

密级: _____



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

台面型 InGaAs 短波红外面阵探测器研究

作者姓名: _____ **魏 鹏** _____

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** _____

培养单位: _____ **中国科学院上海技术物理研究所** _____

2013 年 5 月

Study on mesa type SWIR InGaAs detector arrays

By
Wei Peng

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, 2013

致谢

光阴荏苒，犹如白驹过隙，转眼之间五年的研究生学习生涯就要过去了。回首过往岁月，有欢乐，有忧愁，有过成功的喜悦，也有过失败的沮丧，有太多的人和事值得记忆。谨借此机会向过去几年里帮助过、鼓励过我的所有人表达无限的感激之情，并致以最诚挚的谢意。

首先我要感谢我的导师龚海梅研究员对我的教诲和鼓励，龚老师务实严谨的工作态度，从容豁达的生活作风，不仅使我懂得了如何学习，而且也让我明白了很多做人的道理，将深刻的影响着我今后的工作和生活。同时我也要衷心感谢我的二导李雪研究员，当我在科研上遇到困难时，是李老师在背后给了我极大的支持和教导，在生活上李老师更像是朋友般的关怀，使我深深的感动，在此我深深地感谢李老师对我的帮助和鼓励。

感谢方家熊院士、李言谨老师，微系统所的张永刚老师对我的支持和帮助。他们严谨的治学态度、渊博的学识，都一直感染和激励着我在科研的道路上前行。在这些年的学习过程中，感谢实验室多年来给予我帮助各位老师和师兄师姐：邵秀梅、刘大福、范广宇、张海燕、洪斯敏、汪洋、陈郁、邓双燕、徐勤飞、曾智江、朱龙源、叶丽萍、贾嘉、许金通、王妮丽、刘诗嘉、乔辉、刘向阳、赵水平、兰添翼、储开慧、汤亦聃、蔡子健、马伟平、朱建妹、王建新、廖清君、施永明、张在实等。

感谢与我一起生活和学习的同学和朋友们：唐恒敬、张可锋、李永富、李淘、张伟、黄张成、黄松垒、李超、朱耀明、曹岚、邓洪海、许中华、马学亮、夏王、杨波、仇光寅、夏辉、刘福浩、周炜、叶柏松、刘飞、张立瑶、朱宪亮、王云姬、石铭、黄星、曹高奇、王瑞、徐鹏霄、徐斌等等。特别感谢杨波师弟对本论文进行的校正工作。

感谢研究生部的诸位老师在学习、生活上给予的关心和帮助。

最后，我要深深感谢我的父母和姐姐，感谢他们对我莫大的支持和无私的爱，大爱无言，祝他们永远健康快乐。

谨以此文献给所有关心和帮助我的家人和朋友。

魏鹏

2013年5月15日于上海

摘要

短波红外探测在空间遥感应用中有着重要的作用, InGaAs 探测器能够较好的满足该波段的探测, 尤其通过增加 In 组分能使探测器的波段延伸从而能够满足更多的需求。本论文为进一步提高短波红外 InGaAs 焦平面探测器性能, 发展面阵焦平面探测器, 对晶格匹配及波长延伸 InGaAs 探测器的制备工艺技术和器件物理进行了深入的研究。优化了 p 电极的接触特性, 并成功解决了宽禁带 InAlAs 帽层的欧姆接触问题; 研究了 ICPCVD 低温生长钝化膜对器件性能的影响; 建立物理模型, 分析了材料参数及结构对器件量子效率的影响; 制备了高 In 组分 32×32、64×64 面阵焦平面探测器, 研究了不同 In 组分及不同工艺对器件性能的影响, 获得了改进工艺, 极大地提高了探测器的性能。本论文的主要结果如下:

对器件 p-InP 电极的欧姆接触进行了研究。通过对比实验发现, 经过 450℃、4min 退火后, p^+ -InP 与 Ti/Pt/Au 接触电极的比接触电阻降低到 $7.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 而且电极形貌较平整; 对 p-InAlAs 的金-半接触进行了研究, 通过优化金属膜系, 采用浅扩散技术 (扩散条件: 530℃&4min) 进行二次掺杂, 经过 450℃、60s 退火后, 实现了 Ti/Pt/Au 在 p^+ -In_{0.52}Al_{0.48}As 上的低阻欧姆接触, 其比接触电阻为 $8.88 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$; 采用 4 种不同的帽层材料制备了 10×1 器件, 测试并分析了探测器的光电性能。结果表明, 采用 p-InAlAs 帽层并进行二次掺杂的材料制备的器件具有较低的暗电流 (-0.01V 偏压下暗电流密度为 116nA/cm²) 以及较高的量子效率。

在高 In 组分 InGaAs 器件的钝化方面, 采用了 ICP-CVD 低温生长 SiN_x 膜钝化技术, 对比 PECVD 生长的 SiN_x 钝化膜, 其钝化效果得到了明显改善, 并通过改进器件工艺, 采用先生长 p 电极、退火再钝化的方法, 使 ICPCVD lowrate SiN_x 薄膜的钝化效果达到了较好的状态, 其暗电流下降了约 2-3 个数量级, 测试结构器件在 -0.01V、210K 下的暗电流密度约为 40nA/cm², 而且暗电流密度在不同的温度下基本不随 P/A 而变化, 侧面漏电得到较好的抑制。

采用高温处理加湿法修复, 降低刻蚀过程对表面造成的应力损伤及残留物, 探测器暗电流 (@-0.1V) 约降低 30%左右。采用双台面结构制备的器件, 有利于钝化膜在台面侧面有较好的覆盖, 从而减小侧面的漏电, 而且也可能抑制界面

处的漏电，使器件暗电流降低。

通过建立物理模型，对 P-on-N 结构器件的量子效率进行了理论模拟，分析了吸收层掺杂浓度、吸收层厚度、界面复合速率以及材料对光的吸收系数等对器件量子效率的影响，随着掺杂浓度的增大，由于少子寿命的减小及迁移率的降低等，导致扩散长度减小，非空间电荷区内的复合几率增大，因此量子效率峰值降低，而且峰值处对应的吸收层厚度 d 也减小。另外随着吸收系数的增大，相同掺杂浓度的器件量子效率峰值增大，光进入吸收层后很快被吸收，因此峰值处对应的 d 也减小。随着界面复合速率的增加，器件的量子效率急剧下降。而且复合速率越大，量子效率到达峰值之后随着 d 的增大下降的很快。而且对量子效率随波长的变化也进行了分析，为提高器件量子效率提供了一定的理论参考。

研究了台面型延伸波长 InGaAs 面阵探测器的性能。对 In 组分为 0.8 的 32×32 面阵 InGaAs 焦平面探测器光敏芯片和焦平面特性进行了测试分析。对芯片的 I-V 及其零偏电阻 R_0 随温度的变化关系进行了理论拟合，并与实验数据较吻合，表明在零偏或反偏压较小时，器件的暗电流主要受扩散电流、产生复合电流和欧姆漏电流的限制。另外通过适当降低工作温度和延长积分时间，可以有效地改善焦平面的性能。通过变积分电容的测试结果，得到了积分电容的寄生电容约为 10fF，通过设计电路参数减小寄生电容的影响，可以改善组件的性能。当 In 组分到达 0.83 时，采用常规工艺制备的 64×64 InGaAs 焦平面探测器性能较差，器件隧穿电流及欧姆电流大、信号较小、探测率较低；而采用改进工艺并用 ICPCVD lowrate 低温生长的 SiN_x 钝化膜，器件性能得到明显改善，220K 时暗电流密度为 $1.89\text{E-}6 \text{ A/cm}^2(-10\text{mV})$ 、值因子 R_0A 为 $4.43 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、峰值探测率为 $5.68\text{E}11 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。最后采用改进工艺制备了 512×256 InGaAs 面阵探测器，并对其焦平面特性进行了初步测试。

关键词：短波红外；延伸波长；InGaAs；欧姆接触；低温钝化；量子效率

Abstract

Short-wave infrared detection plays an important role in the space remote sensing applications, InGaAs detector can meet the detection of the band, in particular, the detection band can be extended by increasing the In composition, so as to meet the demand for more applications. To further improve the SWIR InGaAs photodiodes performance and the development of focal plane arrays (FPAs), process technology and device physics of lattice-matched and wavelength-extended InGaAs detectors were studied in this dissertation. The characteristics of the p-electrode contact was optimized, and ICPCVD low-temperature growth passive film on the device performance is studied for the first time. The relationship between material parameters, structure and the quantum efficiency of the device was studied; 32×32 , 64×64 FPAs of high In composition were fabricated and their performances were investigated in detail. The main results in this dissertation could be summarized as follows.

Ohmic contact on the device of the p-InP was studied. The specific contact resistance of the Ti/Pt/Au/p⁺-InP can be reduced to $7.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ after 450°C & 4min annealing; Contacts property of Ti/Pt/Au on p-In_{0.52}Al_{0.48}As layer of the sample which is Zn-diffused at 530°C for 4min was investigated, the sample was annealed at 450°C for 60s and low resistance ohmic contacts ($\rho_c = 8.88 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$) were achieved; 10×1 detectors with four different cap layer material were fabricated, the electric and optical properties of the detectors were tested and analyzed. The results showed that the detector with p-InAlAs cap layer and a secondary doping has the lowest dark current (dark current density is 116 nA/cm^2 at -0.01 V) the highest quantum efficiency.

The surface effects, low-temperature-deposited SiN_x passivation of In_{0.83}Ga_{0.17}As photodiodes have been investigated. In contrast to SiN_x passivation(330°C) formed by PECVD(Plasma enhanced chemical vapor deposition), the low-temperature-deposited SiN_x passivation(75°C) formed by ICPCVD(Inductively coupled plasma chemical vapor deposition) for In_{0.83}Ga_{0.17}As photodiodes have resulted in reductions of dark current as large as 2-3 orders of magnitude. The dark current density of the tested detector is about 40 nA/cm^2 at -0.01 V and 210 K . It was also found that the annealing treatment leads to some degradation to the effect of low-temperature-deposited SiN_x passivation with lowrate. The photodiodes with lowrate-deposited SiN_x passivations do not show the dependence on the perimeter-to-area (P/A) of the junction and the sidewall leakage current is well suppressed.

Heat treatment and wet etching can reduce damage caused by the etching process on the surface and the residue. The detector dark current (@ -0.1 V) reduces approximately 30%. The double mesa structure is conducive to good coverage of the passivation film on the mesa side, thus reducing side leakage current, and also is possible to suppress leakage current at the interface, so that the dark current of the device is reduced.

The quantum efficiency of photodiode with P-on-N structure was theoretically simulated. The relationships between the doping concentration of the absorbing layer, the thickness of the absorbing layer, the interface recombination velocity, the

absorption coefficient and the quantum efficiency of the device were analyzed. With the increase of the doping concentration, the peak quantum efficiency is reduced and the thickness of the absorbing layer corresponding to the peak is also reduced, due to the decrease of the minority carrier lifetime and mobility. In addition, with the increase of the absorption coefficient, the peak quantum efficiency of the photodiode with the same doping concentration increases. Light into the absorbing layer is quickly absorbed, and therefore the thickness of the absorbing layer corresponding to the peak is also reduced. With the increase of the interface recombination velocity, the quantum efficiency of the device is sharply reduced. This dissertation provides a theoretical evidence to improve the quantum efficiency of the device.

The performance of extended-wavelength mesa type InGaAs array detector was studied. 32×32 element mesa-type back-illuminated InGaAs detector arrays were fabricated on the MBE- grown $\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}/\text{InGaAs}$ epitaxial materials by ICP etching. The characteristics of I-V curves, signal and noise were measured and analyzed. By fitting with experimental data, R_0A and I-V at different temperature were calculated theoretically, mechanism of dark current was analyzed and some reasonable methods of reducing dark current were shown. The detector arrays were In-bonded to 32×32 element readout integrated circuits (ROICs) and the photoelectrical characteristics of the FPAs was measured. The results of the tested structure with different integrate capacitance indicated that the parasitical capacitance of intergration capacitance is about 10fF. 64×64 $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ detector arrays were fabricated using the same process, the performance of the device is poor, the tunneling current and ohmic current is large, the response signal and D^* are smaller; while the device fabricated using improved process technology, the performance of the device is improved, the dark current density of $1.89\text{E-}6\text{A}/\text{cm}^2$ (-10mV, 220K), R_0A is $4.43\text{ K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ (220K), D^* was $5.68\text{E}11\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$. 512×256 $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ detector arrays were fabricated using improved process technology, and the photoelectrical characteristics of the FPAs was measured.

Keywords: SWIR; extended wavelength; InGaAs; ohmic contact; low-temperature passivation; quantum efficiency

目录

致谢.....	I
摘要.....	III
Abstract.....	V
目录.....	VII
第一章 引言.....	1
1.1 红外辐射及其应用	1
1.2 红外探测器及其发展趋势.....	3
1.3 InGaAs探测器	5
1.4 InGaAs焦平面探测器研究现状	9
1.4.1 InGaAs探测器的研究热点.....	9
1.4.2 InGaAs焦平面探测器发展现状.....	14
1.5 InGaAs焦平面探测器研究现状	20
1.6 本论文的研究目的和主要内容.....	21
第二章 晶格匹配台面InGaAs探测器性能优化.....	22
2.1 欧姆接触形成的方法及其原理.....	22
2.2 p-InP帽层的金-半接触研究	24
2.2.1 实验	24
2.2.2 实验结果与讨论	25
2.2.2.1 Ti/Pt/Au/p-InP的电学特性	25
2.2.2.2 接触电极的表面形貌.....	26
2.2.2.3 AES深度剖面分析	28
2.3 p-InAlAs帽层的金-半接触研究.....	29
2.3.1 实验	29
2.3.2 实验结果与讨论	30
2.3.2.1 Ni/Pt/Au/p-InAlAs（未二次掺杂）电学特性.....	30
2.3.2.2 Ni/Pt/Au/p-InAlAs（二次掺杂）电学特性.....	31
2.3.2.3 Ti/Pt/Au/p-InAlAs（二次掺杂）电学特性	32
2.4 不同帽层材料的器件验证.....	33
2.4.1 I-V特性	35
2.4.2 光谱特性	39
2.4.3 峰值量子效率	40
2.4.4 串联电阻对光电流影响的分析	41
2.5 本章小结	42

第三章 台面型延伸波长InGaAs探测器关键技术研究.....	43
3.1 器件钝化机理及其方法	43
3.2 ICPCVD的原理及优势.....	46
3.3 不同方法生长的SiNx膜元素分析	47
3.4 不同钝化膜及工艺的测试结构器件性能研究.....	49
3.4.1 器件制备	49
3.4.2 I-V特性	51
3.4.3 暗电流密度随P/A的关系	53
3.4.4 不同温度下的激活能	56
3.4.5 缺陷能级	57
3.4.6 ICPCVD highrate SiN膜在两种不同工艺下的钝化效果对比.....	58
3.5 台面成型损伤修复及双台面结构的初步研究.....	59
3.5.1 台面成型损伤修复的初步研究.....	59
3.5.2 双台面器件的初步研究.....	61
3.6 本章小结	63
第四章 延伸波长InGaAs探测器量子效率初步理论研究.....	64
4.1 量子效率计算模型	64
4.2 材料参数	66
4.3 材料参数与延伸波长InGaAs探测器量子效率的关系	71
4.4 延伸波长InGaAs探测器量子效率随波长的变化	74
4.5 本章小结	77
第五章 台面型延伸波长InGaAs面阵探测器研究.....	78
5.1 台面型波长延伸至 2.4 μ m 32 $\times$ 32 InGaAs面阵探测器研究.....	78
5.1.1 光敏芯片制备	78
5.1.2 芯片特性分析	79
5.1.2.1 R_0 -T关系.....	79
5.1.2.2 器件的I-V特性分析	81
5.1.2.3 光谱特性.....	84
5.1.2.4 信号和噪声的温度特性	85
5.1.3 焦平面特性分析	85
5.2 台面型波长延伸至 2.6 μ m 64 $\times$ 64 InGaAs面阵探测器研究.....	88
5.2.1 芯片制备	88
5.2.2 芯片特性分析	90
5.2.2.1 I-V特性	90
5.2.2.2 光谱特性.....	93
5.2.2.3 信号和噪声的温度特性	94
5.3 台面型波长延伸至 2.6 μ m 512 $\times$ 256 InGaAs面阵探测器初步研制.....	95

5.4 本章小结	97
第六章 全文总结与展望	98
6.1 全文总结	98
6.2 展望	100
参考文献	101
作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果	111

第一章 引言

1.1 红外辐射及其应用

红外辐射是一种电磁波，波长介于微波与可见光之间（ $0.75\mu\text{m}$ - $1000\mu\text{m}$ ），是一种非可见光，又称红外光、红外线。1800年，英国天文学家 William Herschel 在用水银温度计研究太阳光谱的热效应时，发现在可见光谱的红外光之外还有一种不可见的延伸光谱，具有热效应，从而最早发现了红外辐射的存在。在绝对零度（ -273°C ）以上的物体都辐射红外线，红外辐射能量由物体的温度和表面条件决定，不同的物体会发射出不同的红外射线，在常温下物体的自发辐射主要是红外辐射，这也是红外探测技术的基础。根据不同的波长，红外辐射一般被分为5个区域^[1]：近红外波段（NIR） $0.75\text{--}1\mu\text{m}$ ，短波红外波段（SWIR） $1\text{--}3\mu\text{m}$ ，中波红外波段（MWIR） $3\text{--}8\mu\text{m}$ ，长波红外波段（LWIR） $8\text{--}15\mu\text{m}$ ，远红外波段（FIR） $15\text{--}1000\mu\text{m}$ 。

太阳光到达地球表面的辐射能量一半左右属于红外辐射^[2]，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，使辐射能量在传输过程中逐渐衰减。大气的主要气体有 N_2 、 O_2 、 H_2 、 Ar 等，共约占总体积的 99.9% 左右，红外辐射不会引起这些分子电荷的振荡，因而不吸收 $15\mu\text{m}$ 以下的红外辐射，不会造成红外辐射在传输过程中的衰减^[3]。大气中除 N_2 、 O_2 、 H_2 、 Ar 外，还有其他气体分子、水蒸气、尘埃、固体微粒等，如 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CH_4 、 N_2O 、 CO 等多原子气体分子，在红外线传输过程中会引起分子的电偶极矩变化，导致红外线的吸收和散射，使辐射能在传输过程中逐渐衰减。在实际的大气中除了上述气体分子外，还存在着许多大小为 $10^{-1}\sim 10^{-7}\text{cm}$ 的液态和固态的悬浮物，如灰尘、烟、雾、云、雨、雪等，它们对红外线也有较强烈的散射和吸收，导致红外传输的衰减。水汽分子是红外辐射的主要吸收体，较强的水汽吸收带位于 $0.71\text{--}0.735\mu\text{m}$ ， $0.81\text{--}0.84\mu\text{m}$ ， $0.89\text{--}0.99\mu\text{m}$ ， $1.07\text{--}1.20\mu\text{m}$ ， $1.3\text{--}1.5\mu\text{m}$ ， $1.7\text{--}2.0\mu\text{m}$ ， $2.4\text{--}3.3\mu\text{m}$ ， $4.8\text{--}8.0\mu\text{m}$ ，在 $13.5\text{--}17\mu\text{m}$ 处出现二氧化碳的吸收带。这些吸收带间的空隙形成一些红外窗口，其中最宽的红外窗口在 $8\text{--}13\mu\text{m}$ 处（ $9.5\mu\text{m}$ 附近有臭氧的吸收带）。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^[4]。常见的红外波段大气窗口有： $0.95\text{--}1.05\mu\text{m}$ 、 $1.15\text{--}1.35\mu\text{m}$ 、 $1.5\text{--}1.8\mu\text{m}$ 、 $2.1\text{--}2.4\mu\text{m}$ 、 $3.3\text{--}4.2\mu\text{m}$ 、

4.5~5.1 μm 和 8~13 μm 。有时我们也粗略地认为有 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，一般红外仪器或红外系统的工作波段都在这三个窗口之内。

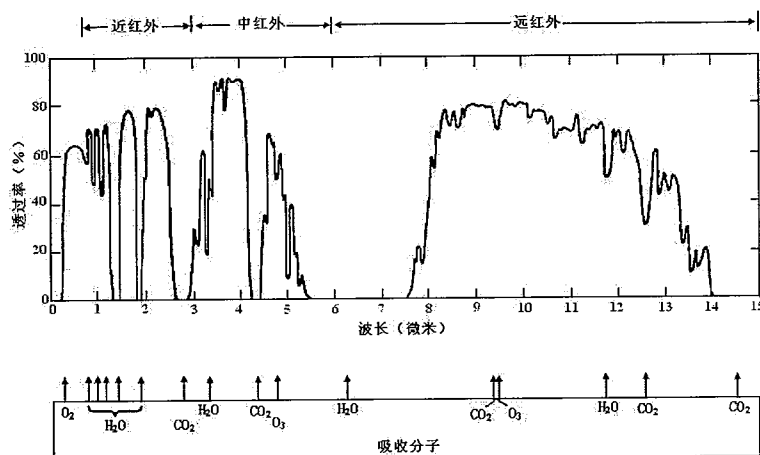


图 1.1.1 海平面大气对红外光的透射

Fig.1.1.1 Atmospheric transmission on sea level

基于红外探测的一些优点，红外辐射有很多应用，如适应性好，环境适应性要优于可见光，尤其是在夜间和恶劣气候环境下；隐蔽性好，红外探测一般多为被动接受目标辐射的信号，比雷达和激光探测安全且保密性强，不易被干扰；识别伪装能力强，可以对目标和背景之间的温差和辐射功率差形成的红外辐射特性进行探测，因此识别伪装目标的能力优于可见光；与雷达系统相比，红外探测系统体积小、重量轻、功耗低，探测器响应光谱范围覆盖短波和长波，应用范围广。在军事上，可用于夜视、侦察、红外制导、红外成像、雷达与测距等方面；在民用方面，也有着广泛的应用，包括工业、农业、医疗卫生以及环境等领域。可用于光纤通信、温度测量、无损探伤、环境监控和污染控制等方面；由于很多物质在该波段具有独特的光谱特性，因此该波段的红外探测器在空间对地探测如了解资源分布、土壤水分监测、大气成分分析、农作物估产等方面有着重要的应用；另外在天文学、医学、生物学、历史学等学科方面也有着重要应用^[5-19]。红外辐射一个有着广阔前景的领域就是遥感领域，在对地观测、环境监测、军事和海洋监控以及天文研究中有着重要应用。红外探测具有很多优势，相比于可见光探测，受白昼和天气影响较小可实现低背景探测，尤其是在短波红外波段(1-3 μm)，可利用反射的太阳辐射获取分辨率较高的遥感图像，且受限于天气情况较小。因此，红外空间遥感技术成为了气象检测无可替代的手段，被广泛应用于气象预测、云

图摄制、气温、大气流动、火灾防护等场合；并且也广泛应用于农业估产、病虫害防治和矿藏分布、地热及火山活动、水文等方面。

1.2 红外探测器及其发展趋势

表 1.2.1 常见红外探测器种类及其特点^[20,21]

Table.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	测辐射热计			电阻温度特性	简单轻便，成本低，光谱范围宽，可室温工作	选择性差 探测率较低 时间常数大 (ms)
	热电偶和热电堆			温差电效应		
	气动探测器			热胀冷缩效应		
	热释电探测器			热释电效应		
	石英共振器			共振频率对温度敏感效应		
光子探测器	光电导探测器、光伏探测器	本征型	IV-VI 化合物材料	光电导效应、光伏效应	禁带宽度窄	机械特性差 介电常数大，结电容大
			II-VI 化合物材料		应用波长范围宽 技术比较成熟	缺陷密度高 成本较高
			III-V 化合物材料		材料性能优良 技术比较成熟	需要合适衬底
		非本征型			成本低，工艺简单，可量产，易于调节响应波长	吸收系数低，需低温工作 量子效率较低
	光电磁探测器			由半导体材料薄片和磁铁组成，入射光子产生的电子空穴对被外加磁场分开	不需致冷，时间常数小（小于 1ns）	探测率较低
	光发射-Schottky 势垒探测器			外光电效应	可用于弱光、微弱光的检测，具有高响应速度，高灵敏度等特点	器件结构复杂
	量子阱红外探测器	I 类		周期性的多量子阱结构，通过结构和掺杂的设计，可以形成特定的子能级，在红外线的作用下，可以发生阱内子能级之间或者子能级到连续态之间的跃迁，激发载流子	材料生长技术成熟 大面积上较好的均匀性 多色探测器	量子效率低 设计和生长较复杂
		II 类			俄歇复合速率低 响应波长容易控制	设计和生长复杂 界面较敏感

