不同的接触层材料如 InAlAs 等,以提高其对可见光的响应。另一个研究方向是对器件进行衬底减薄后多层增透膜设计。

可见拓展的 InGaAs 短波红外探测器在军事和民用领域都有重大的应用,但是对比国内外对于 InGaAs 焦平面器件的研究现状可以发现,无论从焦平面器件规模、器件种类,还是焦平面性能上来看,国内与国外都还存在很大的差距,因

此还有大量的工作需要进行。

1.4.4 近红外 InGaAs 探测器可见拓展的难点

传统的 PIN 型 InGaAs 外延材料包括 InP 衬底、InGaAs 吸收层和 InP 帽层。InP 的禁带宽度为 1.35eV，对应的截止波长为 920nm。In_{0.53}Ga_{0.47}As 的禁带宽度为 0.75eV，对应的截止波长为 1700nm。由于 InP 帽层或者衬底的吸收，传统的 InGaAs 探测器的探测范围为 0.9-1.7 μ m。对于 InGaAs 面阵探测器，采用背照射的工作模式，因此要使探测器响应波长拓展到可见光，需要减薄或者去除 InP 衬底。所以首先要寻找到去除 InP 衬底的合适手段，要保证减薄后芯片表面均匀一致，且对器件造成的损伤和产生的应力较小。其次，确定需要减薄的 InP 的厚度，研究 InP 层在短波红外和可见光波段的透过率。第三，InP 与 In_{0.53}Ga_{0.47}As 晶格匹配，为保证减薄后的器件性能，需要保留一定厚度的 InP 层作为表面钝化层，InGaAs 的工艺特点也决定需要 InP 层提供共用阴极接触，这对减薄的方法提出了进一步的要求。第四，在 InP 衬底减薄的过程中，外延芯片的厚度仅剩几个微米，很容易碎裂，无法再进行图形刻画，需要对探测器的工艺流程进行调整。第五，在对器件进行衬底减薄之后，考虑表面漏电的增大而使器件的暗电流增大，需要考虑表面钝化，为了提高器件的量子效率，需要进行增透膜，并且要综合考虑生长增透膜对可见波段和近红外波段的量子效率的影响。最后，在向可见进行拓展的过程中，对外延结构进行了改变，在提高可见波段量子效率的同时保证探测器在短波红外波段的良好性能。

1.5 本论文的研究目的和主要内容

本论文针对可见拓展的短波红外 InGaAs 探测器在军事和商业特别是微光夜视方面的应用需求，对 InGaAs 探测器光谱响应向可见拓展的工艺技术和器件物理进行了研究。第一章回顾了红外辐射技术和红外探测器的发展，概述了可见拓展的短波红外 InGaAs 探测器的意义、实现途径、发展现状以及难点；第二章研究了 InP 衬底的化学机械抛光以及 InP/InGaAs 的选择性湿法腐蚀，使用不同的材料制备了 32 $\times$ 32 面阵探测器，研究了衬底减薄对面阵探测器性能特别是响应光谱的影响；第三章研究了衬底减薄后的表面处理，研究了 SiN_x 单层增透膜以及 SiN_x/SiO_x 双层增透膜对衬底减薄后器件量子效率以及暗电流的影响；第四章采用物理模型，理论分析了材料参数对器件量子效率的影响，并与实验结果进行对

比；第五章实现了可见拓展的 512×128 面阵焦平面探测器；第六章为全文总结和展望。

2 衬底减薄工艺研究

要实现 PIN 型 InGaAs 短波红外探测器的可见拓展,关键在于减小红外辐射进入 PN 结前的无效吸收。目前空间遥感用 InGaAs 红外焦平面探测器采用混成结构,通过钢柱实现光敏芯片和读出电路之间的电学互连。根据光入射方式的不同,InGaAs 焦平面探测器分为正入射和背入射两种类型,而面阵探测器均采用背入射的工作方式。外延衬底作为入射窗口,目标辐射通过探测器的衬底后进入吸收层,激发产生光生载流子从而形成电信号。由于 InP 与 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 晶格常数相同,在衬底上能够外延生长晶格匹配的 InGaAs 吸收层材料,因此 InP 是最常用的衬底材料。InP 的禁带宽度为 1.35eV,对应的截止波长为 920nm,抑制了 InGaAs 探测器在可见波段的响应。因此将 InP 衬底减薄、去除是实现可见拓展的有效手段。本章研究了 InP 衬底减薄的方法,分别得到了机械抛光和化学湿法腐蚀的工艺参数,并将衬底减薄的方法应用于制备的面阵探测器。

2.1 衬底减薄的方法及原理

用于衬底减薄的方法有两种:化学机械抛光和化学湿法腐蚀。

化学机械抛光 (Chemical-mechanical Planarization, CMP)^[71]是通过机械加工和化学反应的方法对样品进行一系列减薄、研磨和抛光工艺,使样品表面到达所需要的厚度、平整度以及粗糙度。化学机械抛光示意图如图 2.1.1 所示^[72],真空吸盘通过夹具固定芯片,并在芯片背面施加一定压力,使芯片抛光面朝下与抛光盘接触,同时抛光液均匀加在抛光盘表面,芯片和抛光盘同时转动,通过机械力和抛光液的共同作用,实现减薄和表面平坦化的目的^[73,74]。

化学机械抛光包括粗抛和精抛。粗抛是利用刚性的主盘与芯片之间的摩擦,将表面物质逐层去除,主要用于减薄以及去除芯片在制备过程中产生的表面损伤层。精抛需要在抛光盘上覆盖一层带绒毛结构的无纺布抛光垫,这类抛光垫硬度小、压缩比大、弹性好,用于进一步降低芯片表面的粗糙度,实现平坦化^[75]。

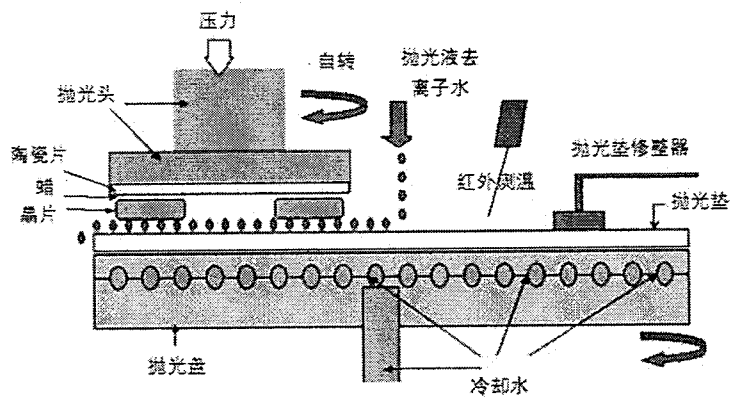


图 2.1.1 化学机械抛光的示意图

Fig.2.1.1 Schematic diagram of CMP

化学机械抛光的工艺流程如图 2.1.2 所示。影响化学机械抛光的因素主要有：抛光液、吸盘的压力以及吸盘和抛光盘的转速^[76-79]。抛光液的 PH 值、浓度、流量以及抛光过程中的温度，都对抛光速率和抛光后的表面质量产生影响，而且要考虑抛光液对芯片的腐蚀作用。抛光压力较小时，抛完后芯片表面平整度下降；抛光压力较大时，平整度提高，抛光速率提高，但是容易造成芯片表面损伤。吸盘和抛光盘转速较大时，抛光速率提高，但是容易造成芯片表面划伤和碎片。因此需要获得一种低损伤、速率适中、表面平整度较好的化学机械抛光工艺。

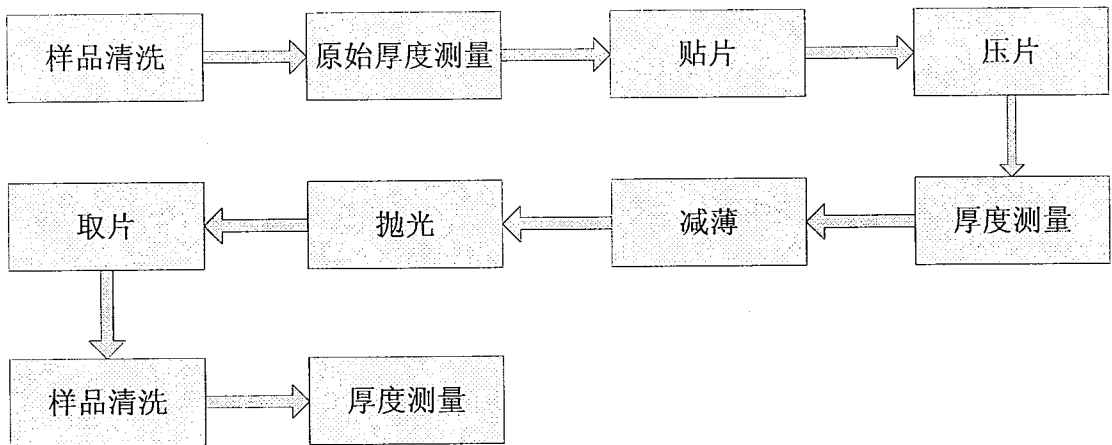


图 2.1.2 化学机械抛光的工艺流程

Fig.2.1.2 Process flow of CMP

化学湿法腐蚀是利用腐蚀液与芯片材料的化学反应来实现芯片减薄的。影响化学湿法腐蚀的参数主要有：腐蚀液配比、腐蚀温度以及被腐蚀芯片的表面状态。与化学机械抛光相比，化学湿法腐蚀具有选择性，对芯片表面的损伤较小，但是腐蚀速率相对较慢，而且会产生侧向钻蚀。

表 2.1.1 化学机械抛光与化学湿法腐蚀的比较

Fig.2.1.1 Comparison of CMP and chemical wet etching

减薄方式	减薄速率	是否具有选择性	表面损伤	表面平整度	是否具有方向性
化学机械抛光	较快	无	较大	与贴片工艺相关	是
化学湿法腐蚀	较慢	有	较小	差	否

为了实现 InP 衬底的减薄, 要结合化学机械抛光和化学湿法腐蚀这两者的优点。首先利用化学机械抛光减薄速度较快和不会产生侧向钻蚀的优势, 去除掉大部分的 InP 衬底, 然后利用化学湿法腐蚀良好的选择性以及较小的表面损伤的优点, 去除掉剩余的 InP 衬底。由于在衬底减薄后器件仍要保持原有的 PIN 型结构, 保持在近红外波段的性能, 因此需要保留一定厚度的 InP 层提供共用阴极接触, 同时作为表面钝化层, 减小表面漏电。所以要进行材料结构优化, 在原有的外延层中加入一层腐蚀阻挡层, 使 InP 缓冲层不会和 InP 衬底一起被腐蚀掉。由于 InP 与 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 晶格匹配, 因此腐蚀阻挡层的材料选择 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 。通过化学湿法腐蚀的方法完全腐蚀掉 InP 衬底后, 然后仍然使用化学湿法腐蚀的方法腐蚀掉 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 腐蚀阻挡层。从而实现衬底减薄。

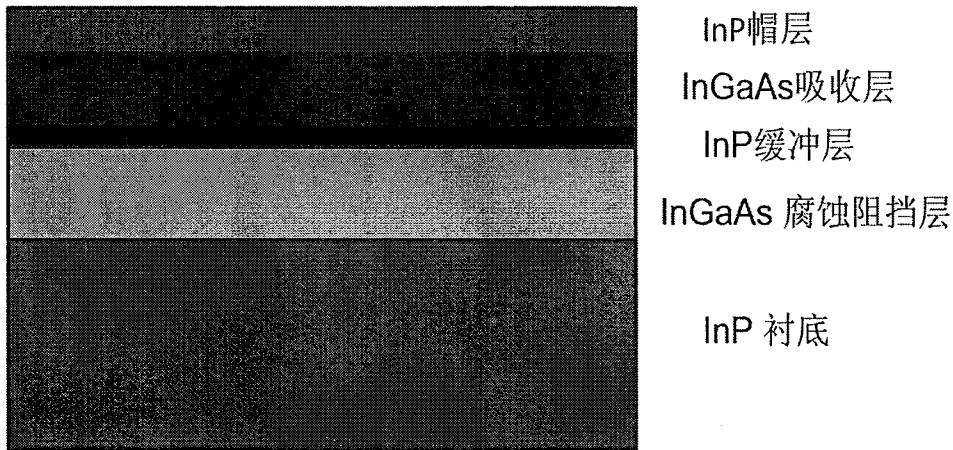


图 2.1.3 外延材料结构

Fig.2.1.3 The structure of epitaxial material

在 InP 衬底减薄后, 外延芯片的厚度仅剩几个微米, 很容易碎裂, 无法再进行图形刻画, 也无法再与读出电路实现电学互连。因此在器件制备好以后, 首先用钢柱将芯片与读出电路互连, 然后再进行衬底减薄。由于在减薄的过程中会在芯片表面施加压力, 会造成钢柱变形甚至断裂, 因此需要在读出电路和芯片之间充入填充物, 对钢柱进行保护。这里使用低温胶作为填充物。低温胶是一种由

弹性环氧树脂及固化剂等组成的粘接剂，液态下流动性较好，在较低的温度下即可实现固化，在较宽的温度范围（ -269°C - 60°C ）内具有较高的粘接强度，并且比其他环氧树脂韧性高，因此作为填充物是比较合适的。

本章采用了一种化学机械抛光和化学湿法腐蚀相结合的衬底减薄方法。具体的工艺如图所示。

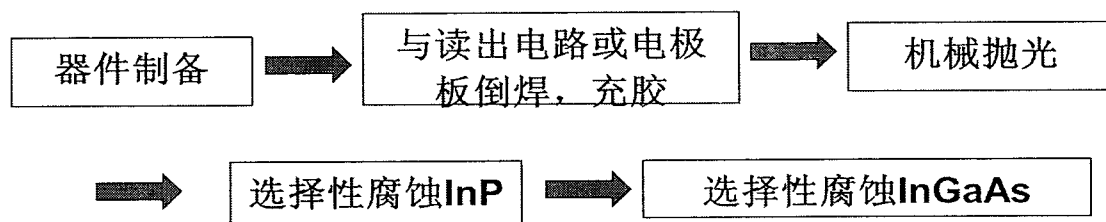


图 2.1.4 衬底减薄的工艺流程

Fig.2.1.4 Process flow of substrate removal

2.2 InP 衬底的机械抛光表征

本文实验所用化学机械抛光的设备是 Logitech 公司的 PM5 精密抛光仪，如图 2.2.1 所示。

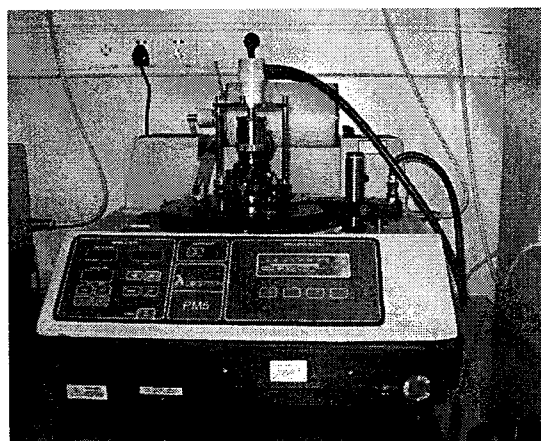


图 2.2.1 化学机械抛光设备的实物图

Fig.2.2.1 Picture of the equipment of CMP

实验用 InGaAs 外延材料为 PIN 型多层材料结构，材料结构的参数如表 2.2.1 所示。使用三氯乙烯、乙醚、丙酮、酒精对样品进行清洗，去除样品表面的有机物，使用去离子水冲洗表面，干净后氮气吹干。将样品置于加热台上加热，样品衬底朝上，使用石蜡将样品贴在玻璃片表面，将样品压平后，从加热台上取下，冷却至室温。化学机械抛光抛光后样品表面的平行度与样品的贴片工艺密切相关，贴片过程中的厚度差会最终传递给样品，因此在贴片过程中要保证样品表面平行

度较好。

表 2.2.1 外延材料结构及参数

Tab2.2.1 The structure and parameters of epitaxial material

外延层	导电类型	厚度/ μm	掺杂浓度/ cm^{-3}
InP	P^+	0.6	$>2 \times 10^{18}$
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	n^-	1.5	3×10^{16}
InP buffer	N^+	0.5	$>2 \times 10^{18}$
InP substrate	SI	350	$>1 \times 10^7$

将玻璃片在吸盘上吸牢，使用 PM5 精密抛光仪对样品进行化学机械抛光，吸盘转速控制在 10rpm，样品抛光至 InP 的衬底厚度为 $100\mu\text{m}$ 左右。将样品从玻璃片上取下，使用三氯乙烯、乙醚、丙酮、酒精对样品进行清洗，去除样品表面的抛光产物。使用 SEM 对抛光后的样品表面进行测试，在不同放大倍数下的表面形貌如图 2.2.2 所示。在进行粗抛后，样品表面平整度较差，有较多的凹坑和凸起。

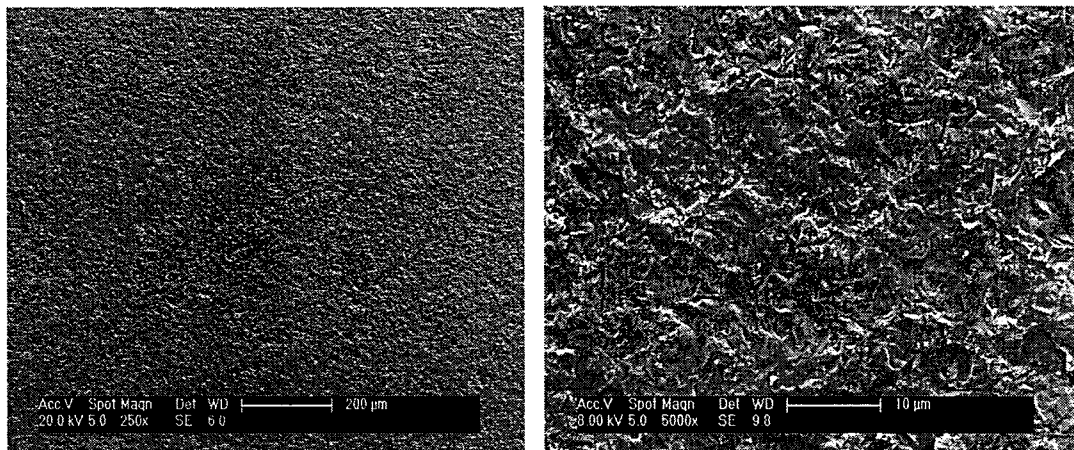


图 2.2.2 样品进行 CMP 后的 SEM（放大倍数分别为 250（左）和 5000（右））

Fig.2.2.2 SEM image with amplified factor of 250(left) and 5000(right) of sample after substrate removal

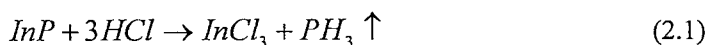
2.3 InP/InGaAs 选择性湿法腐蚀研究

在对 InP 衬底进行化学机械抛光之后，使用化学湿法腐蚀的方法去除掉剩余的 InP 衬底以及 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 腐蚀阻挡层。为了获得低损伤且选择性较好的化学湿法腐蚀方法，需要对腐蚀液的配比、腐蚀条件以及选择比等进行研究。

2.3.1 InP 衬底的湿法腐蚀

对于 InP 的化学湿法腐蚀而言，HCl 基的溶液常被用作腐蚀液^[80-85]。虽然 InP 不溶解于常用的包含氧化剂的溶液中，但是在 HCl 溶液中加入其他种类的酸，

会对 InP 的腐蚀速率产生显著的影响。本实验中用于腐蚀 InP 衬底的腐蚀液为体积百分比为 37.5% 的盐酸溶液和体积百分比为 85% 的磷酸溶液的混合溶液。化学方程式如下所示^[86]:



InP 在溶液中的腐蚀是一个化学反应的过程。HCl 是反应物，它腐蚀 InP 的过程分为两个步骤，如图 2.3.1 所示。第一步是化学键的同时交换，In-Cl 键和 P-H 键代替原有的 H-Cl 键和 In-P 键；第二步，由于 InP 表面的 In 原子和 P 原子同时与相邻的三个原子形成化合键，因此同第一步一样，另外两个 In-P 键断裂，使 In 原子和 P 原子从晶体中脱离出来^[87]。

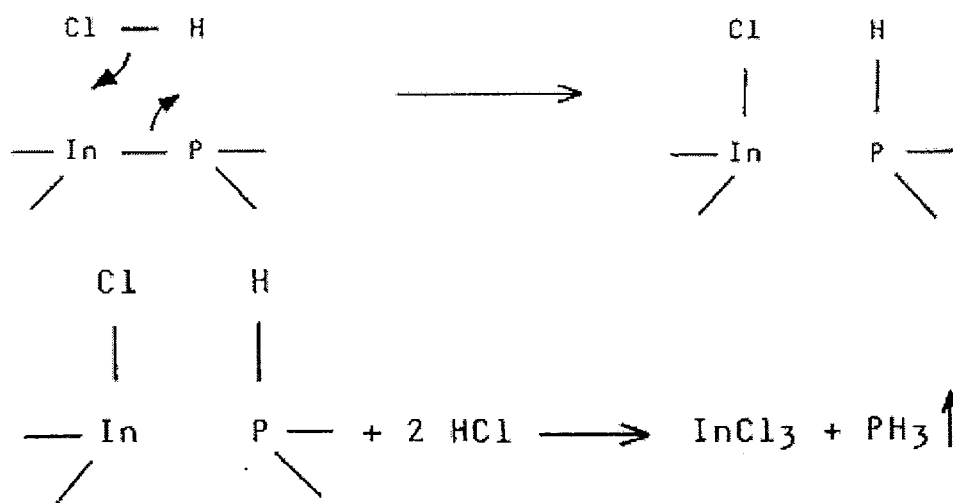


图 2.3.1 HCl 腐蚀 InP 的过程

Fig.2.3.1 The etching process of InP in HCl solutions

在混合液中， H_3PO_4 的作用是抑制 HCl 分子的电离，因为 HCl 分子在磷酸中的电离常数远小于其在水中的电离常数。而 InP 在腐蚀液中溶解的速率是由溶液中 HCl 分子的浓度决定的^[87]。

实验用 InGaAs 外延材料的结构参数与化学机械抛光实验所用材料相同。将外延材料分为四份样品，分别为 1#、2#、3#、4# 样品。使用三氯乙烯、乙醚、丙酮、酒精对样品进行清洗，去除样品表面的有机物，使用去离子水冲洗表面，干净后氮气吹干。采用进口胶将样品贴在平整度较好的宝石片上，在烘箱中固化。与器件衬底减薄的过程相同，使用化学机械抛光的方法去除掉样品的大部分 InP 衬底，将 InP 衬底减薄至 $100\mu\text{m}$ 以下。然后分别使用四组不同配比的腐蚀液对

四个样品进行化学湿法腐蚀，盐酸溶液和磷酸溶液的体积比分别为：(1) 1: 3；(2) 1: 1；(3) 3: 1；(4) 5: 1。为了同时考虑温度对化学湿法腐蚀的影响，使用光刻胶作为掩膜，在不同的温度下对样品进行部分湿法腐蚀。第一步，使用光刻胶遮挡住四个样品表面右边约三分之二的部分，在 45℃烘箱中烘干，将前述不同体积比的腐蚀液放置在 25℃水浴箱中，分别腐蚀对应的样品，腐蚀时间均为 6min；第二步，使用丙酮和酒精清洗掉光刻胶，然后使用去离子水清洗表面，氮气吹干；第三步，使用光刻胶遮挡住四个样品表面左边约三分之二的部分，烘干后在 35℃水浴箱中分别进行腐蚀，腐蚀时间同样为 6min；第四步，同第二步一样对样品进行清洗。

使用台阶仪分别测量四个样品表面的台阶，计算得到不同温度和不同体积配比的腐蚀液中 InP 衬底的腐蚀速率。

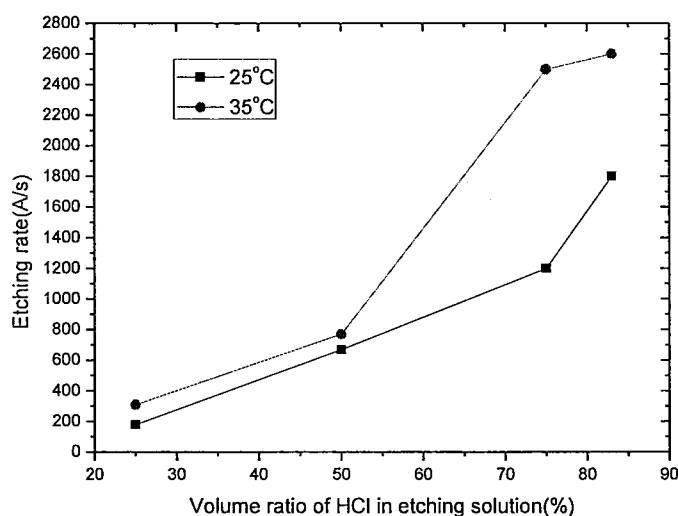


图 2.3.2 不同温度和溶液配比下 InP 的腐蚀速率

Fig.2.3.2 The etching rate of InP versus the volume ratio of HCl solutions at two different remperatures

从图 2.3.2 中可以看到，随着盐酸溶液体积百分数的增大，HCl 分子的浓度增加，化学反应速率增大，InP 腐蚀速率加快。随着温度的升高，HCl 分子在磷酸溶液中的电离度加大，减小了 HCl 分子的浓度，温度的升高促进了化学反应的进行，同时生成物的溶解速率加快，反应产生的 PH_3 气泡在 InP 表面的附着减小，使 InP 更充分的与 HCl 分子进行反应，两者综合的效果是 InP 腐蚀速率增加。

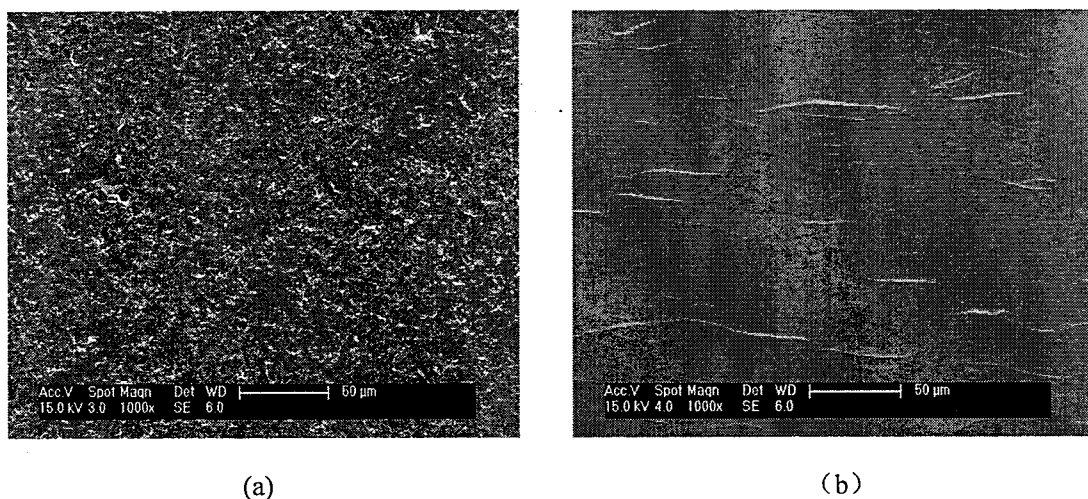


图 2.3.3 3#样品在化学机械抛光 (a) 和化学湿法腐蚀 (25°C) (b) 后的 SEM
Fig.2.3.3 SEM images of sample 3# after CMP (a) and chemical wet etching (b)

在化学湿法腐蚀后通过 SEM 获得了样品表面的形貌。相对于化学机械抛光后的表面形貌, 3#样品在化学湿法腐蚀后表面变得平坦, 说明本实验所用的腐蚀液具有一定的化学抛光作用, 能减小表面的不平整度。

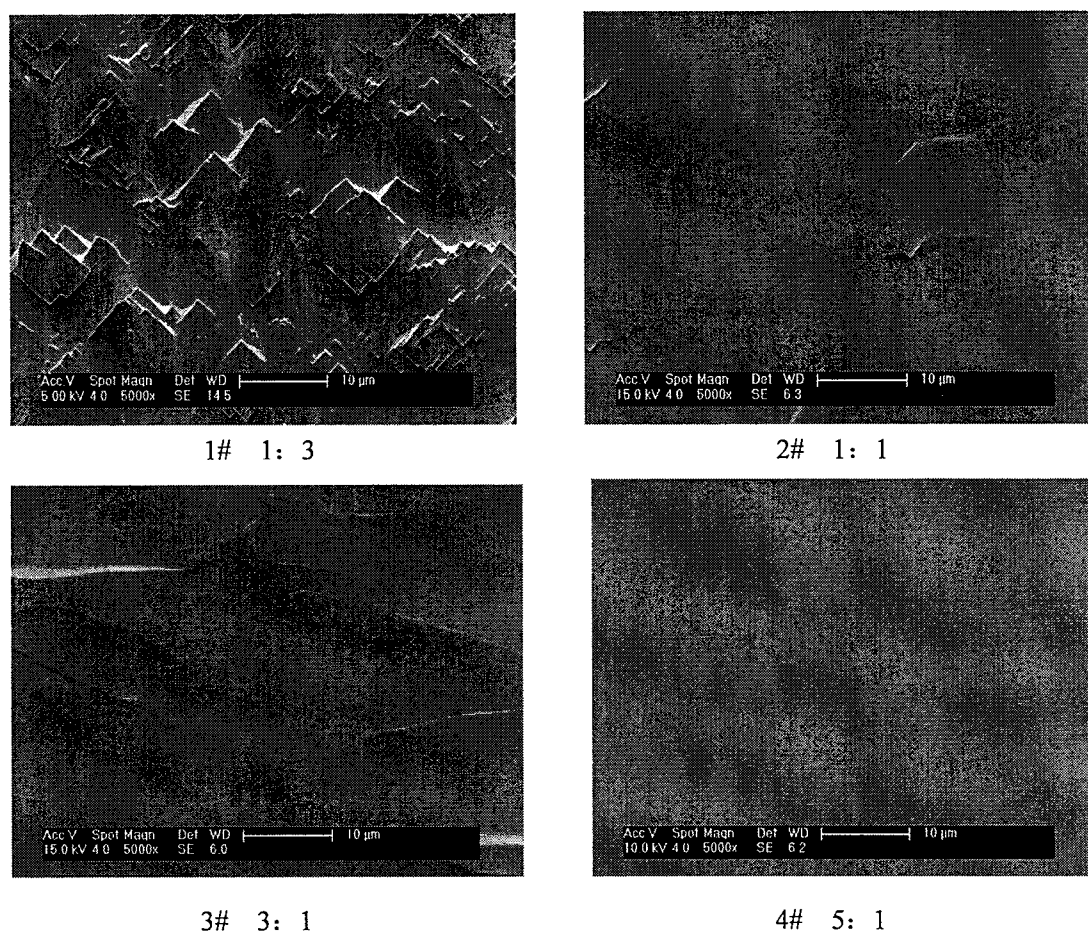
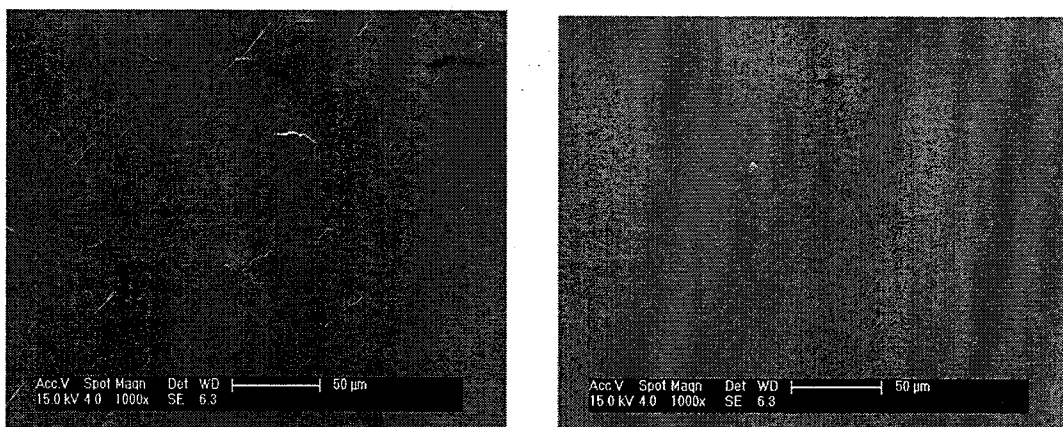


图 2.3.4. 不同腐蚀液配比 (25°C) 下的 SEM
Fig.2.3.4 SEM images of samples etched at different volume ratios of HCl solutions



25°C

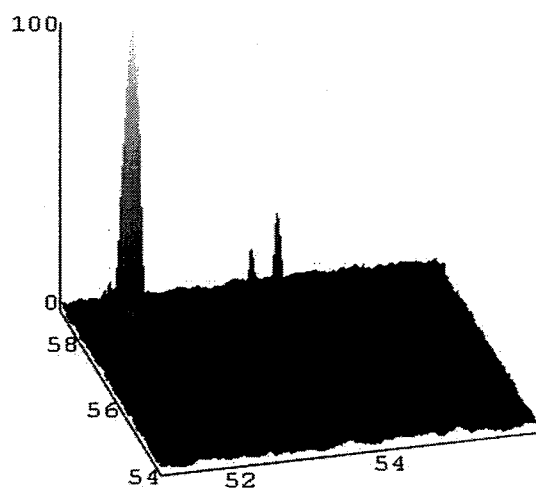
35°C

图 2.3.5 不同腐蚀温度（溶液体积比为 1: 1）下的 SEM

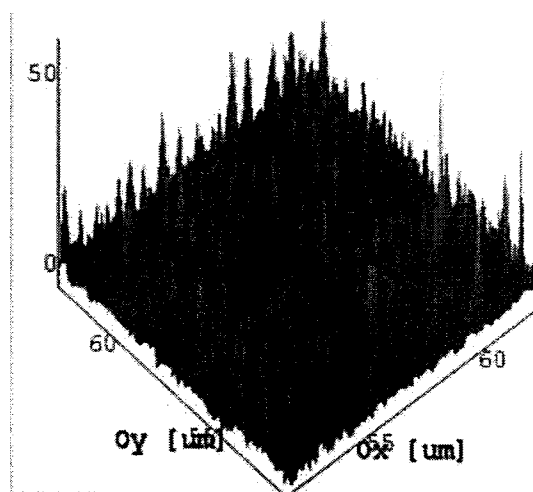
Fig.2.3.5 SEM images of samples etched at different temperatures (the volume ratio of HCl solution=1:1)

不同溶液配比和不同腐蚀温度下的表面形貌如图 2.3.4 和图 2.3.5 所示。随着盐酸溶液体积百分比的增大和温度的升高，InP 的腐蚀速率增大，另外温度的升高也减小了生成气体的掩膜作用，因此增强了腐蚀液对 InP 表面的化学抛光作用，使腐蚀后的表面趋于平坦。

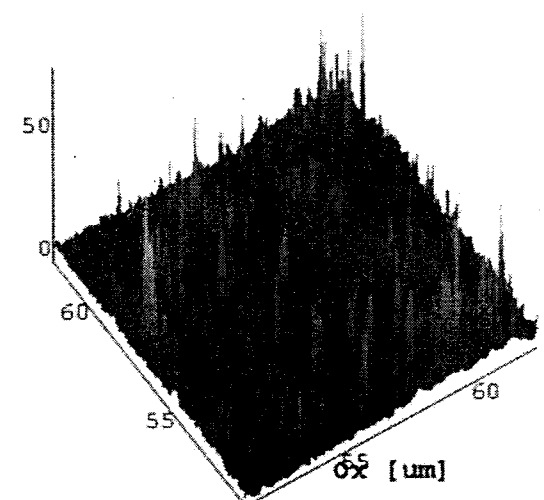
由于在器件减薄的过程中，InP 衬底是被完全去除的，因此对于前述的四个样品，分别在各自的溶液配比和温度下继续进行腐蚀，同前面一样采用光刻胶作为掩膜，直至 InP 衬底被完全去除。



3: 1, 25°C, RMS=3.75nm



3: 1, 35°C, RMS=3.71nm

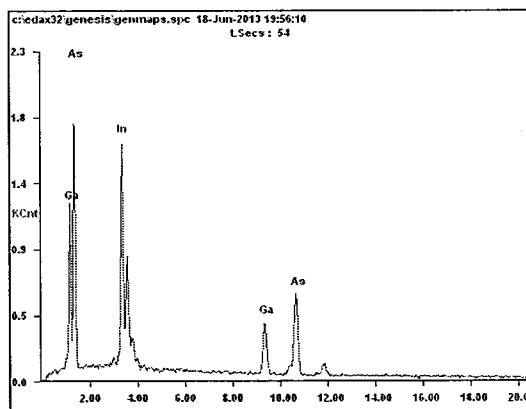
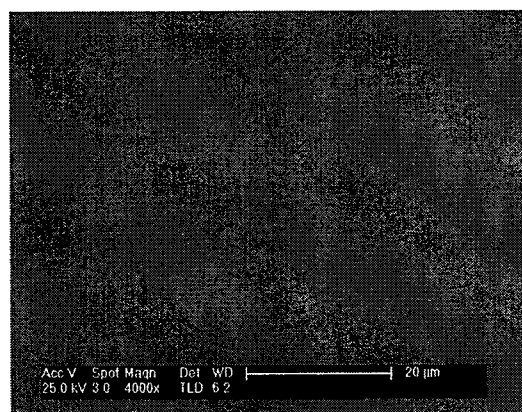


5: 1, 35°C, RMS=3.59nm

图 2.3.6 不同腐蚀条件下的 AFM

Fig.2.3.6 AFM images of samples etched on different conditions

不同溶液配比和不同腐蚀温度下的 AFM 如图 2.3.6 所示, InP 衬底被过腐蚀后样品表面的 RMS 值基本保持在同一水平。样品表面呈现针尖状, 3#样品在 25°C 下腐蚀后的针尖状较少, 表面较为平坦, 随着配比的增大和温度的升高, 化学反应速率的增大快于生成物溶解速率, 使表面针尖状变多。



元素	重量百分比	原子百分比
In	26.90	19.08
Ga	17.97	20.99
As	55.13	59.93

图 2.3.7 3#样品 InP 衬底在 25°C 下被过腐蚀后的 SEM (上) 和 EDS (下)

Fig.2.3.7 SEM image (up) and EDS result (down) of sample 3# after substrate removal

3#样品 InP 衬底在 25℃ 的腐蚀温度下被过腐蚀后, 利用扫描电镜和 X 射线能谱仪对减薄后的样品表面进行了元素的快速定量分析, 如图 2.3.7 所示。可以看到, 通过化学湿法腐蚀作用, InP 衬底被完全去除, 得到了平整、光亮的铟镓砷表面, 这仅靠化学机械抛光是无法完成的。

综合考虑腐蚀速率和完全腐蚀后样品的表面形貌, 最终选择作为 InP 的化学湿法腐蚀条件为盐酸溶液: 磷酸溶液体积比为 3: 1, 腐蚀温度为 25℃。

2.3.2 InGaAs 阻挡层的湿法腐蚀

在 InP 衬底被完全腐蚀后, 为了完成衬底减薄, 还需要采用化学湿法腐蚀的方法去除掉 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 腐蚀阻挡层。可用于选择性湿法腐蚀 InGaAs/InP 的溶液很多, 包括 $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液^[88-90]、 $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液^[91]、 $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液^[92-94]以及柠檬酸: $\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液^[95]等。

本实验采用酒石酸溶液与双氧水的混合溶液作为腐蚀液, 溶液配比为酒石酸溶液 (重量比酒石酸: $\text{H}_2\text{O}=1: 1$): H_2O_2 体积比为 5: 1, 腐蚀温度为 35℃, 在水浴箱中进行。实验所用 InGaAs 外延材料的结构参数与化学机械抛光实验所用材料相同。腐蚀后样品表面较为平整光滑, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 在腐蚀液中的腐蚀速率约为 $0.5\mu\text{m}/\text{min}$ 。

2.4 衬底减薄在探测器中的应用

根据 p-n 结形成方式的不同, InGaAs 探测器可以分为平面型结构和台面型结构。平面型器采用 n-i-n⁺ 的外延材料结构, 通过将掺杂元素以杂质扩散或者离子注入的方式在外延材料中成结, 台面型器件则是通过在外延材料的生长过程中进行原位掺杂形成 p-n 结。两种结构器件的截面图如图 2.4.1 所示。

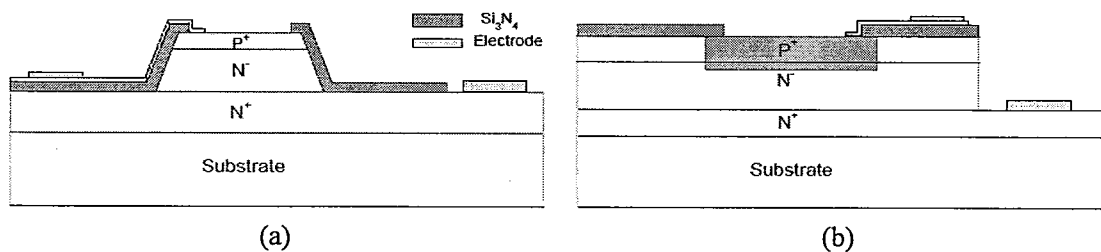


图 2.4.1 台面型(a)和平面型(b)InGaAs 红外探测器

Fig.2.4.1 The structure of InGaAs infrared detector with mesa-type (a) and planar-type (b)

台面型器件通过干法或湿法形成隔离槽的方式来实现光敏元的定义, 这种结构的优点是重复性好, 工艺简单, 光敏元的定义比较精确, 抑制了相邻光敏元之

间的串音。其缺点是光敏元的隔离是通过破坏性的方式实现的，并且 p-n 结的侧面暴露在外面，钝化困难，会使器件的可靠性降低，暗电流和噪声较大，很大程度上限制了器件探测率的提高。平面型器件在制备过程中，掺杂元素在扩散或者离子注入的工艺过程中都会存在一定程度的横向扩散，这样光敏元的精确定义比较困难，相邻光敏元之间会存在较大的串音，并且制备工艺比较复杂。但是，由于平面型器件的 p-n 结处在吸收层中，减小了界面的影响和器件钝化的难度，因此器件具有比较低的暗电流和噪声，比较适用于航天遥感领域。在解决平面型器件存在的难点方面，国内外很多文献都做了相应的研究，比如减小扩散孔的大小以控制光敏面的扩大、采用环形电极以及采用浅隔离槽与保护环的一体化设计等。本节用于衬底减薄的器件均采用平面型结构。

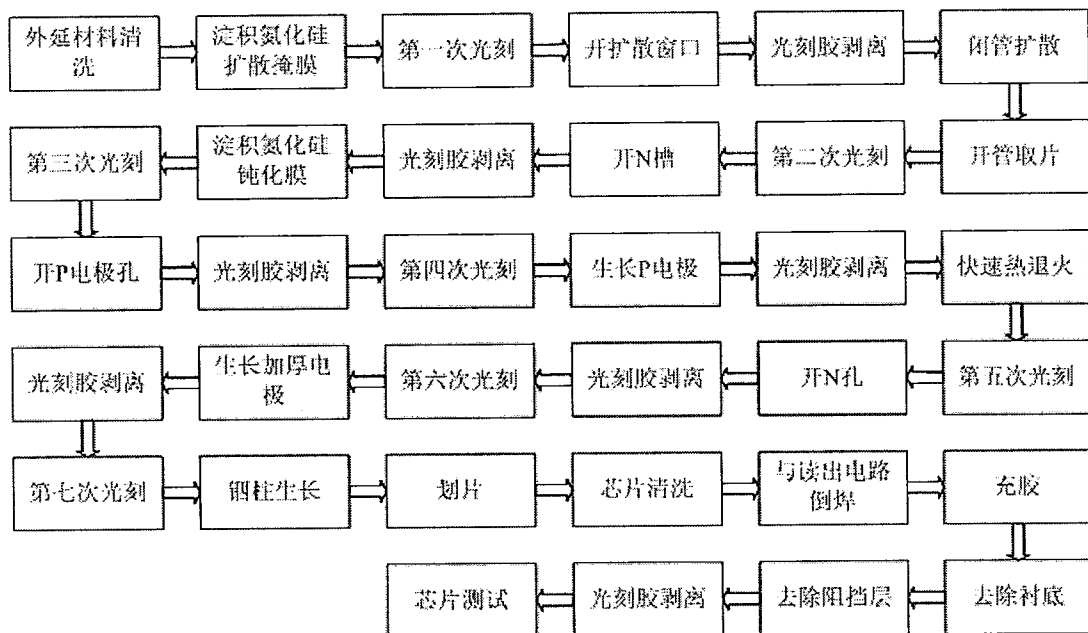


图 2.4.2 光敏芯片制备的工艺流程图

Fig.2.4.2 The process flow of fabrication of photosensitive chip

本节中平面型探测器制备用到两种不同的材料：InP 缓冲层和 InAlAs 缓冲层的材料。材料外延结构和具体的参数会在下面的章节中分别给出。两种材料的平面型探测器的制备均采用常规平面工艺。通过等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 技术沉积 SiN 薄膜作为扩散掩膜，采用感应耦合等离子 (ICP) 刻蚀技术刻蚀出扩散孔，扩散方式采用 Zn 的闭管扩散，采用湿法腐蚀和氩离子刻蚀相结合的方式开 N 电极孔，之后沉积 SiN 薄膜作为钝化层进行钝化，然后通过离子束溅射的方式生长 Au 制作 P 电极，进行高温快速退火减小接触电阻以实现欧

姆接触，之后通过离子束溅射的方式生长 Cr/Au 形成 P、N 加厚电极，最后生长钢柱用于芯片与读出电路的电学互连。具体工艺流程如图 2.4.2 所示。

通过上述工艺制备了背照射平面型的 32×32 元面阵光敏芯片，如图 2.4.3 所示，采用两种类型的外延材料均制备了两种规格的器件，扩散区面积分别为 $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ 和 $23 \times 23 \mu\text{m}^2$ ，中心距均为 $30 \mu\text{m}$ ，面阵周围引入了保护环结构，保护环离面阵最外围的扩散区距离 $10 \mu\text{m}$ ，并通过延伸电极与 N 电极相连。

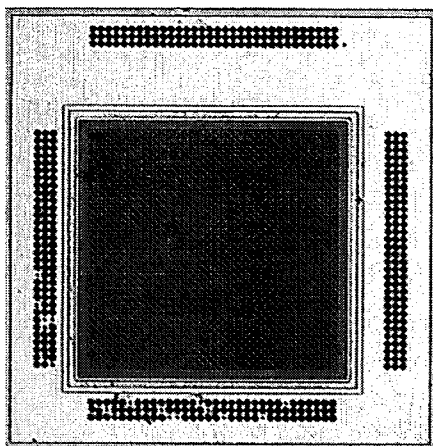


图 2.4.3 背照射 32×32 面阵 InGaAs 光敏芯片

Fig.2.4.3 The backside-illuminated 32×32 InGaAs detector array

在光敏芯片制备完成后，为了简单快速的获得器件的性能，使用中测电极板代替读出电路，实现电信号的输出。通过 In 柱倒装焊实现光敏芯片与电极板的电学互连，如图 2.4.4 所示。然后在光敏芯片与读出电路之间充入低温胶，放置于 45°C 烘箱中固化，固化时间为 48h。

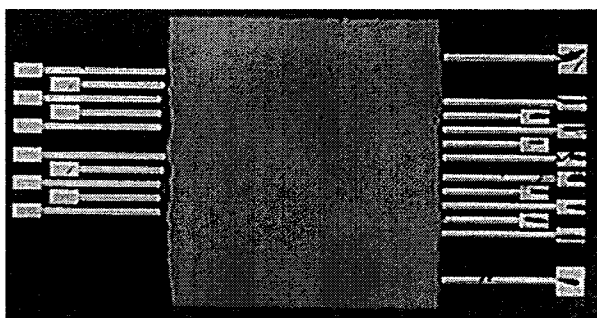


图 2.4.4 光敏芯片与电极板倒焊后的照片

Fig.2.4.4 The picture of photosensitive chip bounded with electrode plate

然后采用化学机械抛光的方式去除掉大部分的 InP 衬底。首先手动在电极板表面涂光刻胶保护，在烘箱中放置两小时以上。然后相继采用粗抛和精抛的方式

进行衬底减薄，所采用的工艺参数与前面实验中一致，将衬底减薄至衬底厚度为 60 微米左右。减薄后的电极板表面和光敏芯片表面出现了如图所示的情况：电极板表面金电极磨损、脱落,如图 2.4.5 (a) 所示；光敏芯片出现碎裂，如图 2.4.5 (b) 所示。前者是由于在精抛的过程中，抛光垫上的绒毛结构与电极板表面摩擦，对金电极造成损伤；后者是由于光敏芯片面积较小，抛光过程中对芯片施加了过大的应力，而减薄后剩余芯片厚度较小，导致光敏芯片碎裂。

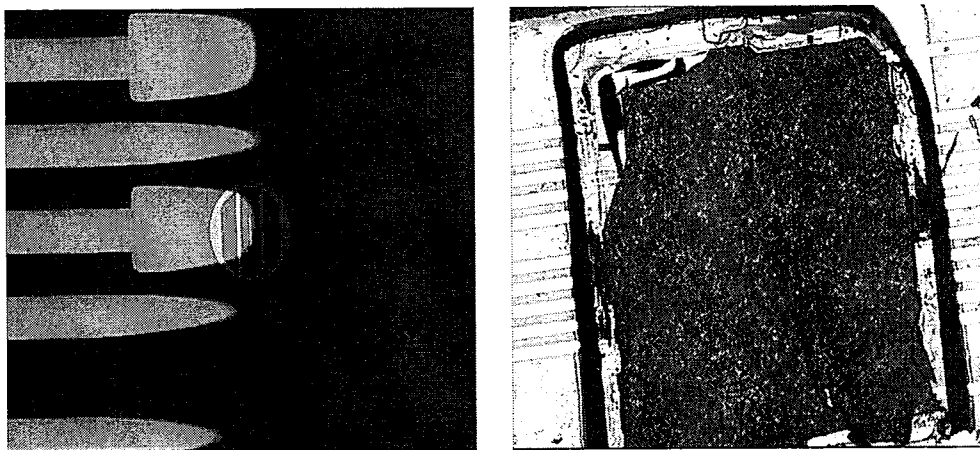


图 2.4.5 化学机械抛光导致电极磨损（左）和芯片碎裂（右）

Fig.2.4.5 Abrasion of electrode (left) and breaking of chip (right) caused by CMP

因此需要对原来的抛光工艺进行改进，具体的改进措施为：仅采用粗抛工艺，而不再进行精抛；减小吸盘的压力及转速，并且在贴片时在光敏芯片的两侧加上陪片，减小所抛掉的衬底厚度，从而减小芯片所受应力。改进工艺后电极板和光敏芯片如图 2.4.6 所示，可以看到，表面较为完整，芯片基本没有碎裂。

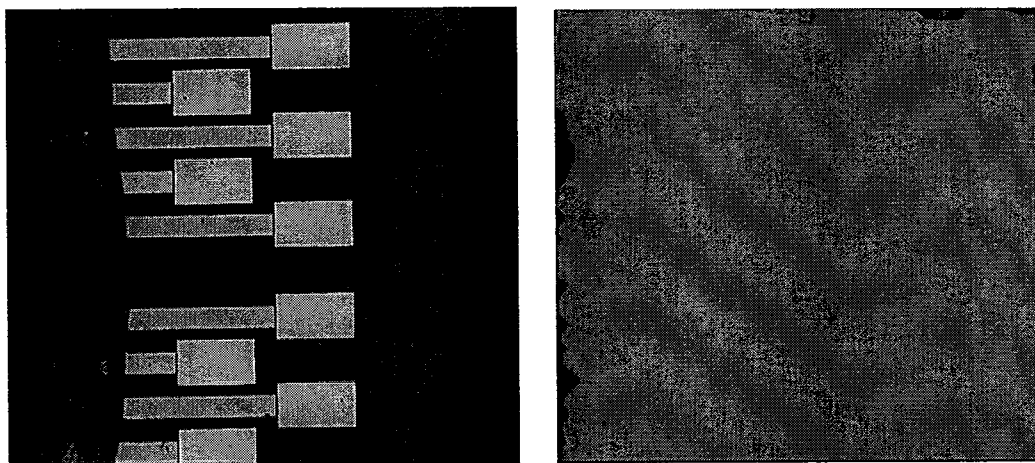


图 2.4.6 改进工艺后电极板(左)和芯片(右)的表面形貌

Fig.2.4.6 Pictures of the surface of the electrode plate (left) and the chip (right) after the improvement of the process

在化学机械抛光之后，在加热台上将组件从玻璃片上取下，分别使用三氯乙烯、丙酮、酒精进行清洗，去离子水冲洗后用氮气吹干。然后在电极板上手动涂光刻胶保护，放置于烘箱中烘干。采用化学湿法腐蚀的方法分别腐蚀掉剩余的 InP 衬底和 InGaAs 腐蚀阻挡层。使用丙酮、酒精清洗，最后得到的光敏芯片的背面如图 2.4.7 所示，从图中可以清晰的分辨出光敏元以及 N 槽。光敏芯片比较完整，表面较为平整光滑，没有出现明显的划痕或者碎裂。衬底减薄后器件的剖面图如图 2.4.8 所示。

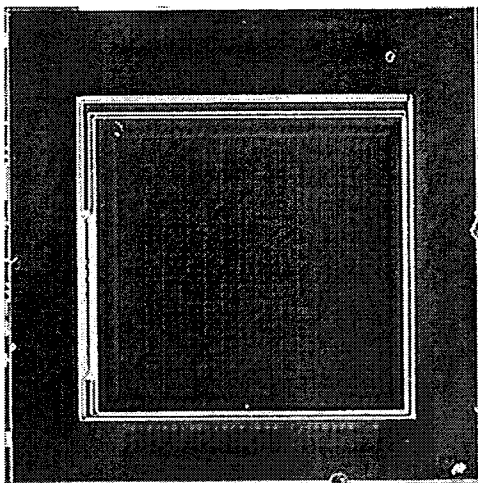


图 2.4.7 光敏芯片减薄后的背面照片

Fig.2.4.7 The picture of photosensitive chip after substrate removal

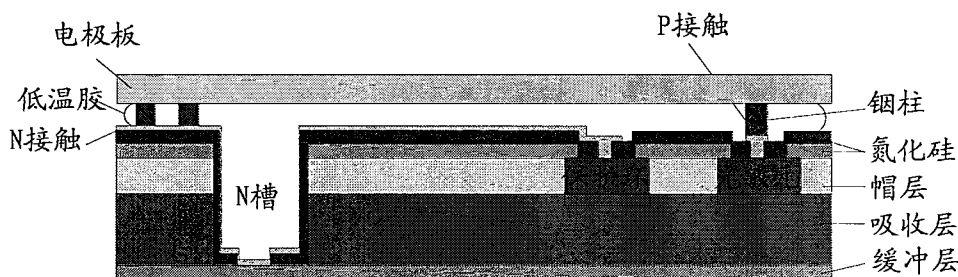


图 2.4.8 衬底减薄后器件的剖面图

Fig.2.4.8 The cross-section diagram of detectors after subatrate removal

2.4.1 InAlAs 缓冲层的器件

制备平面型面阵探测器所用到的 InAlAs 缓冲层的材料，是采用分子束外延 (MBE) 技术在 InP 衬底上生长的，外延材料的结构和具体参数如表所示，材料编号 M115。

表 2.4.1 外延材料结构及参数

Tab.2.4.1 The structure and parameters of epitaxial material

外延层	导电类型	厚度/ μm	掺杂浓度/ cm^{-3}
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	N	1	$5\text{E}16$
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	i	2.5	$5\text{E}16$
$\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$	N	0.5	$2\text{E}18$
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	N	0.3	$2\text{E}18$
InP	N 衬底	500	$2\text{E}18$

在衬底减薄前后,要对光敏芯片的性能进行测试,通过对比减薄前后的结果,研究衬底减薄工艺对器件性能的影响,特别是器件光谱响应是否得到了改善。

2.4.1.1 I-V 特性

I-V 特性是 pn 结的基本特性,反映了载流子的输运过程,是研究器件载流子输运特性的主要手段之一。本节中组件通过键压连接到测试杜瓦中,测量时将杜瓦置于接地的屏蔽盒中。I-V 测试系统采用安捷伦公司的 B1500A 半导体设备分析仪。