红外探测器是一种辐射能转换器，主要用于将接收到的红外辐射能转换为便于测量或观测的电、热能等其它形式的能量，是红外探测技术的核心，也是红外系统的核心。根据能量转换方式，即红外辐射的热效应和光电效应，红外探测器可分为热探测器和光子探测器两大类。热探测器的工作原理是基于入射辐射的热效应引起探测器某一电特性的变化，即利用固体或气体介质对温度敏感的特性，并通过敏感元件的某种电参数与温度的关系，将介质温度的变化转变成容易测量的电信号，以此来探测红外辐射的。热探测器利用的物理效应包括：热阻效应、热伏效应、热气动效应和热释电效应等。常见的热探测器有下面几个类型：热敏电阻、温差电偶和温差电堆、气动探测器、热释电探测器等。热敏电阻是利用辐射热效应而引起电阻变化的现象，温差电偶利用温差电效应，气动探测器利用气体受热膨胀的原理，热释电探测器利用自发极化随温度升降而发生变化。热探测器是非选择性探测器，最大的优点是光谱效应范围较宽且较平坦，可以在非致冷状态下工作。热探测器的时间常数较大，探测率较低，因此不适合于快速、高灵敏度的探测。

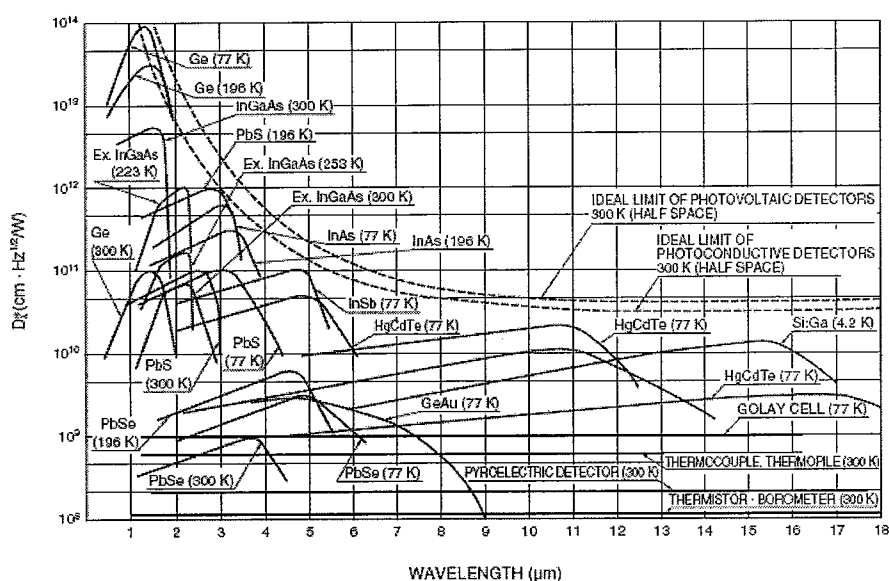


图 1.2.1 各种不同材料红外探测器的探测特性

Fig1.2.1 Detectivity characteristics for IR detectors of various materials

光子探测器是最有用的红外探测器，光子探测器接受红外辐射后，光子把材料的束缚态电子激发成传导电子，引起电信号(引起材料电导变化或产生光生电压)输出，信号大小比例于吸收的光子数。红外光子的能量大小必须能达到足以激发束缚态电子，才能起这种激发作用，所以红外光子探测器的光谱响应有选择

性，只对短于某一特定波长的红外辐射有响应光子，而且不同材料的探测器阈值不同，这个阈值称为长波限。当入射辐射波长大于长波限时，探测器无法响应。因此，光子探测器的光谱响应不及热探测器宽，但光子探测器响应速度快，噪声低，探测率高，灵敏度高。常见光子探测器有以下类型：光电导探测器、光伏探测器、光电磁探测器、光发射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。光子探测器灵敏度与工作温度有关，一般来说，除了在近红外波段的探测外，光子探测器都需要致冷以便进行精确测量。

图 1.2.1^[22]给出了各种不同材料的红外探测器在不同波段的响应及其探测率的分布情况。

从第一种实用的红外探测器（PbS）发展至今，红外成像系统也已经发展到第三代。一个完整的红外成像系统包括：焦平面阵列、光学镜头、读出电路、信号处理系统、制冷器以及显示屏。目前，高性能的第二代、第三代制冷型红外探测器组建普遍采用混成式结构，如图 1.2.1 所示。目前红外焦平面发展方向有以下几个方面：更小尺寸，更轻重量，更低功耗，更高性能和更低成本。相关的研究热点有：提高工作温度；减小象元尺寸；增大像素规格；智能化；多色、高光谱成像。

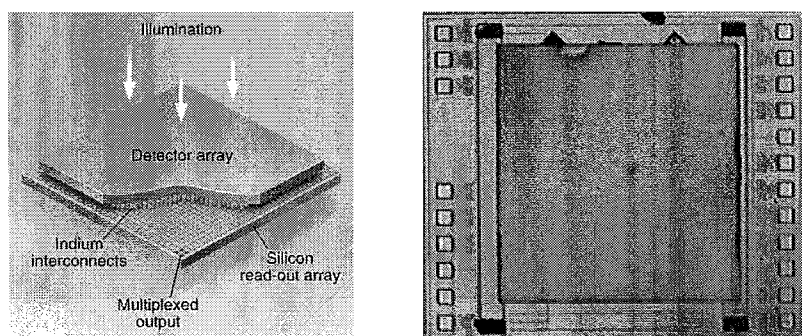


图 1.2.2 焦平面组件的示意图和实物图

Fig.1.2.2 Scheme and module of FPAs

1.3 InGaAs 探测器

由于 $1\sim 3\mu\text{m}$ 短波红外波段包含很多有用的光谱特征信息，因此在遥感、天文观测、大气监测、光谱成像等领域引起了广泛关注。尤其在 $1.7\sim 2.6\mu\text{m}$ 短波红

外波段包含 O-H、C-H、C-O、C=O 和 N-H 等功能键的大量特征吸收^[23], 这些光谱信息占整个 1~3 μm 短波红外波段的一半以上。而且在夜暗环境中存在着少量的自然光, 如月光、星光、大气辉光等, 统统称为夜天光, 又称为夜微光, 大部分能量集中在 1~2 μm 短波红外波段, 特别是在无月亮的夜间, 如图 1.3.1 所示。另外, 一些高温物体如飞机和火箭的发动机喷口、导弹尾焰等的红外辐射能量也集中在该波段内, 因而短波红外波段在微光夜视领域中有着重要的应用。因此短波红外探测及短波红外成像技术在空间对地探测、资源分布、土壤水分监测、大气成分分析、农作物估产, 以及医学成像、工业多光谱成像分析、安全防范、军事监视、红外预警和微光夜视等众多重要的民用和军事领域有着重要的应用。

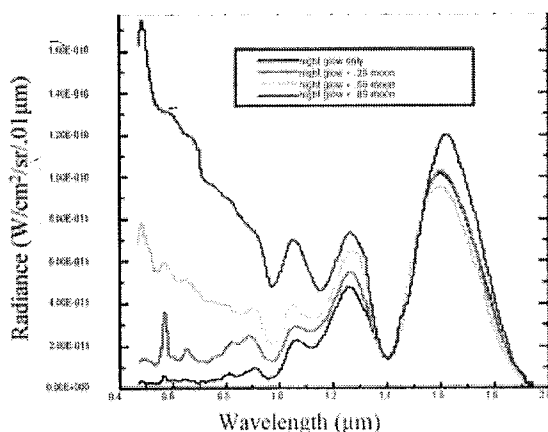


图 1.3.1 夜空光谱辐射亮度曲线

Fig1.3.1 the curve of radiance spectrum in night sky

由图 1.2.1 可以看出, 可用于 1-3 μm 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^[24]。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, 如探测器噪声低、探测率高; 频率响应高; 载流子寿命长; 吸收系数大, 量子效率高; 表面氧化物化学稳定等等^[25]。为了精确控制材料的截止波长, 需要精确的控制 HgCdTe 的组分, 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; 另外 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; 而且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, 因而在短波红外波段的应用上有一定的局限性^[26]。HgCdTe, InAs 与 InSb 制作的探测器都需要低温制冷以抑制热噪声的影响才能达到较高的

探测率，也增加了整个系统装配的复杂性，以及一些难以解决的问题，例如可靠性和寿命等问题，同时也增加整个红外系统的功耗等，在航天遥感等应用方面受到约束。

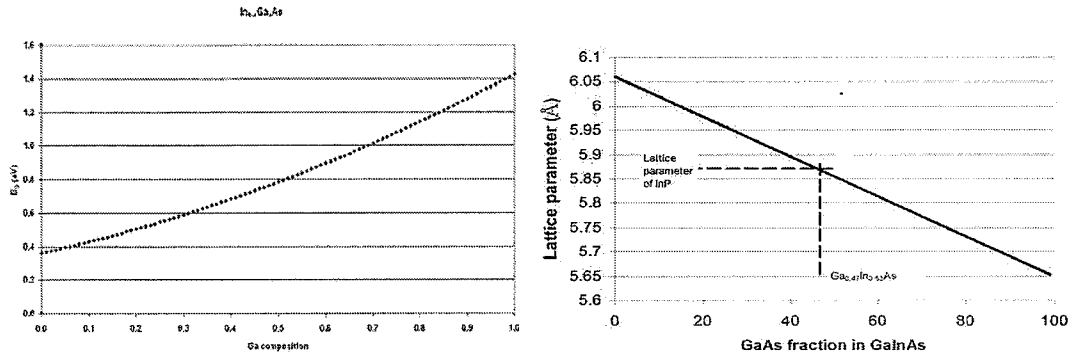


图 1.3.2 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 禁带宽度及晶格常数随组分 x 的变化

Fig1.3.2 Energy gap and Lattice parameter of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ versus gallium composition

三元化合物 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 是 III-V 族的Ⅱ元系半导体材料，是直接带隙材料，具有较高的电子迁移率、良好的稳定性和抗辐照性能^[27]。 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 化合物可以由 InAs 和 GaAs 以任何配比形成，随着组分 x 的变化，其禁带宽度在 0.35-1.43eV 范围内变化，截止波长在 $3.5\mu\text{m}$ 和 $0.87\mu\text{m}$ 之间变化，可覆盖 $1-3\mu\text{m}$ 的短波红外波段^[28]，其晶格常数从 $5.6533\text{\AA}$ (GaAs) 变化至 $6.0583\text{\AA}$ (InAs)，如图 1.3.2 所示。

表 1.3.1 InP、 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 、 $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 和 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 在 300 K 时的材料参数

Table 1.3.1 Basic parameters of InP, $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ and $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ at 300 K

参数	InP	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$	$\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$
晶格结构	闪锌矿	闪锌矿	闪锌矿	闪锌矿
晶格常数(Å)	5.8687	5.8687	5.9895	$6.0583-0.405x$
禁带宽度(eV)	1.344	0.75	0.48	$0.324+0.7x+0.4x^2$
低频介电常数	12.5	13.9	14.63	$15.1-2.87x+0.67x^2$
高频介电常数	9.61	11.6	12.06	$12.3-1.4x$
本征载流子浓度(cm^{-3})	1.3×10^7	8.4×10^{11}	8.2×10^{13}	
电子迁移率($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	≤ 5400	≤ 12000	≤ 1448	$40-80.7x+49.2x^2 \times 10^3$
空穴迁移率($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	≤ 200	≤ 300	≤ 269	
有效导带态密度(cm^{-3})	5.7×10^{17}	2.1×10^{17}	1.26×10^{17}	$2.5 \times 10^{19}[0.023+0.037x+0.003x^2]^{3/2}$
有效价带态密度(cm^{-3})	1.1×10^{19}	7.7×10^{18}	1.10×10^{19}	$2.5 \times 10^{19}[0.41+0.1x]^{3/2}$
电子的有效质量(m_0)	0.08	0.041	0.0294	$0.023+0.037x+0.003x^2$
轻空穴有效质量(m_0)	0.089	0.052	0.0355	$0.026+0.056x$
重空穴有效质量(m_0)	0.6	0.45	0.427	$0.41+0.1x$

表 1.3.1 给出了 InP 和 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 的材料参数， $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 外延材料和 InP

衬底具有相同的晶格常数, 此时禁带宽度为 0.75eV , 与 InP 材料完全晶格匹配 InGaAs 探测器可在室温下工作。增大 In 组分, 可减小禁带宽度, 增大截止波长。高 In 组分的 InGaAs 探测器, 即所谓的波长扩展的 InGaAs 探测器, 其响应波长可以扩展到 $1.7\mu\text{m}\sim 3.0\mu\text{m}$, 相对于工作在同一波段其它类型的探测器, 高 In 组分的 InGaAs 探测器具有可在室温或热电制冷环境下工作、高均匀性、高量子效率和高灵敏度等优点^[29]。另外, 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^[30,31], 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。从上世纪 80 年代开始, 多个国家开展了面向航天遥感应用的 InGaAs 异质结光电探测材料和器件的研究, 目前国际上研究的材料其截止波长已从常规波长的 $1.7\mu\text{m}$ 扩展到 $2.5\mu\text{m}$, 器件已从单元发展到线列及焦平面, 材料和器件性能不断提高, 使得器件的应用范围得到极大的扩展。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^[32], 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^[33-36]。

Epitaxx 是发展延伸波长 InGaAs 的先驱, 在上世纪 80-90 年代, 该公司使用 VPE 技术生长 InAsP 帽层的延伸波长 InGaAs 材料, 制备得到 1024×1 元线列延伸波长探测器, 并应用在了欧洲空间局(ESA)新一代环境卫星 (ENVISAT) 的有效载荷大气分布扫描成像吸收光谱仪 (SCIAMACHY) 中, 光敏元尺寸为 $25\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$, 器件工作在 150K 下, -2mV 下暗电流密度为 $1\text{nA}/\text{cm}^2$ 。这是晶格失配 InGaAs 探测器件首次在卫星遥感上的应用, 目的是根据大气中各种成份的光谱吸收特征测定气体数量, 已在全球温室气体探测方面发挥了很大作用^[34]。Xenics 近几年为 ESA 的 Proba-V、EarthCARE 等卫星提供了 InGaAs 探测器, 其中 EarthCARE 卫星上使用的是 Xenics 的截止波长 $1.7\mu\text{m}$ 、 $\sim 2.3\mu\text{m}$ 探测器^[37]。随着 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中 In 组分的增大, 其响应波长范围向长波方向延伸, 当 In 组分增大到 0.8 时, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料响应截止波长延伸到 $2.4\mu\text{m}$, 波长延伸的 InGaAs 探测器需求前景更为广泛, 如 $1.9\mu\text{m}$ 的农作物水分探测、 $1.9\sim 2.5\mu\text{m}$ 波段资源卫星中高分辨率多光谱成像等。因此发展延伸波长 InGaAs 面阵焦平面探测器对航天遥感应用具有十分重要的意义。

1.4 InGaAs 焦平面探测器研究现状

1.4.1 InGaAs 探测器的研究热点

① 缓冲层技术

为了增大 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器的探测波长, 以满足更多的应用需求, 需要增大 In 的组分。对于高 In 组分 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 探测器而言, 外延材料($\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$)与衬底材料(InP)的晶格将不再匹配, 而且两者之间的晶格失配随 In 含量的增加而增大, 这样就会在外延层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 中引入位错, 形成很多的缺陷, 形成产生-复合中心, 严重影响材料的性能。为了有效地抑制晶格失配对外延材料性能的影响, 从而减小探测器性能的劣化, 需要在衬底与 InGaAs 吸收区之间引入合适的缓冲层结构来释放应力。因此, 衬底-缓冲层材料体系及结构成为了 InGaAs 近红外探测材料研究的核心问题。现在国际上普遍采用的缓冲结构主要有以下三种方案: 1) 选用 In 组分渐变的 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 为缓冲层^[38,39], 2) 选用 In 组分线性变化 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 为缓冲层^[40,41], 3) 选用组分突变的 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 为缓冲层^[42,43]。

美国 EPITAXX 公司的 Olsen 等人利用氢化物气相外延 (Hydride Vapor Phase Epitaxy, HVPE) 方法在 InP 衬底上生长大晶格失配 InGaAs 材料, 通过采用如图 1.4.1 所示的总厚度达 $8\mu\text{m}$ 的梯度递变 InAsP 缓冲层, 相邻两层晶格失配小于 0.13 %, 以减小晶格失配位错, 在缓冲层生长过程中进行高掺杂浓度, 阻止位错进入 InGaAs 吸收层, 将工作波长扩展到 $2.6\mu\text{m}$ ^[44]。

比利时根特大学的 D'Hondt 等人利用金属有机化学气相沉积 (Metalorganic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 方法研究了分别采用 InGaAs 缓冲层和 InAsP 缓冲层以及分别采用组分梯度递变结构和组分线性渐变结构的缓冲层的高 In 组分 InGaAs 材料, 并进行了截止波长为 $2.5\mu\text{m}$ 的器件验证, 发现采用 InAsP 异质结缓冲层的器件性能优于采用 InGaAs 同质结缓冲层的器件, 而缓冲层组分梯度递变和组分线性渐变结构对器件性能影响不大^[45]。他们还仔细研究了材料生长温度和吸收层掺杂浓度对探测器性能的影响。S. P. Ahrenkiel 等人仔细研究了 MOCVD 生长的 InP 基 InAsP 梯度递变缓冲层及 InAsP/InGaAs 异质界面, 发现 InAsP 梯度递变缓冲层可以获得较大的弛豫度和很小的剩余应力, 导致缓冲层中的缺陷只有少部分会传导至 InGaAs 吸收层中, 使得 InGaAs 吸收层的少数寿命达几微秒^[46]。

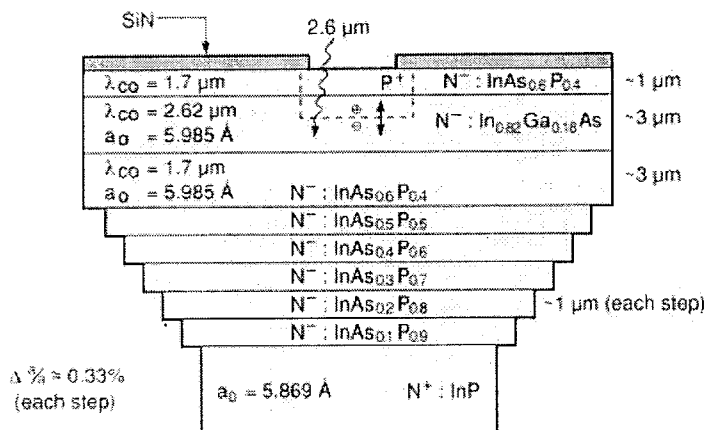

 图 1.4.1.1 InP 衬底的梯度递变 $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ 缓冲层材料结构

 Fig 1.4.1.1 Schematic cross-section of the extended wavelength InGaAs photodiode with $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}$ buffer layer

在国内，中科院上海微系统所张永刚等，对在 InP 衬底上利用 MBE 方法生长高 In 组分 InGaAs 材料进行了详细的研究^[47]，他们尝试选用了 In 组分渐变的 $\text{In}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 作为缓冲层和 In 组分线性变化 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 作为缓冲层两种方案，并得到了具有较高性能的两英寸高 In 组分 InGaAs 外延材料；中科院长春光机所利用两步生长法在 InP 衬底上利用 MOCVD 也成功的制备了具有一定性能的高 In 组分 InGaAs 外延材料。

② 其他衬底器件

当铟含量大于 53% 时，在 InP 衬底上很难外延质量好的 InGaAs，生长的材料缺陷比较多，虽然 GaAs 衬底与高 In 组分的 InGaAs 晶格失配也较大，但 GaAs 衬底便宜，结晶质量通常也高于 InP，且较为坚固，因此，研究以 GaAs 作为衬底的 InGaAs 延伸波长红外探测器具有一定的意义^[48]。室温下 GaAs 的晶格常数为 $5.65325 \text{ \AA}$ ，与 InGaAs 材料的失配更大，因此在 GaAs 衬底上外延高 In 组分的 InGaAs 材料，需要缓冲层释放更多的应变。瑞典 Chalmers 技术大学的研究人员在 GaAs 衬底上以 InAlAs 作为缓冲层利用固态源分子束外延（Solid Source Molecular Beam Epitaxy, SSMBE）方法生长大失配 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料，研究了生长温度、缓冲层厚度等材料表面形貌、电学和光学特性的影响，发现缓冲层厚度在达到一定厚度后，再增加缓冲层厚度将不再能改善性能^[49]。比利时 IMEC 微电子中心的研究人员采用 InAlAs 作为缓冲层在 GaAs 衬底上研制了截止波长为 $2.4 \mu\text{m}$ 的 InGaAs 线列探测器^[50]。另外比利时的 Joachim John 等人^[51]也已经在

GaAs 衬底上生长出 In 含量在 75~80%之间的 InGaAs 外延材料,并制备了探测波段为 1.7~2.5 μm 的 256 元、512 元线列和 320 $\times$ 256 的焦平面短红外探测器。为了克服缓减晶格失配,在 GaAs 衬底上生长宽能带 InAlAs 缓冲层,再生长 InGaAs 的 p-n 结结构,并在顶层生长一层高掺杂的 n^+ 层,生长 TiW/Au 电极,以得到欧姆接触。在无抗反射层的情况下,其 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ 焦平面的探测率为 $5\times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。T.Sasaki 等人对 GaAs 衬底 InGaAs 太阳能电池的载流子复合进行了研究,发现热退火可以有效的增大载流子的寿命,且在此失配体系下得复合主要与线缺陷密度相关^[52]。最近的研究发现,在 GaAs 衬底上生长 InAlAs 缓冲层时,缓冲层中组分变化构型(线性/非线性、单调/非单调等)和掺杂类型及浓度都对外延材料的晶格质量具有很大的影响^[53-55]。

Si 基 InGaAs 探测器可把硅读出电路和 InGaAs 探测器集成在一起,形成单片 InGaAs 焦平面,焦平面的尺寸不需要考虑硅读出电路芯片的热匹配而受到限制,制备与硅 CCD 相似的大规模传感器是可行的。Abhay M. Joshi 等人^[56]把 InGaAs 光电探测器与高密度复杂的 CMOS 读出电路共同集成在硅衬底上,设计并制备出 256 元和 512 元硅基 InGaAs 单片红外探测阵列,可探测短红外波段 1~3 μm 。B. F. Levine^[57]和 Alexandre Pauchard^[58]也报道了 Si 基 InGaAs p-i-n 探测器方面的研究进展。

③ 应变对能带结构的影响

波兰的 Lukasz Gelczuk 等人研究了在晶格失配的 InGaAs/GaAs 异质结中由弹性应变而导致的能带结构的改变,并使用深能级瞬态谱检测了深能级的位置。失配引起的弹性应变可以影响能带结构,并对能带进行调控,从而改善光电器件的性能。然而应变的释放过程则会导致材料质量的退化,并引入深能级称为陷进中心,影响器件的功能。通过检测并控制深能级缺陷有利于改善器件的性能^[59]。

④ 向可见扩展波段 InGaAs 探测器

由于衬底 InP 对光的吸收,晶格匹配的 InGaAs 探测器的探测波段在 0.9-1.7 μm ,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^[60],如图 1.4.1.2 所示,对于正照射的线列探测器,要使其响应波段延伸至可见光,需要将帽层减薄,减少 InP 的吸收作用^[61]。另外还有一种向可见扩展的方法即衬底转移技术^[62],先将 InGaAs/InP 材料贴在双面抛光的宝石片上,采用腐蚀方法完全去除 InP 衬底,再采用台面成型工艺制备芯片,最后