使用 M115 材料制备的光敏芯片在衬底减薄前后的 I-V 特性曲线如图 2.4.9 所示。可以看到,在衬底减薄前后,器件的暗电流变化不大。

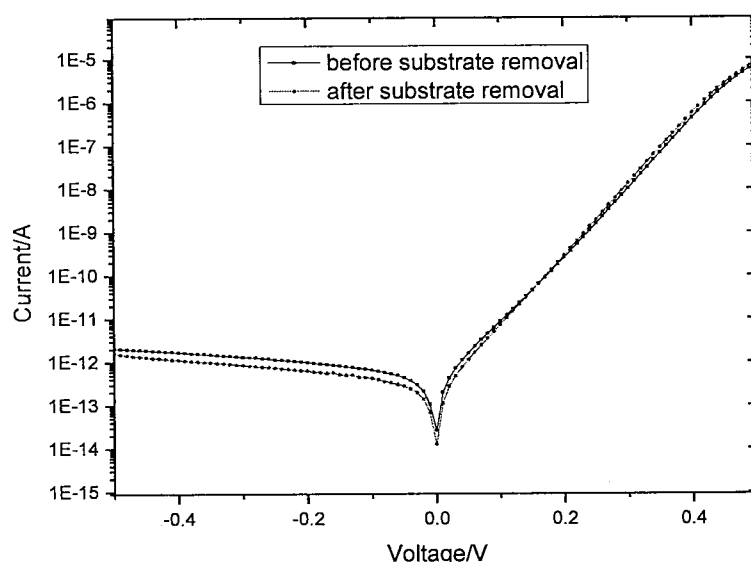


图 2.4.9 衬底减薄前后器件在室温下的 I-V 特性

Fig.2.4.9 I-V characteristics of detectors before and after substrate removal at room temperature

在室温下,衬底减薄前后器件的优值因子 R_0A 分别为 $5.92 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $9.88 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。采用以下公式对器件的正向电流 $\ln(I)-V$ 特性曲线进行拟合:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nk_0T}\right) \quad (2.2)$$

拟合所得的理想因子 n 分别为 1.075 和 1.012，正向电流成分主要为扩散电流。衬底减薄前后器件的暗电流密度曲线如图 2.4.10 所示，在 -100mV 反向偏压下，器件在减薄前后的平均暗电流密度分别为 $72.3\text{nA}/\text{cm}^2$ 、 $47.2\text{nA}/\text{cm}^2$ 。衬底减薄前后器件的性能列于表 2.4.2 中。

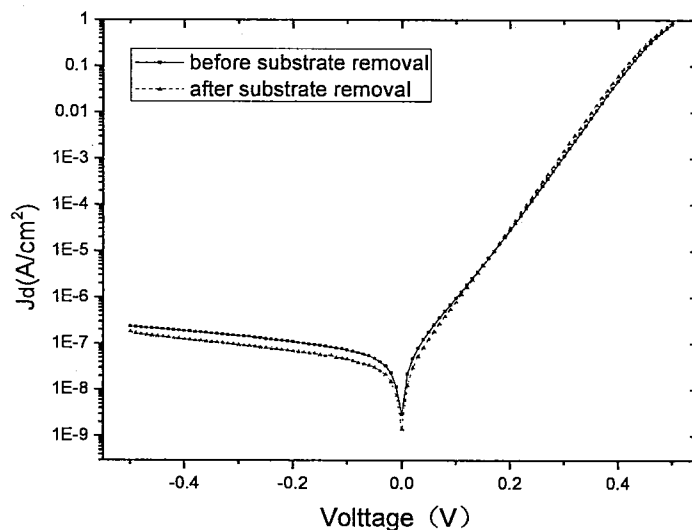


图 2.4.10 衬底减薄前后器件在室温下的暗电流密度

Fig.2.4.10 The dark current density of detectors before and after substrate removal at room temperature

表 2.4.2 器件在衬底减薄前后的性能

Table.2.4.2 The characteristics of detectors before and after substrate removal

	n	$R_0A (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$J_d (\text{nA}/\text{cm}^2 @ -0.1\text{V})$
衬底减薄前	1.075	5.92×10^5	72.3
衬底减薄后	1.012	9.88×10^5	47.2

2.4.1.2 光谱特性

对于常规结构的 InGaAs 探测器，其响应波段为 $0.9\text{--}1.7\mu\text{m}$ ，由于 InP 衬底的有效吸收，其响应在 $0.9\mu\text{m}$ 处截止，一般采用傅里叶近红外光谱仪测试其响应光谱。但是，对常规的器件进行衬底减薄之后，改善了其在可见波段的响应，由于光源的限制，原有的 NICOLET 6700 短波红外光谱仪无法测试可见波段的光谱响应。

为了满足衬底减薄后光谱测试的需要，使用了光谱范围更宽的溴钨灯作为光

源，其光谱分布覆盖了 0.4-1.7 μm 的范围，使用了分光范围较广和精度较高的单色仪，具体的测试系统如图 2.4.11 所示。通过电源控制器控制溴钨灯的功率，即控制光源出射光的功率，出射光通过光栅分光后照射到待测器件上，通过控制光栅的角度可以得到特定波长的光，测量不同波长下器件的光响应就可以得到其响应光谱。

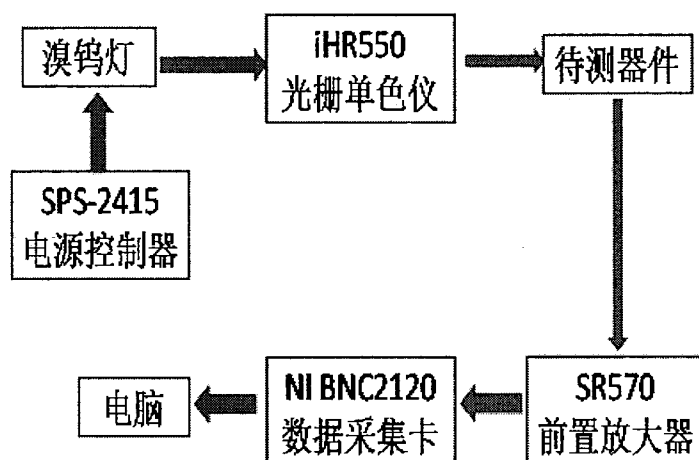


图 2.4.11 响应光谱测试系统

Fig.2.4.11 The test system of response spectrum of detectors

通过上述系统测量得到探测器的响应光谱之后，需要对光谱进行校正。由于衬底减薄后探测器的响应覆盖了可见波段和近红外波段，无法通过一个标准器件完成整个波段的校正，因此采用分段校正的方式：使用 Si 标准器件校正可见波段（0.4-0.9 μm ）的光谱；使用近红外标准器件校正近红外波段（0.9-1.7 μm ）的光谱。具体的校正方法如下式所示。

$$R(\lambda) = [R_s(\lambda) / S_s(\lambda)] * S(\lambda) \quad (2.3)$$

其中， $R(\lambda)$ 为所测探测器的实际响应光谱， $R_s(\lambda)$ 为所测探测器测量得到的响应光谱， $S(\lambda)$ 为标准探测器的标准响应光谱， $S_s(\lambda)$ 则为标准探测器测量得到的响应光谱。

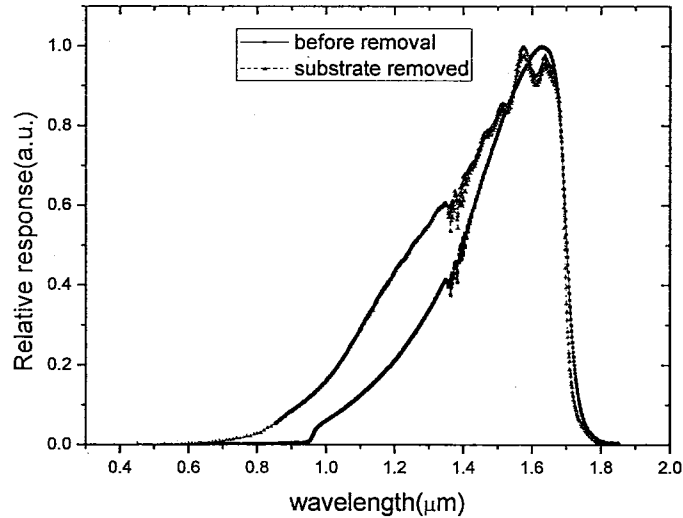


图 2.4.12 衬底减薄前后的归一化响应光谱

Fig.2.4.12 Normalized response spectrum of detectors before and after substrate removal

光敏芯片在 InP 衬底去除前后测量得到的归一化响应光谱曲线如图 2.4.12 所示。从图中可以看到，衬底去除后，在短波长方向其响应增强，截止波长也相应减小，在 $0.8\mu\text{m}$ 左右器件仍有较小的响应。通过去除衬底有效的抑制了 InP 在短波长方向的无效吸收。在长波长方向，其截止波长基本没有变化。

在衬底去除后，器件在短波长方向的响应较小，随着波长的减小响应信号逐渐降低，这是由于 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 缓冲层的吸收作用。为了提高响应，需要进一步减小缓冲层的厚度。

本节中采用 Ar 离子刻蚀的方法对 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 缓冲层进行减薄。离子能量为 300eV ，束流大小为 80mA ，刻蚀时间为 7min ，刻蚀后通过台阶仪测量得到刻蚀厚度为 $2100\text{\AA}$ 。在 Ar 离子刻蚀前后通过校正得到器件在可见波段的响应率如图 2.4.13 所示。可以看到，通过减小缓冲层的厚度，可以提高可见波段的响应，但是由于 InAlAs 在可见波段的吸收系数很大，因此器件在可见波段的响应仍然偏低。

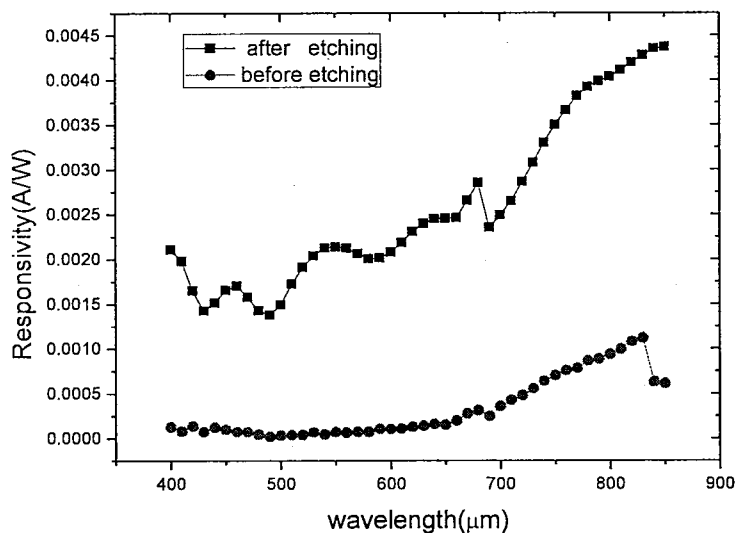


图 2.4.13 器件在 Ar 离子刻蚀前后的响应率

Fig.2.4.13 Responsivity of detectors before and after the Ar ion etching

2.4.2 InP 缓冲层的器件

对于可见拓展的 InGaAs 焦平面探测器，制备器件所使用的外延材料中缓冲层的厚度对减薄后探测器的光谱响应有较大影响，主要是在可见波段。本节中使用了 InP 缓冲层分别为 0.5μm 和 0.2μm 的两种材料制备了 32×32 元平面型面阵器件。

2.4.2.1 0.5μm InP 缓冲层

制备平面型面阵探测器所用到的 InP 缓冲层为 0.5μm 的材料，也是采用 MBE 技术在 InP 衬底上生长的，外延材料的结构和具体参数如表 2.4.3 所示，材料编号 M112B。

表 2.4.3 外延材料结构及参数

Tab.2.4.3 The structure and parameters of epitaxial material

外延层	导电类型	厚度/μm	掺杂浓度/cm ⁻³
InP	N	0.6	3E16
In _{0.53} Ga _{0.47} As	i	1.5	3E16
InP	N	0.5	2E18
In _{0.53} Ga _{0.47} As	N	0.5	2E18
InP	N 衬底	350	半绝缘

采用 M112B 材料制备了 32×32 元平面型面阵器件，光敏元的设计大小同样为 20×20μm² 和 23×23μm² 两种规格，中心距均为 30μm。

光敏芯片在衬底减薄前、InP 衬底去除后（阻挡层未去除）以及 InGaAs 阻

挡层去除后的 I-V 特性曲线如图 2.4.14 所示。可以看到，在衬底减薄前后，光敏芯片的暗电流基本保持不变。

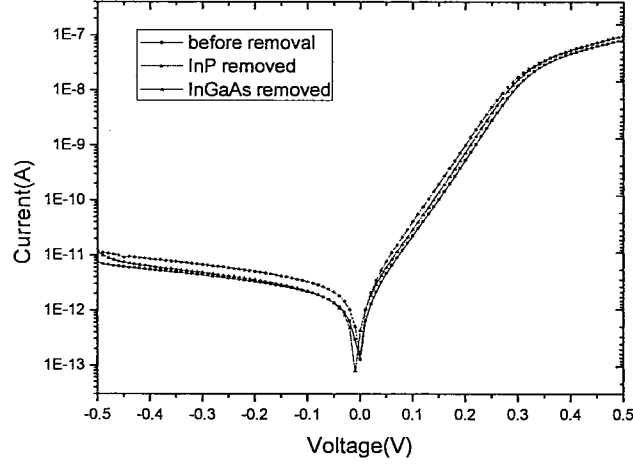


图 2.4.14 衬底减薄前后器件在室温下的 I-V 特性

Fig.2.4.14 I-V characteristics of detectors at room temperature

当 pn 结两端的正向外加偏压接近势垒大小时，流过 pn 结的电流会明显增大，串联电阻上的压降相对于 pn 结区的压降变得不可忽略，从而使得 I-V 特性偏离了理想状态。在考虑串联电阻影响的情况下，pn 结压降修正为 $V_j = V - IR_s$ (R_s 为串联电阻)，此时流过二极管的电流可以表示为^[96]：

$$I = I_0 e^{\frac{q(V-IR_s)}{nKT}} \quad (2.4)$$

将减薄前后器件的 I-V 特性理想曲线在产生偏离之前的部分外延，在相同电流下与实际曲线的电压差就是串联电阻上的压降 $\Delta V = V - V_j = IR_s$ ，因此利用 ΔV 与 I 的关系，可以得到器件的串联电阻。在衬底减薄前后器件的串联电阻分别为 $1.61 \times 10^6 \Omega$ 、 $1.46 \times 10^6 \Omega$ 。器件的串联电阻较大，欧姆接触工艺需要进一步的改进。

在室温下，衬底减薄前后器件的平均优值因子 R_0A 分别为 $1.918 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $1.539 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。采用公式 2.4 对器件的正向电流 $\ln(I) - V$ 特性曲线进行拟合，拟合所得的平均理想因子 n 分别为 1.207 和 1.190，正向电流成分主要为扩散电流。在 -100mV 反向偏压下，器件衬底减薄前后的平均暗电流密度分别为 240.5 nA/cm^2 、 263.3 nA/cm^2 。衬底减薄前、InP 衬底去除后（阻挡层未去除）以及 InGaAs 阻挡层去除后器件的性能列于表 2.4.4 中。

表 2.4.4 器件在衬底减薄前后的性能

Table.2.4.4 The characteristics of detectors before and after substrate removal

	衬底去除前	InP 衬底去除后	InGaAs 阻挡层去除后
R_0 (Ω)	2.13E10	1.43E10	1.71E10
R_0A ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)	1.918E5	1.287E5	1.539E5
J_d (@-0.1V, A/cm^2)	2.405E-7	3.627E-7	2.633E-7
n	1.207	1.197	1.190

采用单色仪系统对衬底减薄后的器件的响应光谱进行测试,并且使用标准器件进行校正。光敏芯片在衬底减薄前后测量得到的归一化相对响应光谱如图 2.4.15 所示。其中衬底减薄前的光谱是采用傅里叶光谱仪测量、然后使用近红外标准器件校正得到的。通过对比可以看到,在长波长方向器件的截止波长没有发生变化,仍然为 $1.7\mu\text{m}$ 。在短波长方向,器件的响应大大提高,截止波长从 $0.9\mu\text{m}$ 延伸到了 $0.6\mu\text{m}$ 。在 $0.9\text{--}1.4\mu\text{m}$ 波段,由于衬底减薄过程中也去除了 InGaAs 腐蚀阻挡层, InGaAs 在这个波段有较强的吸收,因此相对于减薄前,器件的响应提高。在 $0.6\text{--}0.9\mu\text{m}$ 波段,主要是由于 InP 衬底的有效吸收随着衬底的减薄而减小,因此器件在这一波段的响应显著提高。通过衬底减薄的方法可以增强 InGaAs 器件在可见波段的响应。

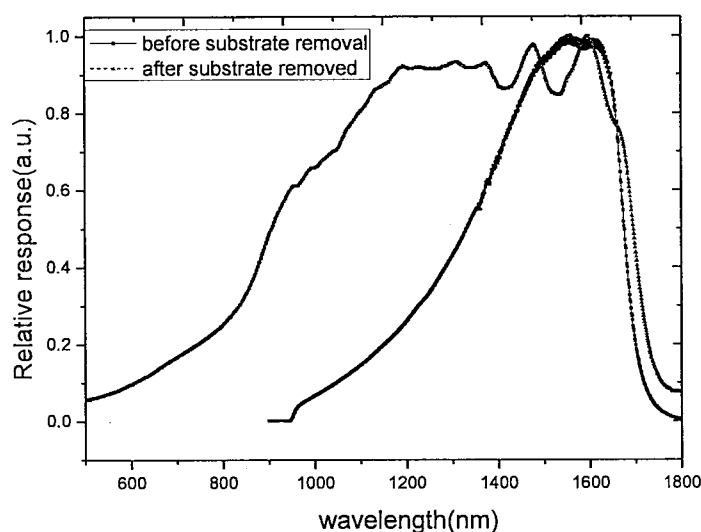


图 2.4.15 衬底减薄前后的归一化响应光谱

Fig.2.4.15 Normalized response spectrum of detectors before and after substrate removal

通过 Si 标准器件对可见波段的光谱进行校正,得到器件在 InP 衬底去除后(阻挡层未去除)以及 InGaAs 阻挡层去除后的量子效率如图 2.4.16 所示,其中光敏元的面积计为 $30\times 30\mu\text{m}^2$ 。在衬底减薄后,器件在可见波段的量子效率提高,在波长为 500nm 的量子效率约为 4%,在 700nm 的量子效率为 12%, 850nm 的

量子效率为 18%。为了进一步提高量子效率,需要减小缓冲层的厚度以进一步减小 InP 的无效吸收。

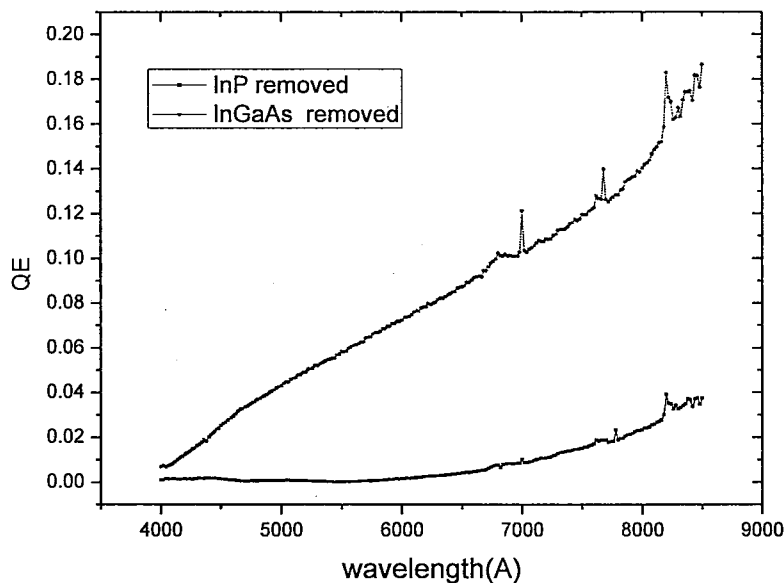


图 2.4.16 衬底减薄后器件在室温下的量子效率

Fig.2.4.16 QE of detectors after substrate removal at room temperature

2.4.2.2 0.2 μm InP 缓冲层

制备平面型面阵探测器所用到的 InP 缓冲层为 0.2 μm 的材料,是通过金属有机化合物化学气相沉积 (MOCVD) 生长的晶格匹配材料。外延材料结构及参数如表 2.4.5 所示,材料编号为 F58。

表 2.4.5 外延材料结构及参数

Tab.2.4.5 The structure and parameters of epitaxial material

外延层	导电类型	厚度/ μm	掺杂浓度/ cm^{-3}
InP	n^-	1	5E16
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	n^-	2.5	5E16
InP	N^+	0.2	$>2\text{E}18$
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	N^+	0.5	$>2\text{E}18$
InP	SI 衬底	350	$>3\text{E}18$

采用 F58 材料制备了 32 $\times$ 32 元平面型面阵器件,光敏元的设计大小同样为 20 $\times$ 20 μm^2 和 23 $\times$ 23 μm^2 两种规格,中心距均为 30 μm 。

器件制备完成后进行衬底减薄。在衬底减薄后采用 SEM 和 EDS 对器件表面进行测试,结果如图 2.4.17 所示。可以看到,表面较为光滑平整,看不出明显的起伏或者沾污。通过 EDS 测量得到的元素比例可以看到, InGaAs 腐蚀阻挡层完全去除,表面一层为 InP 缓冲层, P 和 In 的比例基本符合 1: 1。

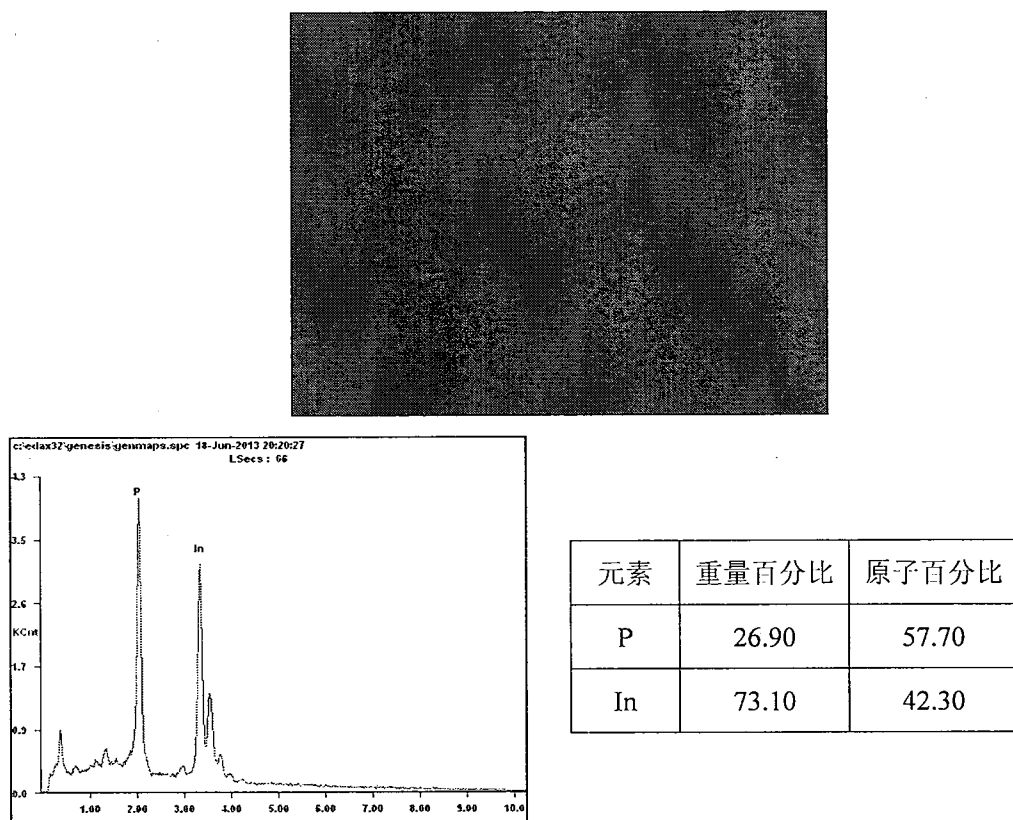


图 2.4.17 器件衬底减薄后的 SEM (上) 和 EDS (下)

Fig.2.4.17 SEM image (up) and EDS result (down) of detector after substrate removal

衬底减薄前后光敏芯片背面的 AFM 三维图像如图 2.4.18 所示。衬底减薄后表面凸起增多，分布大致均匀，减薄前后的 RMS 值分别为 2.76nm 和 1.62nm，衬底减薄的过程中表面的平整度保持较好。

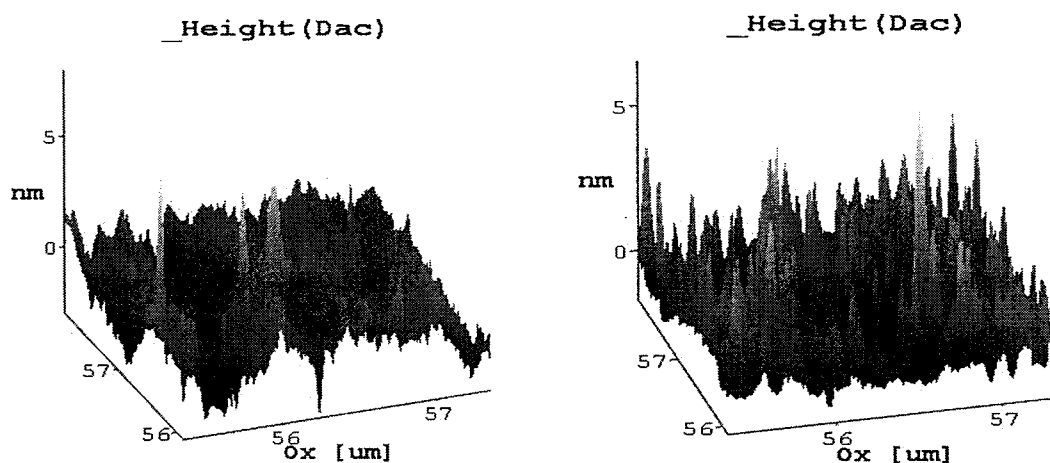


图 2.4.18 衬底减薄前(左)后(右)芯片背面的 AFM 图像

Fig.2.4.18 AFM images of detectors before (left) and after (right) substrate removal

光敏芯片在衬底减薄前、InP 衬底去除后（阻挡层未去除）以及 InGaAs 阻挡层去除后的 I-V 特性曲线如图 2.4.19 所示。采用公式 2.4 对器件的正向电流

$\ln(I)-V$ 特性曲线进行拟合, 拟合所得的平均理想因子 n 分别为 1.030 和 1.018, 正向电流成分主要为扩散电流。在衬底减薄前后器件的串联电阻分别为 $5.68 \times 10^6 \Omega$ 、 $8.93 \times 10^6 \Omega$ 。衬底减薄前、InP 衬底去除后(阻挡层未去除)以及 InGaAs 阻挡层去除后器件的性能列于表 2.4.6 中。

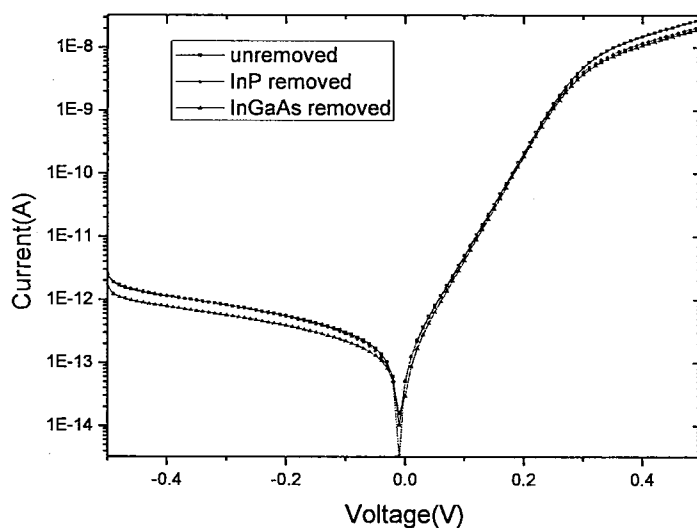


图 2.4.19 衬底减薄前后器件在室温下的 I-V 特性

Fig.2.4.19 I-V characteristics of detectors at room temperature

表 2.4.6 器件在衬底减薄前后的性能

Table.2.4.6 The characteristics of detectors before and after substrate removal

	衬底去除前	InP 衬底去除后	InGaAs 阻挡层去除后
$R_0 (\Omega)$	1.42E11	1.52E11	1.90E11
$R_0 A (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	1.28E6	1.37E6	1.71E6
$J_d (@-0.1\text{V}, \text{nA}/\text{cm}^2)$	34.4	32.5	24.9
n	1.030	1.030	1.018