倒装互连，如图 1.4.1.3 所示。可见/短波红外探测器可同时探测两个波段的光谱信息，在军事和民用领域都有重大的应用。Marshall J.Cohen 等人介绍了一种移除衬底的方法，在 InGaAs 吸收层下方插入一层较薄 ($\leq 0.3\mu\text{m}$) 的 InP 接触层，用力学方法去除大部分 InP 衬底，然后用腐蚀液 $\text{HCL}:\text{HPO}_4$ (3: 1) 腐蚀掉剩余的 InP 衬底和 InP 缓冲层，然后用 $25\%\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7:\text{H}_2\text{O}_2$ (5:1) 腐蚀掉 InGaAs 阻挡层，响应波段为 $0.5\mu\text{m} - 1.7\mu\text{m}$ ， $1.5\mu\text{m}$ 的量子效率为 80%， $0.8\mu\text{m}$ 量子效率为 50%， $0.5\mu\text{m}$ 的量子效率为 15%^[63]。Tara Martin 等人通过力学抛光和湿法腐蚀相结合的方法获得了 320×240 的可见/短波红外 InGaAs 探测器阵列^[64]。A. Rouvié 等人得到了 $15\mu\text{m}$ 的 640×512 InGaAs 焦平面阵列，通过化学腐蚀减薄 InP 层，使光谱响应延伸到 $0.4\mu\text{m}$ ^[65]。近年来，国外的很多研究机构都在 InGaAs 可见延伸领域取得了一系列的成果^[66-69]。

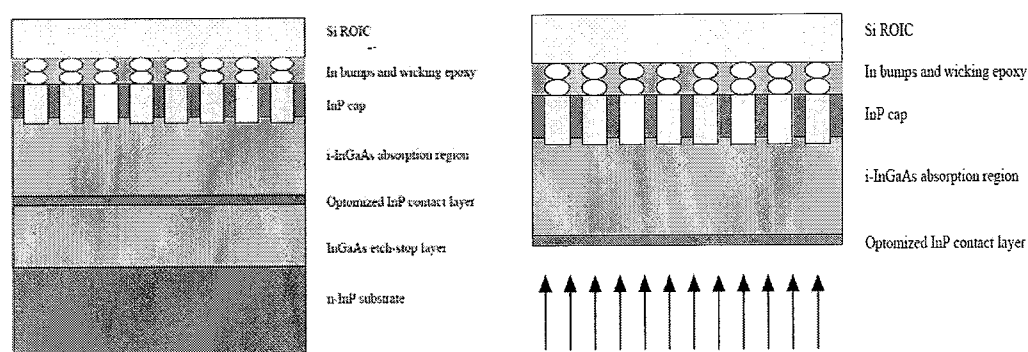


图 1.4.1.2 向短波方向延伸的 InGaAs 结构示意图

Fig1.4.1.2 Schemes of extended short-wavelength InGaAs detectors

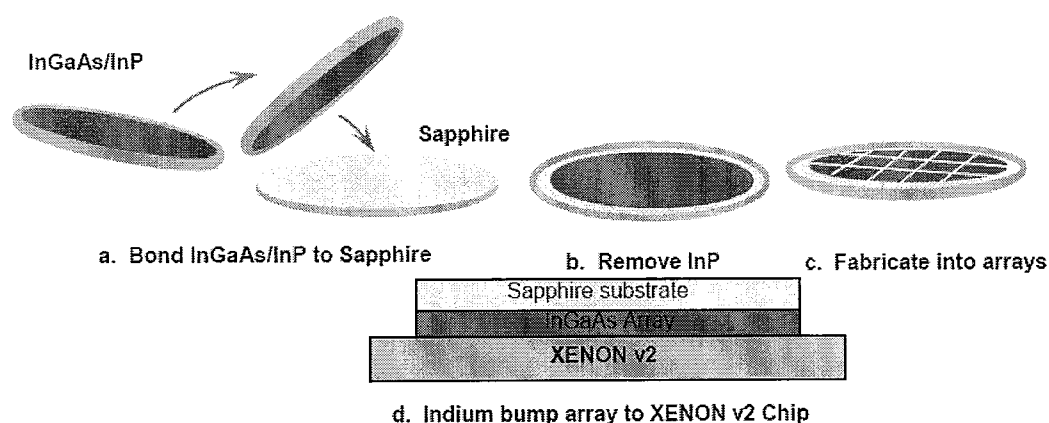


图1.4.1.3 InGaAs焦平面制备的衬底转移技术流程图

Fig.1.4.1.3 Epitaxial transfer of InGaAs to sapphire substrate for VIS-NIR FPAs

⑤ InGaAs 探测器暗电流机制

为使 InGaAs 探测器的截止波长向长波方向拓展 ($\lambda_c > 1.7\mu\text{m}$), 就需要增加 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料中 In 的组分含量使材料的禁带宽度相应减小, 从而使响应波长向

长波方向扩展。当 In 的含量 $x > 0.53$ 时, 外延材料($\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$)与衬底材料(InP)的晶格将不再匹配, 而且两者之间的晶格失配随 In 含量的增加而增大, 这样就会在外延层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 中引入位错, 形成很多的缺陷, 严重影响材料的性能, 即使通过引入缓冲层也不会彻底消除缺陷。因而研究器件暗电流机制, 减少暗电流成为延伸波长 InGaAs 器件的关键问题。

Ruud 等人根据不同电流成分的偏压特性及温度特性, 对器件的暗电流成分进行了分析^[34]。波音实验室的 Joseph Boisvert 等人^[70]对平面 PIN 型 InGaAs 探测器暗电流进行了研究, 如图 1.4.1.4 所示, 他们认为平面型探测器暗电流主要来源于下面这些地方: 缓冲层与有源层的界面处、吸收层内部、吸收层与帽层的界面处、帽层表面与钝化层界面处以及钝化层表面, 这其中暗电流主要受到吸收层与帽层的界面影响。

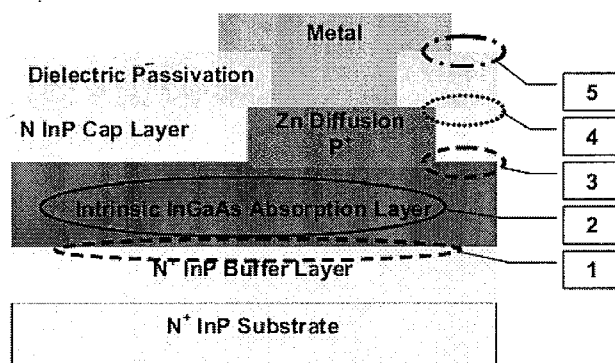


图 1.4.1.4 平面型探测器暗电流来源示意图: 1.吸收层与缓冲层界面; 2.吸收层; 3.帽层与吸收层界面; 4.钝化层与帽层界面; 5.钝化层表面。

Fig1.4.1.4 Schemes of dark current sources in planar detector: 1.absorber and buffer interface; 2.absorption layer; 3.cap and absorber layer interface; 4.cap and passivation interface; 5.surface of passivation layer.

法国 III-V 实验室的 A. Rouvié 等人描述了非制冷的 VGA InGaAs 模块性能, 并对探测器的暗电流机制研究发现, 若材料质量未优化, InGaAs 材料有较高的缺陷/位错密度, 暗电流主要由发生在反偏结耗尽区的 SRH(Shockley Read Hall)电流组成, 与结面积成正比。对于优化的材料质量, SRH 机制可以忽略。在较低的反偏压下 ($< 0.2\text{V}$), 暗电流主要由从 InGaAs 体材料区向耗尽区扩散少数载流子组成, 暗电流与结周长成正比, 在较大的反偏压下 ($> 2\text{V}$), 暗电流由发生在 InGaAs 和 InP 帽层界面的表面 SRH 电流组成, 暗电流与周长成正比。对不同尺寸的探测器暗电流测试显示暗电流与周长相关, 激活能表明低压下的暗电流是扩散机制, 高反偏压下的暗电流机制为 SRH^[71]。

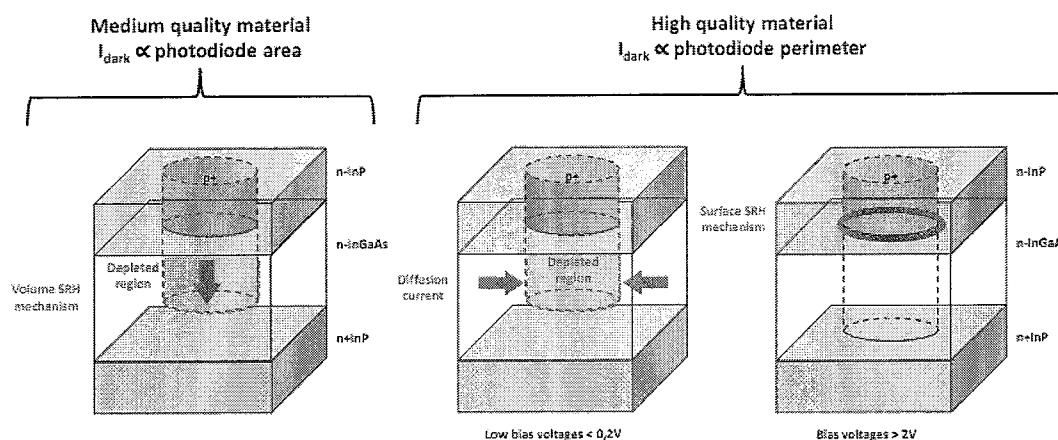


图 1.4.1.5 InGaAs/InP 探测器中暗电流的产生区

Fig 1.4.1.5 Dark current sources in InGaAs/InP detectors

在焦平面暗电流优化方面取得进展的还有 Aerius Photonics 公司，该公司研制的 InGaAs 焦平面探测器主要应用于天文观测。他们主要通过材料结构的优化以及工艺的优化来降低器件的暗电流，材料结构的优化主要集中在 InGaAs 吸收层与 InP 盖帽层及缓冲层的界面特性上，而工艺的优化则主要集中在扩散成结过程以及表面钝化上^[72]。

1.4.2 InGaAs 焦平面探测器发展现状

国外对 InGaAs 红外焦平面探测器的研究起步较早，而且从上世纪 80 年代开始，多个国家就已经开展了其空间遥感应用方面的研究。InGaAs 焦平面探测器已经从单元器件发展到面阵焦平面探测器，且探测波段也由 0.9~1.7 μm 延伸到 0.9~2.6 μm 和 0.4~1.7 μm 等，在军事及民用的众多领域有着重要的应用。国外的许多厂商已经拥有非常成熟的系列产品，如美国 Goodrich(下属的传感无限公司)的 LC 及 LE 系列，Judson 的 J 系列，日本滨松公司的 G 系列，比利时 XenICs 公司的 Xlin 及 Xeva 系列等，另外，美国 Indigo、Aerius Photonics 公司和波音 Spectrolab 公司以及法国的 Thomson 和 Sofradir 公司都有相关产品的报道。国内对于 InGaAs 探测器的研究工作一部分应用于光纤通讯，对于 InGaAs 焦平面探测器的研究，主要有上海技术物理研究所和重庆光电技术研究所。

InGaAs 红外焦平面有以下几个发展方向：增大规模，减小象元面积，提高占空比；提高焦平面性能，减小暗电流、噪声，提高量子效率；扩展探测波长，向可见或红外波段延伸。

晶格匹配 InGaAs 线列焦平面探测器用于空间遥感扫描成像已有多例，如法

国 THOMSON 公司在上世纪 80 年代中期研制了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面, 工作波长为 $1.55\sim 1.70\mu\text{m}$, 室温工作, 是由 10 个 300 元 InGaAs 小线列拼接而成, 并应用在陆地卫星(SPOT4, SPOT5)的高分辨可见红外系统(HRG)和植被仪(Vegetation)中, 主要应用于土壤、植被含水量的监测^[73]。该探测器像元面积为 $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$, 探测率为 $6\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 非均匀性小于 10%, 平均量子效率为 65%, 噪声等效功率为 10^{-13}W 。印度发射的资源卫星 IRS-1C 和 IRC-P6 上 AWiFS 相机的短波红外通道分别采用了 2100 元和 6000 元拼接实现的长线列焦平面, 像元面积为 $13\mu\text{m}\times 13\mu\text{m}$ ^[74,75]。

原 Epitaxx 是发展延伸波长 InGaAs 的先驱, 1991 年该公司的 G.H.Olsen 等人就成功制备了 512×1 元长线列波长延展至 $2.6\mu\text{m}$ 的 $\text{In}_{0.82}\text{Ga}_{0.18}\text{As}$ 探测器焦平面^[76], 使用了利用气相外延 (VPE) 法在 InP 上生长的外延材料, 缓冲层为组分突变的 InAsyP_{1-y} , As 组分在每隔 $1\mu\text{m}$ 突变增加 0.1, 单个像元的为 $30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$, 在 300K、-5V 偏压下探测器的暗电流为 $8\times 10^{-8}\text{A}$, 探测器率达到了 $1\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。由他们研制的 1024 元 InGaAs 线列也被用在了欧洲空间局 (ESA)新一代 ENVISAT 环境卫星上^[33,34], 该卫星于 2002 年 3 月发射, 其核心的部件 SCIAMACHY 光谱仪中, 四个通道分别采用了 1024 元的 InP 基晶格匹配和波长扩展的 InGaAs 线列, 单元尺寸 $25\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$, 器件分别工作在 200K 和 150K 下, 这是波长扩展 InGaAs 探测器阵列首次在卫星遥感上的应用。在 2011 年 3 月日本大地震后, 欧空局提供了 Spot-5 卫星、ENVISAT 卫星以及德国测绘卫星 TerraSAR-X 的观测图片, 如图 1.4.2.1 所示。

另外还有几家公司也在线列焦平面探测器研究方面取得了重大进展。比利时 XenICs 公司成功研制了截止波长分别 $1.7\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ 的 128 元、256 元和 512 元线列焦平面, 光敏元大小为 $50\times 500\mu\text{m}^2$, 分别为 2 级、3 级 TEC 制冷, $2.5\mu\text{m}$ 探测器为台面结构, 其余为平面结构, 最近的新产品有 1024 元以及 2048 元线列 InGaAs 焦平面探测器, 器件响应波段 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$, 光敏元中心距都为 $12.5\mu\text{m}$ ^[77]。日本 Hamamatsu 公司将线列探测器芯片、热电制冷器和 CMOS 读出电路耦合在一起, 器件的响应波段为 $0.9\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$ 或 $0.9\mu\text{m}\sim 2.6\mu\text{m}$, 焦平面探测器规模有 128 元、256 元、512 元和 1024 元^[78], 光敏元大小为 $50\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$ 或 $25\mu\text{m}\times 500\mu\text{m}$, 以及响应波段为 $0.9\mu\text{m}\sim 1.7\mu\text{m}$ 、光敏元大小 $450\mu\text{m}\times 1000\mu\text{m}$ 的 16×1 元大光敏元线列器件。Sensors Unlimited 公司报道了其研制的单片 1024 元混合

线列焦平面探测器^[79], InGaAs 光电二极管与硅基 CMOS 读出器混成, 探测器像元面积为 $20\mu\text{m}\times 250\mu\text{m}$, 像元中心距为 $25\mu\text{m}$, 响应波长范围为 $1.1\mu\text{m}\sim 2.2\mu\text{m}$ 。2013 年 1 月该公司公布其最近的 InGaAs 探测器为 2048×1 的线列, 并用于 3D 光学相干层析成像^[80]。另外该公司还提供 2 级 TEC 制冷的 256×1 元延伸至 $2.5\mu\text{m}$ 的线列探测器。

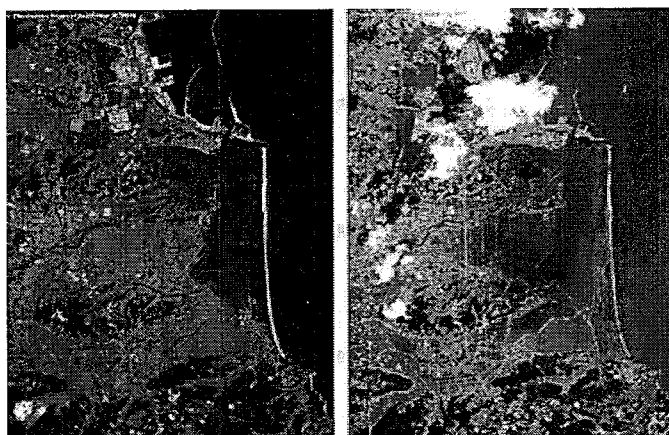


图 1.4.2.1 地震前后日本沿海卫星图片对比 (左: 2010-9-5; 右: 2011-3-12)
Fig1.4.2.1 Satellitic images of Japan seaboard before and after earthquake (left: 2010-9-5, right: 2011-3-12)

在 InGaAs 面阵焦平面探测器研究方面, 主要有以下几家公司及研究机构: 美国 Sensors Unlimited 公司、美国 Boeing Spectrolab 公司、Aerius Photonics 公司、比利时 XenICs 公司、美国 Judson 公司以及法国 III-V 实验室。近几年美国 Judson 公司以及比利时 XenICs 公司在波长扩展 InGaAs 焦平面探测器方向都取得很大进展, 其他的公司及机构主要研究晶格匹配材料以及向可见方向扩展的 InGaAs 焦平面探测器。

Goodrich 是目前世界领先的 InGaAs 探测器制造商, 该公司的面阵 InGaAs 探测器主要是常规和向可见延伸的器件, 提供 128×128 元、 320×240 元、 640×512 元和 1280×1024 元面阵焦平面产品。在 DARPA(Defense Advanced Projects Agency), NASA, the US ARMY, Air Force Research Labs 等一系列研究计划的资助下, 其 InGaAs 焦平面探测器的性能得到了极大的提高^[81], 已经成功在 3 英寸、4 英寸的 InGaAs 外延片上制备了背照射式 1280×1024 的阵列焦平面器件, 其响应波长为 $0.7\sim 1.7\mu\text{m}$, 光敏元中心距为 $15\mu\text{m}$, 探测器暗电流密度 $< 1\text{nA}/\text{cm}^2$ (@ 10°C), 峰值探测率 $1.5\times 10^{13} \text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ (@ 295°C), 填充因子达到了 100%, 并具有很高的灵敏度。另外该公司在 InGaAs 焦平面系统的小型化和低功耗方面也取得了一

定的进展^[82]。高质量和低暗电流的 InGaAs 探测器工作在室温下，轻质量和低功耗配置使其可用于人便携式和无人机^[83]。

美国 Boeing Spectrolab 公司研制的 InGaAs PIN 及 APD 器件，主要是高速器件，用于通讯市场，2008 年该公司在 DARPA 的 PCAR(Photon Counting Array) 计划的资助下通过优化材料外延结构及器件结构，制备了 1280×1024 元的 InGaAs 焦平面器件，光敏元大小为 $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ ，暗电流密度低于 $1\text{nA}/\text{cm}^2$ (@280K)^[84]。2009 年，美国 Raytheon 公司制备了高动态范围的 1280×1024 规模的读出电路，并与 Boeing Spectrolab 公司的低暗电流的 InGaAs 焦平面器件互连，研制出高动态范围低噪声的军用短波红外成像系统^[85]。

Aerius Photonics 公司目前的主要产品有两种规格，即 640×512 和 320×240 ，象元中心距有 $15\mu\text{m}$ 和 $25\mu\text{m}$ 两种，探测波长也有 $0.6\text{--}1.7\mu\text{m}$ 和 $0.9\text{--}1.7\mu\text{m}$ ，主要用于夜视、成像光谱仪、天文观测、食物检测、高光谱成像和无损探测等，其中夜视用相机有头戴便携式、车载式等^[86]。该公司在焦平面暗电流优化方面取得较大进展，主要通过材料结构的优化以及工艺的优化来降低器件的暗电流，材料结构的优化主要集中在 InGaAs 吸收层与 InP 盖帽层及缓冲层的界面特性上，而工艺的优化则主要集中在扩散成结过程以及表面钝化上。器件在 20°C 时的暗电流密度从 $18\text{nA}/\text{cm}^2$ (@-0.1V) 降至 $8.4\text{nA}/\text{cm}^2$ (@-0.1V)，器件在 7°C 时的暗电流密度降至 $<1\text{nA}/\text{cm}^2$ (@-0.1V)。在此基础之上，他们成功研制出 1024×1024 元的平面型 InGaAs 焦平面探测器^[87]，器件光敏元中心距为 $18\mu\text{m}$ ，并应用在天文成像上取得了良好的效果。图 1.4.2.2 所示为用该 InGaAs 相机及 Si CCD 相机对猎户座星云的成像效果对比图，由图可知，采用 InGaAs 红外相机可获得更多的天体信息。

法国 III-V 实验室的 InGaAs 焦平面阵列有 320×256 和 640×512 两种规格，中心距为 $30\mu\text{m}$ ，探测波段为 $0.4\text{--}1.7\mu\text{m}$ ，主要用于夜视（图 1.4.2.3）及空间成像等，另外该公司正在研究 InGaAs APD 探测器，用于通讯领域^[88]。

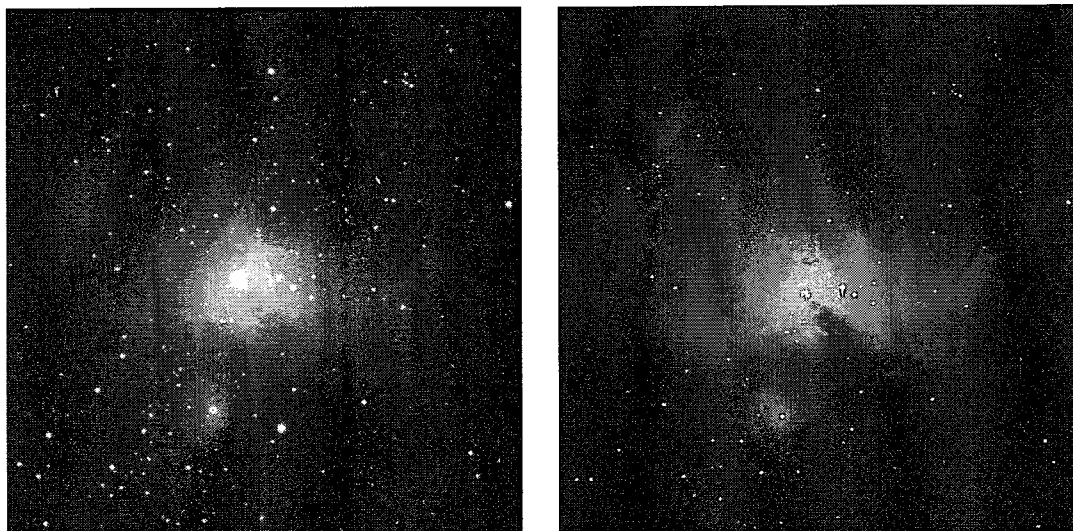


图1.4.2.2 左)1024×1024 InGaAs相机对猎户座星云的成像图, 右) 2148×1472 CCD相机成像图
Fig1.4.2.2 left) Image of the Orion Nebula taken by 1024×1024 InGaAs camera, right) Image of the Orion Nebula taken by 2148×1472 CCD camera

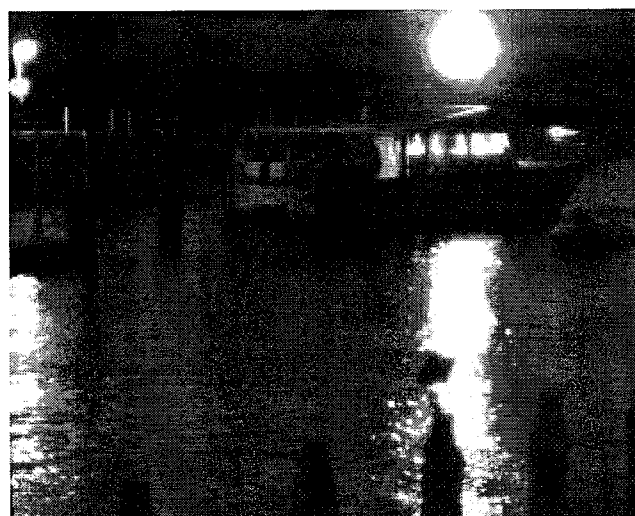


图 1.4.2.3 320×256InGaAs 相机在夜晚的成像图

Fig1.4.2.3 Image of the night taken by 320×320InGaAs cmaera

近几年, 美国 Judson 公司以及比利时 XenICs 公司在波长扩展 InGaAs 焦平面探测器方向都取得很大进展。2008 年 Judson 公司已经具备成熟的包括常规、短波方向延伸和向长波方向延伸的 320×256 元 InGaAs 焦平面探测器制备技术, Hery Yuan 等人报道了他们制备的 320×256 元高 In 组分 InGaAs 探测器, 其长波方向的截止波长为 $2.6\mu\text{m}$, 外延材料是采用 MOCVD 方法在 InP 衬底上生长的外延材料, 采用 InAsP 作为缓冲层和帽层, 器件的峰值量子效率优于 80%, 由于 InAsP 缓冲层的窗口效应, 当制冷至 -65°C 时, 响应波段变为 $1.5\sim 2.5\mu\text{m}$, 长波延伸器件采用了四级热电制冷器^[89,90]。另外该公司也已经开始研制 1280×1024 规模

的常规 InGaAs 焦平面器件, 光敏元大小为 $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$, 在 $1.35\sim 1.6\mu\text{m}$ 波段的量子效率在 $80\%\sim 85\%$ 之间。向短波方向延伸的 InGaAs 焦平面器件采用衬底移除技术制备, 响应波段为 $0.4\sim 1.7\mu\text{m}$, 器件在 $0.5\sim 1.6\mu\text{m}$ 响应波段内的量子效率最低为 40% 。XenICs 公司采用衬底减薄技术, 将探测器芯片的厚度从 $125\mu\text{m}$ 减至 $5\mu\text{m}$, 使得 InGaAs 焦平面器件的波长响应范围扩展至 $0.4\sim 1.7\mu\text{m}$, 并制备了 320×256 的焦平面器件, 器件光敏元中心距 $20\mu\text{m}$, 主要应用于高光谱探测^[91]。该公司近几年为 ESA 的 Proba-V、EarthCARE 等卫星提供了 InGaAs 探测器。其中 EarthCARE 卫星上使用的是 XenICs 的截止波长 $1.7\mu\text{m}$ 、 $\sim 2.3\mu\text{m}$ 探测器, 光敏元大小 $25\mu\text{m}\times 25\mu\text{m}$, 采用平面结构^[92]。最近, 该公司还研制了响应波段在 $0.9\sim 2.5\mu\text{m}$ 的 320×256 元的 InGaAs 探测器, 光敏元中心距为 $30\mu\text{m}$, 其量子效率提高至 70% ^[77]。

在国内, 重庆光电技术研究所成功研制了 $0.9\sim 1.7\mu\text{m}$ 的背照射式 320×256 规模的 InGaAs 面阵探测器^[93], 光敏元中心距 $30\mu\text{m}$, 采用 Zn 扩散成结工艺, 器件增透膜为 SiN_x 。探测器通过 In 柱倒焊与 Si 基 CMOS 读出电路互连。室温下, 器件平均峰值探测率 $6\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。该所也曾报道过延伸波长 InGaAs 器件, 目前其能提供截止波长至 $2.2\mu\text{m}$ 的单元探测器商业产品。

上海技术物理所成功研制了多种 InGaAs 线列探测器, 如台面型 256×1 正照射 InGaAs 焦平面探测器芯片的峰值响应率达到 1.09A/W , 室温下响应截止波长为 $1.71\mu\text{m}$, 平均峰值探测率为 $1.20\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 响应非均匀性为 3.87% ; 台面型 256×1 元背照射线列 InGaAs 焦平面探测器, 探测器芯片的峰值响应率为 0.95A/W , 峰值探测率为 $4.5\sim 6\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 响应非均匀性 $3.5\%\sim 5\%$, 以及台面型 512×1 元背照射 InGaAs 探测器, 平均峰值探测率为 $6.13\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$, 响应不均匀性为 3.71% ^[94,95]; 平面型 10×1 元、 24×1 元正照射 InGaAs 焦平面探测器; 256×1 、 800×1 元背照射 InGaAs 焦平面探测器, 探测器芯片的典型性能为探测率 $3\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$, 暗电流 $20\text{nA}/\text{cm}^2$, 量子效率近 95% ^[96]; 平面型背照射的 800×2 元 InGaAs 双波段集成探测器, 中心距 $25\mu\text{m}$ 、盲元率为零、响应非均匀性低于 3.5% 、峰值探测率为 $2.4\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。该所还在延伸波长器件也有了一定的进展, 成功研制了台面型背照射 N-on-P 结构的 640×1 InGaAs 线列探测器, 室温下器件截止波长达到 $2.4\mu\text{m}$, 峰值波长为 $1.92\mu\text{m}$, 优值因子平均为 $16.0\Omega\cdot\text{cm}^2$, 峰值波长量子效率达到了 37.5% , 在 1ms 积分时间、TEC1 条件下

探测器焦平面的平均峰值探测率已经达到 $2.01 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，响应非均匀性约为 8.77%，焦平面平均量子效率 40.3%^[97]。在 InGaAs 延伸波长探测器方面，已研制出台面型 32×32、64×16 及 64×64 等小面阵探测器，目前正在进行 512×256 元的面阵焦平面探测器，截止波长为 2.6 μm 左右。

1.5 InGaAs 焦平面探测器研究现状

通过分析国际及国内 InGaAs 探测器的发展现状和对延伸波长 InGaAs 焦平面探测器的需求，今后 InGaAs 短波红外焦平面探测器的发展将会主要集中在以下几个方面：

(1) 低暗电流、低噪声。随着红外成像系统对功耗、系统质量以及成本等方面的要求越来越高，非制冷或简单制冷探测器已经成为一个发展趋势，这样对于器件暗电流噪声的要求也越来越高，降低暗电流噪声已经成为一个研究热点，对于延伸波长器件来说更是如此。

(2) 小光敏元、大规模阵列焦平面器件。采用焦平面器件，可以更好地满足系统的要求，同时也有利于简化系统结构、降低成本。今后，为显著提高系统的性能，延伸波长 InGaAs 红外成像探测器将向更大面阵和甚长线列的大阵列方向发展。

(3) GaAs 衬底材料。对于延伸波长 InGaAs 探测器来说，InP 衬底与 InGaAs 层产生失配，通过引入缓冲层也不能完全消除失配的影响。而 GaAs 衬底虽然也于 InGaAs 有较大的失配，但相对来说具有其他的一些优势，因此发展以 GaAs 为衬底的延伸波长 InGaAs 材料也是目前重要的发展方向之一。

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

(5) 多波段工作。多波段工作的焦平面探测器不仅可以获得空间信息，而且能获取光谱信息，因此可以获取更丰富、更精确、更可靠的目标信息。对于 InGaAs 焦平面来说，多色也是其重要的发展方向之一。

(6) 能带调控。通过优化能带结构，从而减少缺陷对器件性能的影响，改善器件的性能，对于延伸波长 InGaAs 探测器来说，也是其重要的发展方向之一。

近几年 InGaAs 焦平面器件的应用领域在不断拓展，从军用到民用，从工业到

医药、农业，而且材料生长技术不断成熟，器件性能不断提高，生产规模不断变大，成本不断的降低。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，要缩小这种差距，从器件材料的生长到器件结构、工艺的优化等方面都有大量的工作需要去做。

1.6 本论文的研究目的和主要内容

本论文针对高光谱用短波红外 InGaAs 焦平面探测器应用需求，以研制高性能、大规模的延伸波长 InGaAs 面阵探测器为主要目的，对延伸波长材料参数、器件暗电流、量子效率及关键工艺进行了优化研究。第一章回顾了红外辐射、技术和红外探测器的发展，概述了 InGaAs 焦平面探测器的发展现状；第二章针对晶格匹配器件串联电阻及暗电流较大的问题，研究了 p-InP 的欧姆接触、宽禁带 p-InAlAs 帽层对器件暗电流的影响及欧姆接触的电学特性；第三章针对台面成型工艺对器件造成的损失大等问题，研究了低温钝化膜对器件性能的影响，并成功解决了器件侧面漏电的问题，极大的降低了器件的暗电流；第四章研究了延伸波长器件的量子效率与材料参数及其器件结构的关系，为提高器件量子效率提供一定的理论基础；第五章研制了几种规格的延伸波长 InGaAs 面阵探测器，并分析其光电性能；第六章是全文总结和展望。

第二章 晶格匹配台面 InGaAs 探测器性能优化

In_{0.53}Ga_{0.47}As 与 InP 晶格常数相同, 因此在 InP 衬底上能够外延生长晶格匹配的 InGaAs 吸收层材料, 器件具有低暗电流、低噪声等优点, 近年来晶格匹配 InGaAs 焦平面探测器在科学、商业及军事等应用领域中也有极大的发展。对于采用 InP 作为帽层材料 InP/InGaAs p-i-n 探测器来说, p-InP 的欧姆接触是影响其光电性能的一个重要因素。大多数共价半导体都符合 Mead 定律^[98], 即 n 型的势垒高度 Φ_{Bn} 为 $2/3 E_g$, p 型的势垒高度 Φ_{Bp} 为 $1/3 E_g$, 而 InP 则不符合 Mead 定律。n-InP 的势垒高度 Φ_{Bn} 为 $0.4 \sim 0.5 \text{ eV}$, p-InP 的势垒高度 Φ_{Bp} 为 $0.8 \sim 0.9 \text{ eV}$, 而且空穴的有效质量也较电子有效质量大很多, 因此 p 型欧姆接触要比 n 型难做得多。n-InP 的欧姆接触已经实现比接触电阻低达 $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ^[99]。通常有两种方法实现 p-InP 的欧姆接触: 合金膜系和非合金膜系^[100-103]。现在常见的 Au 基合金膜系与 p-InP 的接触 (如 Au-Zn, Au-Be 等), 其比接触电阻可做到 $10^{-4} \sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ^[104], 但有一些内在的缺点如可靠性差、接触电极表面不均匀及其界面处形成尖峰等。InP/InGaAs/InP p-i-n 光电二极管是双异质结构, 帽层的 p-InP 禁带宽度 ($1.344 \text{ eV}@300\text{K}$) 比 In_{0.53}Ga_{0.47}As 禁带宽度 ($0.74 \text{ eV}@300\text{K}$) 大, 有特定的窗口效应, 可以起到一定的钝化作用, 减小表面的漏电流, 若采用 p-In_{0.52}Al_{0.48}As (禁带宽度为 $1.52 \text{ eV}@300\text{K}$), 则更有利于降低器件暗电流, 但欧姆接触的形成将更困难。本章对金属和 p-InP 及 p-In_{0.52}Al_{0.48}As 接触的电学特性进行了研究, 通过金属膜系、退火条件的优化以及浅扩散技术的应用, 获得了较好的欧姆接触。

2.1 欧姆接触形成的方法及其原理

金属的功函数 W_m 表示一个起始能量等于费米能级 E_F 的电子从金属内部逸出到真空能级 E_0 所需要的最小能量, 一般约为几个 eV。类似的也把真空能级 E_0 与费米能级 E_F 之差称为半导体的功函数 W_s , 半导体的费米能级随杂质浓度变化, 因此 W_s 也与杂质浓度有关。金属与半导体接触会产生接触电势差, 根据肖特基理论, 考虑理想、紧密接触及 n 型半导体的情况, 半导体一边的势垒高度是 $qV_D = W_m - W_s$, 金属一边的势垒高度 $\Phi_{bn} = W_m - \chi$, 其中 χ 是半导体电子亲和能。

当 $W_m > W_s$, 金属和 n 型半导体接触形成阻挡层, 为整流接触; 当 $W_m < W_s$, 金属

和 n 型半导体接触形成反阻挡层，反阻挡层没有整流作用，即形成欧姆接触。对于 p 型半导体来说，势垒高度为 $\Phi_{bp} = E_g + \chi - W_m$ ， $\Phi_{bn} + \Phi_{bp} = E_g$ 。在实际应用中，还有其他影响接触势垒的因素包括：半导体表面态、金属-半导体接触形成的条件与方法、生长半导体晶体的技术、半导体表面的化学配比和表面重构等。由于表面态密度的不同，接触电势差有一部分要降落在半导体表面以内，金属功函数对表面势垒将产生不同程度的影响。理想的欧姆接触是指这样的接触：不产生明显的附加阻抗，而且不会使半导体内部的平衡载流子浓度发生显著的变化，当有电流流过时，欧姆接触上的电压降应远小于样品或器件本身的压降，这种接触不影响器件的电流-电压特性。半导体器件一般都要利用金属电极输入或输出电流，这就要求在金属和半导体之间形成良好的欧姆接触。

形成欧姆接触有三种方法，其一形成重掺杂的半导体层，接触金属，此时势垒区变得很薄，电子也要通过隧道效应贯穿势垒产生相当大的隧穿电流，甚至超过热电子发射电流而成为主要的电流成分，使得即使很高的势垒高度，场发射占主要地位，形成接近理想的欧姆接触。高掺杂表面层可以通过以下方式得到：合金化或固相再生长，在接触金属中含有的掺杂物的内扩散，外延生长，扩散或离子注入等技术。利用金属物理与化学热力学的知识，可以设计一个多层金属膜的金属化系统，经过加热，金属化系统可能产生合金化或固相再生长，于是形成（金属-重掺杂层- $A^{III}B^V$ ）欧姆接触。更通常的办法（特别是对于层或体效应器件）是在工作区外延生长一层特殊的高掺杂接触区，这就是指外延再生长或双外延。这个方法的难点就是在工作区和高掺杂外延区通常会有一高电阻区。高掺杂表面层可以通过浅扩散或是离子注入的方法得到。其二是在金属-半导体界面有可以忽略的势垒高度，以致在室温下就有足够的载流子可以越过势垒，则这种接触的整流效应极小，将近似为欧姆接触。其三就是在近金属-半导体界面引入复合中心，如果复合中心的浓度足够大，在耗尽区的复合占主要传导机制，使接触电阻明显降低。

在金属与半导体材料之间形成欧姆接触，加热界面是必要的，通常在惰性气体中进行，称为快速热退火。在改进欧姆接触中会遇到一个问题：在加热过程中金属与半导体出现不希望的反应，导致结穿透，如铝与硅，结尖刺有可能引起结短路，可通过增加阻挡层金属化抑制扩散的方法解决。淀积金属作为阻挡层，阻

止层上下的材料互相混合。阻挡层金属一般应具有以下的基本特性：有很好的阻挡扩散特性；高电导率且有很低的欧姆接触电阻；在半导体和金属之间有很好的附着；抗电迁徙；很薄并且高温下有很好的稳定性；抗侵蚀和氧化。通常做阻挡层的金属是一类具有高熔点的难熔金属，如 Ti、W、Ta（钽 tan）、Mo（钼 mu），Co（钴 gu）、Pt。Ti 作为阻挡层的优点是增强附着、减小接触电阻、减小应力和抗电迁徙。

2.2 p-InP 帽层的金-半接触研究

2.2.1 实验

实验所用材料为晶格匹配 PIN 型 InP/ In_{0.53}Ga_{0.47}As /InP 双异质结结构，采用气态源分子束外延 (GSMBE) 方式生长，p-InP 掺杂浓度为 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (掺 Be)，衬底为 2 英寸 350 μm 厚的半绝缘 InP(100)衬底。

首先用有机溶剂氯仿、乙醚、丙酮和酒精对样品进行清洗，用氮气吹干。为了接近器件工艺制备过程，采用 PECVD 生长一层钝化膜，光刻制备 TLM（传输线模型）测试图形。本章主要对薄膜材料进行测试，因此采用了适用于薄膜样品的传输线模型法(Transmission line model)。这种方法首先由 Schockley 引入，后经 Berger 做了进一步改进，在欧姆接触电阻测定中经常使用。接着用 HF 缓冲液湿法腐蚀开孔，并用去离子水冲洗。采用真空度为 10^{-4} Pa 电子束蒸发系统在样品上淀积 Ti/Pt/Au (20nm/30nm /20nm)。采用正交设计法选取退火条件，退火温度范围为 $350^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ ，退火时间为 30s~8min，退火气氛为 N_2 。I-V 测试系统是计算机控制 Keithley236 源测量仪，采用压测的方法进行测试。退火之后采用离子溅射法淀积加厚电极 Cr/Au (20nm/400nm)。样品的剖面结构示意图如图 2.2.1.1 所示。利用原子力显微镜(AFM)研究不同退火条件下的样品的表面形貌，并用俄歇电子能谱(AES)研究了元素的深度分布。

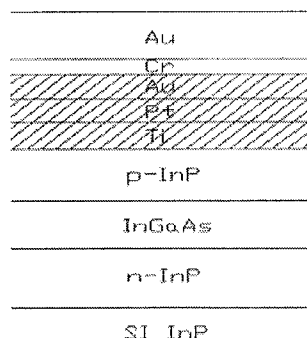


图 2.2.1.1 样品剖面结构示意图

Fig 2.2.1.1 Cross section of sample

实验所用 TLM 图形为 $250\mu\text{m}\times 120\mu\text{m}$ 的矩形,其间距从 $10\mu\text{m}$ 以 $2\mu\text{m}$ 递增到 $28\mu\text{m}$ 。如图 2.2.1.2 所示。

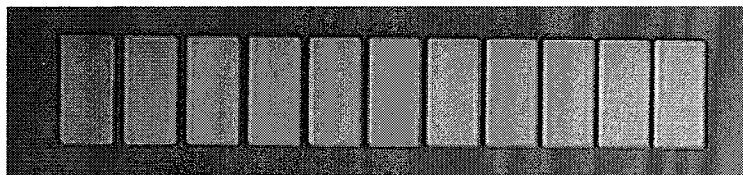


图 2.2.1.2 TLM 样品实物图

Fig 2.2.1.2 The sample of TLM

2.2.2 实验结果与讨论

2.2.2.1 Ti/Pt/Au/p-InP 的电学特性

图 2.2.2.1 是接触电极在不同温度下退火 4min 的 I-V 曲线图。当退火温度为 350°C 时,退火时间变化对接触特性影响不大,基本为肖特基接触,当温度大于 400°C 时开始形成欧姆接触,在 450°C 退火后 I-V 曲线斜率最小,温度继续升高到 500°C 时 I-V 曲线的斜率下降。图 2.2.2.2 中所示为在 450°C 下退火不同时间后测得的 I-V 曲线图,由图中明显看出退火时间在 2~4 min 时,金-半接触从肖特基接触转变为欧姆接触,当时间继续延长至 8min 时,接触的特性退化。I-V 曲线的斜率反映了接触电极电阻的大小,经过快速热退火的过程,在 450°C 4min 的条件下达到最小值。

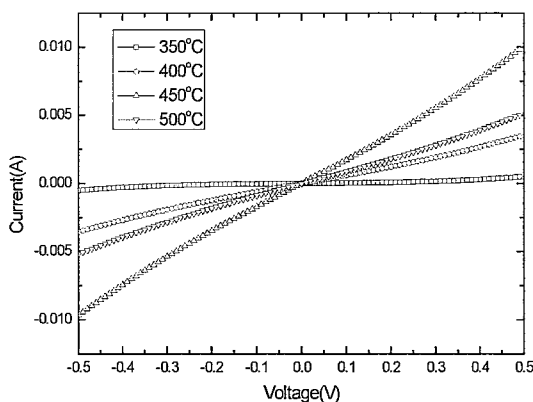


图 2.2.2.1 在不同温度下退火 4min 后接触电极的 I-V 特性 (间距 $14\mu\text{m}$)

Fig2.2.2.1 I-V characteristics of Ti/Pt/Au contact to p-InP films annealed in N_2 at different temperature for 4min with pad spacing of $14\mu\text{m}$

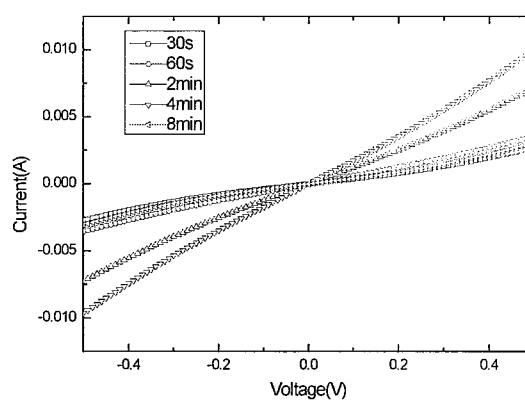


图 2.2.2.2 在 450°C 下退火不同时间后接触电极的 I-V 特性 (间距 $14\mu\text{m}$)

Fig2.2.2.2 I-V characteristics of Ti/Pt/Au contact to p-InP films annealed in N_2 at 450°C with pad spacing of $14\mu\text{m}$

接触电极的比接触电阻是反应欧姆接触的一个重要参数,可由电极间总电

阻与间距之间的关系进行提取，如图 2.2.2.3 所示，根据图中四种条件下的曲线可以看出，退火条件为 450℃4min 的样品其总电阻最小。对图 2.2.2.3 中曲线进行线性拟合，则 $2R_c$ 为截距， R_{sh}/W 为曲线的斜率。 R_c 是接触电阻， R_{sh} 是半导体材料的方块电阻。由传输线模型可知比接触电阻为：

$$\rho_c = \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1} \bigg|_{V=0} \quad (\Omega \cdot \text{cm}^2) \quad (2.1)$$

经过简化计算可得：

$$\rho_c = R_c^2 W^2 / R_{sh} \quad (2.2)$$

由拟合结果可得对于退火条件 450℃2min、4min、8min 及 500℃4min，其比接触电阻依次为 $1.94 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ， $7.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ， $0.95 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $2.27 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。在 450℃4min 的退火条件下比接触电阻最小。

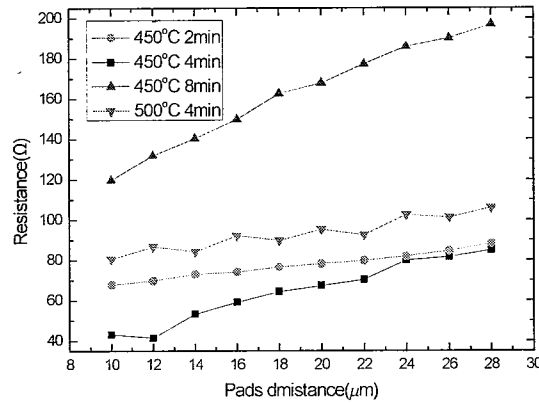


图 2.2.2.3. 接触电极间总电阻与间距的关系图（退火条件：450℃2min，4min，8min 和 500℃4min）

Fig2.2.2.3 Resistance dependence on pad spacing for Ti/Pt/Au contact to p-InP annealed at 450℃ for 2min, 4min, 8min and at 500℃ for 4min

2.2.2.2 接触电极的表面形貌

采用 1000 倍光学显微镜及原子力显微镜观察样品表面形貌，图 2.2.2.4、图 2.2.2.5 所示为退火条件分别为 450℃&2min、4min、8min 和 500℃&4min 的电极表面形貌图。退火温度为 450℃及其以下时，样品表面形貌均匀，无明显缺陷，当退火温度高至 500℃时，表面有明显的 Au 脱落现象，这将会导致接触电极的可靠性变差。退火条件为 500℃4min 时加厚电极表面的粗糙度 $RMS \gg 10\text{nm}$ 。而在退火条件为 450℃时样品表面较为平滑均匀，对于退火时间为 2min、4min 和 8min 的情况其表面粗糙度 RMS 依次为 5.576nm, 4.669nm, 5.789nm。当退火温度

相对较高时, 金-半接触性能变差, 且在 450°C 4min 的退火条件下样品的表面粗糙度最小。退火条件为 450°C & 8min 与 500°C & 4min 时, 接触的电学性能均发生了退化, 但电极表面形貌却明显不同, 可能有以下两个原因: 1. 界面处金属与 InP 互扩散程度不同; 2. 形成的少量合金化合物不同。