使用单色仪测试系统测量器件的响应光谱, 并且使用标准器件进行校正, 如图 2.4.20 所示为衬底减薄前后器件在 297K 下的典型归一化响应光谱曲线, 可以看到, 器件在长波长方向的截止波长不变, 短波长方向的响应拓展到了可见波段, 截止波长为 $0.5 \mu\text{m}$ 。

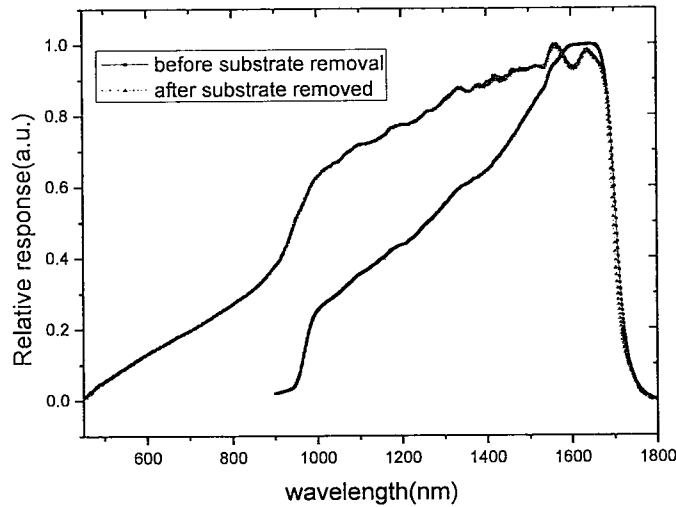


图 2.4.20 衬底减薄前后的归一化响应光谱

Fig.2.4.20 Normalized response spectrum of detectors before and after substrate removal

通过标准器件校正得到衬底减薄后器件的量子效率如图 2.4.21 所示。其中光敏元的面积计为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 。在衬底减薄后，器件在可见波段的量子效率显著提高，在波长为 500nm 的量子效率约为 16%，在 700nm 的量子效率为 30%，850nm 的量子效率为 54%，1310nm 的量子效率为 94%，1550nm 的量子效率为 91%。在缓冲层厚度分别为 0.5 和 $0.2 \mu\text{m}$ 时，衬底减薄后的器件在可见波段量子效率的对比如表 2.4.7 所示。随着缓冲层厚度的减小，器件在可见波段的量子效率显著提高。

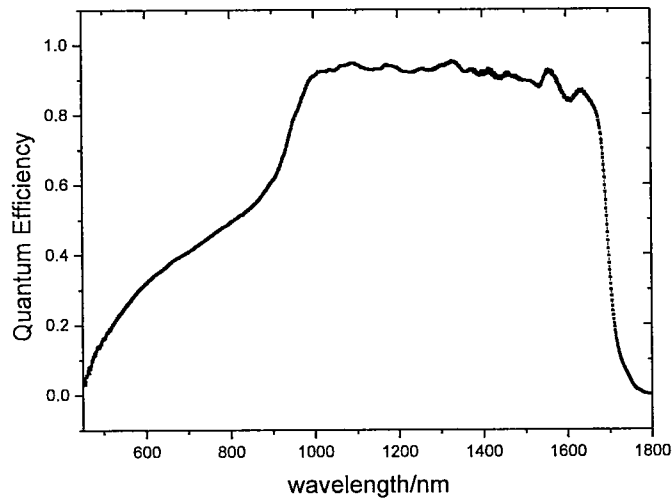


图 2.4.21 衬底减薄后器件在室温下的量子效率

Fig.2.4.21 QE of detectors after substrate removal at room temperature

表 2.4.7 缓冲层厚度不同时器件的量子效率

Table.2.4.7 QE of detectors with different depth of buffer layer after substrate removal

	500nm	700nm	850nm
0.5 μm	4%	12%	18%
0.2 μm	16%	30%	54%

利用相对响应光谱按公式 2.5^[97] 计算黑体温度为 900K 时器件的 g 因子, 其中各参数为: $\sigma=5.673\times 10^{-12}\text{W}/(\text{cm}^2\text{K}^4)$; $T_B=900\text{K}$, $G(\lambda)$ 是随波长变化的信号相对值, $G(\lambda_p)$ 是峰值波长对应的信号的相对值。衬底减薄前后器件的 g 因子分别为 80 和 73。

$$g = \frac{G(\lambda_p) \int_0^\infty \varphi(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/(\lambda T)} - 1)} d\lambda} = \frac{G(\lambda_p) \sigma T_B^4}{\int_0^\infty G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/(\lambda T_B)} - 1)} d\lambda} \quad (2.5)$$

对样品进行响应信号测试, 具体的测试条件为: 黑体温度 $T_B=900\text{K}$ 、环境温度 $T_0=297\text{K}$ 、调制频率为 800Hz、黑体孔径 $\Phi=8\text{mm}$, 黑体出射孔与探测器距离 $L=21.6\text{cm}$, 测试信号如表 2.4.8 所示, 并根据式 2.6 计算探测器的峰值响应率及量子效率。其中, 衬底减薄后通过单色仪测量得到的峰值波长为 $1.564\mu\text{m}$, 峰值量子效率为 92.5%, 与通过黑体测量得到的结果比较接近。

$$R_\lambda = gR_{bb} = \frac{gI_s \times 4L^2}{\sigma(T_B^4 - T_0^4) \times d \times A_D} \quad \eta = hcR_\lambda / q\lambda \quad (2.6)$$

表 2.4.8 器件在衬底减薄前后的峰值量子效率

Table.2.4.8 QE (at peak wavelength) of the samples

	信号/mV(1E-8)	峰值响应率	峰值量子效率/%
衬底减薄前	5.2	1.048	79.6%
衬底减薄后	6.0	1.102	88.1%

2.5 本章小结

本章首先介绍了衬底减薄的方法和基本原理, 通过实验得到了机械抛光的工艺参数, 研究了 InP/InGaAs 的选择性湿法腐蚀, 最终选择作为 InP 的化学湿法腐蚀条件为盐酸溶液: 磷酸溶液体积比为 3: 1, 腐蚀温度为 25°C 。分别使用了

InP 缓冲层和 InAlAs 缓冲层的外延材料制备了 32×32 平面型 InGaAs 面阵探测器, 并将衬底减薄的方法用于制备的面阵探测器。结果表明, 使用机械抛光和湿法腐蚀相结合的方法实现 InP 衬底的低损伤去除, 使 InGaAs 探测器的响应波段向可见方向延伸。使用 InP 缓冲层为 $0.2\mu\text{m}$ 的材料制备器件进行衬底减薄后, 在波长为 500nm , 量子效率达到约 16%, 在波长为 850nm , 器件的量子效率约为 54%, 在波长为 1310nm 量子效率约为 94%, 在 1550nm 处量子效率约为 91%。

3 InGaAs 探测器衬底减薄后的表面处理

在 InGaAs/InP PIN 型面阵探测器制备完成之后,为了进一步改善探测器的光电性能,通常需要对其表面进行适当的处理,包括抛光、表面钝化、表面增透等。抛光的目的是使探测器背表面更加平整,从而减小漫反射。表面钝化的目的是为了降低表面态密度,减小表面复合速率,从而降低探测器的暗电流,提高探测器的探测率,同时也能阻止其他杂质对探测器表面的沾污。表面增透则是为了减小表面的反射,从而减小入射光的损失,提高探测器的响应率。在对 InGaAs 面阵探测器进行衬底减薄之后,光敏芯片仅为几个微米厚,包括一层 InP 帽层、一层 InGaAs 吸收层以及一层 InP 缓冲层,表面较为平整,不用再进行抛光。但是衬底减薄工艺会对材料表面造成损伤,增加了复合中心,增大了表面复合速率,因此需要进行表面钝化。衬底减薄的主要目的是提高探测器在可见波段($0.4\text{-}0.9\mu\text{m}$)的量子效率,同时也要保持其在近红外波段($0.9\text{-}1.7\mu\text{m}$)良好的光响应特性,虽然探测器在可见波段的量子效率相对于减薄前大大提高,但是相对于其在近红外波段的性能则仍然较低,因此需要通过表面增透的方法进一步改善。本章对 InGaAs 探测器衬底减薄后的表面处理进行了研究,重点研究了增透膜生长对探测器光电性能的影响。

3.1 表面处理方法

当入射光照射到探测器上时,在表面会发生反射,减小了到达吸收层的光的能量,从而减小了探测器的响应率,同时这些反射会在探测器内形成杂散光,影响探测器的质量。为了减小探测器表面的反射光,通常在其表面镀上一定厚度的单层或多层膜。

入射光照射到探测器表面,会发生反射和折射。根据能量守恒定律,在不考虑吸收和散射的情况下,入射光的能量等于透射光和反射光能量之和。增透膜的作用是通过重新分配反射光和透射光的能量,使得透射光的能量增大。

当一束光从空气($n_0=1$)中垂直入射到折射率为 n_1 的衬底表面时,由菲涅耳公式可以得到反射率和透射率分别为:

$$R = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2, \quad T = 1 - R \quad (3.1)$$

在考虑的波段内，InP 衬底的折射率约为 3.2，计算得到反射率为 27%，即入射到探测器表面的光有 27% 损失掉。

在衬底表面生长一层折射率为 n 、厚度为 d 的增透膜后，光入射到薄膜的上表面分为反射和折射两束光，反射光命名为光束 1，折射光在薄膜的下表面又会发生反射和折射，其中反射光到达上表面折射后回到原来的介质，这束光命名为光束 2，光束 2 与光束 1 交迭，依此类推，因此总的折射光实际上是由一系列的光交迭而成，由于在反射折射的过程中光的能量很快衰减，因此只考虑前面两束光之间的交迭，如图 3.1.1 所示。

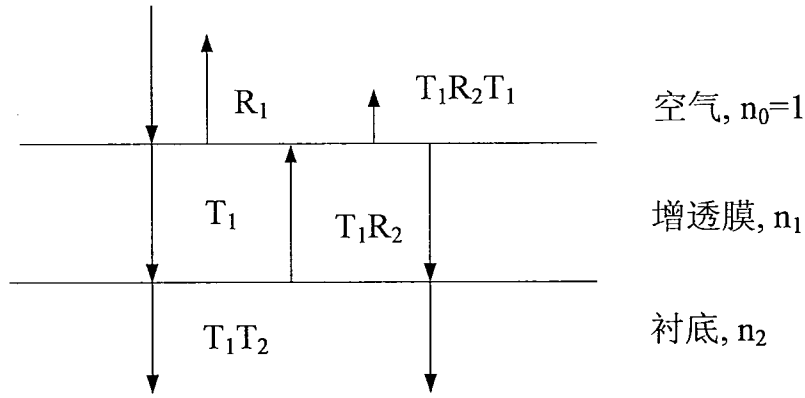


图 3.1.1 光入射到器件表面的反射和折射

Fig.3.1.1 The reflection and refraction of light incident to the device

不考虑表面的漫反射，由菲涅耳公式可以得到：

$$R_1 = \frac{(n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2}, \quad T_1 = 1 - R_1 \quad (3.2)$$

$$R_2 = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}, \quad T_2 = 1 - R_2 \quad (3.3)$$

只考虑前两束光时总的反射率和透射率为：

$$R = \frac{I_R}{I_0} = R_1 + T_1 R_2 T_1 + 2\sqrt{R_1 T_1 R_2 T_1} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2n_1 d\right), \quad T = 1 - R \quad (3.4)$$

当光从光疏介质射入光密介质时，反射光会有半波损失。增透膜的折射率大小介于衬底和空气之间，因此光束 1 和光束 2 均有一次半波损失，从而相互抵消。

为了实现增透的目的，增透膜厚度要满足如下条件：

$$2n_1d = \frac{\lambda}{2}(2k+1), (k \text{ 为自然数}) \quad (3.5)$$

在光电探测器的增透膜方面已经有很多的研究工作。国内研究较多的是无机单层增透膜，常用的材料有 TiO_2 、 ZnS 、 Ta_2O_5 、 SiN_x 、 SiO_2 、 Al_2O_3 等，而国外采用双层增透膜 MgF_2/ZnS 、 $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$ 、 ZnS/YF_3 等获得了很好的效果^[98-102]。增透膜的折射率、厚度、均匀性、与衬底的应力等都是影响增透效果的重要因素。增透膜的性能取决于其微观结构和化学成分，除了材料本身的性质外，增透膜的制备技术也很重要。常用的薄膜生长方式包括：化学气相沉积法（ICPCVD、PECVD）、真空蒸镀、溅射法（离子束溅射、磁控溅射）以及溶胶-凝胶法等^[103]。

在半导体表面，在光的激发下，会产生非平衡载流子电子-空穴对，当激发过程停止后，被激发到导带的电子回到价带，电子-空穴对消失，由非平衡态恢复到平衡态，非平衡载流子在表面复合。对表面复合起决定性作用的是表面陷阱电荷。表面陷阱电荷是由表面的非饱和键（悬挂键）产生的，表面的晶格缺陷、机械损伤以及杂质沾污都可能使表面陷阱电荷增加。表面复合速率较高时，会使更多的非平衡载流子在表面复合消失，从而对器件的暗电流和探测率等造成不利影响，降低探测器的性能。因此在器件制备过程中，总是希望能尽可能降低表面复合速率，需要使用钝化技术。

常用的钝化技术包括两种。一种是通过沉积或生长一层合适的薄膜，中和表面的悬挂键，从而降低表面态密度，减小表面的复合速率。另一种是通过表面掺杂或引入固定电荷的方式在表面形成一个内建电场，使一种载流子（电子或空穴）表面浓度减小，由于表面复合属于间接复合，当电子和空穴浓度接近时表面复合速率最大，因此通过减小一种载流子浓度可以降低表面复合速率^[104-108]。

常用的钝化薄膜有 SiO_2 、 Si_3N_4 、 ZnS 、 Al_2O_3 等材料的单层膜或多层膜，薄膜的生长方式则主要包括化学气相沉积、热蒸发和溅射等。

3.2 InGaAs 探测器衬底减薄后单层增透膜研究

3.2.1 增透膜的生长及表面状态

在对 InGaAs 平面型面阵探测器进行衬底减薄之后，光敏芯片仅为几个微米厚，包括一层 InP 帽层、一层 InGaAs 吸收层以及一层 InP 缓冲层。衬底减薄的

主要目的是改善探测器在可见波段的光响应，因此对于衬底减薄后的表面处理，首先考虑的是通过生长增透膜减小表面的反射。对于 InGaAs 探测器，比较常用的增透膜是通过热蒸发生长的 ZnS 薄膜。由于衬底减薄后 InP 缓冲层表面暴露在空气中，n-InP 的表面复合速率较小，但是衬底减薄过程中不可避免的会在 InP 表面带来沾污，同时可能会在表面产生缺陷，使表面复合速率增加。因此在增透的同时最好可以考虑钝化的作用，而 ZnS 薄膜的钝化效果并不理想。SiN_x 薄膜具有良好的光电性能、钝化性能以及对杂质离子的掩蔽能力，对 H₂O、O、Na、Ga、In 等具有较强的扩散阻挡作用，因此是半导体工艺中广泛应用的一种钝化膜。同时，SiN_x 薄膜的制备工艺比较成熟，具有抗腐蚀、耐高温、绝缘性能好等优点，作为增透膜也得到广泛的应用^[109]。

采用 PECVD（等离子体增强化学气相沉积）生长的 SiN_x 薄膜虽然有较多的优点，但相对 ICPCVD（感应耦合等离子体化学气相沉积），离子能量较大，因此容易对材料表面造成损伤。另外，由于衬底减薄后光敏芯片与读出电路通过铟柱实现互连，PECVD 生长温度较高（~330℃），铟柱在高温下会融化变形，极大影响电学互联。因此本节采用 ICPCVD 的工艺生长 SiN_x 薄膜作为增透膜。

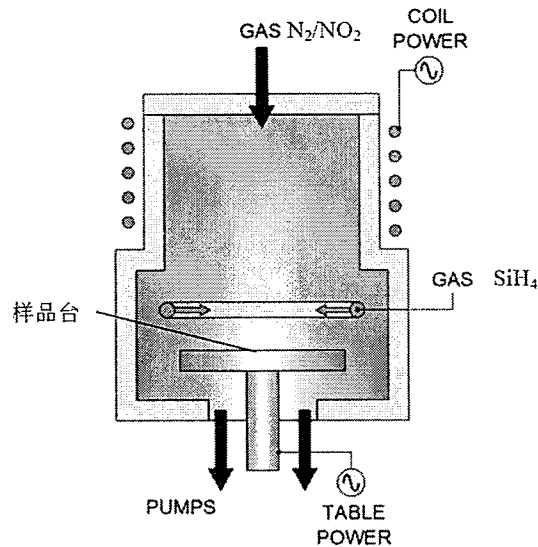


图3.2.1 ICP-CVD系统的示意图

Fig3.2.1 Schematic diagram of ICP-CVD system

生长增透膜所用的 ICPCVD 设备为英国牛津仪器公司的 ICPCVD plasma lab system 100，由腔体、射频系统、真空系统、气路系统，软件控制系统等五大部分组成。ICP180 设备的腔体采用圆筒形等离子发生器，结构如图 3.2.1 所示。其基本原理是由 ICP 功率源提供的交变电流产生射频磁场，然后在腔体内诱导出了

一个射频电场，从而产生高密度的等离子体^[110]。ICP 设备采用两个独立的射频功率源，其中一个用以控制产生等离子体的密度，另一个用以控制等离子体的能量，因此在保证产生高密度的等离子体的同时，离子的能量较低，对样品的损伤较小。并且等离子体分布均匀，静电屏蔽层的加入使得离子下降速度较慢。采用 ICPCVD 可以淀积均匀性好、损伤小的 SiN_x 薄膜。

本节中的样品为采用 M112B 材料制备的 32×32 元平面型面阵器件，其材料参数如表 2.4.3 所示。对器件进行衬底减薄后，在 InP 缓冲层表面生长一层 SiN_x 增透膜，采用 ICPCVD highrate 生长工艺，具体的工艺条件为：ICP 功率 2000W，RF 功率 0W，气体流量为 SiH_4 : $\text{N}_2=45\text{sccm}: 38\text{sccm}$ ，腔压 8mTorr。在该工艺条件下，衬底温度较低（约为 75°C ），并且 SiN_x 薄膜的淀积速率较为稳定，约为 100nm/min。

生长 SiN_x 增透膜的厚度与折射率的关系如式 3.5 所示，要得到生长厚度需要知道 SiN_x 的折射率，本节中采用椭圆偏振光技术进行测量。椭圆偏振光技术被广泛应用来测量高吸收衬底上的介电薄膜的厚度，是已有的厚度测量中最精确的方法之一。当入射光照射到生长了一层薄膜的衬底上时，会出现多重反射，各反射光相互干涉。当入射光为线偏振时，可以分解为平行于入射面的 P 分量和垂直于入射面的 S 分量，反射后两个分量产生不同的相移，并且两者的反射系数不同，因此反射光呈椭圆偏振。采用 ψ 和 Δ 来描述反射光偏振态的变化，如下式所示：

$$\Psi = \tan^{-1} \left| \frac{R_p}{R_s} \right| \quad (3.6)$$

$$\Delta = \text{相移的变化} = \Delta_p - \Delta_s \quad (3.7)$$

其中， R_p 、 R_s 分别为 P 分量和 S 分量的反射系数， Δ_p 和 Δ_s 分别为反射引起的各自的相移。若反射时没有相移，P 分量和 S 分量保持同相位，反射光仍是线偏振光，但是振动面（偏振光的振动方向和传播方向形成的面）发生转动，是因为 P 分量和 S 分量的相对大小与入射偏振光不同，因此这一转动量可以反映出 ψ 的大小。当两个分量出现相位差时，采用附加的光学元件进行相位补偿可以使反射光仍为线偏振光，补偿的相移量可以反映 Δ 的大小^[111]。当入射光波长、入射角以及衬底参数一定的条件下， ψ 和 Δ 是薄膜厚度和折射率的函数，因此通过 ψ 和 Δ 的值可以得到薄膜的折射率。

由于 ψ 和 Δ 与薄膜厚度和折射率的关系较为复杂, 为了得到薄膜材料的色散关系 (折射率随波长的变化关系), 需要采用一定的模型便于更好的分析实验数据。本节中采用柯西 (Cauchy) 模型, 其公式如下所示:

$$n(\lambda) = A_n + \frac{B_n}{\lambda^2} + \frac{C_n}{\lambda^4} \quad (3.8)$$

其中 A_n 、 B_n 、 C_n 为三个系数参数, 通过椭偏仪测量得到 SiN_x 薄膜对应的值分别为:

$$A_n = 1.9777, B_n = 0.0065, C_n = 0.0008$$

在 $0.5\text{-}1.7\mu\text{m}$ 范围内, 折射率 n 可看作不变, 其值为 1.9777。代入式 (3.5) 中计算得到所需薄膜厚度, 其中心波长 λ 取为 700nm , 当 k 取为 0 时, 所得到的薄膜厚度为 88.5nm , ICPCVD 生长的时间为 50s , 使用台阶仪测量薄膜厚度约为 90nm 。采用二次离子质谱仪 (Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS) 测量得到 Si 和 N 的原子比为 0.74, 接近 3: 4。

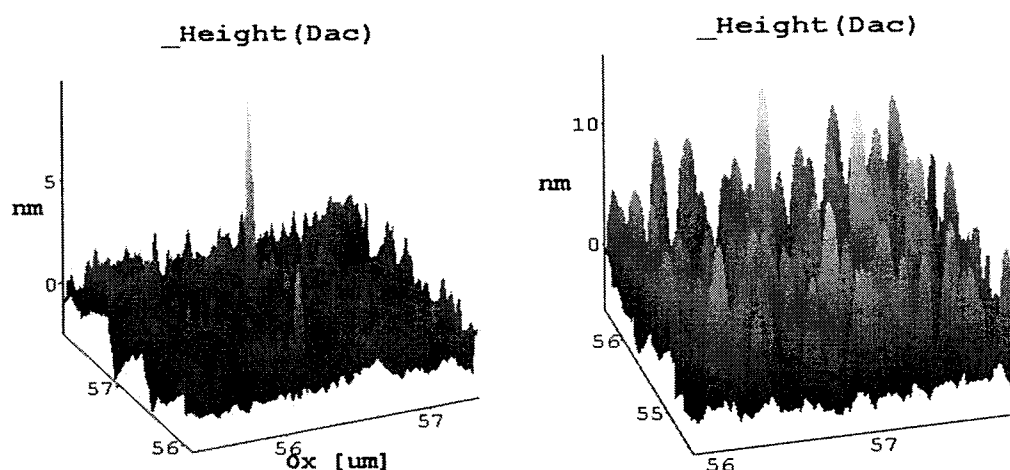


图 3.2.2 衬底减薄后(左)和增透膜生长后(右)样品表面的 AFM 图

Fig.3.2.2 AFM images of the sample after substrate removal (left) and with SiN_x film (right)

在衬底减薄后和增透膜生长后分别使用 AFM 测量样品的表面形貌, 如图 3.2.2 所示, 所对应的 RMS 值分别为 5.18nm 和 3.13nm 。生长的 SiN_x 增透膜较为平滑均匀, 表面呈现出颗粒状。

3.2.2 光谱特性

在衬底减薄后以及生长增透膜后, 使用单色仪系统对器件的响应光谱进行测量, 使用标准硅器件和近红外标准器件分别对可见波段和近红外波段的光谱进行

校正, 得到的归一化相对响应光谱如图 3.2.3 所示。在增透膜生长后, 器件在 0.6-1.0 μm 波段的相对响应有所提高, 在其他波段则变化较小。通过标准器件校正后得到可见波段的量子效率如图 3.2.4 所示。

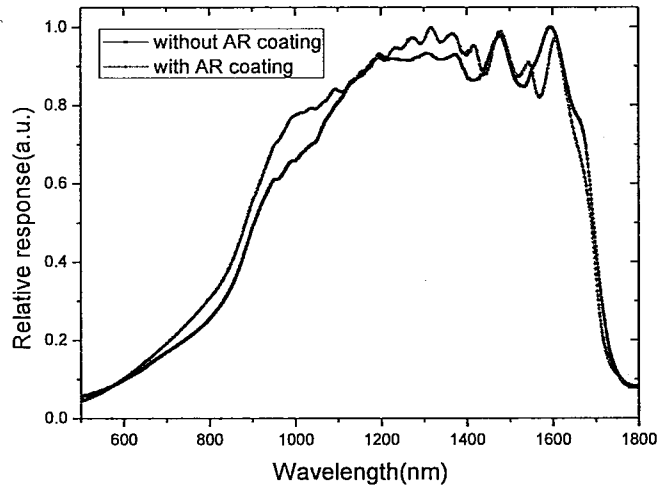


图 3.2.3 增透膜生长前后的归一化响应光谱

Fig.3.2.3 Normalized response spectrum of detectors with and without AR coating

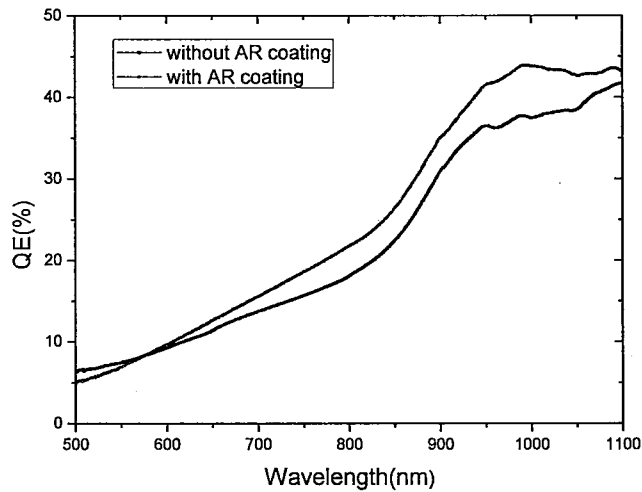


图 3.2.4 增透膜生长前后可见波段的量子效率

Fig.3.2.4 QE of detectors with and without AR coating in visible band

在器件表面生长增透膜后, 光入射到表面, 反射情况如图 3.1.1 所示。计算得到总的反射率随波长的变化如图 3.2.5 所示。在 0.5-1.0 μm 波段, 生长薄膜后的表面反射减小, 使透过增加, 提高了器件的量子效率, 与实验结果还是基本一致的。可以看到, 通过生长单层 SiN_x 增透膜, 在特定波段提高了器件的量子效率, 但是增透的效果不显著, 在其他波段器件的量子效率甚至会降低。

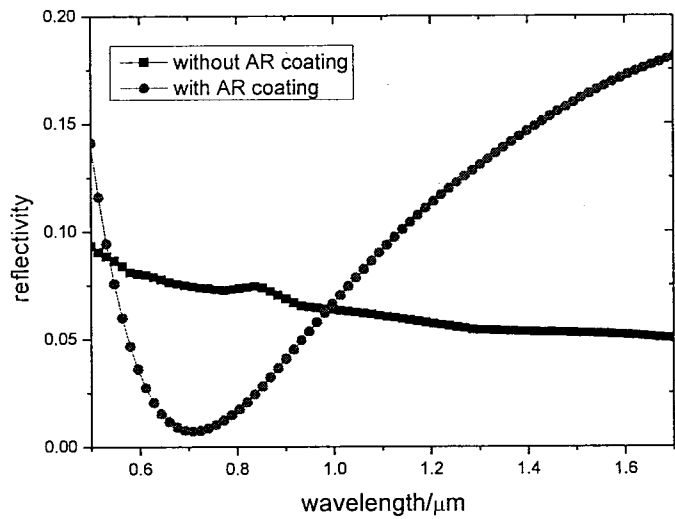


图 3.2.5 生长增透膜前后表面总的反射率

Fig.3.2.5 Simulated refractive of the surface of detectors with and without AR coating