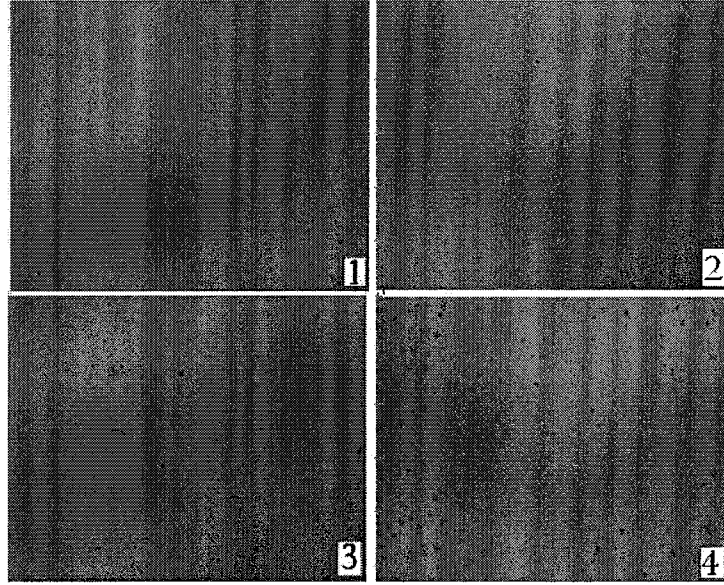


图 2.2.2.4 接触电极的表面形貌 ($1000\times$) ,1: 450°C 2min; 2: 450°C 4min; 3: 450°C 8min; 4: 500°C 4min

Fig2.2.2.4 Surface morphologies of the TLM contact pad observed with $1000\times$ optical microscope, 1: 450°C for 2min; 2: 450°C for 4min; 3: 450°C for 8min; 4: 500°C for 4min

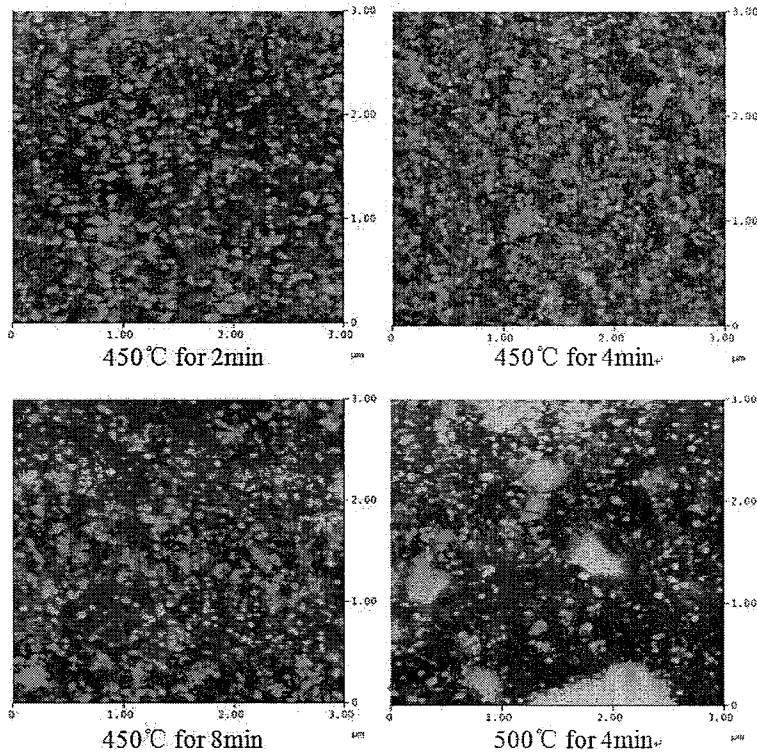


图 2.2.2.5 AFM 观察表面形貌 ($3\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}$)

Fig2.2.2.5 Surface morphologies observed with AFM ($3\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}$)

2.2.2.3 AES 深度剖面分析

为了进一步证实表面和界面在退火后发生的变化，我们采用 AES 对表面和界面进行分析。利用 AES 可以得到元素深度方向的分布，根据元素灵敏度系数法，这是非常实用的一种定量分析方法。元素 x 所占的百分比 C_x 为：

$$C_x = \frac{I_x / S_x}{\sum_i I_i / S_i} \quad (2.3)$$

其中， C_x 是元素 x 原子百分比浓度， I_x 是元素 x 俄歇峰峰高， S_x 是元素 x 相对灵敏度因子， $\sum I_i / S_i$ 是该图谱上所有主峰和杂峰的和。

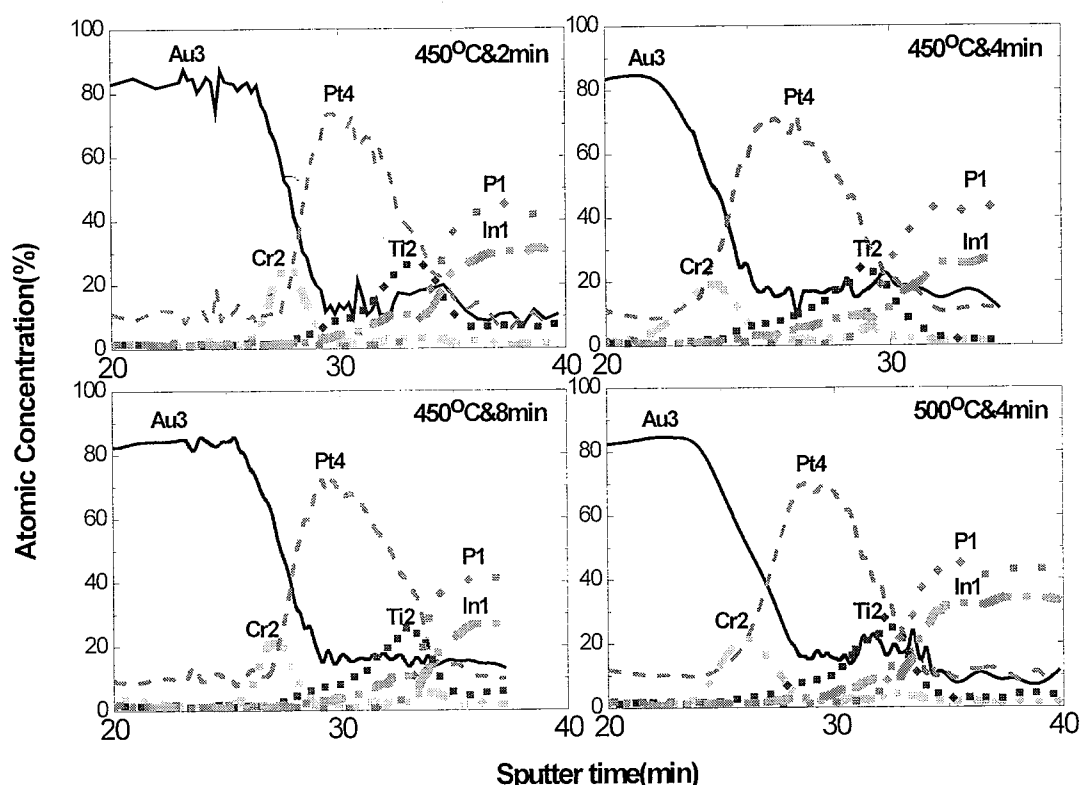


图 2.2.2.6 不同退火条件下 Cr/Au/Ti/Pt/Au/InP 的 AES 剖面深度分析图

Fig2.2.2.6 AES depth-composition profiles for Cr/Au/Ti/Pt/Au/InP contacts at different conditions

图 2.2.2.6 所示为四种不同退火条件下的金属-InP AES 深度剖面分析图，分别得到退火前后 Au, Pt, Ti, Cr, In, P 元素百分比的深度分布。由 Avishay Katz 等所报道的文献^[105]可知，当退火温度大于 400℃时 Ti 元素可与 In、P 发生反应形成 Ti_xP_y 、 $Ti_xP_yIn_2$ 化合物，并随着温度的增加，反应程度增大，与图 2.2.2.6 中所示吻合。从图中可以看出，Pt 层可以相对有效的阻挡 Au 与 InP 的互扩散，但在 450~500℃的退火温度下，仍有少部分 Au 与 InP 发生互扩散。在不同的退火

条件下, Au 与 In、P 的互扩散程度不同, 生成的 In-Au 化合物也不同, Victor 等人^[106]对 Au 与 InP 的反应做了详细的研究, 表明 Au 与 InP 反应可生成 Au_3In 、 Au_9In_4 等化合物, 且退火温度在 450°C 左右, 生成的化合物逐渐从 Au_3In 向 Au_9In_4 转变并有成核现象出现, 且温度越高, 转变过程越快。图 2.2.2.6 所示的四种不同退火条件下 AES 深度分析图中元素互扩散程度虽有不同, 但差别不大, 即表明造成接触特性差别较大的原因可能是界面处形成的合金化合物成份不同, 即 Au_9In_4 的增多使欧姆接触的特性退化。AES 深度分析结果表明欧姆接触的形成强烈的依赖于金-半接触界面处的化学及其冶金学反应, 与退火的温度和时间都相关, 通过对温度和时间的优化应该可以得到比接触电阻更小的欧姆接触。

2.3 p-InAlAs 帽层的金-半接触研究

在宽带隙半导体材料上制备欧姆接触, 应采用与半导体形成较低势垒高度的金属, 或者使半导体材料具有高掺杂浓度。若按照文献^[107]中报道, 对于组分 $0.45 < x < 0.55$, Au 与 $\text{n-In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ 的势垒高度关系为: $\phi_{\text{bn}} = 2.46 - 3.16x$, 则对于 $x=0.52$, $\phi_{\text{bn}} = 0.82\text{eV}$, 据此 $\phi_{\text{bp}} = 0.7\text{eV}$ 。但实际上界面态可能造成费米能级顶扎, 对势垒高度产生影响。对于 III-V 族半导体欧姆接触的形成, 有两种方法: 合金接触和非合金接触。对于合金接触, 如 Au 基金属膜, p 电极接触: AuZn 、 AuBe ; n 电极接触: AuGeNi 。通过引入掺杂元素 (Zn、Be、Ge 等) 提高掺杂浓度, 降低接触电阻。对于非合金接触, 一般通过浅扩散技术形成重掺杂帽层, 再淀积 Ti, Pt, Au 等金属膜, 其电流主要以隧穿为主^[108]。A Katz^[109]等人采用 Ti/Pt (50/60nm) 金属膜系在 $\text{p-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (Zn-doped $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$) 实现欧姆接触, 在 $450^\circ\text{C} \& 30\text{s}$ 的快速热退火条件下其比接触电阻为 $2.5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。由于实验中直接在样品上淀积 Ti/Pt/Au 进行退火, 由此制备的器件串联电阻较大, 因此尝试用 Ni/Pt/Au 金属膜系或对样品进行二次扩散浅掺杂以增加表面掺杂浓度再淀积 Ni/Pt/Au 和 Ti/Pt/Au 进行试验。

2.3.1 实验

实验所用材料为晶格匹配 PIN 型 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As} / \text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As} / \text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 双异质结结构, 采用气态源分子束外延 (GSMBE) 方式生长, p-InAlAs 帽层掺杂

浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (掺 Be), 厚度为 $1 \mu\text{m}$, 以及 $2.5 \mu\text{m}$ 厚的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 吸收层和 $0.5 \mu\text{m}$ 厚的 N-InAlAs 缓冲层, 衬底为 2 英寸 $350 \mu\text{m}$ 厚的半绝缘 InP(100) 衬底。首先用有机溶剂氯仿、乙醚、丙酮和酒精对样品进行清洗, 用氮气吹干。为了接近器件工艺制备过程, 采用 PECVD 生长一层钝化膜, 光刻制备 TLM (传输线模型) 测试图形。接着用 HF 缓冲液湿法腐蚀开孔, 并用去离子水冲洗。采用真空度为 10^{-4} Pa 电子束蒸发系统在样品上淀积 Ni/Pt/Au (20nm/40nm/20nm) 金属膜系。样品经过快速热退火, 退火温度范围为 $350^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$, 退火时间为 60s, 退火气氛为 N_2 。另外几组样品进行二次扩散浅掺杂, 并淀积 Ni/Pt/Au (20nm/40nm/20nm) 及 Ti/Pt/Au (20nm/30nm/20nm) 金属膜系, 快速热退火条件为: 退火温度范围为 450°C , 退火时间为 60s, 退火气氛为 N_2 。退火之后采用离子溅射法淀积加厚电极 Cr/Au (20nm/400nm)。I-V 测试系统是计算机控制 Keithley236 源测量仪, 样品焊至杜瓦内进行测试。

2.3.2 实验结果与讨论

2.3.2.1 Ni/Pt/Au/p-InAlAs (未二次掺杂) 电学特性

图 2.3.2.1 所示为接触电极在不同温度下退火 60s 的 I-V 曲线图, 可以明显看出为肖特基接触。根据热电子发射模型, 肖特基势垒的电流表达式如下^[110]:

$$I = I_{ns} e^{\beta q V / k T} (1 - e^{-\frac{q V}{k T}}) \quad (2.4)$$

其中 I_{ns} 是反向饱和电流, $I_{ns} = A^* S T^2 e^{-\frac{q \Phi_b}{k T}}$, Φ_b 即是界面肖特基势垒高度, A^* 为有效 Richardson 常数, T 是绝对温度, n_j 是理想因子, S 为电极接触面积, 对于 p-In_{0.52}Al_{0.48}As, $m_{hh} = 0.578 m_0$, $m_{lh} = 0.086 m_0$, $A^* = \frac{4 \pi q m^* k^2}{h^3} = 79.7 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^2$,

T=300K, S=250×120×10⁻⁸ cm²。

通过变换, 上式可写为:

$$\ln \left(\frac{I}{e^{q V / k T} - 1} \right) = \ln I_{ns} + \frac{q (\beta - 1) V}{k T} = \ln I_{ns} - \frac{q V}{n_j k T} = A + B V \quad (2.5)$$

其中 n_j 是理想因子, $A = \ln I_{ns}$, $B = -\frac{q}{n_j k T}$ 。

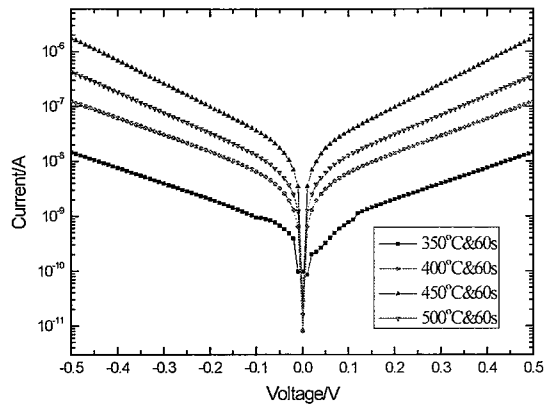


图 2.3.2.1 未二次掺杂样品在不同温度下退火 60s 后的 I-V 特性 (间距 $10\mu\text{m}$)
Fig2.3.2.1 I-V characteristics of Ni/Pt/Au contact to p-InAlAs without secondly doping annealed in N_2 at different temperature for 60 s with pad spacing of $10\mu\text{m}$

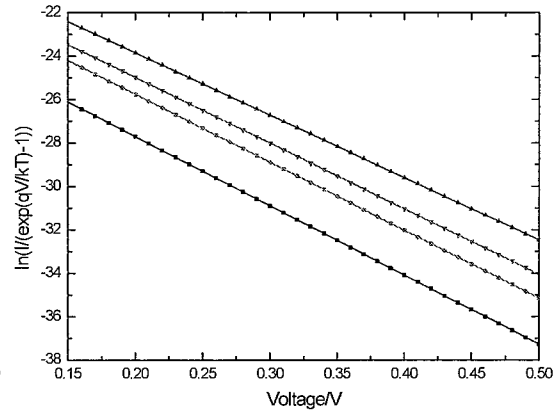


图 2.3.2.2 $\ln(I/(\exp(qV/kT)-1))$ 随偏压变化的曲线拟合
Fig2.3.2.2 Experimental $\ln(I/(\exp(qV/kT)-1))$ vs. V plots (forward bias) of the Schottky contacts

表2.3.2.1 肖特基势垒的I-V特性拟合所得结果

Table2.3.2.1 Experimental values obtained from the forward bias I-V of the Schottky contacts

退火条件	350 °C&60 s	400 °C&60 s	450 °C&60 s	500 °C&60 s
势垒高度/eV	0.75	0.71	0.67	0.69
理想因子	1.21	1.23	1.34	1.27

图2.3.2.1所示的I-V曲线可以看成是两个背靠背肖特基结的电流特性，一般在较大偏压时可以认为是一个肖特基结在起主要作用，此时 $\ln(I/(\exp(qV/kT)-1))$ 与电压V呈线性关系，通过拟合则可以得到A和B的值，即 I_{ns} 和 n_j 的大小，如图2.3.2.2所示，通过反向饱和电流公式，可以得到势垒高度 Φ_b 的大小。拟合所得结果见表2.3.2.1，结果表明接触均为肖特基接触，最低势垒高度为0.67eV，对应的退火温度为450°C，该条件下的样品电阻最小，电流最大。如果理想因子 n_j 接近1，则扩散电流占主导，若 n_j 接近2，则产生复合电流占主导，实验所得 n_j 为1.34，表明扩散电流与产生复合电流共同作用。

2.3.2.2 Ni/Pt/Au/p-InAlAs (二次掺杂) 电学特性

为了得到掺杂浓度大的表面接触层，采用闭管密封 Zn 扩散方法对 p-InAlAs

帽层进行扩散, 采用 Zn_3As_2 作为扩散源, 扩散条件为 $530^\circ\text{C}&4\text{ min}$ 和 $530^\circ\text{C}&8\text{ min}$ 。按之前的过程制备 TLM 模型, 退火条件为 $450^\circ\text{C}&60\text{s}$, 测试得 I-V 特性曲线如图 2.3.2.3 所示。结果表明虽然重掺杂层有助于改善接触特性, 电阻减小, 电流增大, 势垒高度降低, 但接触仍为肖特基接触。实验结果拟合得到的 n_j 和 Φ_b 如表 2.3.2.2 所示。

以上的结果表明在 $\text{p-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 上采用 Ni/Pt/Au 金属膜系很难形成理想的欧姆接触。

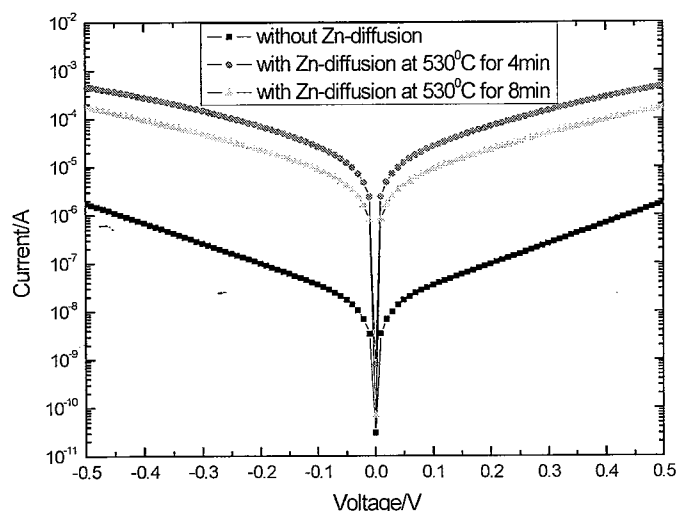


图 2.3.2.3 Ni/Pt/Au 在三种不同表面条件 p-InAlAs 接触的 I-V 特性 (间距 $10\mu\text{m}$, 退火: $450^\circ\text{C}&60\text{s}$)

Figure 3: I-V characteristics of Ni/Pt/Au contact to three different p-InAlAs samples annealed in N_2 at 450°C for 60s with pad spacing of $10\mu\text{m}$

表2.3.2.2 由图2.3.2.3中I-V特性曲线拟合所得 n_j 和 Φ_b 大小

Table 2.3.2.2 Experimental values obtained from the forward bias I-V in Fig2.3.2.3 of the Schottky contacts

Zn 扩散条件	未扩散	$530^\circ\text{C}&4\text{ min}$	$530^\circ\text{C}&8\text{ min}$
势垒高度/eV	0.67	0.54	0.57
理想因子	1.34	1.22	1.23

2.3.2.3 Ti/Pt/Au/p-InAlAs (二次掺杂) 电学特性

采用Ti/Pt/Au作为接触电极, 并对p-InAlAs表面进行浅扩散 ($530^\circ\text{C}&4\text{ min}$), 制备TLM器件, 退火条件为 $450^\circ\text{C}&60\text{s}$, 其I-V特性曲线如图2.3.2.4所示。由图可以看出I-V曲线呈线性特性, 表明形成了欧姆接触。图2.3.2.5为电阻值随间距的

变化规律，根据TLM理论进行线性拟合（最小二乘法），可以得到截距（ $=2R_c$ ）和斜率（ $=R_{sh}/W$ ），根据式2.2可以得到比接触电阻：

$$\rho_c = R_c^2 W^2 / R_{sh} = (78.83/2)^2 \times 250 \times 10^{-8} / 4.38 = 8.88E-4 (\Omega \cdot cm^2) \quad (2.6)$$

由以上结果可以得到：浅扩散形成的重掺杂表面层能够有效得改善金-半接触特性，此时采用 Ti/Pt/Au 金属膜系可以在 p-In_{0.52}Al_{0.48}As 上有效得形成低阻欧姆接触。

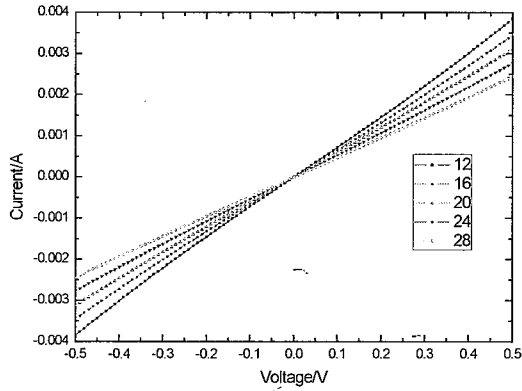


图 2.3.2.4 Ti/Pt/Au/p- InAlAs 接触的 I-V 特性（不同间距，扩散条件：530 °C&4 min，退火条件 450 °C&60 s）

Figure 2.3.2.4: I-V characteristics of Ti/Pt/Au contact to p-InAlAs films with Zn-diffusion at 530 °C for 4 min in annealed in N₂ at 450 °C for 60 s with different pad distances(unit: μm)

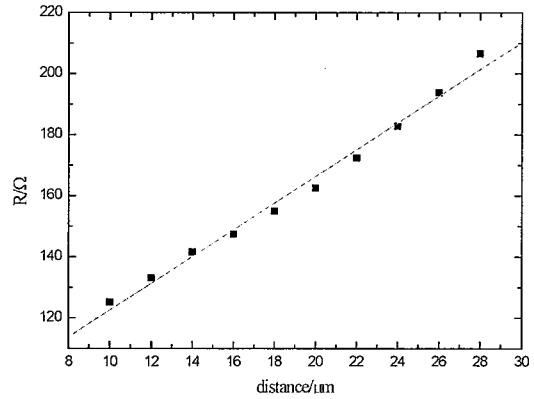


图 2.3.2.5 Ti/Pt/Au/p- InAlAs 接触的电阻值随间距的变化（扩散条件：530 °C&4 min，退火条件 450 °C&60 s）

Figure 2.3.2.5: Resistance dependence on pad spacing for Ti/Pt/Au contact to p-InAlAs with Zn-diffusion at 530 °C for 4 min annealed in N₂ at 450 °C for 60 s

2.4 不同帽层材料的器件验证

为了验证不同的帽层材料以及不同的接触特性对器件性能产生的影响，分别用不同的材料（均为晶格匹配材料，衬底均为半绝缘 InP 衬底）制备了 10×1 的测试器件，并测试其性能。制备器件所用材料编号、结构及参数见表 2.4.1 所示。器件制备流程如图 2.4.1 所示。

其中 Zn 扩散工艺是采用闭管封闭的方法进行，扩散温度为 530℃，扩散时间为 4 分钟，对样品 4#进行全片扩散，即原位掺杂之后的二次掺杂。按照此扩散工艺，扩散深度在帽层（1μm 厚）中，不会对吸收层以及界面层产生较大影响。样品 1#-3#未经过扩散。制备的测试器件光敏元尺寸为 100×100μm²。工艺中采用感应耦合等离子体（ICP）刻蚀结合湿法腐蚀技术实现台面成型，采用等离子体

增强化学沉积技术 (PECVD) 生长的 SiN_x 膜作为钝化膜, 随后采用电子束蒸发 Ti/Pt/Au 作为金属膜系, 快速热退火条件则采用之前的实验结果。之后采用离子束溅射的方法生长 Cr/Au 作为加厚电极以便于引出测试。器件成型后俯视图如图 2.4.2 所示。利用 Keithley 6430 可编程电流源表、傅里叶光谱仪、信号与噪声测试系统对制备的探测器进行室温下电学特性、光谱、信号和噪声等光电性能测试。

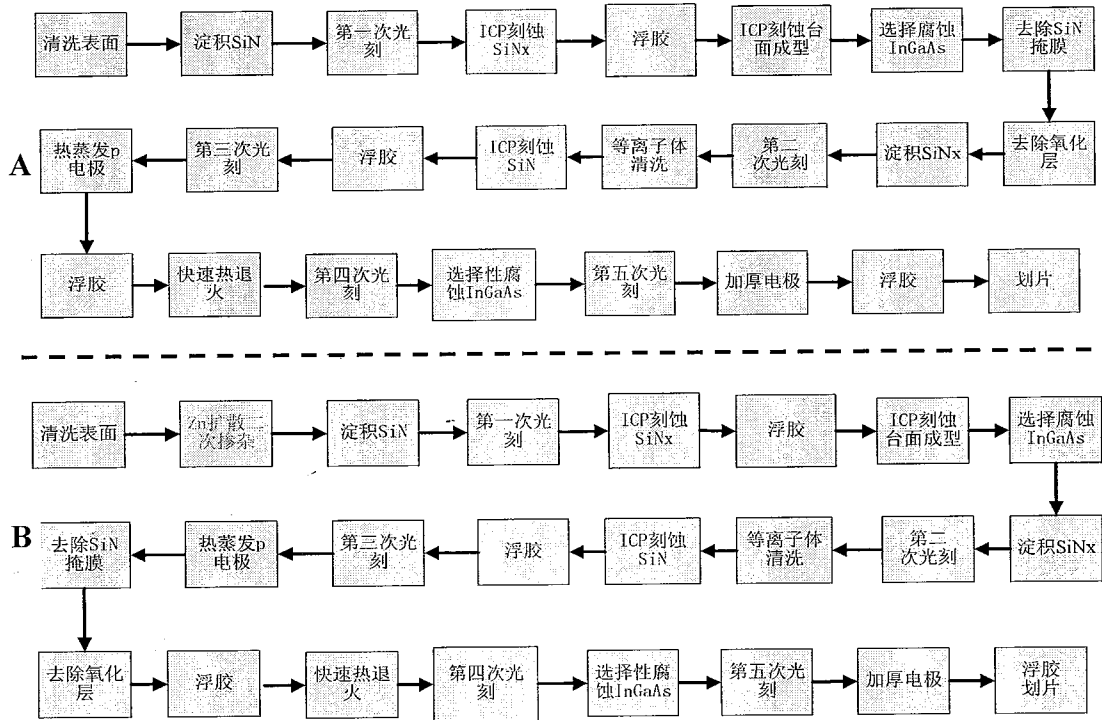


图 2.4.1 器件制备流程图 (A: 样品 1, 2, 3; B: 样品 4)

Fig2.4.1 The fabrication process of the samples (A: sample 1, 2, 3; B: sample 4)

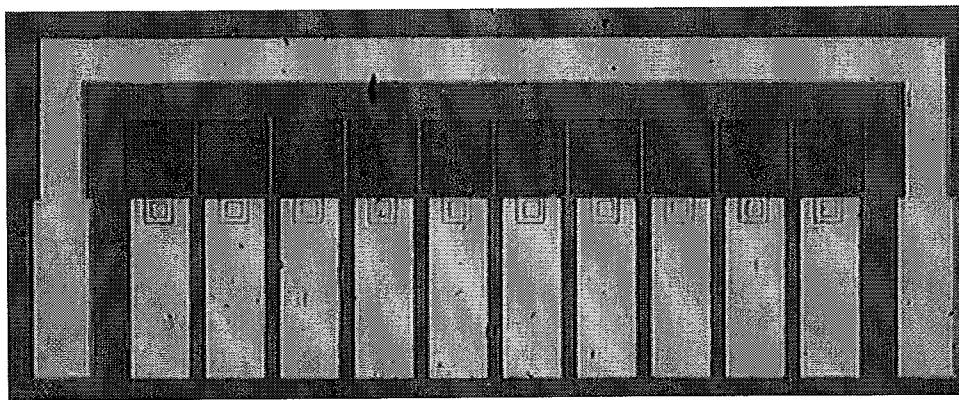


图 2.4.2 探测器的照片

Fig2.4.2 The photograph of the detector

表 2.4.1 材料编号、结构和参数
Table 2.4.1 The number, structure and parameter of materials

器件编号		材料编号	帽层材料	掺杂类型
1		M79	p-InP	原位掺杂
2		M169	p-InAlAs+InGaAs	原位掺杂
3		M119	p-InAlAs	原位掺杂
4		M119	p-InAlAs	原位掺杂+二次扩散掺杂
材料结构参数		材料	厚度/微米	载流子浓度/cm ⁻³
M119	P ⁺	In _{0.52} Al _{0.48} As	1	1E18
	I	In _{0.53} Ga _{0.47} As	2.5	3E16
	N ⁺	InAlAs.buffer	0.5	2E18
M169	P ⁺	In _{0.53} Ga _{0.47} As	0.15	5E18
	P ⁺	In _{0.52} Al _{0.48} As	0.6	2E18
	I	In _{0.53} Ga _{0.47} As	1.5	3E16
	N ⁺	InAlAs.buffer	1.0	2E18
M79	P ⁺	InP	0.6	2E18
	I	In _{0.53} Ga _{0.47} As	2.5	3E16
	N ⁺	InP.buffer	1.5	2E18

2.4.1 I-V 特性

图 2.4.3 为 4 个样品的 I-V 特性曲线, 偏压为-0.1V 和-0.01V 时的暗电流密度见表 2.4.2 所示。

禁带宽度较小的 p-InP 为帽层的器件暗电流最大, 而禁带宽度较大的 p-InAlAs 为帽层的器件, 暗电流最小, 由于 InGaAs 材料的禁带宽度较小, 因此导致 2#器件暗电流也偏大。对于 p-InAlAs 为帽层的 3、4#器件, 暗电流都较小, 相对 1#器件降低了约两个数量级, 但 3#器件存在明显的肖特基结, 会对器件的光电效率产生影响, 而 4#器件通过表面浅扩散二次掺杂从而实现欧姆接触, 器件综合性能最好。不同器件的 I-V 特性表明帽层材料的选择对器件暗电流有较大影响, 即帽层材料具有一定的钝化作用, 可以减小器件的表面漏电流, 禁带宽度

越大，效果越明显。

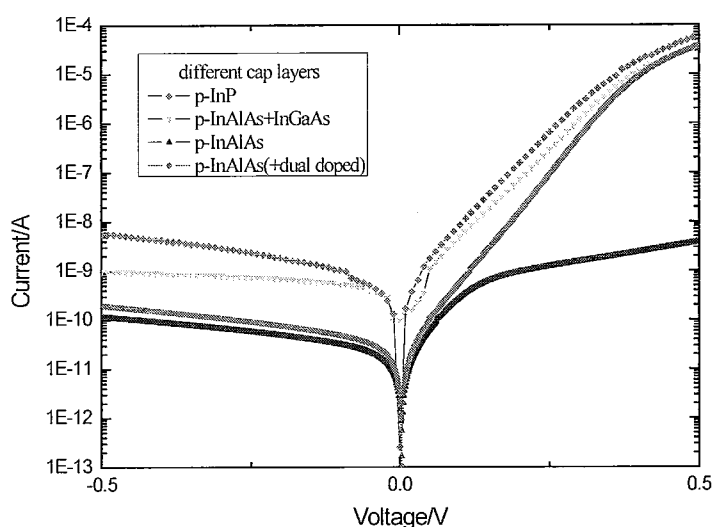


图 2.4.3 4 个样品的 I-V 特性曲线

-Fig2.4.3 I-V characteristics of sample 1-4

表 2.4.2 不同的样品在-0.1V 和-0.01V 时的暗电流密度大小

Table2.4.2 The current density of different samples at -0.1V and -0.01V

	帽层材料	暗电流密度@-0.1V	暗电流密度@-0.01V
1	p-InP	10.2 μ A/cm ²	1.35 μ A/cm ²
2	P-InAlAs+InGaAs	5.45 μ A/cm ²	984nA/cm ²
3	P-InAlAs	317nA/cm ²	79.3nA/cm ²
4	P-InAlAs(二次掺杂)	488nA/cm ²	116nA/cm ²

对于 4#器件，分析其零偏压附近范围内的微分电阻 R ，假设隧穿电流的影响可以忽略，考虑热电阻，有如下形式，第一项表示扩散电流与产生复合电流引起的电阻之和，第二项表示并联电阻：

$$\frac{1}{R_{thermal}} = A \exp(qV / nkT) + \frac{1}{R_{sh}} \quad (2.7)$$

如图 2.4.4 所示，拟合可得 $1/R=3.81E-10\exp(x/0.0285)+3.32E-10$ ，由式 (2.7) 得到理想因子与并联电阻 $n=1.12$ ， $R_{sh}=3.01E9\Omega$ 。由此可得扩散电流、产生复合电流之和，以及分路电流，4#器件总电流表达式如式 (2.8)。对比拟合结果与测试 I-V 曲线，两者非常吻合，表明之前的假设是正确的，此时隧穿电流可以忽略，由理想因子 n 的大小接近 1 可知扩散电流是主要电流机制，另外并联电阻引起的

分路电流也不可忽略，在正偏压大于 0.4V 时，由于串联电阻及大电流效应拟合曲线与实验曲线发生偏离，如图 2.4.5 所示。

$$I = 2 \times 10^{-11} \left(\exp \left(\frac{qV}{1.12kT} \right) - 1 \right) + \frac{V}{3.01 \times 10^9} \quad (2.8)$$

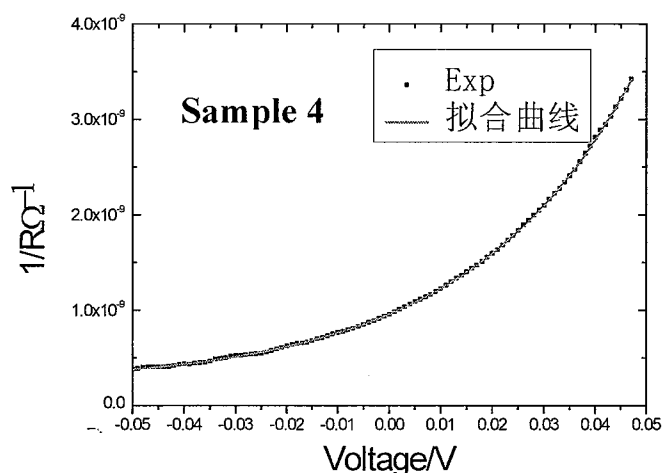


图 2.4.4 1/R 在零偏附近随偏压的变化

Fig2.4.4 1/R vs V near $V_{bias}=0V$

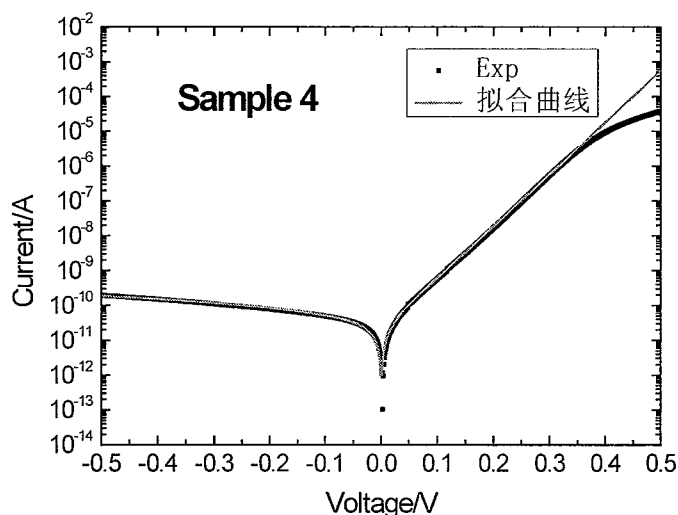


图 2.4.5 T=300K 时，4 号器件 I-V 实验曲线和理论拟合曲线

Fig2.4.5 At T=300K, the I-V characteristic of experiment and theoretical fitting of different dark current mechanism for sample 4

对于 3#器件来说，当正向偏压较大时，PN 导通，3#器件电流电压特性基本由肖特基结的伏安特性决定，从图 2.4.3 中也可以看出，根据式 (2.4)，对较大偏压下的电流-电压曲线进行拟合，如图 2.4.6 所示，在正向偏压较大时非常吻合，所得电流表达式如下，提取势垒高度为 0.65eV，与 2.3 节中所得结果基本吻合。

$$I = 3.45E-10 \exp\left(-\frac{V}{0.03}\right) \exp\left(\frac{V}{0.026} - 1\right) \quad (2.9)$$

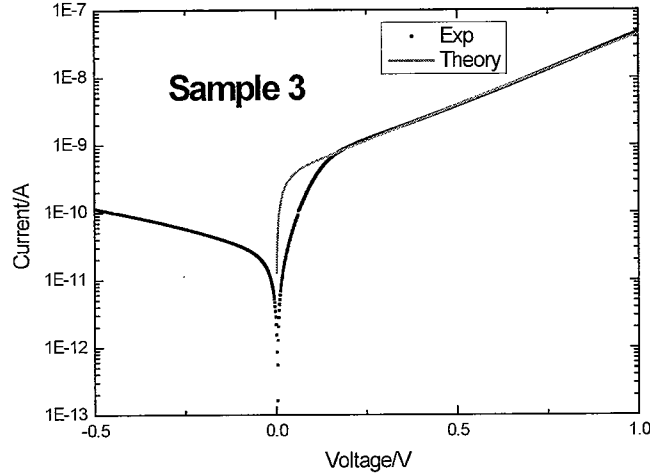


图 2.4.6 正向偏压较大下电流-电压半对数曲线线性拟合

 Fig2.4.6 linear fitting of $\ln I$ - V curve at higher forward bias voltage

在反偏压及正向偏压较小时, PN 未导通, 此时 3#器件电流电压特性由 PN 结的伏安特性决定, $-0.5V \sim 0.1V$ 的拟合结果如图 2.4.7 (左) 所示, 电流形式如下式, 综合以上拟合结果得到 3#器件在 $-0.5V$ 到 $0.5V$ 的电流机制(图 2.4.7 左)。

$$I = 1.5 \times 10^{-11} \left(\exp\left(\frac{qV}{1.2kT}\right) - 1 \right) + \frac{V}{5.99 \times 10^9} \quad (2.10)$$

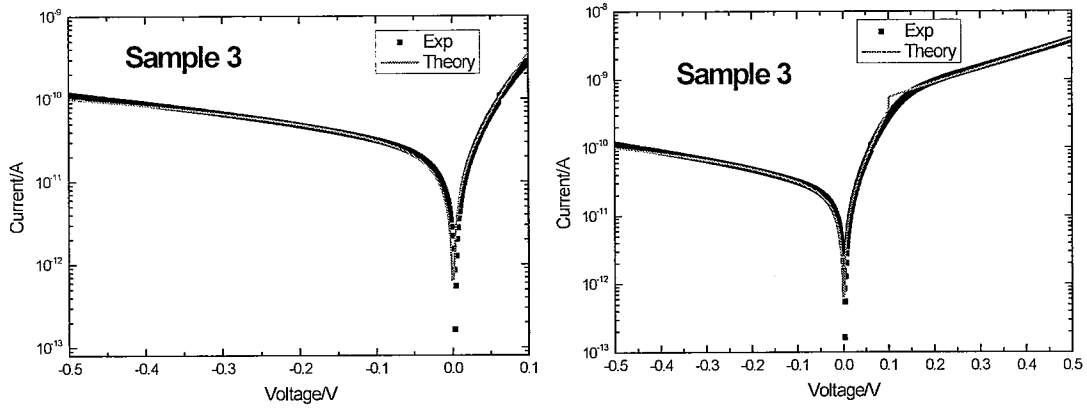

 图 2.4.7 $T=300K$ 时, 3 号器件 I - V 实验曲线和理论拟合曲线($-0.5V \sim 0.5V$)

 Fig 2.4.7 At $T=300K$, the I - V characteristic of experiment and theoretical fitting of different dark current mechanism for sample 3

1、2#器件类似 4#器件, 对其暗电流进行拟合, 结果如图 2.4.8 所示, 电流表达式分别如下两式:

$$I = 3 \times 10^{-10} \left(\exp\left(\frac{qV}{1.25kT}\right) - 1 \right) + \frac{V}{1.2 \times 10^8} \quad (2.11)$$

$$I = 5 \times 10^{-10} \left(\exp \left(\frac{qV}{1.48kT} \right) - 1 \right) + \frac{V}{1 \times 10^9} \quad (2.12)$$

从公式 2.8-2.12 电流表达式中, 表明 P-InP 帽层器件 (1#) 的分路电流远大于其他器件, 宽禁带 InAlAs 帽层对分路电流的抑制比较明显, 另 3、4#器件的扩散电流和产生复合电流相比于 1#、2#器件也降低了 1 个数量级左右。2#器件的分路电流明显大于 3#和 4#, 可能原因由于 InGaAs 接触层引入, InGaAs 接触层禁带宽度较小, 增大了表面产生复合几率, 从而使这项电流增大。对比 3、4#器件的暗电流机制, 可知浅扩散二次掺杂对材料造成了一定的损伤, 增加了复合中心, 从而使器件暗电流增大了 50%左右。

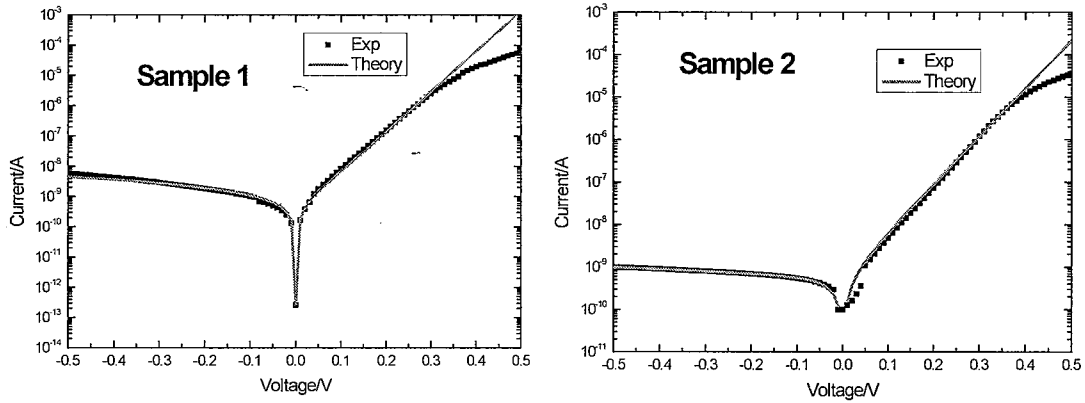


图 2.4.8 T=300K 时, 1、2 号器件 I-V 实验曲线和理论拟合曲线(-0.5-0.5V)

Fig 2.4.8 At T=300K, the I-V characteristic of experiment and theoretical fitting of different dark current mechanism for sample 1 and 2

2.4.2 光谱特性

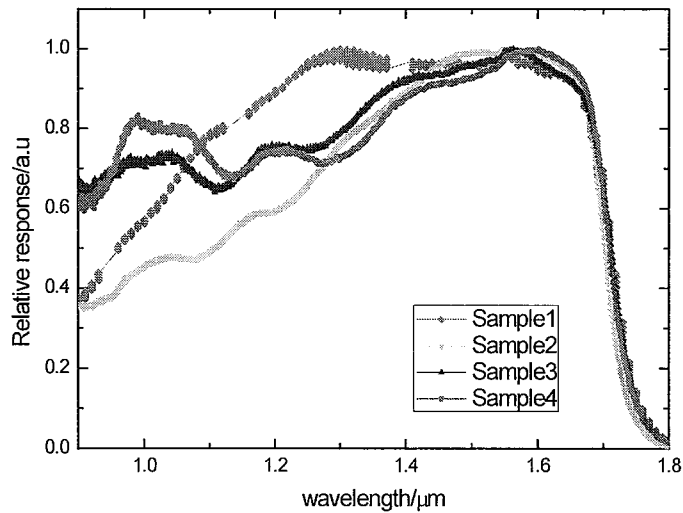


图 2.4.9 光敏芯片典型响应光谱曲线

Fig2.4.9 The typical optical responsivity of the photodetectors

采用傅里叶光谱仪测试器件的响应光谱, 如上图所示分别为 4 种器件的典型校正归一化响应光谱曲线, 其截止波长基本相同。2#器件短波长方向响应明显减弱, 分析为帽层中的 InGaAs 的吸收作用, 短波长方向的光被吸收后, 在表面复合掉了, 没能转化为有效的光生载流子; InAlAs 帽层台面型器件在短波方向的响应最强, 分析为 InAlAs 帽层的禁带宽度大, 其表面复合几率较小。

根据相对响应光谱按公式 2.13^[111]计算 900K 黑体下器件的 g 因子, 其中: $\sigma=5.673 \times 10^{-12} \text{ W}/(\text{cm}^2 \text{ K}^4)$; $T_B=900\text{K}$, $G(\lambda)$ 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, 计算 g 因子如表 2.4.3 所示。

$$g = \frac{G(\lambda_p) \int_0^{\infty} \phi(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/(\lambda T)} - 1)} d\lambda} = \frac{G(\lambda_p) \sigma T_B^4}{\int_0^{\infty} G(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{c_2/(\lambda T_B)} - 1)} d\lambda} \quad (2.13)$$

表 2.4.3 4 种器件的 g 因子大小

Table 2.4.3 g index of the samples

编号	1	2	3	4
g 因子 (@RT)	68	73	69	70

2.4.3 峰值量子效率

对样品进行响应信号测试, 测试具体条件包括黑体温度为 900K、调制频率为 800Hz, 黑体孔径 Φ 为 8mm, 环境温度 T_0 为 293K, 测试距离 19cm, 测试信号如表 2.4.4 所示, 并根据式 2.14 计算探测器的峰值响应率及量子效率。

$$R_\lambda = gR_{bb} = \frac{gI_s \times 4L^2}{\sigma(T_B^4 - T_0^4) \times d \times A_D} \quad \eta = hcR_\lambda / q\lambda \quad (2.14)$$

表 2.4.4 4 种器件的峰值量子效率

Table 2.4.4 QE(at peak wavelength) of the samples

编号	信号/mV(1E-8)	峰值响应率	峰值量子效率/%
1	90	1.08	83.6
2	94	1.21	94
3	66	0.80	62.5
4	104	1.29	99

注: 测试过程中可能引入杂散光或器件光敏元扩大, 但各器件测试条件相同, 因此峰值量子效率虽然不是真实的值, 但具有相对比较的参考价值。

由于存在肖特基结, 3#器件的量子效率最低, 通过引入 InGaAs 接触层(2#), 器件的量子效率有了明显改善, 但器件的暗电流增加了 1 个数量级。为此, 进一步通过浅扩散进行二次掺杂的方法, 解决宽禁带 p-InAlAs 帽层的欧姆接触问题, 研制了 p-InAlAs 帽层器件 (4#), 不仅器件的暗电流降低, 而且量子效率也得到了提高, 从而使器件的性能得到较大的提高。

2.4.4 串联电阻对光电流影响的分析

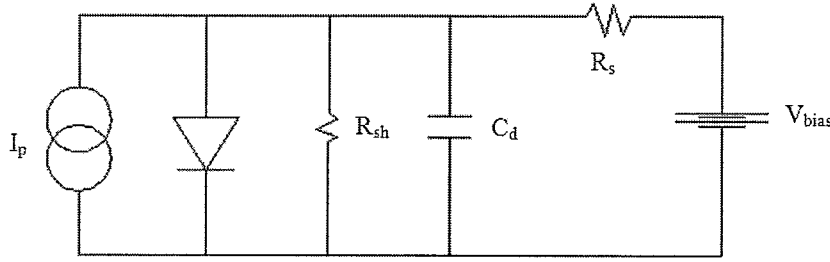


图 2.4.10 实际 pn 结等效电路简化图

Fig 2.4.10 Equivalent circuit simplified diagram of an actual pn junction

考虑实际的 pn 结的等效电路图如上图所示, 其中 R_{sh} 为并联电阻, R_s 为串联电阻, C_d 为附加电容, I_p 为光电流, V_{bias} 为外加偏压。考虑低频情况, 不考虑 C_d , 则总电流为:

$$I_{sc} = I_p + I_0 (\exp(q(V_{bias} - I_{sc} R_s) / nkT) - 1) + (V_{bias} - I_{sc} R_s) / R_{sh} \quad (2.15)$$