3.2.3 增透膜对器件暗电流的影响

在生长增透膜后，将光敏芯片压焊到杜瓦中，对器件的 I-V 特性进行测量，测量时将杜瓦置于接地的屏蔽盒中。选择其中的两元，生长增透膜前后的 I-V 特性曲线如图 3.2.6 所示，其性能对比如表所示。这两元器件正向电流的理想因子 n 均接近 1，以扩散电流成分为主。通过对比可以看到，在增透膜生长前后，暗电流基本没有变化，说明钝化的效果并不理想。

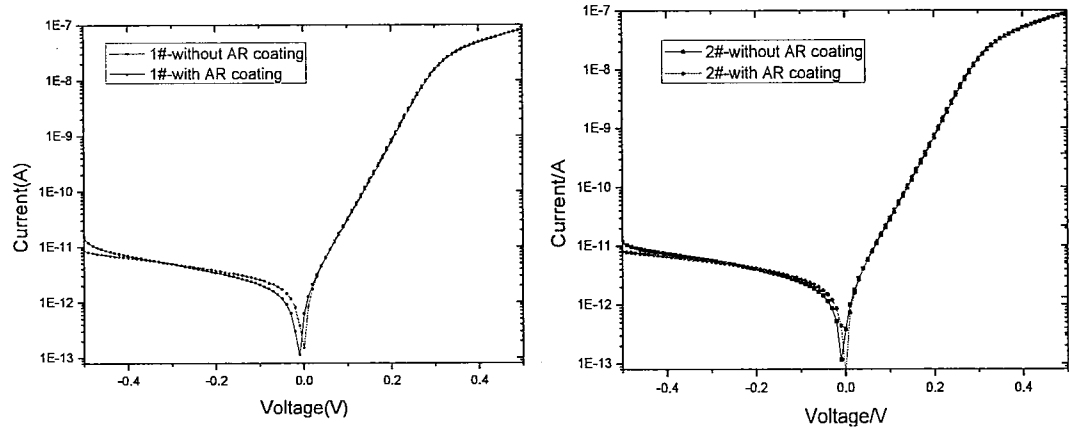


图 3.2.6 增透膜生长前后 1#（左）和 2#（右）器件在室温下的 I-V 特性

Fig.3.2.6 I-V characteristics of detectors with (left) and without (right) AR coating at room temperature

表 3.2.1 1#和 2#器件在增透膜生长前后的性能

Table.3.2.1 The characteristics of detectors with and without AR coating

		$R_0(\Omega)$	$R_0A (\Omega \cdot \text{cm}^2)$	$J_d(\text{nA}/\text{cm}^2 @ -0.1\text{V}, \text{RT})$
1#	生长薄膜前	1. 67E10	1.50E5	230

	生长薄膜后	1.62E10	1.46E5	286
2#	生长薄膜前	1.79E10	1.61E5	269
	生长薄膜后	1.69E10	1.52E5	301

3.3 多层增透膜的设计与生长

单层增透膜能在特定波长增强器件的响应，但是在其他波段甚至会使器件的响应降低，因此增透范围较窄。为了改善增透效果，尽可能兼顾器件的整个响应波段，在衬底减薄后生长双层增透膜。

除了 SiN_x 薄膜外， SiO_2 薄膜具有良好的光学性能以及较低的折射率使其较早被用作增透膜。生长 SiO_2 的方法很多，相对于其他的薄膜生长方法，ICPCVD 有其独特的优势，因此仍然考虑使用 ICPCVD 进行增透膜的生长。使用椭圆偏振光技术对 ICPCVD 工艺生长的 SiO_2 薄膜的折射率进行测量，通过拟合后可以得到，在所考虑的波段范围内，其值基本保持在 1.45 左右。

为了确定生长薄膜的厚度，采用美国 SCI (Scientific Computing International) 公司的光学薄膜软件 Film Wizard Optical Thin Film Software 进行模拟。兼顾可见波段和近红外波段的光响应，设计了如表 3.3.1 所示的双层增透膜结构，模拟得到的透过率与波长的关系如图 3.3.1 所示。

表 3.3.1 模拟设计的增透膜的结构与参数

Table.3.3.1 The structure and parameters of AR coating designed with SCI

	材料	折射率	厚度
No.1	SiN_x	1.98	79nm
No.2	SiO_x	1.45	108nm

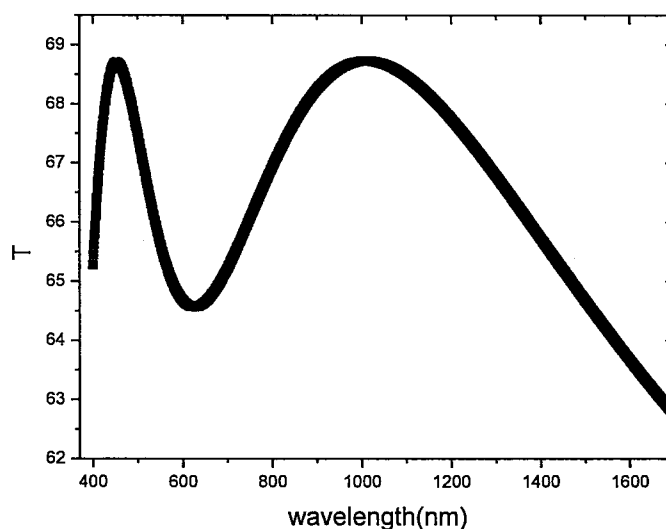


图 3.3.1 模拟得到的透过率与波长的关系

Fig.3.3.1 Simulated transmittance versus wavelength

本节中的样品为采用 F58 材料制备的 32×32 元平面型面阵器件，光敏元设计大小为 $23 \times 23 \mu\text{m}^2$ 。在对光敏芯片进行衬底减薄后，采用 ICPCVD 技术在芯片背面依次生长 SiN_x 薄膜和 SiO_x 薄膜。生长 SiN_x 薄膜的工艺条件为：ICP 功率 2000W，RF 功率 0W，气体流量为 SiH_4 : $\text{N}_2=45\text{sccm}: 38\text{sccm}$ ，腔压 8mTorr，生长时间为 42s，使用台阶仪测量实际生长的厚度约为 78nm。生长 SiO_x 薄膜的工艺条件为：ICP 功率 1000W，RF 功率 7W，气体流量为 SiH_4 : $\text{N}_2\text{O}=4\text{sccm}: 16\text{sccm}$ ，腔压 4mTorr，生长时间为 10min12s，实际生长厚度约为 109nm。采用 SIMS 测量得到 Si 和 O 的原子比接近 1: 2。

使用单色仪测量器件的光响应特性，校正后的归一化响应光谱如图 3.3.2 所示，并且与生长增透膜前进行比较。增透膜生长前后峰值波长分别为 $1.559\mu\text{m}$ 和 $1.564\mu\text{m}$ ，截止波长没有变化，响应波段仍然为 $0.5\text{-}1.7\mu\text{m}$ 。计算得到 G 因子为 76.584。

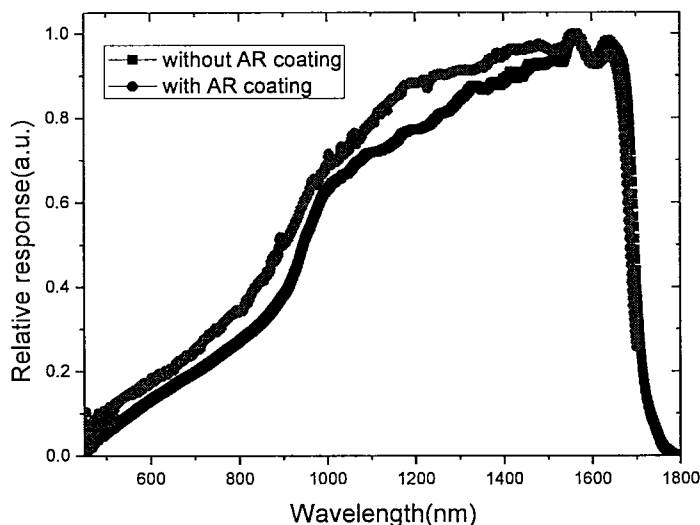


图 3.3.2 增透膜生长前后的归一化响应光谱

Fig.3.3.2 Normalized response spectrum of detectors with and without AR coating

对样品进行黑体响应信号测试，具体的测试条件为：黑体温度 $T_B=900\text{ K}$ 、环境温度 $T_0=297\text{K}$ 、调制频率为 800Hz、黑体孔径 $\Phi=8\text{mm}$ ，黑体出射孔与探测器距离 $L=27.5\text{cm}$ ，计算得到探测器的黑体响应率为 0.0162A/W ，得到峰值量子效率为 99.2%。在测试过程中可能引入了杂散光使量子效率比真实值大，但是仍然可以作为参考。比较增透膜生长前后的相对响应光谱和峰值量子效率可以看到，

在增透膜生长后，在 0.5-1.5 μm 波段都实现了量子效率的提高。双层增透膜的增透效果好于单层增透膜。

3.4 本章小结

本章首先介绍了光敏芯片表面处理方法，重点介绍了增透膜的原理和方法，并对比了 PECVD 和 ICPCVD 两种生长技术的优缺点，最后选择采用 ICPCVD 生长 SiN_x 薄膜作为增透膜。在对光敏芯片进行衬底减薄后，在表面生长单层 SiN_x 薄膜，结果表明，单层增透膜只对部分波段的光响应有增强作用，在其他波段影响不大，器件的暗电流在增透膜生长前后基本不变。通过软件模拟设计了 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ 双层增透膜，并使用 ICPCVD 工艺生长，结果表明，器件在可见波段和近红外波段的量子效率都得到了提高，双层增透膜的增透效果好于单层增透膜。

4. InGaAs 探测器量子效率模拟

为了更直观的描述光电探测器对入射光子的转换效率,使用量子效率来表征探测器的光响应特性。对于光子型探测器,量子效率(QE: Quantum Efficiency)是指被探测器的电极收集到的电子-空穴对的数目与入射到探测器表面的光子数目之比。只有能量大于吸收层禁带宽度的光子才能激发产生光电流,因此光子型探测器具有波长选择性,只有波长小于截止波长的光子才能被吸收。当波长一定时,理想的探测器的量子效率也是一定的,由其在不同波长处的光响应决定。但在实际情况下,各层材料内部的吸收、界面的复合以及表面的反射会使量子效率降低,因此探测器的结构和材料参数对量子效率有很大的影响。另外,器件的串联电阻、增透膜的生长等因素也会影响探测器的量子效率。本章通过建立物理模型,对背照射的晶格匹配的 InGaAs/InP 探测器的光响应与结构参数的关系进行了模拟计算,重点分析了吸收层厚度对探测器量子效率的影响,并且对可见拓展 InGaAs 探测器的量子效率进行了模拟分析。

4.1 量子效率模拟的方法

当用适当波长的光照射半导体时,能量大于该半导体禁带宽度(E_g)的光子将把价带电子激发到导带上,从而产生电子空穴对。当光照射到 PN 结上时,进入空间电荷区的光生电子和空穴在内建电场的作用下被分开,电子向 N 区运动,空穴向 P 区运动,从而形成光电流。对于背照射的 PIN 结构的 InGaAs/InP 探测器,其光入射的示意图如图 4.1.1 所示。

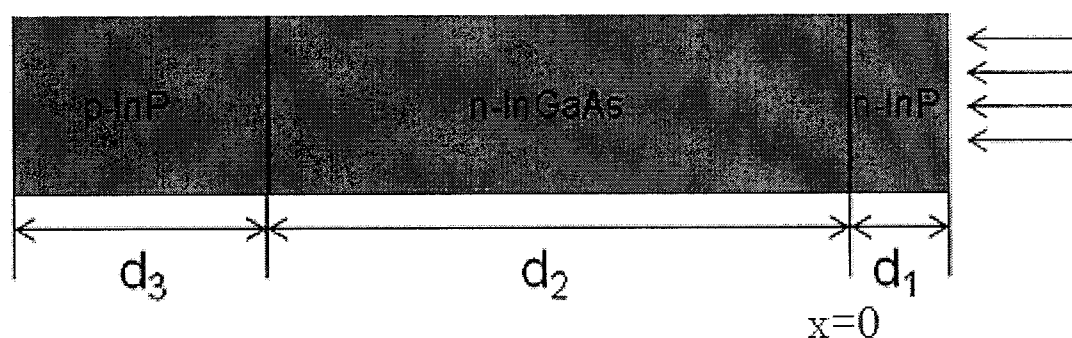


图 4.1.1 光入射到器件的示意图

Fig.4.1.1 Schematic diagram of light incident to the device

光电流由三部分组成：N 区空间电荷区外通过扩散作用进入空间电荷区被收集的光生空穴产生的光电流 J_1 ；空间电荷区光生载流子形成的光电流 J_2 ；P 区空间电荷区外通过扩散作用被收集的光生电子产生的光电流 J_3 。各部分的光电流所对应的内量子效率分别为 η_1 、 η_2 、 η_3 。

总的内量子效率为：

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 \quad (4.1)$$

4.1.1 计算模型

各部分的量子效率采用以下方法进行计算：通过求解稳态下的连续性方程得到光电流分布，从而得到 η_1 和 η_3 ；通过计算空间电荷区光激发产生的电子空穴对数量从而得到 η_2 。

首先通过计算少子稳态情况下的分布，得到空间电荷区之外 N 区产生的光电流^[112]。

当入射光辐照 Φ_0 照在器件背面时，在到达吸收区之前要经过 InP 衬底和缓冲层。InP 的禁带宽度为 1.35eV，所对应的截止波长为 920nm。考虑到 InP 衬底及缓冲层的无效吸收，InGaAs 吸收层中电子-空穴对的产生率 $g(x)$ 与位置的关系可表示为^[113]：

$$g(x) = \Phi_0 \cdot e^{-\alpha_1 \cdot d_1} \cdot \alpha_2 \cdot e^{-\alpha_2 \cdot x} \quad (4.2)$$

其中 α_1 为 InP 的吸收系数， d_1 为 InP 衬底及缓冲层的厚度。 α_2 为 InGaAs 吸收层的吸收系数。

在吸收层耗尽区外的少子连续性方程如下：

$$\frac{d\Delta p}{dt} = \Phi_0 \cdot e^{-\alpha_1 \cdot d_1} \cdot \alpha_2 \cdot e^{-\alpha_2 \cdot x} - \frac{\Delta p}{\tau} + D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} \quad (4.3)$$

其中 τ 为少子寿命， D_p 为空穴扩散系数。

稳态情况下：

$$\Phi_0 \cdot e^{-\alpha_1 \cdot d_1} \cdot \alpha_2 \cdot e^{-\alpha_2 \cdot x} - \frac{\Delta p}{\tau} + D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = 0 \quad (4.4)$$

这一方程的解为：

$$\Delta p(x) = A_1 e^{-x/L_p} + A_2 e^{x/L_p} + M e^{-\alpha_2 x} \quad (4.5)$$

其中 $M = \frac{\alpha_2 \Phi_0 e^{-\alpha_1 d_1} \tau}{1 - L_p^2 \alpha_2^2}$, L_p 为空穴扩散长度。

方程的边界条件为:

a. $x=0$ 处的光电流由界面复合速度决定:

$$D_p \left. \frac{d\Delta p}{dx} \right|_{x=0} = S \Delta p \quad (4.6)$$

其中 S 为界面复合速度。对于晶格匹配的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$, 由于其具有良好的界面质量, 因此在计算中忽略界面态的影响^[114]。

b. $x=d_2-l$ 处即耗尽区边上 (l 为 n 区空间电荷区的宽度), 空穴一旦扩散到这里立刻被电场拉走, 因此:

$$\Delta p \Big|_{x=d_2-l} = 0 \quad (4.7)$$

将 (4.5) 代入边界条件中可以求得:

$$A_1 = \frac{\left[(\alpha_2 D_p + S) e^{(d_2-l)/L_p} - \left(S - \frac{D_p}{L_p} \right) e^{-\alpha_2 (d_2-l)} \right] M}{\left[\left(S - \frac{D_p}{L_p} \right) e^{-(d_2-l)/L_p} - \left(S + \frac{D_p}{L_p} \right) e^{(d_2-l)/L_p} \right]} \quad (4.8)$$

$$A_2 = \frac{\left[-(\alpha_2 D_p + S) e^{-(d_2-l)/L_p} + \left(S + \frac{D_p}{L_p} \right) e^{-\alpha_2 (d_2-l)} \right] M}{\left[\left(S - \frac{D_p}{L_p} \right) e^{-(d_2-l)/L_p} - \left(S + \frac{D_p}{L_p} \right) e^{(d_2-l)/L_p} \right]} \quad (4.9)$$

因此空间电荷区之外 N 区产生的光电流为:

$$J_1 = -q D_p \left. \frac{d\Delta p}{dx} \right|_{x=d_2-l} \quad (4.10)$$

这部分光电流贡献的内量子效率为:

$$\eta_1 = J_1 / q \Phi_0 \quad (4.11)$$

在空间电荷区内, 入射光激发产生的电子和空穴被内建电场电场分开, 分别向 N 区和 P 区漂移, 通过计算空间电荷区内的光生电子空穴对, 可以得到这部分的量子效率。由于 InGaAs 材料中的载流子在内建电场作用下, 以较高的速度穿过空间电荷区, 因此空间电荷区内的净热复合可以忽略不计^[113]。另外为了简

化运算，能带不连续所带来的影响也暂不考虑。因此这部分内量子效率通过下式计算：

$$\eta_2 = \exp(-\alpha_1 d_1) \cdot \alpha_2 \int_{d_2-l}^{d_2} \exp(-\alpha_2 x) dx = \exp(-(d_2-l)\alpha_2) - \exp(-d_2\alpha_2) \quad (4.12)$$

最后计算空间电荷区外 P 区通过扩散作用被收集的光生电子产生的光电流 J_3 ，所采用的方法同第一部分的计算相同。

到达 P 区空间电荷区边缘的光辐照强度为：

$$\Phi_2 = \Phi_0 \exp(-\alpha_1 d_1) \exp(-\alpha_2 d_2) \quad (4.13)$$

在帽层空间电荷区外的少子连续性方程为：

$$\frac{d\Delta n}{dt} = \Phi_2 \alpha_3 e^{-\alpha_3(x-d_2)} - \frac{\Delta n}{\tau} + D_n \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} \quad (4.14)$$

其中 α_3 为 InP 帽层的吸收系数， D_n 为 InP 帽层中电子的扩散系数。

稳态情况下：

$$\Phi_2 \alpha_3 e^{-\alpha_3(x-d_2)} - \frac{\Delta n}{\tau} + D_n \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} = 0 \quad (4.15)$$

这一方程的解为：

$$\Delta n(x) = B_1 e^{-(x-d_2)/L_n} + B_2 e^{(x-d_2)/L_n} + N e^{-\alpha_3(x-d_2)} \quad (4.16)$$

其中 $N = \frac{\alpha_3 \Phi_2 \tau}{1 - L_n^2 \alpha_3^2}$ ， L_n 为电子扩散长度。

方程的边界条件为：

a. $x=d_2+d_3$ 处的光电流由 InP 表面复合速度决定：

$$D_n \left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x=d_2+d_3} = S' \Delta n \quad (4.17)$$

其中 S' 为 InP 表面复合速度。

b. $x=d_2$ 处即空间电荷区边上， $\Delta n = 0$ 。

将 (4.16) 代入边界条件中可以求得：

$$B_1 = \frac{\left[(\alpha_3 D_n + S') e^{-\alpha_3 d_3} - \left(S' - \frac{D_n}{L_n} \right) e^{d_3/L_n} \right] N}{\left[\left(S' - \frac{D_n}{L_n} \right) e^{d_3/L_n} - \left(S' + \frac{D_n}{L_n} \right) e^{-d_3/L_n} \right]} \quad (4.18)$$

$$B_2 = \frac{\left[-(\alpha_3 D_n + S')e^{-\alpha_3 d_3} + (S' + \frac{D_n}{L_n})e^{-d_3/L_n} \right] N}{\left[(S' - \frac{D_n}{L_n})e^{d_3/L_n} - (S' + \frac{D_n}{L_n})e^{-d_3/L_n} \right]} \quad (4.19)$$

由于 InP 的表面复合速率较小, n 型 InP 的表面复合速率仅为 $1 \times 10^4 \text{cm/s}$, 而 P 型 InP 的表面复合速率也仅为 $5 \times 10^5 \text{cm/s}$ ^[115], 对结果的影响较小, 因此在模拟中忽略表面复合的影响。

因此空间电荷区之外 P 区产生的光电流为:

$$J_3 = qD_n \left. \frac{d\Delta n}{dx} \right|_{x=d_2} \quad (4.20)$$

这部分光电流贡献的内量子效率为:

$$\eta_3 = J_3 / q\Phi_0 \quad (4.21)$$

将三部分的量子效率相加, 即可得到总的内量子效率。

4.1.2 材料参数

在量子效率的模型中涉及到 InP 和 InGaAs 的材料参数, 材料参数的选择对模拟的结果有着重要的影响。对于晶格匹配的 InGaAs/InP 探测器, 相关的报道比较多, 因此可以采用文献和手册中的材料参数^[116,117], 还有部分参数可以采用 InAs 和 GaAs 的材料参数通过差值运算得到。

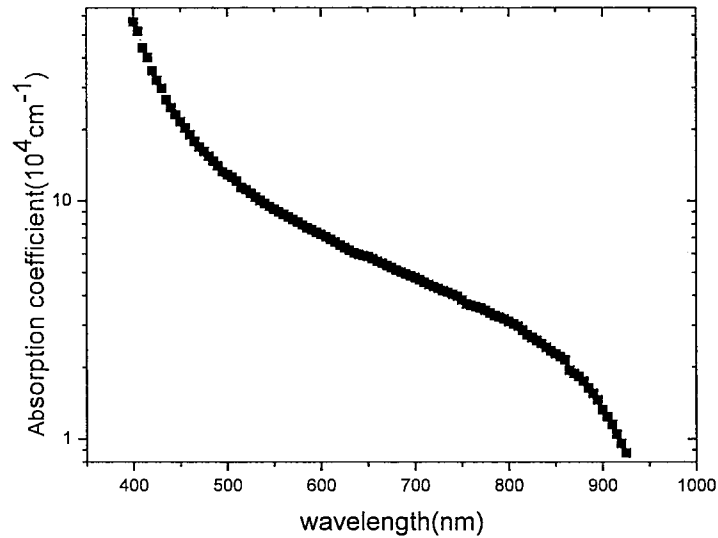
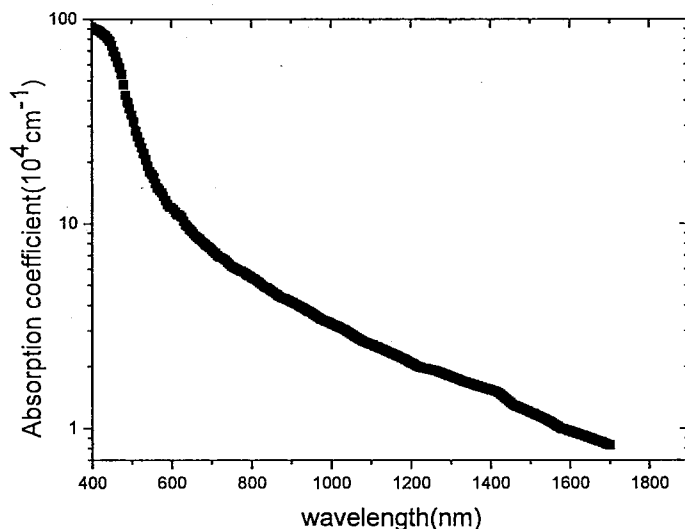


图 4.1.2 N 型 InP 的吸收系数随波长的变化

Fig.4.1.2 Absorption coefficient of N-InP vsrsus wavelength

图 4.1.3 N 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的吸收系数随波长的变化Fig.4.1.3 Absorption coefficient of N- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ vsrsus wavelength

InP 和 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料的吸收系数采用 H.Burkhard 等人报道的结果^[118], N 型 InP 以及 N 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的吸收系数随波长的变化关系分别如图 4.1.2 和 4.1.3 所示。

III-V 族材料的少子寿命主要由 SRH(Shockley-Read-Hall)复合、辐射复合和俄歇复合三种复合机制决定。对于 InGaAs 材料,通常在低掺杂时少子寿命主要由 SRH 复合决定,中间掺杂时辐射复合起主要作用,重掺杂时主要由俄歇复合决定。在室温下 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的少子寿命采用半经验公式^[119]:

$$\tau(N) = (A + B \frac{N}{R} + CN^2)^{-1} \quad (4.22)$$

其中 N 为 InGaAs 吸收层的掺杂浓度, R 为循环因子,源于双异质结 InGaAs 材料中的光子循环效应,即辐射复合所产生的光子在半导体中传播时会被再次吸收,直到光子逸出 InGaAs 材料^[120]。其他各参数的取值分别为:

$$A = 2.11 \times 10^4 \text{ s}^{-1}, \quad B = 1.43 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 / \text{s}, \quad C = 8.1 \times 10^{-29} \text{ cm}^6 / \text{s}$$

将参数代入式 4.22 计算得到的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料的少子寿命随掺杂浓度的变化关系如图 4.1.4 所示。

InP 帽层的少子寿命则采用 Y.Rosenwaks 等人报道的结果^[121]。

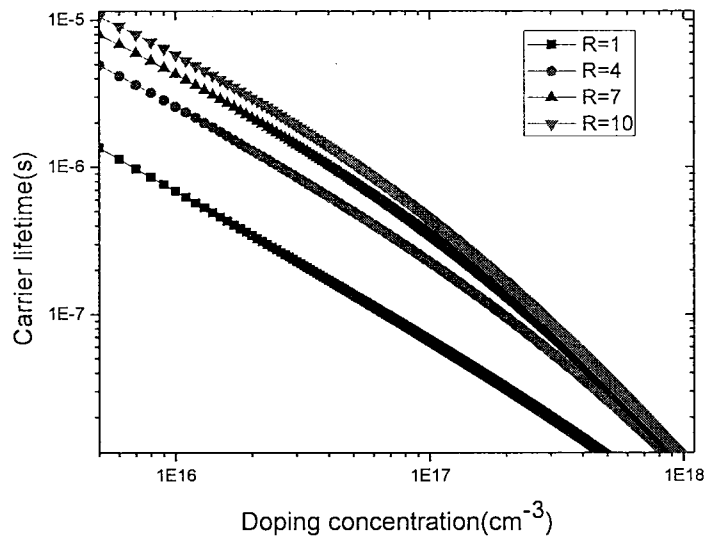


图 4.1.4 In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料的少子寿命随掺杂浓度的变化

Fig. 4.1.4 Lifetime of minority carrier in In_{0.53}Ga_{0.47}As versus doping concentration

迁移率表示单位场强下电子或者空穴的平均漂移速度，它是描述半导体内部载流子输运的重要电学参数。本章中采用 M.Sotoodeh 提出的低场迁移率模型来计算 InGaAs 吸收层中的空穴以及 InP 帽层中的电子的迁移率，其表达式如下所示^[122]：

$$\mu_{LF}(N,T) = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max}(300K)(300K/T)^{\Theta_1} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{\text{ref}}(300K)(T/300K)^{\Theta_2}} \right)^{\lambda}} \quad (4.23)$$

表 4.1.1 迁移率计算用到的材料参数

Fig.4.1.1 Parameters used in calculation of mobility

		$\mu_{\max}(300K)$ (cm ² /V · s)	$\mu_{\min}(\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s})$	$N_{\text{ref}}(300K)$ (cm ⁻³)	λ	Θ_1	Θ_2
InP	μ_n	5200	400	3E17	0.47	2	3.25
	μ_p	170	10	4.87E17	0.62	2	3
In _{0.53} Ga _{0.47} As	μ_n	14000	300	1.3E17	0.48	1.59	3.68
	μ_p	320	10	4.9E17	0.403	1.59	3.68

迁移率的计算中所用到的材料参数如表 4.1.1 所示。根据爱因斯坦关系式 $\frac{D}{\mu} = \frac{k_0 T}{q}$ 可以由迁移率得到 InP 和 In_{0.53}Ga_{0.47}As 材料的扩散系数。通过材料的扩散系数和少子寿命进一步可以得到材料的扩散长度 $L = \sqrt{D\tau}$ 。N 型 In_{0.53}Ga_{0.47}As