在 $V_{bias} = 0V$ 时, $I_{sc} R_s$ 较小时, 则

$$I_{sc} = I_p + I_0 (\exp(-qI_{sc} R_s / nkT) - 1) - I_{sc} R_s / R_{sh} \approx I_p - I_{sc} R_s / R_d - I_{sc} R_s / R_{sh} \quad (2.16)$$

其中 R_d 为理想二极管零偏电阻, 由此可得当 I_{sc} 和 R_s 较小时:

$$\frac{I_{sc}}{I_p} = \frac{R}{R + R_s}, \text{ 其中 } \frac{1}{R} = \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_{sh}} \quad (2.17)$$

4 种样品的 R_d 及 R_{sh} 值如下表所示:

表 2.4.5 4 种样品的 R_d 、 R_{sh} 值
Table 2.4.5 R_d and R_{sh} of the samples

	1	2	3	4
R_d/Ω	5.73E7	8.71E7	1.55E9	1.04E9
R_{sh}/Ω	1.2E8	1E9	5.99E9	3.01E9

则 I_{sc}/I_p 随 R_s 的变化关系如图 2.4.11 所示。串联电阻较大时, 会强烈影响光

电流的收集,从而使总电流减小,对于不同的器件,零偏电阻及并联电阻大小不同, R_s 的影响也不同, R_d 、 R_{sh} 越大, R_s 的影响越小,对于 3#器件,串联电阻非常大,而且可能不是简单的上述关系,如肖特基结的影响。

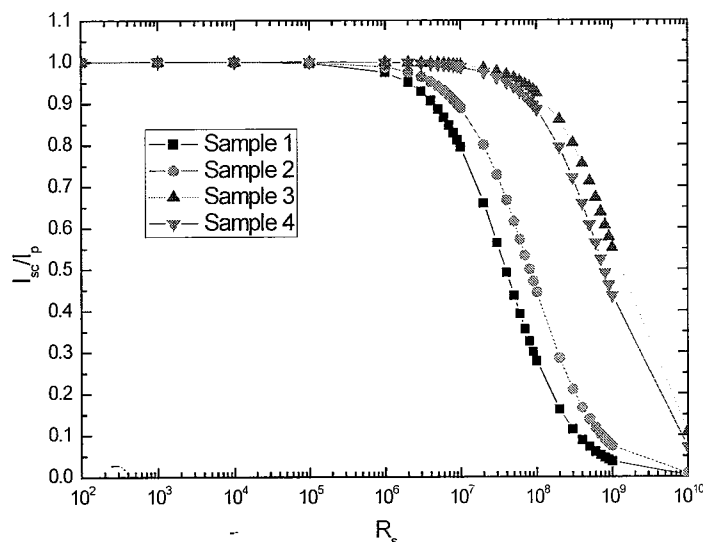


图 2.4.11 I_{sc}/I_p 随 R_s 的变化关系

Fig2.4.11 I_s/I_p vs. R_s

2.5 本章小结

本章首先介绍了欧姆接触形成的方法及其原理,对 p-InP 的金-半接触特性进行了研究,通过优化退火工艺,实现了低阻欧姆接触,比接触电阻为 $7.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$,并对电极的表面及深度分布进行了分析。之后对 p-InAlAs 的金-半接触进行了研究,通过优化金属膜系,采用浅扩散技术进行二次掺杂,实现了该材料上的低阻欧姆接触比接触电阻为 $8.88 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。采用 4 种不同的帽层材料制备了 10×1 器件,测试并分析了器件的光电性能。结果表明采用 p-InAlAs 帽层并进行二次掺杂的材料制备的器件具有较低的暗电流以及较高的量子效率。并分析了串联电阻对不同器件光电转化效率的影响。

第三章 台面型延伸波长 InGaAs 探测器关键技术研究

台面成型及其表面钝化是台面型器件制备的两种关键技术。表面钝化是制备 InGaAs 台面型探测器最关键工艺之一，钝化效果的好坏，尤其是台面的侧面钝化效果，直接影响器件表面的复合速率，进而影响探测器的暗电流、探测率和稳定性等。表面钝化问题一直是 III-V 族半导体工艺的难题之一，高的表面态密度和表面复合速率一直制约着 III-V 族半导体器件的发展。对于台面型器件来说，钝化的目的是降低表/侧面态密度，减少表/侧面复合速率，从而降低探测器的暗电流、提高器件探测率。另外钝化层还要有以下特性：绝缘性好；能长期阻止有害杂质对器件表面的沾污；热膨胀系数与衬底匹配；钝化膜的组份和厚度均匀性好；良好稳定的机械、化学、电学等性能。对于延伸波长 InGaAs 探测器，其 In 组分高达 0.8-0.83，与 InP 衬底有较大的晶格失配，如 In 组分为 0.83 的 InGaAs 与 InP 有+2.06%的失配，材料内部引入大量的缺陷，增加了复合中心，而且表面复合速率也增大，导致了暗电流的增加及量子效率的降低，因此对高质量的表面钝化技术提出了更高的要求。另外台面成型也是制备 InGaAs 台面型探测器关键工艺之一，台面成型的目标是获得图形保真度高、横向钻蚀小、对材料损伤小、均匀性好的台面结构。主要有湿法腐蚀和干法刻蚀两种技术。干法刻蚀具有较多的优点，如何优化干法刻蚀工艺并结合湿法腐蚀及退火等工艺减小台面成型带来的损伤，对于改善器件性能具有重要的作用。本章对延伸波长 InGaAs 探测器的 ICPCVD 低温钝化技术进行了研究，并对台面成型去损伤做了初步的研究。

3.1 器件钝化机理及其方法

受光或电等能量的激发，半导体内部产生非平衡载流子电子-空穴对，停止激发过程后，由于半导体的内部作用，被激发到导带的电子又回到价带，电子-空穴对消失，由非平衡态恢复到平衡态，这一过程称为非平衡载流子的复合。

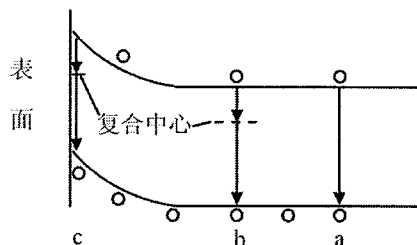


图 3.1.1 载流子的各种复合机制

Fig 3.1.1 recombination mechanisms of carriers

根据复合过程发生的位置，可以区分为体内复合和表面复合，如图 3.1.1 所示。复合一般有以下几种复合方式：直接复合（辐射复合）、带间俄歇复合、SRH 复合（通过缺陷能级的复合）。在直接带隙半导体中，一般辐射复合占主导地位，

非平衡载流子的寿命为 $\tau_{radiative} = \frac{1}{B(n_0 + p_0 + \Delta n)}$ ，非直接带隙则 B 值较小，一个

过程涉及的粒子数目越大，引起复合的可能性就越小。在带间俄歇电子与空穴复合，将过剩的能量传送给第三个载流子（导带中的电子或价带中的空穴），而不是发射光子。因此，这个复合过程涉及到第三个载流子，第三个受激发的载流子通过多种碰撞过程发射声子，再回到它的初始能量状态。Shockley-Read-Hall 理论（SRH 理论）认为：杂质，位错等在半导体的禁带中形成一定的能级（复合中心能级）。在假设的基础上，对位于能态 N_t 的单能级缺陷，SRH 理论预期的复合速率 U_t 如下^[110]：

$$U_t = \frac{\nu_{th} N_t (np - n_i^2)}{\frac{n + n_t}{\sigma_p} + \frac{p + p_t}{\sigma_n}} = \frac{np - n_i^2}{\tau_{p0}(n + n_t) + \tau_{n0}(p + p_t)} \quad (3.1)$$

浅能级缺陷的寿命要比深能级缺陷的大很多。靠近带隙中央的缺陷是最有效的复合中心。

表面复合是指半导体表面发生的复合过程。半导体表面表现了晶格对称性可能失衡的极端状况，引入非饱和（悬挂）键。表面陷阱电荷是由表面处的非饱和键（悬挂键）产生的；半导体表面处的晶格缺陷、机械损伤和杂质沾污都可能在禁带中引进能级，使表面陷阱电荷密度增加。表面陷阱分为施主和受主两种。实验表明，低能电子束和离子束的轰击会产生分立能级的表面陷阱电荷。表面陷阱对表面复合起决定性的作用。表面陷阱电荷不同于固定氧化物电荷，当表面电势改变，费米能级与表面能级相对位置变化时，界面陷阱中电子填充情况也发生变化，而引起界面陷阱电荷变化，产生电容效应。从复合机制上讲，表面复合属于间接复合。较高的复合速度，会使更多的注入的载流子在表面复合消失，以致严重的影响器件的性能。因此大多数的器件制备过程中，总是希望尽量降低表面复合速度，从而改善器件性能。

有两种根本不同的钝化技术来减少半导体表面的复合速率。

a. 优化表面态特性：

SRH 复合速率正比于缺陷密度。从技术上讲，可以通过沉积或生长一层合

适的钝化薄膜，中和表面的悬挂键，来猛烈地降低表面态密度 N_{st} ，优化表面态特性，从而减小表面的复合速率。

b. 场效应钝化：

SRH 复合过程涉及到一个电子和一个空穴，在表面电子和空穴浓度近似相等的情形下，得到最大的表面复合速率。相反地，如果其中一种成分的浓度极大大幅度地降低，那么，复合速率也大幅度降低。当电子和空穴运载电荷时，一种电荷（电子或空穴）载流子表面浓度的减少可以通过在半导体表面下形成一个内建电场容易地实现。其一在材料表面下制造一个掺杂分布，杂质原子在晶体晶格里的空间非均匀浓度分布产生内建电场。如果掺杂杂质与材料原有杂质极性相同，那么这种掺杂产生一个高低结（ p^+p 或 n^+n ）。其二通过在顶部绝缘层中引入固定电荷的方法进行场效应钝化。

在选取钝化方式上已有大量的、非常有意义的研究工作，如化学钝化^[112-115]和介质膜钝化^[116,117]。常用的钝化薄膜材料有 SiO_2 、 Si_3N_4 、 Al_2O_3 、 ZnS 、聚酰亚胺以及双层或多层膜系结构等。由于不同的介质薄膜本身的禁带宽度、纯净度、均匀性、与衬底的应力和内部的缺陷等，都是影响钝化效果的重要因素。常用的薄膜生长方式包括：化学气相沉积（ICPCVD, PECVD）、热蒸发、溅射（Ion-beam sputtering, Magnetron sputtering）等^[118]。短波红外 InGaAs 探测器在优化器件钝化介质薄膜方面，前期做了大量的工作，主要集中在 SiN_x （PECVD）、单层聚酰亚胺、硫化+单层聚酰亚胺、硫化+ ZnS /聚酰亚胺双层钝化、硫化+ In_2S_3 /聚酰亚胺双层钝化和 SiN_x /聚酰亚胺双层钝化等方面，并对它们的钝化效果进行了比较，其中采用 SiN_x 薄膜钝化的器件性能较好^[119-121]。 SiN_x 薄膜作为一种重要的薄膜材料，具有优良的光电性能、钝化性能、机械性能和对杂质离子的掩蔽能力，对 H_2O 、 O 、 Na 、 Al 、 Ga 、 In 等都具有极强的扩散阻挡作用，是一种高效的器件表面钝化材料，已被广泛应用在半导体工艺中。

采用PECVD（等离子体增强化学气相沉积技术）生长的 SiN_x 虽然有较多优点，但相对ICPCVD（感应耦合等离子体化学气相沉积），生长温度仍较高（ $\sim 330^\circ C$ ），离子能量较大，容易对材料表面造成损伤，尤其是高In组分的InGaAs延伸波长材料缺陷较多，影响更明显，钝化效果不明显，侧面漏电较大。因此本章对比研究了两种不同方法生长的 SiN_x 薄膜对延伸波长器件的钝化效果，测试分析了器件暗电流密度随P/A的变化关系。

3.2 ICPCVD 的原理及优势

等离子体增强CVD过程使用等离子体能量来产生并维持CVD反应，使用平行板反应器，如图3.2.1所示，样品放置在下电极上，上电极上施加射频功率(RF)，从而在电极板之间形成等离子体，而等离子体化学活性很强，容易在样品上生长出期望的薄膜。PECVD的腔体内部存在电场，因此等离子体在下降过程中会加速，离子能量较大，不仅会损伤材料，而且会破坏Si-N或Si-H键，增加SiN_x的压应力，从而使钝化效果退化。在薄膜淀积过程中，下电极一般需要加热至300~400℃，也容易产生温度梯度，使薄膜均匀性变差。另外由于等离子体具有一定的方向性，因此对台阶的覆盖情况较差。

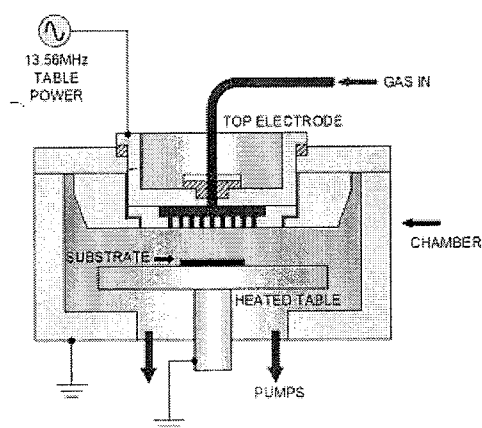


图3.2.1 PECVD系统的示意图

Fig3.2.1 Schematic diagram of PECVD system

本章中采用的ICPCVD设备为英国牛津仪器的ICPCVD Plasma lab system 100，示意图如图3.2.2所示，该设备采用圆筒式分布线圈，分布在腔的侧面，通过交流电感应耦合磁场与电场，激发产生等离子体。该方式可以在低的工作压力（1-10mTorr）下产生高密度的等离子体，等离子体密度取决于ICP功率的大小，等离子体分布均匀，而且加入了静电屏蔽层，使等离子体区成为等势场区，离子下降速度慢，基本属于自由降落，离子的能量也较低，因此对样品的损伤很小，可以淀积均匀性好、损伤小、台阶侧面覆盖好的SiN_x薄膜。另外方法淀积SiN_x的温度也较低，低于150℃。综上所述，相对PECVD而言，ICPCVD具有多方面的优势。

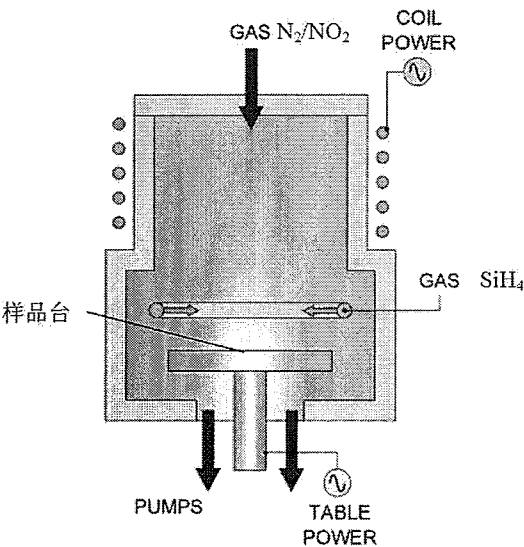


图3.2.2 ICP-CVD系统的示意图

Fig3.2.2 Schematic diagram of ICP-CVD system

3.3 不同方法生长的 SiNx 膜元素分析

为了研究不同生长方法生长的 SiNx 膜的元素构成，采用 SIMS（二次离子质谱）对生长在 InP 衬底上的不同 SiNx 膜进行了元素的深度分析，样品的具体生长参数见表 3.3.1 所示。二次离子质谱技术是测量深度成分分布的一种有效的工具。在二次离子质谱仪中入射粒子是离子，用能量为 500eV~30keV 的一次离子束轰击固体表面，使其表面原子激发并溅射出来，溅射出来的颗粒有中性的，有带正电荷和带负电荷的，利用能量分析器和质量分析器对二次离子进行不同质荷比的分离，从而获得固体表面化学组成和化学态的信息。

表 3.3.1 SIMS 测试样品

Table 3.3.1 Samples for SIMS test

样品编号	1	2	3
样品生长方法	PECVD	ICP CVD highrate	ICP CVD lowrate
生长参数			
衬底温度/℃	330	75	75
ICP 功率/W	/	2000	750
RF 功率/W	40	0	0
SiH ₄ 流量	30mL/min	45 sccm	15.5 sccm
N ₂ 流量	900mL/min	38 sccm	12.5 sccm
腔压/mTorr	/	8	12
生长速率	~16nm/min	~100nm/min	~16nm/min

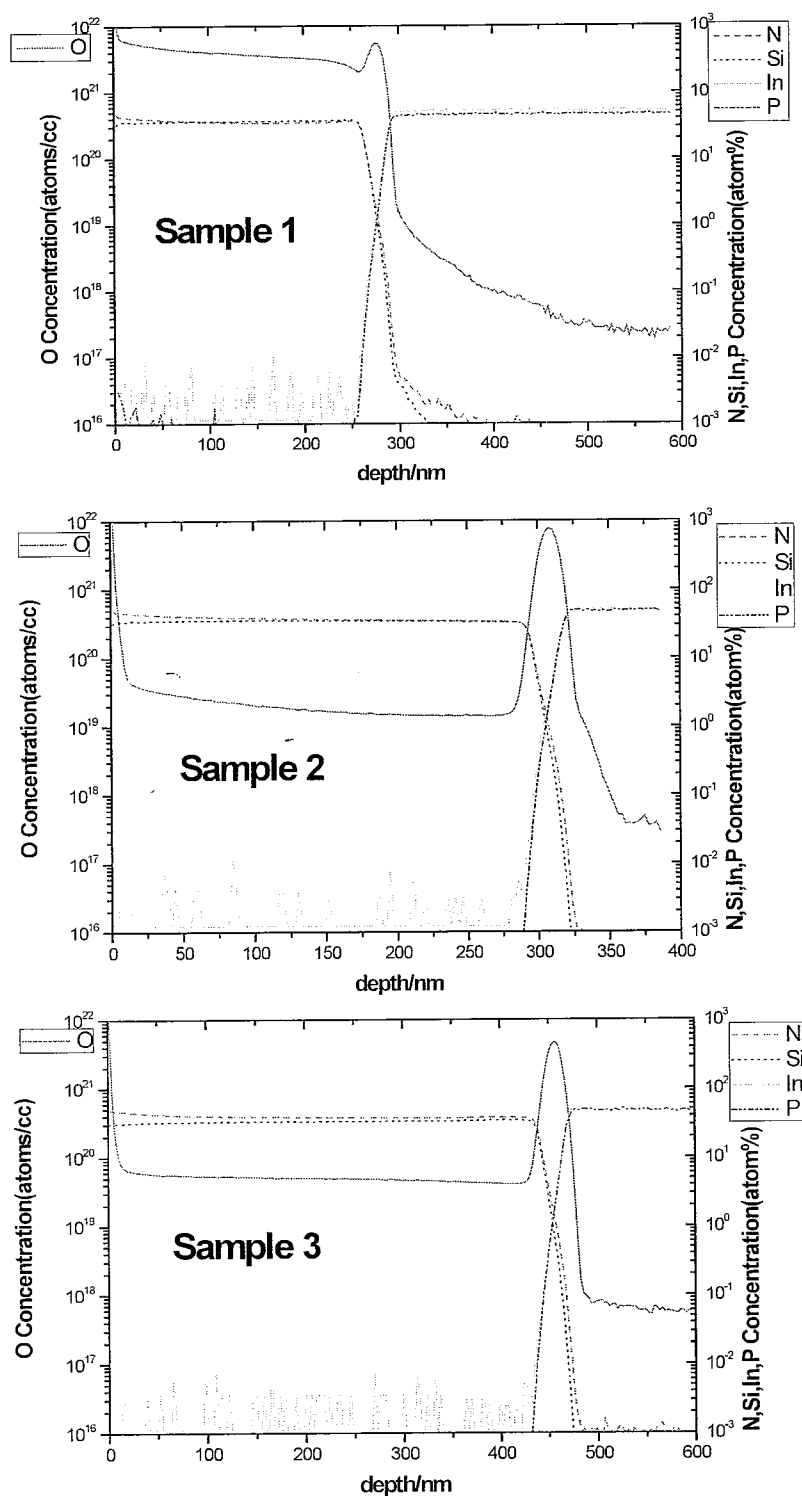

 图 3.3.1 3 种 SiN_x/InP 样品的 SIMS 元素深度分布图

Fig3.3.1 SIMS depth-composition profiles for Sample 1 (SiN_x layer formed by PECVD), Sample 2 (SiN_x layer formed by ICPCVD with highrate), Sample 3 (SiN_x layer formed by ICPCVD with lowrate)

如图 3.3.1 所示为 3 个样品的 SIMS 元素 (Si、N、O、In、P) 深度分布图 (注: 其中在 InP 界面处的测试结果不准确)。3 个样品的 O 元素的含量分布相差很大, PECVD 生长的 SiN_x 的 O 元素含量比 ICPCVD highrate 及 ICPCVD lowrate 生长

的 SiN_x 的 O 含量约大 2 个数量级, 而且贯穿整个 SiN_x 薄膜。O 元素含量多, 可能会引入一些表面态, 从而使钝化膜的钝化效果退化。3 个样品的 Si/N 分别为 1, 0.9 和 0.8, 如图 3.3.2 所示, 表明 ICPCVD lowrate 生长的 SiN_x 最接近 Si_3N_4 。

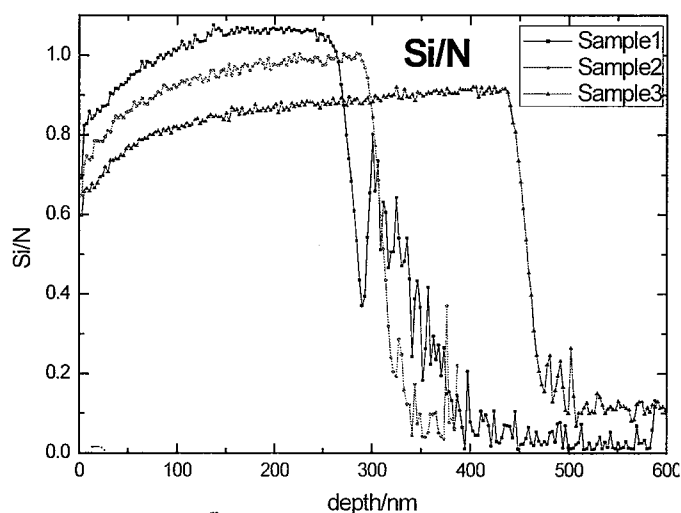


图 3.3.2 3 个样品的 Si/N 随深度的分布

Fig3.3.2 Si/N vs. depth for three samples

3.4 不同钝化膜及工艺的测试结构器件性能研究

3.4.1 器件制备

为了验证 SiN_x 膜对器件的钝化效果, 制备了 P/A 测试结构器件, 如图 3.4.1 所示。所用材料为 GSMBE 生长的 PIN 结构 $\text{InAlAs}/\text{InGaAs}/\text{InAlAs}$ 双异质结材料, 材料具体参数见表 3.4.1。

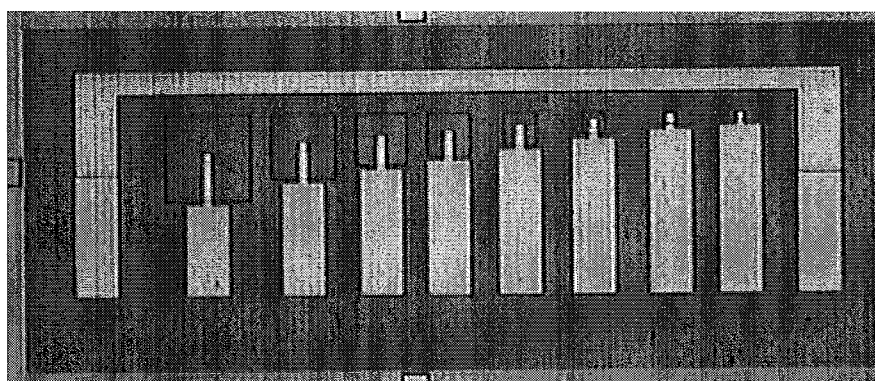


图 3.4.1 P/A 测试器件的照片

Fig 3.4.1 The photograph of the P/A test detectors

表 3.4.1 材料结构和参数

Table 3.4.1 The structure and parameter of materials

	导电类型	掺杂物质	厚度 (μm)	掺杂浓度(cm^{-3})
$\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$	P^+	Be	0.6	$2\text{E}18$
$\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$	n^-	Si	1.5	$3\text{E}16$
$\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As buf}$	N^+	Si	1.9	$3\text{E}18$
InP substrate	S.I.	Fe	350 ± 20	

表 3.4.2 测试结构器件的各光敏元尺寸

Table 3.4.2 The areas of the photosensitive elements

	1	2	3	4	5	6	7	8
光敏元尺寸/ μm^2	200×200	150×150	120×120	100×100	75×75	50×50	30×30	20×20

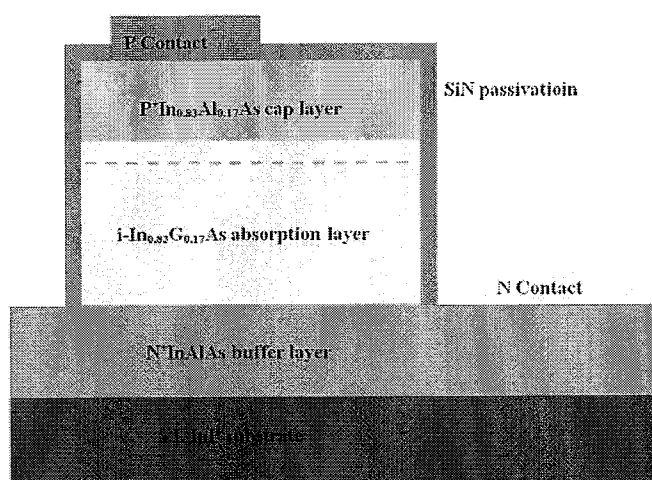


图 3.4.2 台面型 PIN 探测器示意图

Fig3.4.2. Scheme of the mesa PIN photodiode.