材料的少子扩散长度随掺杂浓度的变化如图 4.1.5 所示, 其中计算寿命时假定光子的循环因子为 $10^{[123,124]}$ 。

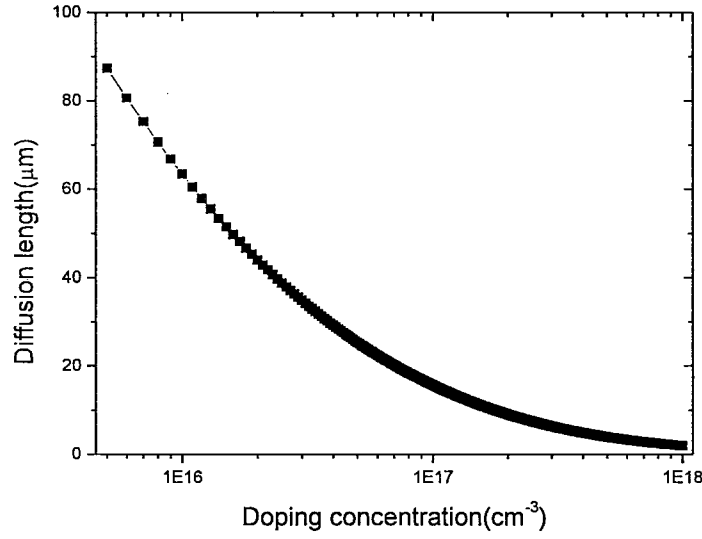


图 4.1.5 N 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料的少子扩散长度随掺杂浓度的变化

Fig. 4.1.5 Diffusion length of minority carrier in N- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ versus doping concentration

表 4.1.2 计算内建电场用到的材料参数

Table.4.1.2 Parameters used in calculation of internal field

InP	E_g	χ	m_{hh}	m_{lh}	N_v	ϵ
	1.34eV	4.40eV	$0.6m_0$	$0.089m_0$	$1.24E19\text{cm}^{-3}$	12.35
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	E_g	χ	m_e^*		N_c	ϵ
	0.75eV	4.51eV	$0.041m_0$		$2.10E17\text{cm}^{-3}$	13.99

InP 和 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的部分材料参数如表 4.1.2 所示。其中 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的材料参数采用差值运算的方式得到。通过以上参数采用下式计算 PN 结的内建电场:

$$V_d = (\phi_1 - \phi_2) / q = ([\chi_1 + E_{g1} + kT \ln(N_{A1} / N_{v1})] - [\chi_2 - kT \ln(N_{D2} / N_{c2})]) / q \quad (4.24)$$

$$= ([4.40 + 1.34 + kT \ln(N_{A1} / 1.24E19)] - [4.51 - kT \ln(N_{D2} / 2.10E17)]) / q$$

分别取 N_{A1} 和 N_{D2} 的值为 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 和 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 计算得到内建电场 $V_d = 1.15 \text{V}$ 。

在 p 区和 n 区的空间电荷区宽度分别为:

$$W_1 = \left[\frac{2\epsilon_1\epsilon_2 N_{D2}}{qN_{A1}(\epsilon_2 N_{D2} + \epsilon_1 N_{A1})} V_d \right]^{1/2} = 4.7 \times 10^{-3} \mu\text{m} \quad (4.25)$$

$$W_2 = \left[\frac{2\varepsilon_1\varepsilon_2N_{A1}}{qN_{D2}(\varepsilon_2N_{D2} + \varepsilon_1N_{A1})} V_d \right]^{1/2} = 0.186\mu\text{m} \quad (4.26)$$

假设 PN 结的交界面处为 $x=0$ ，则可以计算得到空间电荷区内的电场强度如图 4.1.6 所示。

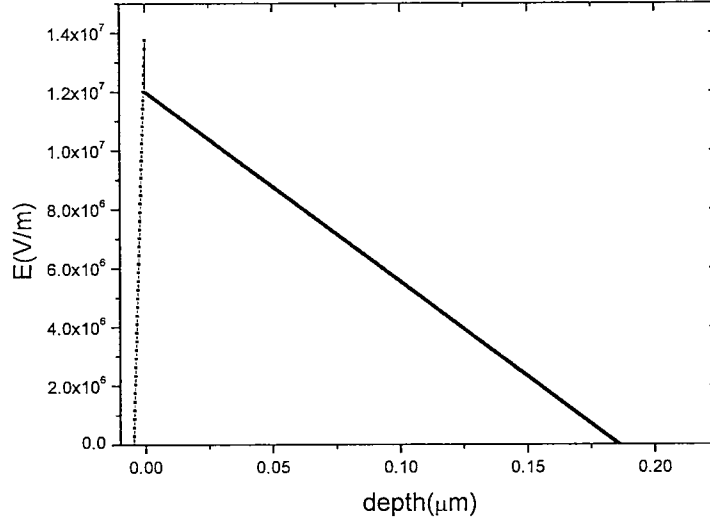


图 4.1.6 空间电荷区的电场强度的分布

Fig.4.1.6 Intensity of electric field in space-charge region

在 p 区和 n 区的电压降分别为：

$$V_{D1} = V_d - V_{D2} = 0.03V \quad (4.27)$$

$$V_{D2} = V_d / \left(1 + \frac{\varepsilon_2 N_{D2}}{\varepsilon_1 N_{A1}} \right) = 1.12V \quad (4.28)$$

在材料参数确定之后，就可以利用前述物理模型对 InGaAs 探测器的光响应进行模拟和分析。

4.2 InGaAs 探测器吸收层厚度对量子效率的影响

对于与 InP 晶格匹配的背照射 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ PIN 型探测器，其光响应特性主要与吸收层相关，包括吸收层的厚度、掺杂浓度以及与 InP 的界面生长质量等因素，都对探测器的光响应特性特别是量子效率有较大的影响。由于吸收层(N 区)空间电荷区的宽度远远大于帽层 (P 区)，因此空间电荷区内光生载流子的产生主要集中在吸收层内。光子在到达结区之前会穿过吸收层，不可避免的会被 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料所吸收，产生的空穴需要经过一段距离的扩散才能到达结区被吸收，因此研究吸收层的厚度对量子效率的影响，对于提高探测器的量子效率有

一定的指导作用。

为了研究吸收层厚度对 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器的影响, 采用了两种不同吸收层厚度的材料制备器件, 所制备的器件均为平面型面阵器件。两种外延材料都是通过金属有机化合物化学气相沉积 (MOCVD) 生长的晶格匹配材料。外延材料结构及参数如表 4.2.1 所示, 材料编号分别为 F40 和 F25。从表中可以看到, 两种材料的吸收层厚度分别为 $1.5\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$, 其他的材料参数均相同。

表 4.2.1 外延材料结构及参数

Tab.4.2.1 The structures and parameters of epitaxial materials

		F40		F25	
	导电	厚度 (μm)	掺杂浓度 (cm^{-3})	厚度 (μm)	掺杂浓度 (cm^{-3})
InP	n^-	1	$5\text{E}16$	1	$5\text{E}16$
$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	n^-	1.5	$5\text{E}16$	2.5	$5\text{E}16$
InP	N^+	0.5	$>2\text{E}18$	0.5	$>2\text{E}18$
InP	SI 衬底	350	$>3\text{E}18$	350	$>3\text{E}18$

使用 F40 和 F25 两种材料制备了平面型 32×32 面阵器件, 光敏元设计大小分别为 $23\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$, 中心距均为 $30\mu\text{m}$ 。两种光敏芯片制备采用相同的工艺流程和工艺条件, 均为常规的 InGaAs 平面型工艺。两种材料均选取光敏元设计大小为 $23\mu\text{m}$ 的器件, 倒焊后置于杜瓦中, 在室温下使用傅里叶光谱仪测量得到的归一化相对响应光谱曲线如图 4.2.1 所示。

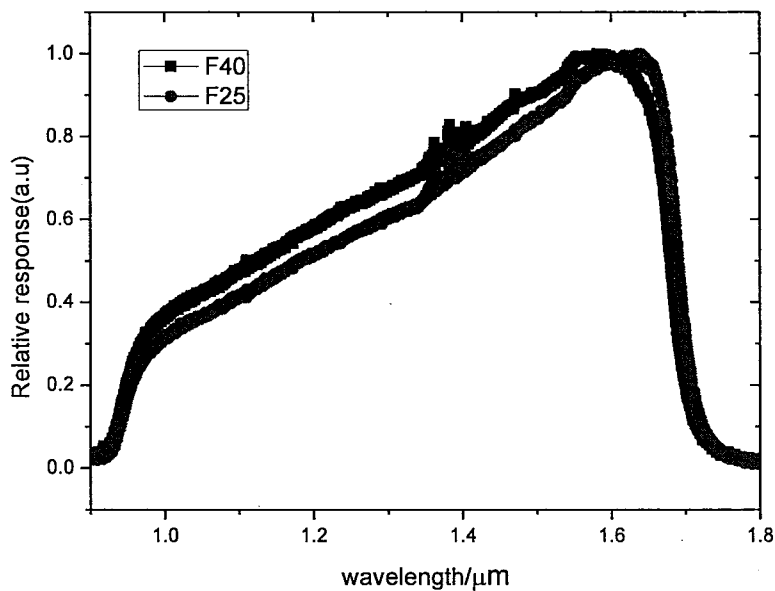


图 4.2.1 两种材料制备的器件的典型归一化响应光谱曲线

Fig.4.2.1 Normalized response spectrum of detectors

两种光敏芯片的截止波长基本相同, 分别为 $1.68\mu\text{m}$ 和 $1.69\mu\text{m}$, 而峰值波长

分别为 $1.58\mu\text{m}$ 和 $1.64\mu\text{m}$ 。根据相对响应光谱计算得到 900K 黑体下两种器件的 G 因子分别为 84.5 和 82.0。

使用黑体对两种器件进行响应信号测试，具体的测试条件为：黑体温度 $T_B=900\text{ K}$ 、环境温度 $T_0=297\text{K}$ 、调制频率为 800Hz 、黑体孔径 $\Phi=8\text{mm}$ ，黑体出射孔与探测器距离 $L=21.9\text{cm}$ ，根据所测得的信号计算得到两种器件的黑体响应率、峰值响应率以及量子效率如表 4.2.2 所示。可以看到，在其他参数保持不变的情况下，吸收层的厚度由 $2.5\mu\text{m}$ 减小到 $1.5\mu\text{m}$ 时，器件的峰值响应率和峰值量子效率显著降低。

表 4.2.2 两种器件的峰值量子效率

Table.4.2.2 QE (at peak wavelength) of the samples

	吸收层厚度	黑体响应率 (A/W)	峰值响应率(A/W)	峰值量子效率
F25	$2.5\mu\text{m}$	0.0153	1.25	95.3%
F40	$1.5\mu\text{m}$	0.0113	0.95	75.2%

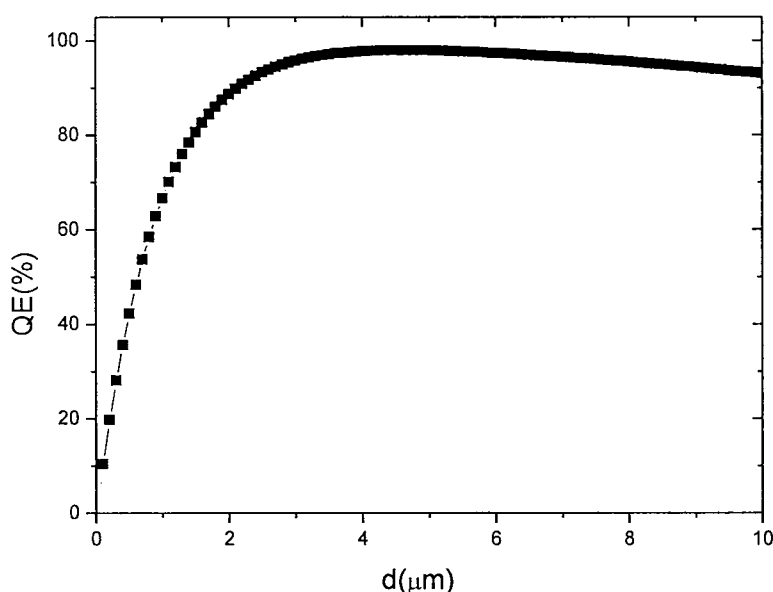


图 4.2.2 器件的内量子效率随吸收层厚度的变化

Fig.4.2.2 Inner QE (at peak wavelength) of detectors versus thickness of absorption layer

采用前面所述模型对 F40 和 F25 两种材料制备的器件的量子效率进行模拟。对于这种常规波长的外延材料制备的器件，由于 InP 衬底较厚，可见波段的光基本上被完全吸收，因此只需要考虑近红外波段即 $0.9\text{-}1.7\mu\text{m}$ 波段内器件的光响应，衬底的吸收就可以不再考虑，同时第三部分的光电流即 P 区空间电荷区外通过扩散作用被收集的光生电子产生的光电流也可以忽略不计。模拟中峰值波长取为 $1.6\mu\text{m}$ ，吸收系数取为 $1.1\times 10^4\text{cm}^{-1}$ ，器件的内量子效率随吸收层厚度的变化如图

4.2.2 所示。器件的其他参数与 F40 和 F25 相同，由于器件制备完成后都会经过抛光处理，衬底厚度从原来的 $350\mu\text{m}$ 减小到 $300\mu\text{m}$ 左右，因此模拟中衬底厚度设为 $300\mu\text{m}$ 。

由模拟的结果可以看到，随着吸收层厚度的增大，器件的内量子效率先迅速增大，然后基本保持不变。由 4.1 节的计算可以得到，对于 F40 和 F25 的外延材料结构，理论的空间电荷区的宽度为 $0.186\mu\text{m}$ ，而 N 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料的少子扩散长度为十几微米量级。光在吸收层中传播时，光强随传播距离的变化由下式表示：

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (4.29)$$

吸收系数取为 $1.1 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ 时，在吸收层中传播 $1\mu\text{m}$ 后，光强变为原来的 33%；在吸收层中传播 $5\mu\text{m}$ 后，光强变为原来的 0.4%。因此光的吸收主要发生在吸收层表面的几个微米以内。

在吸收层较薄时，吸收层均为空间电荷区，随着吸收层厚度的增大，空间电荷区增大，光生载流子增多，使量子效率增大。随后空间电荷区的宽度保持固定，吸收层厚度的增大使得光激发产生的载流子增加，但是同时光生载流子在到达空间电荷区被收集之前扩散的距离增加，意味着被复合的几率增加。在吸收层厚度较小时，前者的作用更显著，因此器件的量子效率增大；当吸收层厚度较大时，光吸收逐渐趋于饱和，后者的作用慢慢体现出来，因此器件的量子效率出现缓慢下降。

器件峰值量子效率的模拟值与实际测量值的对比如表 4.2.3 所示。可以看到，两者相差不是很大，模拟值与实验值基本是吻合的。吸收层为 $2.5\mu\text{m}$ 时器件的峰值量子效率比吸收层为 $1.5\mu\text{m}$ 时高。

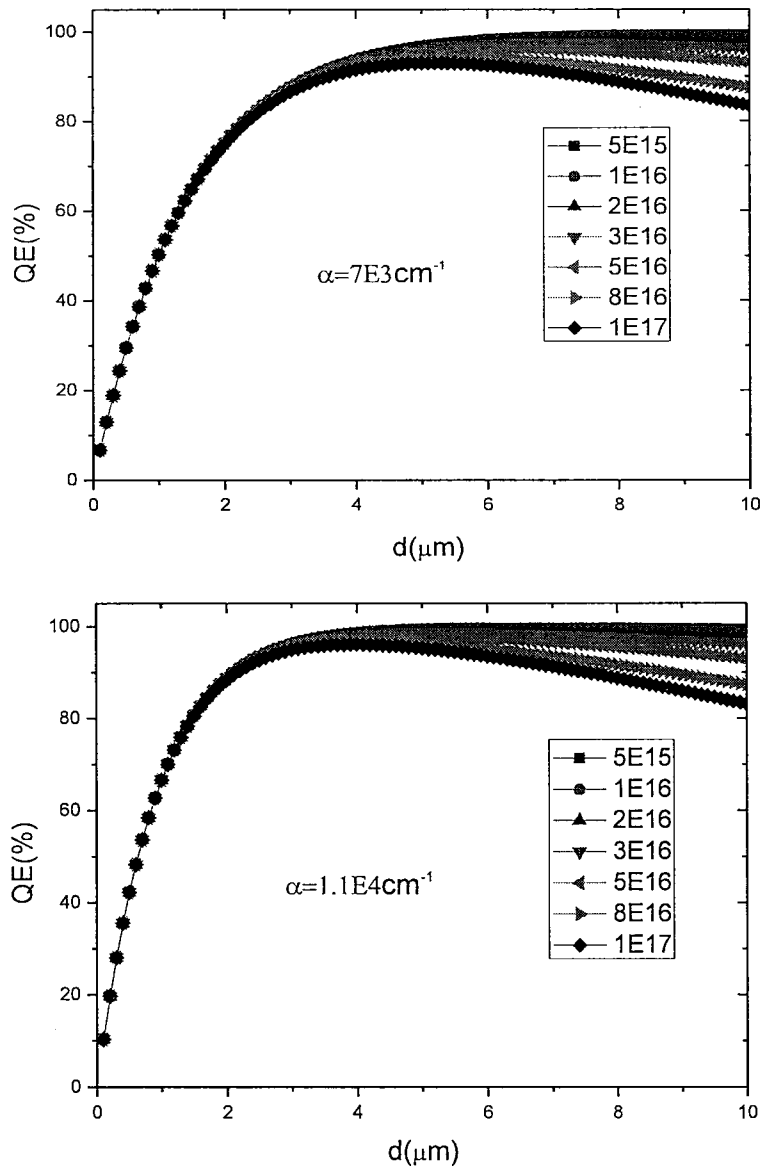
表 4.2.3 峰值量子效率理论值与测量值的对比

Fig.4.2.3 Comparison of QE at peak wavelength of simulation and experiment

峰值量子效率	测量值	模拟值
F25	95.3%	93.3%
F40	75.2%	80.7%

在不同的波长处，N 型 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的吸收系数不同，在近红外波段，吸收系数基本上在 $6 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$ 范围内变化^[7]。使用该模型进一步模拟了不同的吸收系数下，器件的峰值量子效率随吸收层厚度以及掺杂浓度的变化关系，如

图 4.2.3 所示。在吸收层掺杂浓度发生变化时, 器件峰值量子效率随吸收层厚度的变化趋势是基本一致的。在吸收层厚度固定时, 吸收层的掺杂浓度越高, 空间电荷区的宽度越小, 因此吸收层中光生空穴在到达空间电荷区之前的扩散距离越长, 被复合的几率越高, 同时吸收层的少子扩散长度减小, 所以通过扩散作用到达空间电荷区的载流子减少, 器件的量子效率降低。吸收系数越大, 吸收层对入射光子的吸收就集中在表面越薄的区域内, 量子效率达到饱和时对应的吸收层厚度就越小。



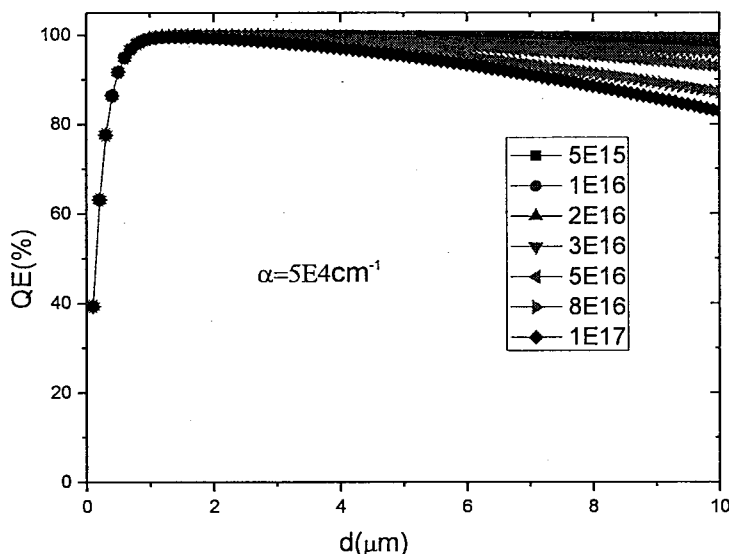


图 4.2.3 器件的内量子效率随吸收层厚度以及掺杂浓度的变化

Fig.4.2.3 Inner QE at peak wavelength of detectors versus the thickness and doping concentration of the absorption layer

4.3 可见拓展的 InGaAs 探测器量子效率与材料参数的关系

对于可见拓展的 InGaAs 面阵探测器，其光响应延伸到可见波段，在分析其光响应特性时必须考虑 InP 的吸收作用。为了实现 InGaAs 面阵探测器的可见拓展，在常规的 InGaAs 探测器的基础上，通过衬底减薄的方式减小 InP 衬底在可见波段的无效吸收，从而提高探测器在可见波段的响应。在衬底减薄后，剩下一层 InP 缓冲层。对于背照射的探测器，入射光在到达吸收层被吸收之前会通过 InP 缓冲层，因此分析探测器的光响应特别是在可见波段的响应时，必须考虑 InP 缓冲层的吸收。

采用前述模型，和之前所得到的材料参数，对衬底减薄后结构如图 4.1.1 所示的背照射 PIN 型平面型面阵器件的光响应特性进行模拟分析。影响器件量子效率的因素包括 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 层厚度、掺杂浓度、缓冲层的厚度以及吸收层和缓冲层在不同波长处的吸收系数。模拟中不考虑吸收层与缓冲层之间的界面复合速率。

首先考虑单一波长的光照射器件的情况，主要模拟器件在可见波段的光响应。在入射光波长为 850nm 时，给定不同的吸收层掺杂浓度，器件的内量子效率随缓冲层厚度的变化如图 4.3.1 所示。给定不同的缓冲层厚度，器件的内量子效率随吸收层掺杂浓度的变化如图 4.3.2 所示。模拟中吸收层厚度均取为 $2.5\mu\text{m}$ 。从图中可以看到，相对于吸收层的掺杂浓度，InP 缓冲层的厚度对器件量子效率的

影响要显著的多。随着缓冲层厚度的增大, InP 的无效吸收迅速增大, 使得到达吸收层的光子数量迅速减小, 从而降低器件的量子效率。相对于缓冲层厚度, 改变吸收层掺杂浓度对器件量子效率的影响比较小。

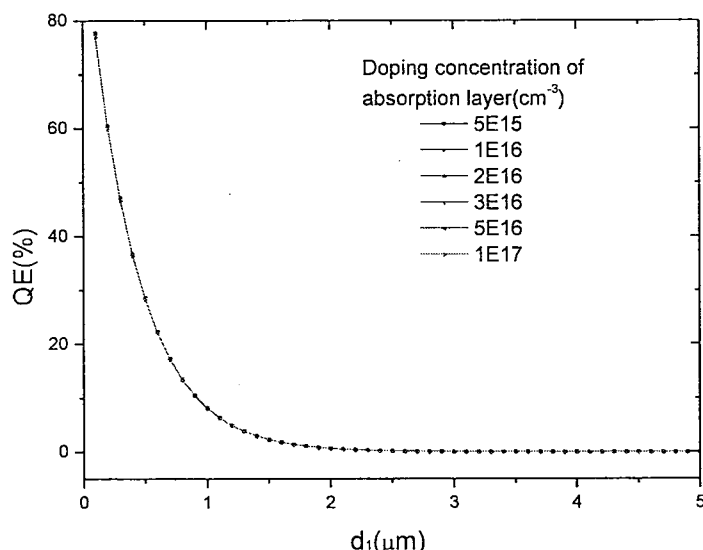


图 4.3.1 器件的内量子效率随缓冲层厚度的变化 ($d_2=2.5\mu\text{m}$)

Fig.4.3.1 Inner QE at 850nm of detectors versus thickness of the buffer layer ($d_2=2.5\mu\text{m}$)

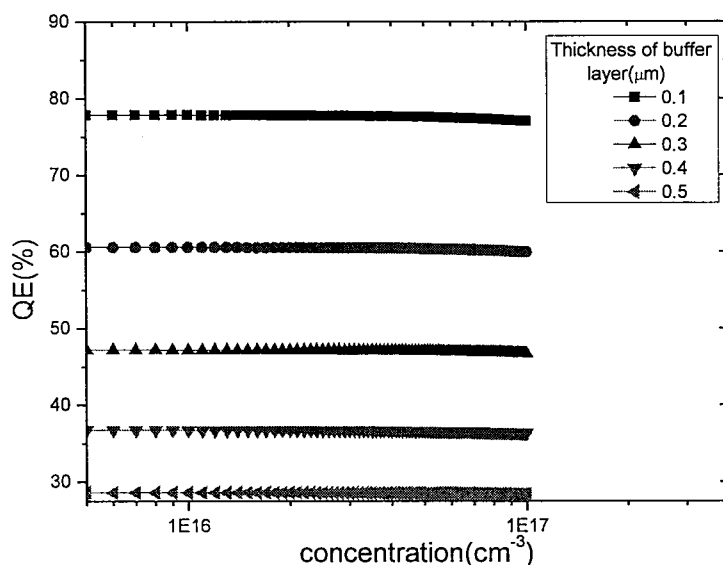


图 4.3.2 器件的内量子效率随吸收层掺杂浓度的变化 ($d_2=2.5\mu\text{m}$)

Fig.4.3.2 Inner QE at 850nm of detectors versus the doping concentration of the absorption layer ($d_2=2.5\mu\text{m}$)

当 InP 缓冲层厚度固定时, 缓冲层对入射光的吸收不变, 此时吸收层厚度和掺杂浓度对器件量子效率的影响与 4.2 节中的分析相同。在入射光波长为 700nm, 缓冲层厚度固定为 $0.2\mu\text{m}$ 时, 器件的内量子效率随吸收层厚度和掺杂浓度的变化

如图 4.3.3 所示。器件内量子效率的变化趋势与 4.2 节中相同，但是整体的值则大大降低。

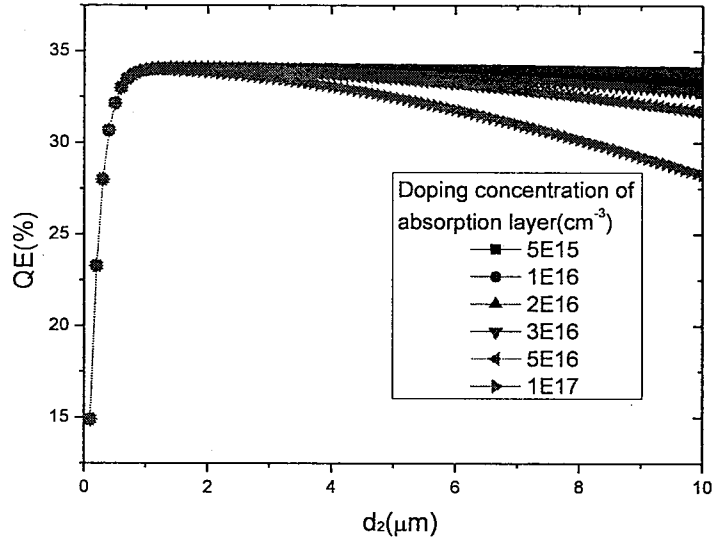


图 4.3.3 器件的内量子效率随吸收层厚度和掺杂浓度的变化 ($d_1=0.2\mu\text{m}$)

Fig.4.3.3 Inner QE at 700nm of detectors versus the thickness and doping concentration of the absorption layer ($d_1=0.2\mu\text{m}$)

采用前述模型对器件在 $0.4\text{--}1.7\mu\text{m}$ 波段内的量子效率进行模拟。InP 缓冲层的厚度影响了器件在可见波段的量子效率,对器件在近红外波段的量子效率则影响不大。考虑吸收层厚度为 $2.5\mu\text{m}$,吸收层掺杂浓度为 $5\text{E}16\text{cm}^{-3}$ 的情况下,不同缓冲层厚度器件的内量子效率随波长的变化关系如图 4.3.4 所示。

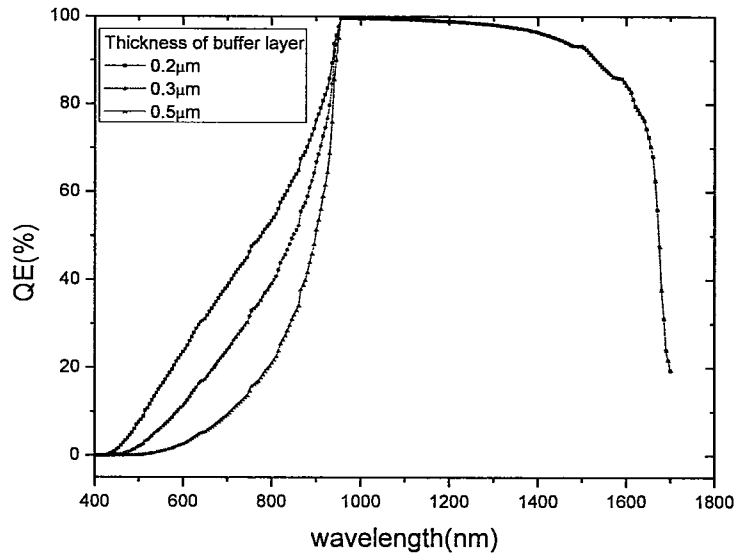


图 4.3.4 不同缓冲层厚度的器件内量子效率随波长的变化关系 ($d_2=2.5\mu\text{m}$)

Fig.4.3.4 Inner QE of detectors with different thickness of the buffer layer versus wavelength ($d_2=2.5\mu\text{m}$)

吸收层厚度也会影响器件的量子效率，且影响主要体现在近红外波段（0.9-1.7 μm ）。考虑吸收层掺杂浓度为 $5\text{E}16\text{cm}^{-3}$ ，缓冲层厚度为 $0.2\mu\text{m}$ 的情况下，不同吸收层厚度的器件的内量子效率随波长的变化关系如图 4.3.5 所示。随着吸收层厚度的增加，响应的截止波长基本没有变化，但是在近红外波段的量子效率逐渐增加，分析同 4.2 节中相同。在可见波段，由于 InGaAs 的吸收系数较大，吸收层对入射光的吸收集中在表面很薄的区域内，因此吸收层厚度的变化对量子效率的影响较小。随着波长的增大，InGaAs 的吸收系数迅速降低，因此器件的内量子效率有所降低。

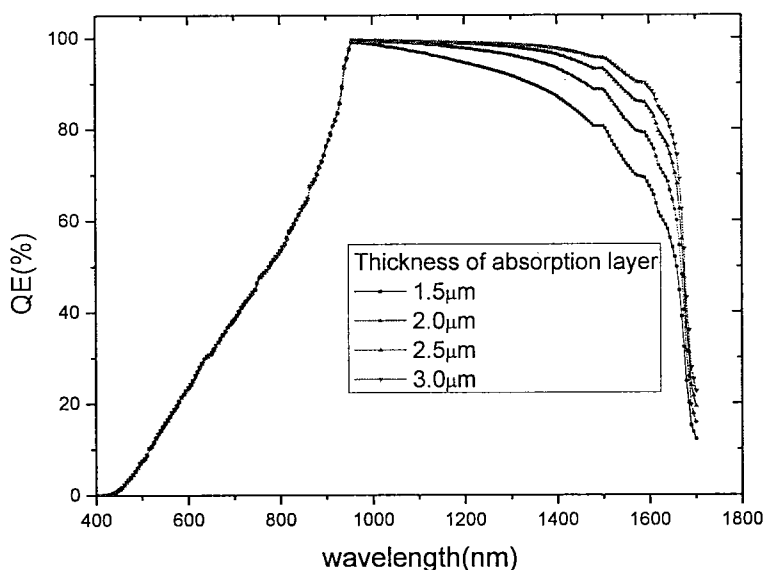


图 4.3.5 不同吸收层厚度的器件的内量子效率随波长的变化关系（ $d_1=0.2\mu\text{m}$ ）

Fig.4.3.5 Inner QE of detectors with different thickness of the absorption layer versus wavelength ($d_1=0.2\mu\text{m}$)

以上的模拟都没有考虑器件表面的反射。考虑如图 4.3.6 所示的结构，光从空气中入射到器件表面，减薄后表面为 InP 缓冲层。InP 的折射率采用 Adachi 报道的结果^[125]， $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 在考虑的波段内折射率约为 3.4。在 0.5-0.9 μm 波段，由于 InP 缓冲层的强烈吸收，只考虑一次反射和折射。在 0.9-1.7 μm 波段，考虑两次反射。总的反射率由下式得到：

$$R = \frac{I_R}{I_0} = R_1 + T_1 R_2 T_1 + 2\sqrt{R_1 T_1 R_2 T_1} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} 2n_1 d\right) \quad (4.30)$$

其中 d 为缓冲层的厚度，这里设为 $0.2\mu\text{m}$ 。

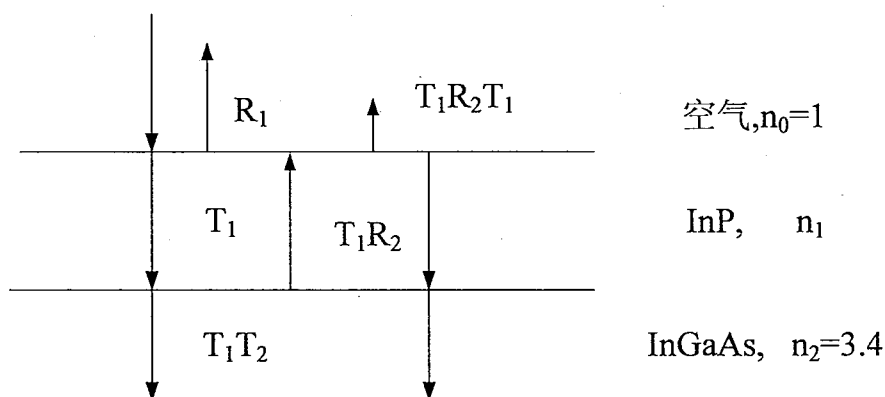


图 4.3.6 光入射到器件表面的反射和折射

Fig.4.3.6 The reflection and refraction of light incident to the device

在 0.4-1.7 μm 波段内光入射到器件表面后总的透射率随波长的变化如图 4.3.7 所示。

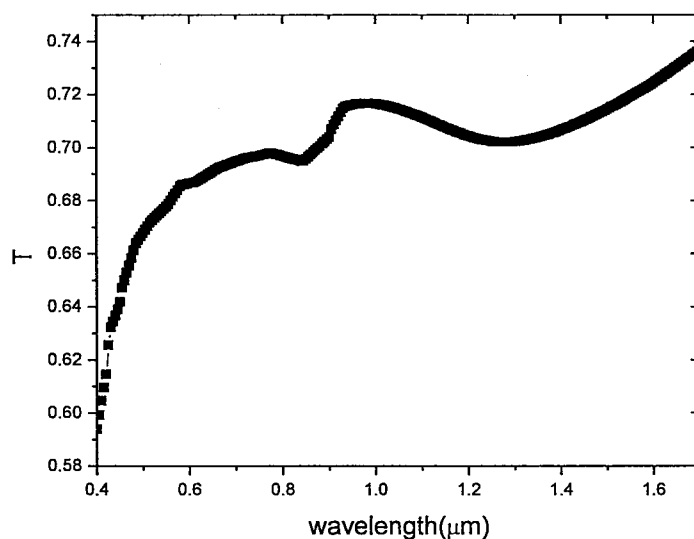


图 4.3.7 光入射到器件表面后总的透过率

Fig.4.3.7 The transmissivity of light incident to the device

对 2.4.2 节中使用 F58 材料制备的器件的量子效率进行模拟。在考虑了表面反射后模拟得到的器件的归一化相对响应光谱如图 4.3.8 所示，并且将理论值与实验得到的结果进行了比较，可以看到理论值和实验值较为吻合。在近红外波段，理论值要比实验值略高，这是由于模型中用到的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的材料参数与实际情况存在差异，另外，对传统的 InGaAs 探测器进行衬底减薄后，探测器暴露在空气中的表面钝化困难，导致接近表面的光生载流子可能被束缚住，从而降低探测器的量子效率。

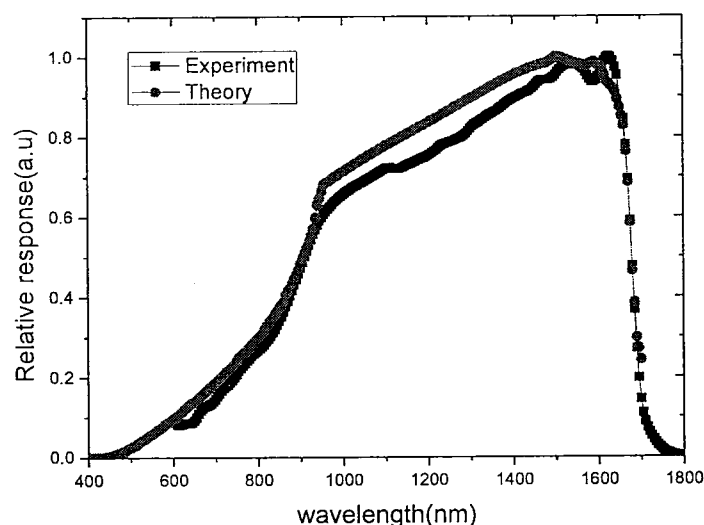


图 4.3.8 理论模拟的归一化响应光谱与实验所得的归一化响应光谱

Fig.4.3.8 Normalized response spectrum of simulation and experiment

4.4 本章小结

本章采用器件物理模型，通过测试和文献获得材料参数，对可见拓展的背照射的 InGaAs 平面型器件的量子效率进行了理论模拟，重点分析了缓冲层厚度、吸收层厚度以及掺杂浓度对探测器在可见波段和近红外波段的量子效率的影响，表明缓冲层 InP 的厚度对探测器在可见波段量子效率影响最为显著。进一步将探测器量子效率和响应光谱的理论模拟结果和实验结果进行对比，理论值和实验值吻合较好，优化了可见拓展探测器的结构参数设计，吸收层厚度 $2.5\mu\text{m}$ ，掺杂浓度 $5\text{E}16\text{cm}^{-3}$ ，缓冲层厚度的进一步降低是提高 InGaAs 探测器可见波段量子效率的一个有效途径。

5 可见拓展的 InGaAs 焦平面探测器

随着红外探测技术的发展,目前红外探测器已经发展到了第三代。第三代红外探测器具备以下特点:大规模阵列、小光敏元、多波段工作、探测器芯片与读出电路的混合集成、低暗电流和低噪声^[126,127]。在众多短波红外波段的探测器中,InGaAs 探测器具有可在相对较高温下仍有较好的性能、迁移率高、可靠性好等特点,有较大的优势^[47],长线列和面阵 InGaAs 焦平面探测器逐渐应用于空间遥感与夜视、侦察与监视、红外光谱成像等众多领域^[48-55]。

常规波长的 InGaAs 焦平面探测器响应波段为 0.9-1.7 μm ,通过可见拓展可以使其响应波段向可见延伸。美国传感无限公司(Sensors Unlimited Inc)实现了 1280 x 1024 (15 μm)元可见拓展的 InGaAs 焦平面探测器,响应波段为 0.4 μm -1.7 μm ^[61]。国外其他的一些的研究机构在 InGaAs 可见拓展面阵焦平面探测器领域也取得了一系列的成果^[67-70]。相对于常规波长的 InGaAs 焦平面探测器,向可见拓展的 InGaAs 焦平面探测器在可见光波段(0.4-0.9 μm)有很高的量子效率,同时近红外波段也能保持优良的性能,包括高探测率、高量子效率和小暗电流,使其在微光夜视、侦查、农业检测等领域获得重要的应用。因此发展可见拓展的 InGaAs 面阵焦平面探测器具有十分重要的意义。

本章为了满足应用需求,研制了背照射平面型 512 $\times$ 128 元 InGaAs 面阵探测器,中心距为 30 μm ,实现了探测器与读出电路的互连,测量并分析了焦平面探测器的光电性能。在此基础上采用大面阵探测器衬底减薄工艺,实现了大面阵 InGaAs 焦平面探测器的可见拓展,其响应波段为 0.5-1.7 μm 。

5.1 平面型 512 $\times$ 128 元 InGaAs 焦平面探测器

5.1.1 光敏芯片制备

所用材料为带有腐蚀阻挡层的 PIN 结构 InP/InGaAs/InP 双异质结材料 F58,材料具体参数见表 2.4.5,其缓冲层厚度为 0.2 μm 。芯片制备工艺流程见图 2.4.2。通过 PECVD 技术沉积 SiN 薄膜作为扩散掩膜,采用 ICP 刻蚀技术刻蚀出扩散孔,扩散方式采用 Zn₃P₂ 的闭管扩散,采用湿法腐蚀和氩离子刻蚀相结合的方式开 N 电极孔,之后采用 PECVD 技术沉积 SiN 钝化膜,通过离子束溅射的方式生长

Au 制作 P 电极，高温快速热退火的条件为 450℃&15s，第六步光刻采用双层胶技术，通过离子束溅射的方式生长 Cr/Au 形成 P、N 加厚电极，最后生长 In 柱并对芯片背面进行抛光减薄。

光敏芯片为 512×128 元的面阵，其光敏元设计大小为 23×23μm²，中心距为 30μm。光敏芯片与读出电路通过 In 柱进行倒焊互连，最后获得了两个 512×128 元 InGaAs 面阵焦平面探测器组件，编号分别为 F58-1、F58-2，实物如图 5.1.1 所示。

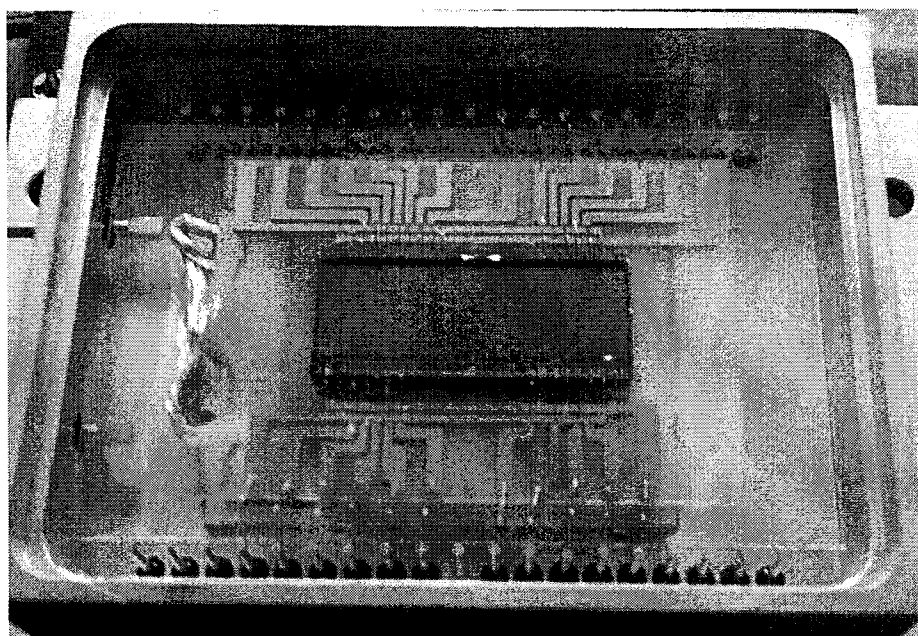


图 5.1.1 512×128 元 InGaAs 面阵焦平面探测器组件实物图

Fig.5.1.1 Photo of 512×128 InGaAs detector

5.1.2 焦平面特性分析

红外焦平面探测器组件主要由红外探测器阵列芯片、读出电路芯片和封装组成。其工作性能既与探测器性能如量子效率、噪声、均匀性、盲元率等有关,还与信号的输出性能有关,如电路输入级的电荷存储、均匀性、线性度、注入效率,输出电路中的电荷转移效率、电荷处理能力等。短波红外焦平面阵列的主要性能参数包括响应信号电压、噪声电压、探测率、响应不均匀性、电流响应率、盲元率、噪声等效功率、动态范围等^[128,129]。

焦平面的信号电压表示为^[130]:

$$V_s = I_{\text{int}} T_{\text{int}} A_v / C_{\text{int}} \quad (5.1)$$

其中, I_{int} 为积分电流, T_{int} 为积分时间, A_v 为电路增益, C_{int} 为积分电容。由于积分电流包括光电流和暗电流, 因此焦平面探测器的信号电压实际上是有效信号和暗信号之和。

噪声实质上是物理量围绕其平均值的涨落现象, 其测量通常采用测量像元响应的均方根偏差的方法(即标准偏差)。焦平面的噪声电压表示为^[130]:

$$V_n = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_n(i) - \bar{V}_n)^2} \quad (5.2)$$

其中, $V_n(i)$ 为第 i 个像元的噪声电压, $\bar{V}_n$ 为所有像元的平均噪声电压。

焦平面的峰值探测率表示为:

$$D_{\lambda p}^* = gD_{bb}^* = \frac{gV_s 4L^2 \sqrt{1/2T_{\text{int}}}}{V_n \sigma (T_B^4 - T_0^4) d^2 \sqrt{A_D}} \quad (5.3)$$

焦平面响应的不均匀性定义为, 红外焦平面有效像元响应率均方根与平均响应率的百分比, 用焦平面的信号电压可以表示为^[130]:

$$U_{VS} = \frac{1}{\bar{V}_s} \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N [V_s(i) - \bar{V}_s]^2} \quad (5.4)$$

其中, $V_s(i)$ 为第 i 个像元的信号电压, $\bar{V}_s$ 为所有像元的平均信号电压。

电流响应率可以表示为:

$$R = G \frac{I}{P} = G \frac{V_s C_{\text{int}}}{T_{\text{int}} A_v P} \quad (5.5)$$

其中, G 为峰值响应率与黑体响应率的比值, I 为光电流, P 为辐射功率。

焦平面的盲元率定义为, 无效像元占总像元数的百分比, 用符号 N_{ef} 表示。可以根据测试的信号电压, 判断其中是否存在死像元或过热像元, 判断条件为: <0.5 倍平均信号电压, 则为死像元, 符号为 d ; >1.5 倍平均信号电压, 则为过热像元, 符号为 h 。则盲元率为:

$$N_{ef} = \frac{d+h}{N} \times 100\% \quad (5.6)$$

其中 N 为总像元数。

综上所述, 焦平面探测率等参数的测试, 可归结为响应信号电压 V_s 和噪声

电压 V_n 的测试, 其他特性参数可根据定义计算得到。积分时间、噪声等效功率、噪声等效温差、帧周期、饱和辐照功率、动态范围等参数与红外系统的光学系统、电路设计以及特定应用场合等因素有关。

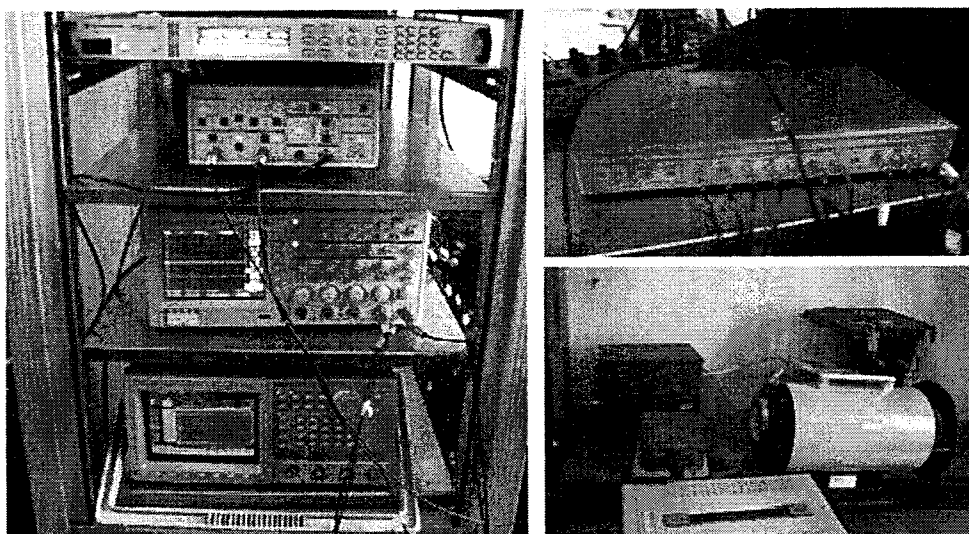


图 5.1.2 InGaAs 焦平面探测器测试系统

Fig. 5.1.2 InGaAs FPA measurement system

InGaAs 焦平面探测器测试系统如图 5.1.2 所示, 主要由黑体辐射源、示波器、数据发生器、差分放大器、A/D 卡等组成, 数据采集由计算机 Labview8.0 程序控制完成, 其示意框架图如 5.1.3 所示。

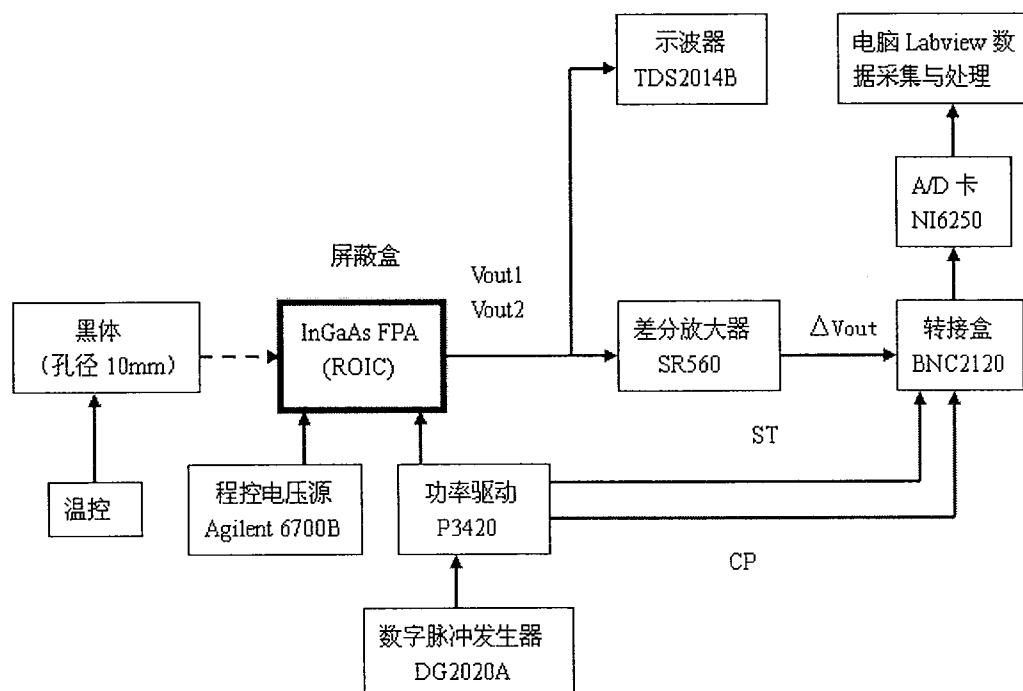


图 5.1.3 InGaAs 焦平面探测器测试系统示意框架图

Fig. 5.1.3 The schematic of InGaAs FPA measurement system

将焦平面模块封装在测试管壳中，利用上述的 InGaAs 焦平面探测器测试系统对 512×128 元面阵焦平面探测器 F58-1 和 F58-2 的光电性能进行测试。测试条件为：测试环境温度 300K，黑体温度 900K，黑体出射孔距离焦平面 52cm，黑体出射孔径为 10.16mm。

在积分时间为 3ms 的条件下，扣除了暗信号后 F58-1 的有效信号分布如图 5.1.4 所示。可以看到，信号的分布较为均匀，采用式 5.6 中对盲元的定义得到探测器的盲元率为 0.34%，盲元数目较少。在剔除盲元后探测器有效信号的直方图如图 5.1.5 所示，响应不均匀性为 9.9%。取 G 因子为 80，峰值波长取为 $1.6\mu\text{m}$ ，得到探测器的峰值响应率和峰值探测率分别为 0.49A/W 、 $8.71 \times 10^{11} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。

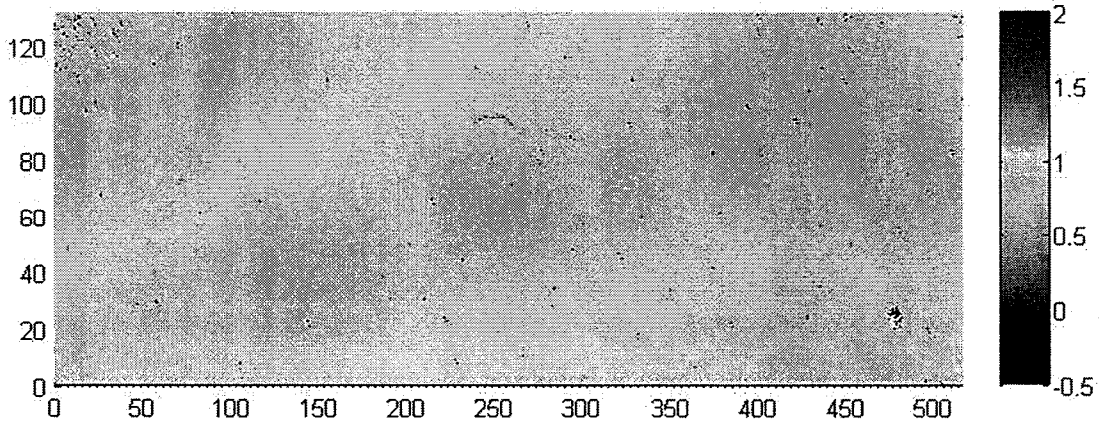


图 5.1.4 室温下积分时间为 3ms 时探测器 F58-1 响应信号的分布图

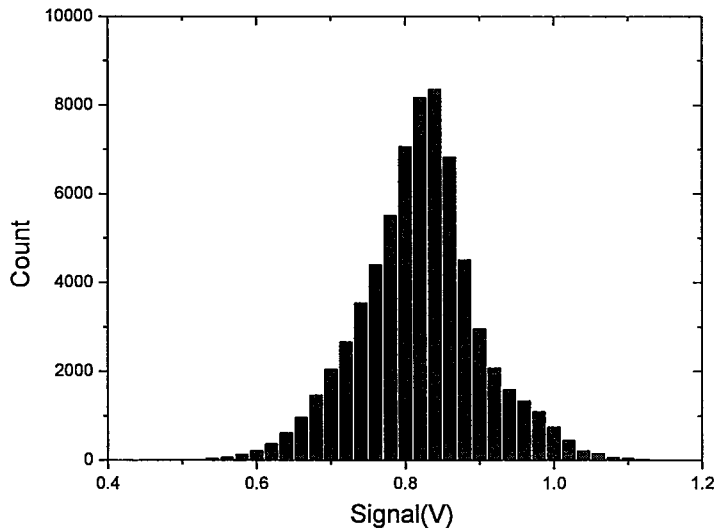
Fig.5.1.4 Distribution of signal of detector F58-1 at room temperature ($T_{\text{int}}=3\text{ms}$)

图 5.1.5 室温下积分时间为 3ms 时探测器 F58-1 有效信号的直方图

Fig.5.1.5 Histogram of the effective signal of detector F58-1 at room temperature ($T_{\text{int}}=3\text{ms}$)

在积分时间为 3ms 的条件下,扣除了暗信号后焦平面 F58-2 的有效信号分布如图 5.1.6 所示。可以看到,信号的分布不均匀,左侧的信号相对较大,右侧的信号相对较小,探测器的盲元率为 8.5%,盲元数目较多,并且比较集中,可能的原因是探测器制备的过程中对此处造成了损伤,在无光照情况下,过热像元较多,可能与倒焊压力有关。在剔除盲元后探测器有效信号的直方图如图 5.1.7 所示,响应不均匀性为 17%,各元的信号大小不集中,存在一个广泛的分布。

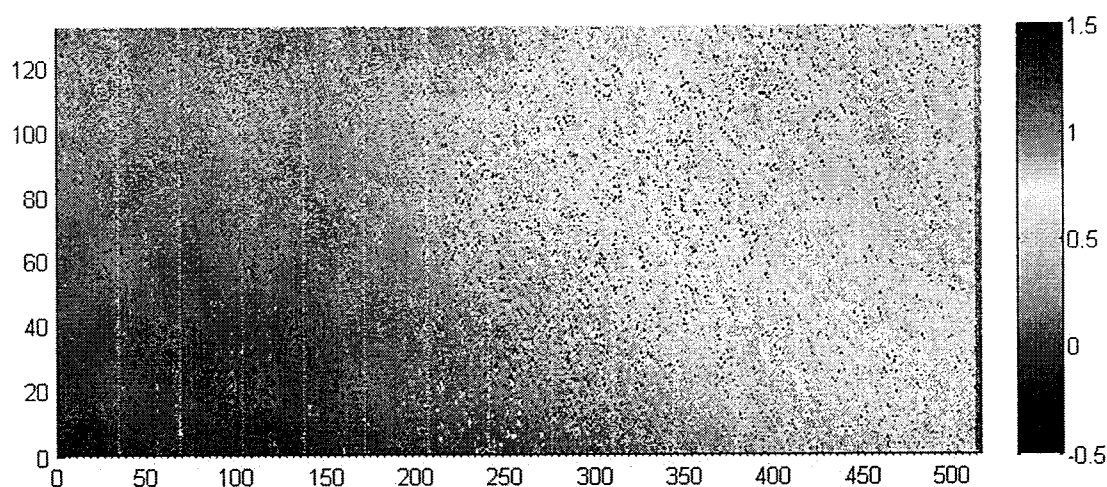


图 5.1.6 室温下积分时间为 3ms 时探测器 F58-2 响应信号的分布图

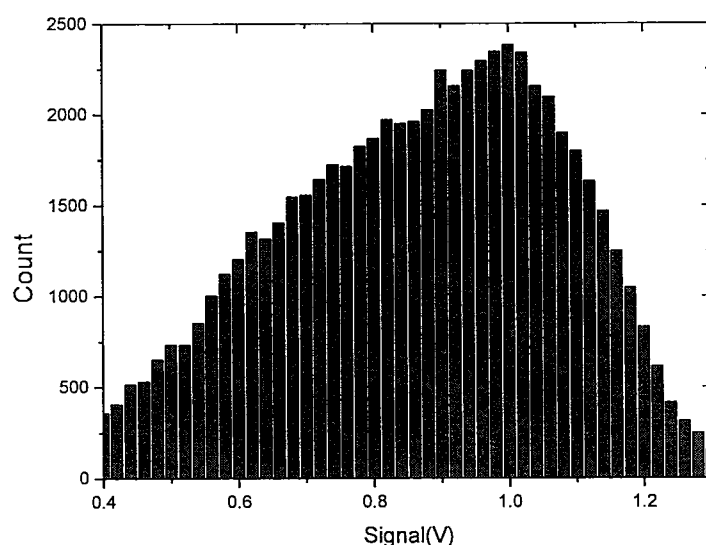
Fig.5.1.6 Distribution of signal of detector F58-2 at room temperature ($T_{\text{int}}=3\text{ms}$)

图 5.1.7 室温下积分时间为 3ms 时探测器 F58-2 有效信号的直方图

Fig.5.1.7 Histogram of the effective signal of detector F58-2 at room temperature ($T_{\text{int}}=3\text{ms}$)

在积分时间为 3ms 下 F58-2 噪声的分布如图 5.1.8 所示,噪声的分布较为均

匀, 平均值为 $7.59 \times 10^{-4} \text{V}$ 。

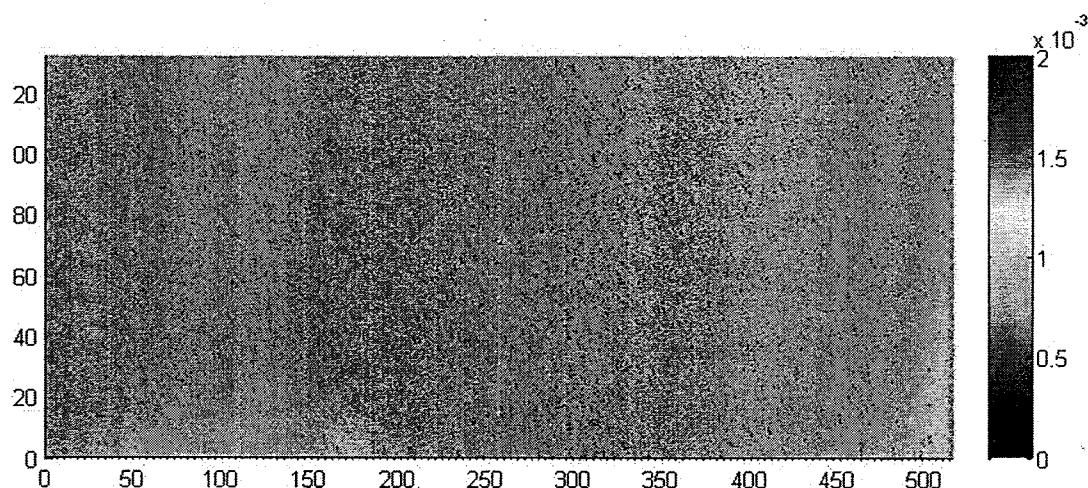


图 5.1.8 室温下积分时间为 3ms 时探测器噪声的分布图

Fig.5.1.8 Distribution of noise of detector at room temperature ($T_{\text{int}}=3\text{ms}$)

在室温下焦平面探测器 F58-2 的噪声和信号随积分时间的变化曲线如图 5.1.9 所示, 焦平面探测器的信号随积分时间呈线性增加趋势, 焦平面的噪声随积分时间增加, 读出电路噪声和光敏芯片噪声共同作用。

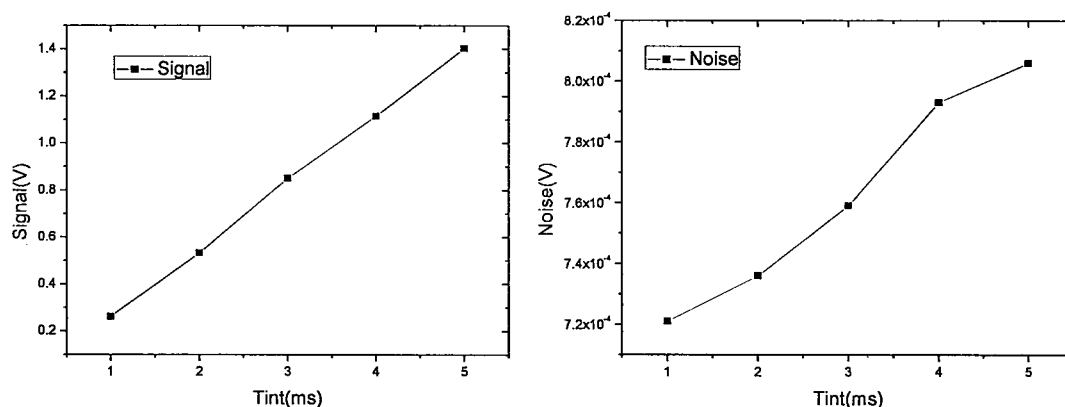


图 5.1.9 室温下焦平面探测器的有效信号和噪声随积分时间的变化

Fig.5.1.9 Effective signal and noise of detector versus T_{int} at room temperature

选择其中的 128 元, 使用单色仪系统测量得到的归一化响应光谱如图 5.1.10 所示, 其中剔除了 41#、54#、56#、71#、84#、93#等六个盲元。可以看到, 各元的光谱基本一致, 因此选择其中的三元 1#、50#和 100#进行校正。校正后得到的相对响应光谱如图 5.1.10 右所示, 三条曲线基本重合, 响应波段为 $0.9\text{--}1.7\mu\text{m}$, 峰值波长为 $1.59\mu\text{m}$, 计算得到 G 因子为 91.8, 因此得到焦平面探测器的峰值响应率和峰值探测率分别为 0.56A/W 、 $1.20 \times 10^{12} \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。

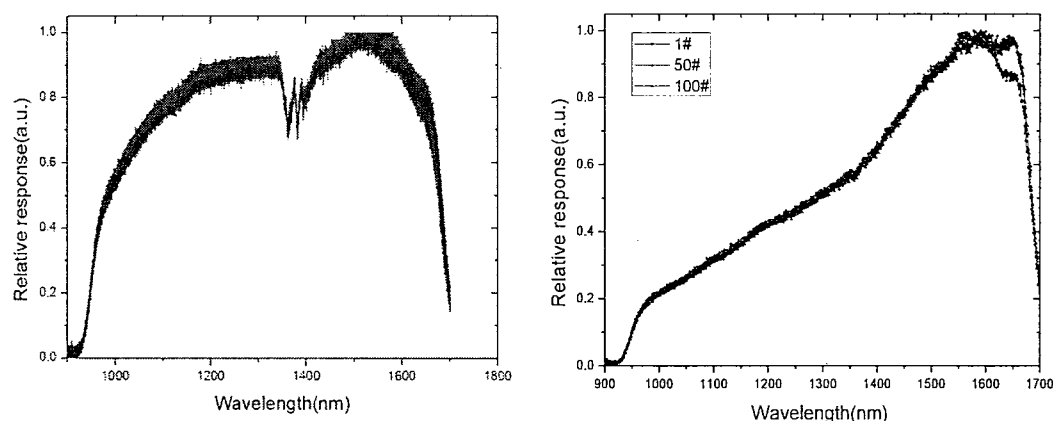


图 5.1.10 常温下校正前（128 元）和校正后（3 元）的归一化响应光谱

Fig.5.1.10 Normalized response spectrum of detector before substrate removal at room temperature

5.2 大面阵探测器的衬底减薄

大面阵探测器的衬底减薄仍然采用化学机械抛光和化学湿法腐蚀相结合的方法。在光敏芯片与读出电路之间充入低温胶，在室温下进行固化，固化时间为 72h。首先手动在电极板以及读出电路表面涂光刻胶保护，采用的光刻胶为正薄胶，在 65℃烘箱中放置两小时以上。然后使用 PM5 进行化学机械抛光，由于探测器面积较大，对贴片提出了更高的要求，要求贴片后光敏芯片表面两端的高度差控制在 10 μ m 以内，将 HgCdTe 陪片贴在电极板上，吸盘压力不能太大，抛光时转速控制在 8rpm 左右，将 InP 抛光至 100 μ m 左右。在化学机械抛光之后，分别使用三氯乙烯、丙酮、酒精进行清洗，然后用氮气吹干。然后再次涂胶保护，放置于烘箱中烘干。采用化学湿法腐蚀的方法分别腐蚀掉剩余的 InP 衬底和 InGaAs 腐蚀阻挡层，使用丙酮、酒精清洗。

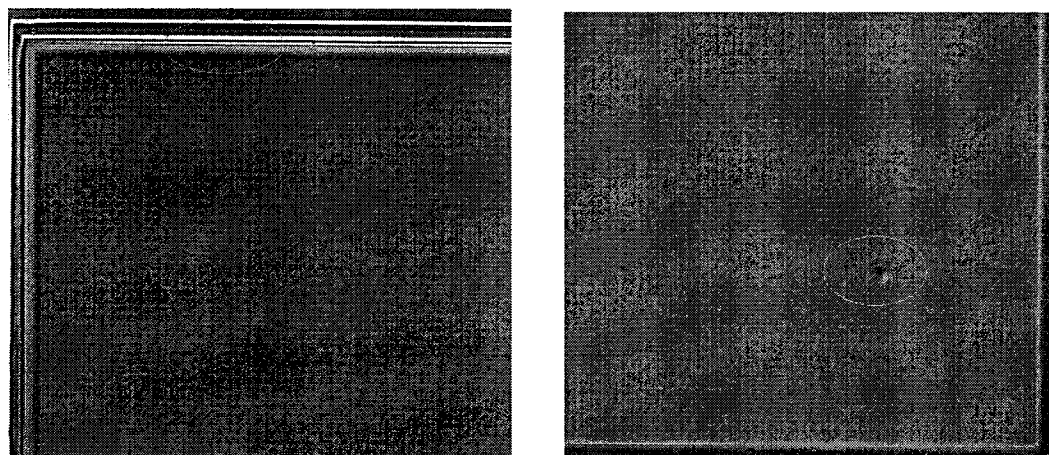


图 5.2.1 衬底减薄后焦平面探测器的表面形貌

Fig.5.2.1 Pictures of the surface of FPA detector after substrate removal

最后得到的衬底减薄后的焦平面探测器的表面形貌如图 5.2.1 所示。可以清晰的分辨出光敏芯片的光敏元、N 电极以及缺陷。

5.3 可见拓展的 InGaAs 焦平面探测器

在对 F58 材料制备的 512×128 元面阵焦平面探测器 F58-2 进行衬底减薄后，封装在测试管壳中，对其光电性能进行测试。测试条件同衬底减薄之前相同。在 3ms 积分时间下探测器有效信号和噪声的分布如图 5.3.1 所示。信号的分布不均匀，左侧的信号相对较大，右侧的信号相对较小，其分布规律同减薄之前一致，但是信号整体增大。噪声的分布较为均匀，其分布规律同减薄之前一致，在左下角和右下角均出现一个区域，其内各元的噪声相对较大。探测器的盲元率为 12.1%，响应不均匀性为 24%。相对于减薄前，盲元增多，其中死像元的比例由减薄前的 6.5% 增大到减薄后的 9.0%，而过热像元则由 2.0% 增大到 3.1%。由于衬底减薄的工艺对器件造成损伤，减薄后表面较难清洗，因此表面的沾污也会产生盲元，机械抛光和湿法腐蚀对表面的应力分布不均匀则会提高探测器的响应不均匀性。

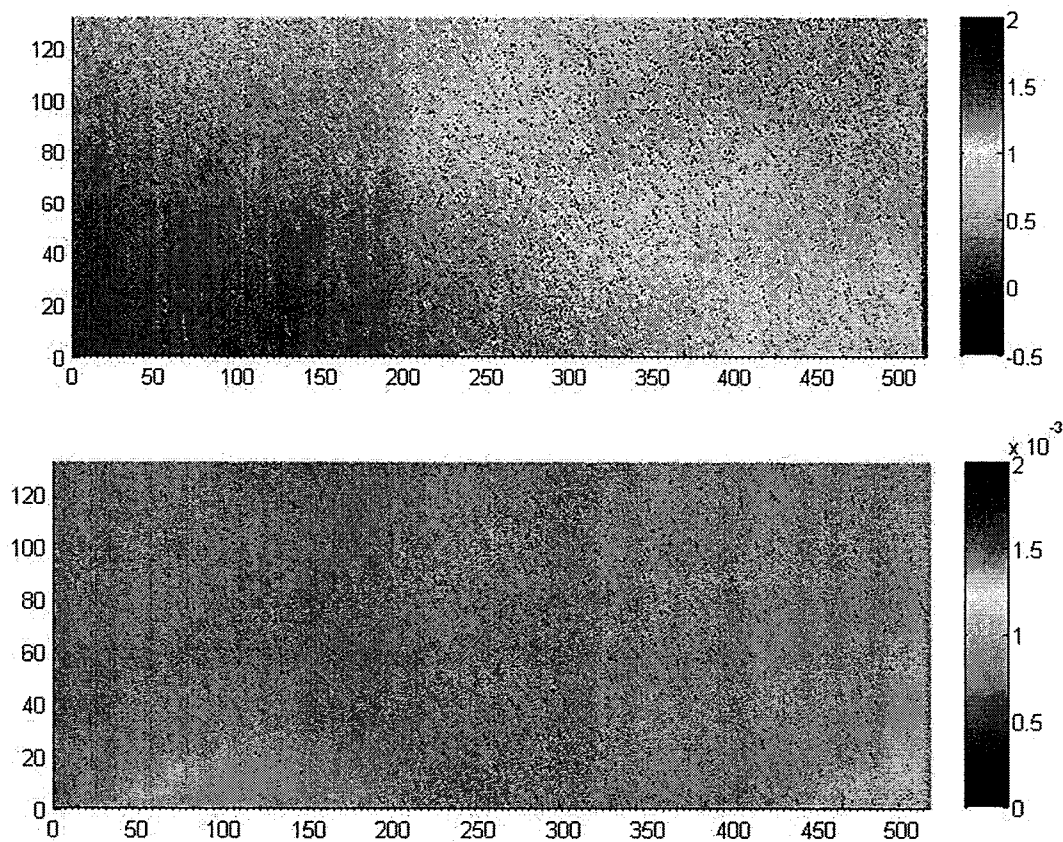


图 5.3.1 衬底减薄后积分时间为 3ms 时探测器的信号（上）和噪声（下）的分布图

Fig.5.3.1 Distribution of signal (top) and noise (bottom) of FPA detector after substrate

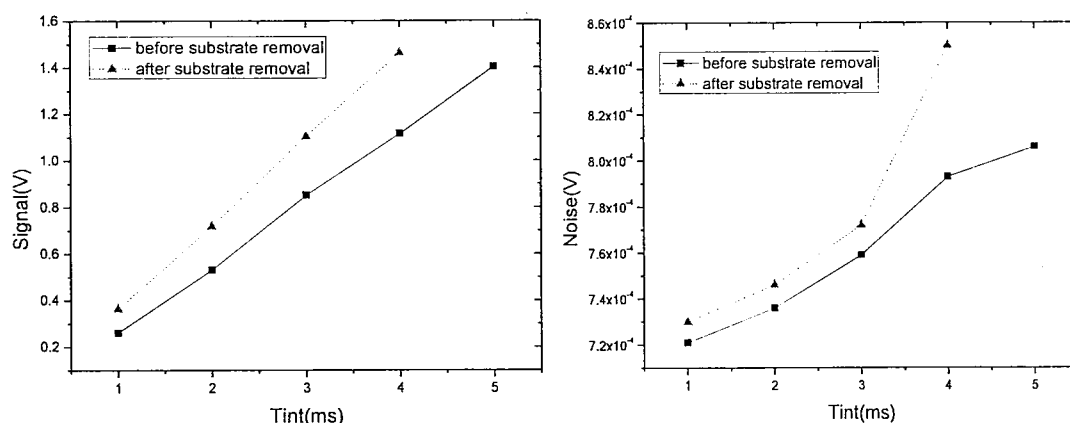
removal at room temperature ($T_{\text{int}}=3\text{ms}$)


图 5.3.2 衬底减薄后焦平面探测器的信号和噪声随积分时间的变化

 Fig.5.3.2 Effective signal and noise of FPA detector versus T_{int} after substrate removal at room temperature

焦平面探测器的平均信号和噪声随积分时间的变化如图 5.3.2 所示。可以看到，信号随积分时间的增大呈线性增大，在积分时间为 5ms 时信号达到饱和。噪声也随积分时间的增大而增大。从衬底减薄前后的对比可以看到，探测器的信号和噪声均比减薄前大。由于 InP 衬底以及 InGaAs 腐蚀阻挡层的去处，减小了对入射光的无效吸收，探测器的响应增大。

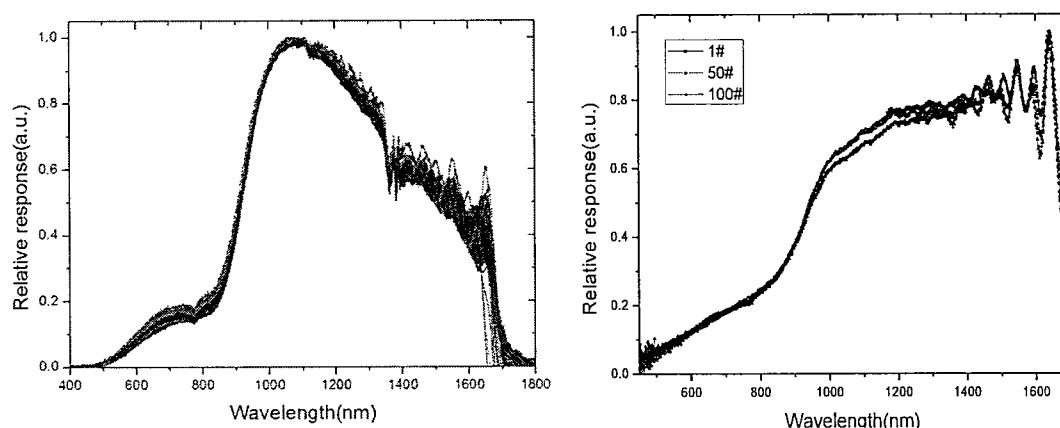


图 5.3.3 衬底减薄后校正前（128 元）和校正后（3 元）的归一化响应光谱

Fig.5.3.3 Normalized response spectrum of detector before substrate removal at room temperature

使用单色仪系统测量得到的归一化响应光谱如图 5.3.3 所示，测试时仍然选择与减薄前相同的 128 元，并且其中剔除的盲元与减薄之前相同，仍然为 41#、54#、56#、71#、84#、93#等六元。可以看到，各元的光谱基本一致。选择其中的三元 1#、50#和 100#进行校正，校正后得到的相对响应光谱如图 5.3.3 右所示。

衬底减薄后,探测器的响应波段延伸到了 $0.5\mu\text{m}$, 峰值波长为 $1.64\mu\text{m}$,而长波长方向的截止波长则没有变化,计算得到探测器的 G 因子为 89.7。因此得到焦平面探测器的峰值响应率和峰值探测率分别为 0.70A/W 、 $1.48\times 10^{12}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。峰值响应率较衬底减薄之前增大 25%,这是由于衬底减薄过程中去除 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 腐蚀阻挡层的缘故。

5.4 本章小结

本章首先介绍了焦平面探测器的性能参数和测试方法。使用 InP 缓冲层厚度为 $0.2\mu\text{m}$ 的外延材料成功制备了 512×128 元 InGaAs 面阵焦平面探测器,光敏元大小为 $23\mu\text{m}$,中心距为 $30\mu\text{m}$,并对其光电性能进行了测试,盲元率和响应不均匀性都较高,信号和噪声随积分时间的增大基本呈线性增大,探测器的峰值响应率和峰值探测率分别为 0.56A/W 、 $1.20\times 10^{12}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。然后使用机械抛光和化学湿法腐蚀相结合的方法对焦平面探测器实现了衬底减薄。减薄后的探测器响应波段为 $0.5\text{-}1.7\mu\text{m}$,信号及噪声相对于减薄前都有所增大,同时盲元率和不均匀性也进一步增大,探测器的峰值响应率和峰值探测率分别增大为 0.70A/W 、 $1.48\times 10^{12}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

6 全文总结和展望

6.1 全文总结

短波红外 InGaAs 探测器以其在相对较高温下仍有较好的性能、迁移率高、可靠性好等特点,在系统小型化、低成本等方面具有较大的优势,被广泛应用于空间遥感、天文观测以及光谱成像等领域,而通过可见拓展可以进一步加强其在军事和商业特别是微光夜视等方面的应用。本文在已有的 InGaAs 面阵探测器制备工艺基础上,对 InGaAs 探测器光谱响应向可见拓展的工艺技术和器件物理进行了深入的研究。研究了 InP 衬底的化学机械抛光和化学湿法腐蚀的工艺方法,获得了低损伤的衬底减薄工艺参数;使用不同的材料制备了 32×32 面阵探测器,研究了衬底减薄对面阵探测器性能特别是响应光谱的影响;研究了单层增透膜以及双层增透膜对衬底减薄后器件量子效率以及暗电流的影响;采用器件物理模型,分析了材料参数对器件量子效率的影响;最后实现了可见拓展的 512×128 面阵焦平面探测器。所取得的主要研究成果如下:

1. InP 衬底减薄工艺研究

研究了 InP 衬底的化学机械抛光工艺,改进了机械抛光的工艺参数,研究了 InP/InGaAs 的选择性湿法腐蚀,通过 SEM、AFM 等手段对比分析了 InP 衬底在不同腐蚀液配比和条件下的化学湿法腐蚀,最终选择作为 InP 的选择性湿法腐蚀条件为盐酸溶液:磷酸溶液体积比为 3:1,腐蚀温度为 25°C ,选择性湿法腐蚀 InGaAs 的腐蚀液为酒石酸溶液(重量比酒石酸: H_2O =1:1): H_2O_2 体积比为 5:1,腐蚀温度为 35°C ,获得了较为平整的表面。

2. 面阵探测器的衬底减薄研究

1) 分别使用了 InAlAs 缓冲层厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 和 InP 缓冲层厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 及 $0.2\mu\text{m}$ 的外延材料制备了 32×32 平面型 InGaAs 面阵探测器。

2) 将衬底减薄的方法用于制备的探测器。结果表明,使用机械抛光和湿法腐蚀相结合的方法可以实现 InP 衬底的低损伤去除,使 InGaAs 探测器的响应波段向可见方向延伸,器件的暗电流在衬底减薄前后基本保持不变。使用 InP 缓冲层为 $0.2\mu\text{m}$ 的材料制备器件进行衬底减薄后,响应波段为 $0.5\text{--}1.7\mu\text{m}$,在波长为 500nm ,量子效率达到约 16%,在波长为 850nm ,器件的量子效率约为 54%,在 1550nm 的量子效率约为 91%。

3.衬底减薄后的表面处理

1) 采用 ICPCVD highrate 工艺生长 SiN_x 薄膜作为增透膜, 结果表明, 单层增透膜只对部分波段的光响应有增强作用, 在其他波段影响不大, 器件的暗电流在增透膜生长前后基本不变。

2) 采用软件模拟设计了 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ 双层增透膜, 并使用 ICPCVD 工艺生长, 结果表明, 器件在可见波段和近红外波段的量子效率都得到了提高, 双层增透膜的增透效果好于单层增透膜。

4.InGaAs 探测器量子效率模拟

1) 采用器件物理模型, 对背照射的 InGaAs 平面型器件的量子效率进行了理论模拟。重点分析了吸收层厚度对探测器量子效率的影响, 对比了吸收层厚度分别为 $1.5\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ 的 InGaAs 平面型器件的光谱响应, 理论结果与实验结果较为一致, 随着吸收层厚度的增加, 器件的量子效率先迅速增大, 然后基本保持不变。

2) 对衬底减薄后的 InGaAs 探测器的量子效率进行了模拟, 当 InP 缓冲层为 $0.2\mu\text{m}$ 时, 探测器响应光谱的实验值与理论值较为吻合。分析了缓冲层厚度、吸收层厚度以及掺杂浓度对探测器在可见波段和近红外波段的量子效率的影响, 结果表明缓冲层 InP 的厚度对探测器在可见波段量子效率影响最为显著, 随着缓冲层厚度的增加, 探测器在可见波段的量子效率急剧下降。减小缓冲层厚度是提高 InGaAs 探测器可见波段量子效率的一个有效途径。

5.可见拓展的 InGaAs 焦平面探测器

1) 使用 InP 缓冲层厚度为 $0.2\mu\text{m}$ 的外延材料成功制备了 512×128 元 InGaAs 面阵焦平面探测器, 并对其光电性能进行了测试, 信号和噪声随积分时间的增大而增大, 探测器的峰值响应率和峰值探测率分别为 0.56A/W 和 $1.20 \times 10^{12}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

2) 将衬底减薄的方法应用于 512×128 元 InGaAs 面阵焦平面探测器, 衬底减薄后的探测器响应波段为 $0.5\text{-}1.7\mu\text{m}$, 信号及噪声相对于减薄前都有所增大, 同时盲元率和不均匀性也进一步增加, 探测器的峰值响应率和峰值探测率分别增大为 0.70A/W 、 $1.48 \times 10^{12}\text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。

6.2 展望

虽然本论文工作取得了一定的研究结果，研究了可见拓展的 InGaAs 短波红外探测器，但仍然有大量的问题需要解决，需要继续开展大量的研究工作。

1. 进一步优化衬底减薄工艺

虽然通过机械抛光和湿法腐蚀相结合的方法可以实现 InP 衬底的低损伤去除，但是工艺过程中电极板和读出电路上的电极会受到损伤，从而影响减薄后的电学连接，并且减薄后光敏芯片表面极易出现沾污且较难清洗，因此需要进一步改善减薄过程中对电极的保护以及减薄后的清洗工艺，以得到较高的成品率和减小表面的沾污。

2. 增透膜的表面界面状态和优化

在衬底减薄后通过生长增透膜以改善器件的光响应，增透膜生长后器件的光谱得到了改善，但是对生长的 SiN_x 薄膜的特性以及其与芯片之间的界面状态没有进行深入研究，在生长 $\text{SiN}_x/\text{SiO}_x$ 双层增透膜后也需要对其界面状态进行研究。

3. 焦平面探测器的衬底减薄工艺优化以及可靠性研究

在对大面阵焦平面探测器进行可见拓展后，虽然其光响应得到改善，但是盲元率和不均匀性都有所升高，探测器的噪声也增大，需要对其中的机理进行研究。并且衬底减薄后，焦平面探测器的稳定性和可靠性未进行验证，因此，需要研究衬底减薄工艺的可靠性问题，以实现工程应用。

4. 量子效率模拟的进一步完善

本文采用器件物理模型对 InGaAs 探测器的量子效率进行了模拟，虽然部分结果与实验值较为吻合，但是两者之间仍然存在较多的差异，需要进一步对模型进行优化。另外，模拟过程中所涉及的材料参数大量采用了文献中的数据，与实际使用的材料存在一定的差异，可以通过实验进行测量，包括 InP、InGaAs 的吸收系数，载流子的扩散长度等，使模拟与实际情况更为接近。