测试结构的光敏元为方形结构, 大小从 $200\times 200\mu\text{m}^2$ 依次到 $20\times 20\mu\text{m}^2$, 具体见表 3.4.2 所示。台面器件的剖面示意图如图 3.4.2 所示。器件制备过程中所用的 SiN_x 钝化膜有三种: PECVD 生长; ICPCVD highrate 模式生长; ICPCVD lowrate 模式生长。三种方法的具体温度、工艺参数见 3.3 节中的表 3.3.1。生长 SiN_x 之前都采用 HF 缓冲液对样品进行处理, 去除表面氧化层, 再立刻进行 SiN_x 钝化膜的生长。首先采用工艺 I 制备了三个样品, 钝化膜依次为上述三种 SiN_x 膜, 之后采用改进工艺 II 制备了第四个样品, 其 SiN_x 钝化膜采用 ICPCVD lowrate 生长, 具体工艺步骤见图 3.4.3 所示, 四个样品的编号见表 3.4.3 所示。采用 ICP 刻蚀技

术实现台面的成型，刻蚀台面为浅台面结构，并用非选择性湿法腐蚀 (H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O =1:3:5)去除刻蚀残留物及修复部分晶格损伤，刻蚀所用掩膜为 PECVD 生长的 SiN_x 膜 (400nm)。p 电极采用 Ti/Pt/Au (20nm/30nm/20nm)，退火条件为 420°C &40s，退火气氛为 N_2 。器件的加厚电极仍采用 Cr/Au (20/300nm)。工艺 I 过程中钝化膜要经历快速热退火的过程，而改进工艺 II 过程中先生长 p 电极并退火，再进行钝化膜的生长，钝化膜不经过高温过程，钝化效果不会受到影响。

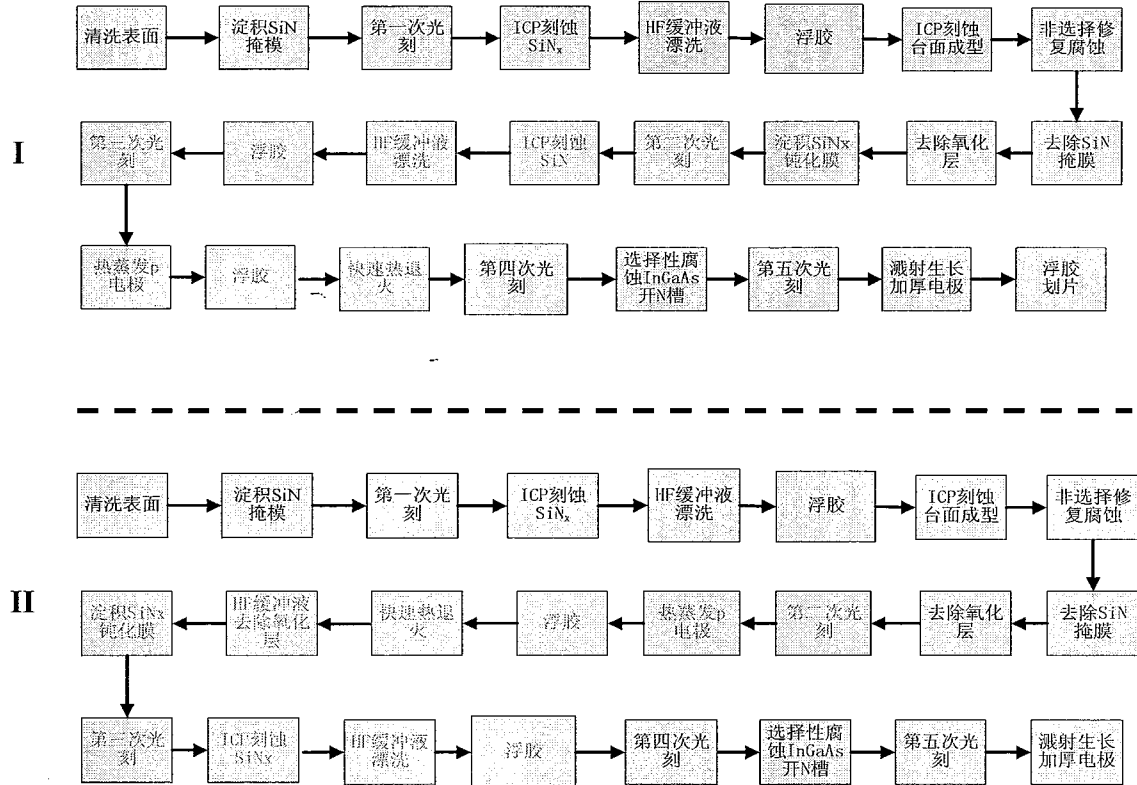


图 3.4.3 器件制备流程图 (I: 传统工艺; II: 改进工艺)

Fig3.4.3 The fabrication process of the samples (I: conventional process; II: improved process)

表 3.4.3 四种样品所用 SiN_x 钝化膜及其制备工艺

Table 3.4.3 SiN_x passivation layers and process for the samples

样品编号	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D
SiN_x 钝化膜生长方式	PECVD	ICPCVD highrate	ICPCVD lowrate	ICPCVD lowrate
工艺	I	I	I	II

3.4.2 I-V 特性

I-V 测试系统是 Agilent B1500A 半导体器件分析仪，样品置于变温杜瓦内进

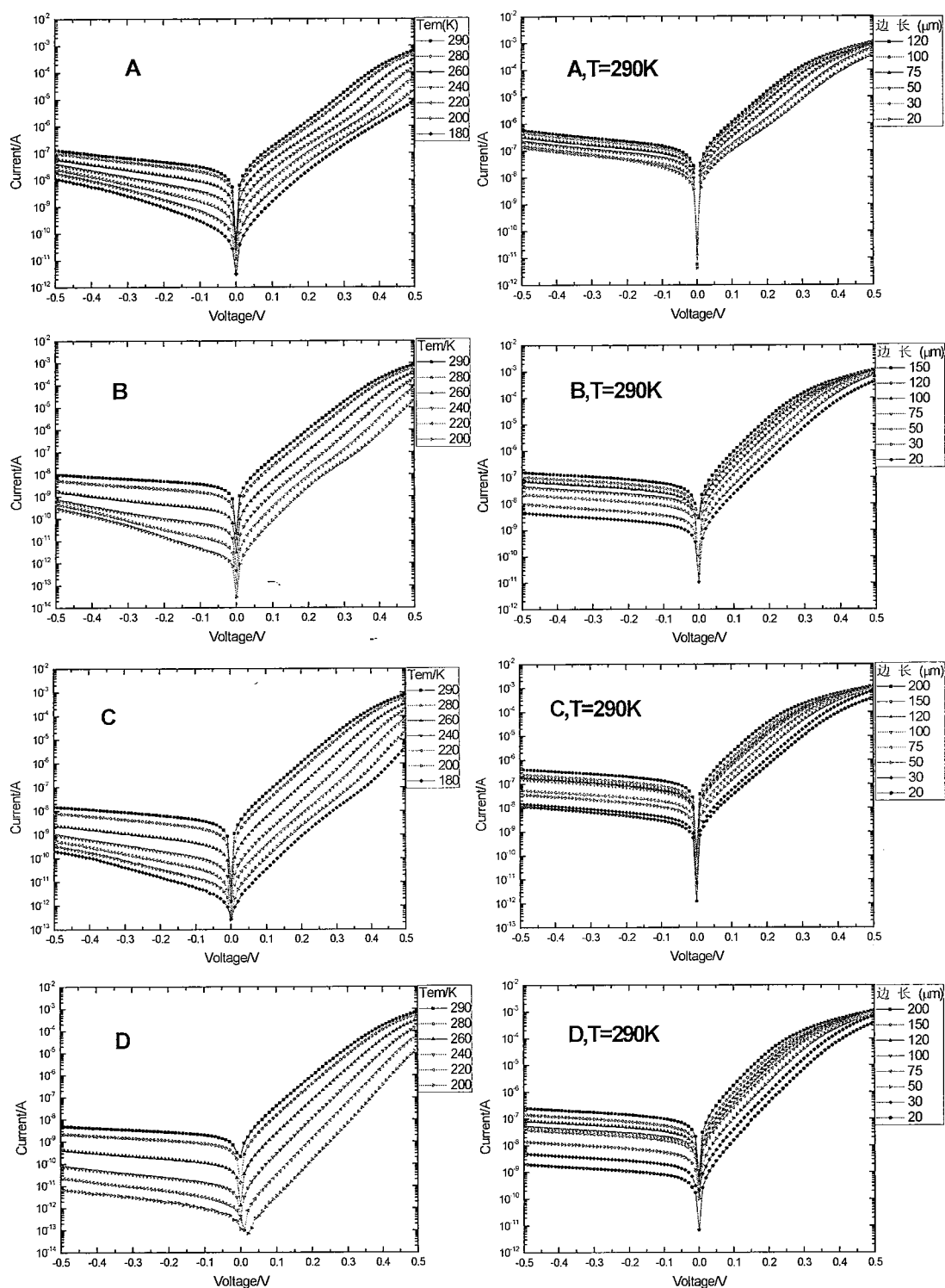


图 3.4.4 四种样品在不同温度下(光敏元为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$) 和不同光敏元大小(温度为 290K) 的 I-V 特性曲线

Fig 3.4.4 The I-V plots of the Sample A, B, C, D at different temperatures(area: $30 \times 30 \mu\text{m}^2$) and different areas($T=290\text{K}$)

进行测试。测试样品在不同温度下(180K-290K), 不同 P/A 值下的 I-V 特性曲线, 如图 3.4.4 所示。图中左边为光敏元 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 器件的变温 I-V 特性, 图右为温度在 290K 时各个器件随 P/A 变化的 I-V 特性。I-V 特性是验证钝化效果最为有

效的方法之一,由上图可以很明显的看出,相比 PECVD 生长的 SiN_x 钝化膜,采用 ICPCVD 进行低温生长的 SiN_x 膜使器件暗电流明显降低,温度越低,这种现象越明显。为了直观的展现这种现象,将 4 种器件的 I-V 曲线放在一起进行对比,如图 3.4.5 所示为在 290K 和 220K 温度下不同样品的 I-V 曲线(光敏元大小为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$),在 220K 时,样品 D 的暗电流相比样品 A 下降了约 3 个数量级。在 -100mV、200K 时样品 D 的暗电流密度达到约 $100\text{nA}/\text{cm}^2$ 。另外对比样品 C 和 D 的 I-V 曲线可以看出,采用传统工艺,高温过程对钝化膜产生了一定的影响,使 ICPCVD lowrate 生长的 SiN_x 膜的钝化效果退化。

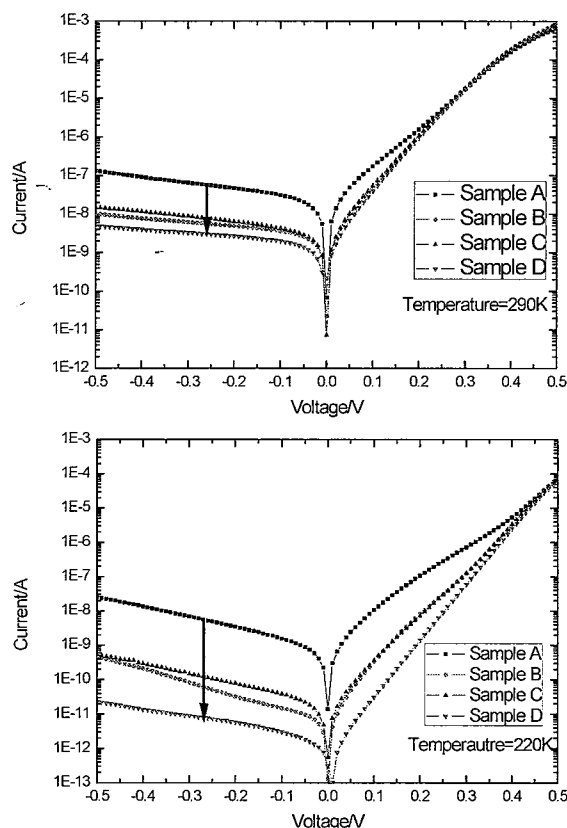


图 3.4.5 温度为 290K 和 220K 时四种样品的 I-V 特性曲线对比

Fig.3.4.5. The I-V plots of the Sample A, B, C, D at 290K and 220K.

3.4.3 暗电流密度随 P/A 的关系

台面型探测器暗电流主要来源于:缓冲层与吸收层的界面处、吸收层内部、耗尽区、吸收层与帽层的界面处、帽层与钝化层界面处、钝化层表面以及台面侧表面。在不同温度或偏压下,暗电流主要成分是不同的。暗电流和暗电流密度可表示为下式^[122]:

$$I = J_B A + J_s P$$

$$J = \frac{I}{A} = J_B + J_s \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

其中 A 为器件光敏元面积, P 为光敏元的周长, J_B 为体暗电流密度, J_s 为侧面暗电流密度, 因此通过分析暗电流密度 J 与 P/A 的关系可以获得器件的暗电流机制。

在反偏下 -100mV, 各样品暗电流密度随 P/A 及温度的变化关系如图 3.4.6 所示。根据式 (3.2), 对曲线进行线性拟合, 所得截距为体暗电流密度 J_B , 体暗电流与面积呈正比, 所得斜率为侧面暗电流密度 J_s , 侧面暗电流与器件周长呈正比, 拟合结果如表 3.4.4 所示。样品 A (PECVD SiN_x 钝化) 的暗电流密度最大, 并且与 P/A 值有强烈的依赖关系, 表明侧面漏电流占主导作用, 尤其光敏元面积较小时侧面漏电更明显。ICPCVD 低温生长的 SiN_x 钝化膜能够较好的抑制器件暗电流密度对 P/A 的依赖关系, 即抑制了侧面漏电流。尤其对于样品 D, 暗电流密度最小, 且随着温度的降低, 暗电流密度基本不随 P/A 变化, 表明侧面漏电流的贡献可以忽略, 体暗电流占主导。由此可见, ICPCVD 生长的 SiN_x 钝化膜能够有效的减小表面态, 而且对台面侧面的覆盖钝化效果也很明显, 中和表面及侧面的悬挂键, 而且在薄膜生长过程中对材料损伤也较小。

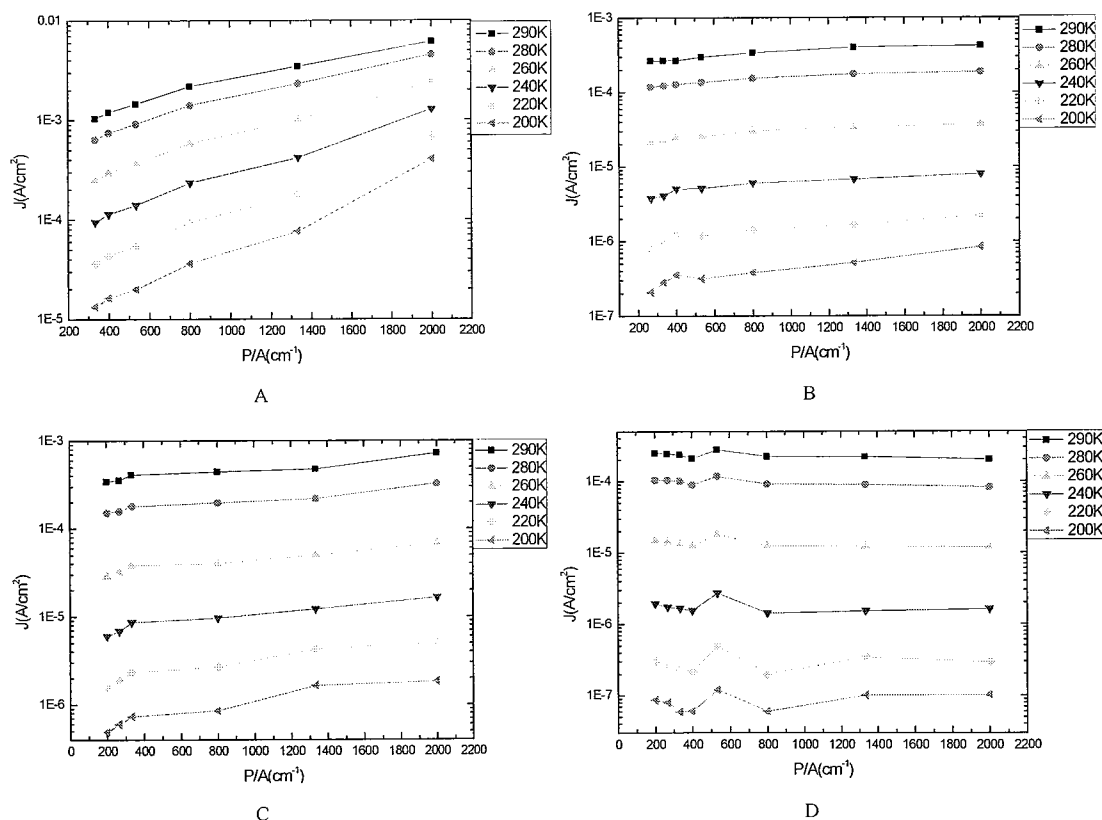


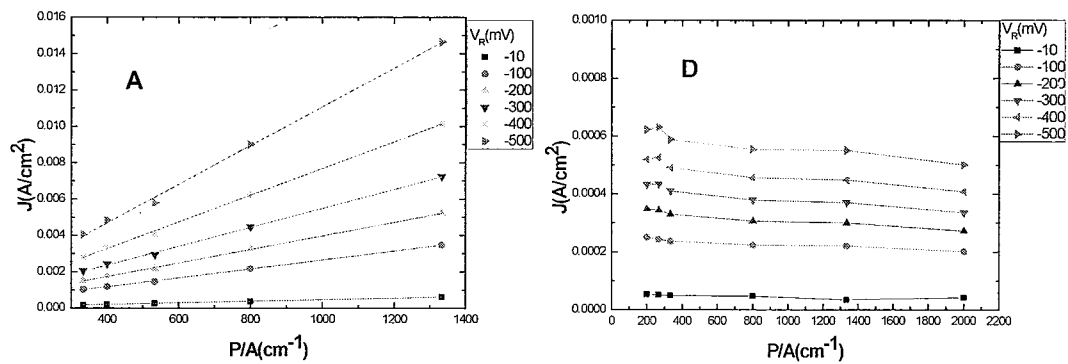
图 3.4.6 在 -100mV 下暗电流密度随 P/A 及温度的变化

Fig.3.4.6. The dark current density versus P/A ratio at -100mV and different temperatures

相比样品 B、C，样品 D 的 J_B 和 J_S 都降低了不少，表明高温退火过程有可能使 SiN_x 与材料产生应力，从而破坏了表面状态，从而增加了表面态密度，使暗电流增大。

表 3.4.4 拟合所得 J_B, J_S (-100mV, 290K-200K)Table 3.4.4. J_B, J_S at -100mV for Sample A, B, C, D at 290K-200K

Sample A			Sample B		Sample C		Sample D	
Tem/K	$J_B(\text{A/cm}^2)$	$J_S(\text{A/cm})$	$J_B(\text{A/cm}^2)$	$J_S(\text{A/cm})$	$J_B(\text{A/cm}^2)$	$J_S(\text{A/cm})$	$J_B(\text{A/cm}^2)$	$J_S(\text{A/cm})$
290K	2.01E-4	2.46E-6	2.23E4	1.37E-7	3.09E-4	1.83E-7	2.26E-4	-3.99E-9
280K	5.37E-5	1.70E-6	1.01E-4	6.84E-8	1.35E-4	8.55E-8	9.38E-5	-5.14E-9
260K	-1.96E-5	7.64E-7	1.68E-5	1.72E-8	2.35E-5	2.15E-8	1.26E-5	-2.92E-10
240K	-2.22E-5	3.27E-7	2.69E-6	4.30E-9	4.85E-6	5.77E-9	1.47E-6	6.14E-11
220K	-1.57E-5	1.42E-7	5.21E-7	1.20E-9	1.21E-6	2.01E-9	3.18E-7	-2.12E-12
200K	-1.08E-5	6.38E-8	1.30E-7	3.25E-10	3.39E-7	8.01E-10	8.63E-8	8.80E-12

图 3.4.7 样品 A、D 在不同偏压下暗电流密度随 P/A 的变化关系 ($T=290\text{K}$)Fig3.4.7 J_d vs. P/A at different bias(-10mV、-100mV、-200mV、-300mV、-400mV、-500mV) for Sample A and D ($T=290\text{K}$)

在不同的偏压下，器件的暗电流成分也不同。分析采用 PECVD 钝化膜的样品 A 及采用 ICPCVD lowrate 生长钝化膜的样品 D，在相同温度下（290K）不同反偏压下（-10mV、-100mV、-200mV、-300mV、-400mV、-500mV）暗电流密度随着 P/A 的变化关系，如图 3.4.7 所示。由图可以看出采用 ICPCVD 生长的 SiN_x 作为钝化膜，可以有效的抑制侧面漏电流，在不同的偏压下，暗电流密度都基本不随 P/A 而变化。而采用 PECVD 生长的 SiN_x 作为钝化膜，对侧面的钝化效果较差，随着偏压的增大，暗电流密度随 P/A 变化的斜率变大，而且体漏电流也增加，线性拟合结果如表 3.4.5 所示，表明侧表面的态密度较大，导致了在不同偏压下侧面漏电流不同。采用拟合的结果计算光敏元分别为 $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ 和 $30 \times$

30 μm^2 时在不同偏压下侧面漏电占总暗电流的比例, 如图 3.4.8 所示, 可以看出侧面漏电起主导作用 (80%~90%), 而且光敏元面积越小, 侧面漏电所占比例越大, 偏压越大, 侧面漏电流也增加。

表 3.4.5 样品 A 在不同偏压下拟合所得 J_B , J_S (温度为 290K)

Table 3.4.5 J_B , J_S at different bias for Sample A(T=290K)

偏压/mV	-10	-100	-200	-300	-400	-500
J_B	4.48E-5	2.01E-4	2.58E-4	2.90E-4	3.47E-4	4.35E-4
J_S	4.30E-7	2.46E-6	3.73E-6	5.21E-6	7.34E-6	1.06E-5

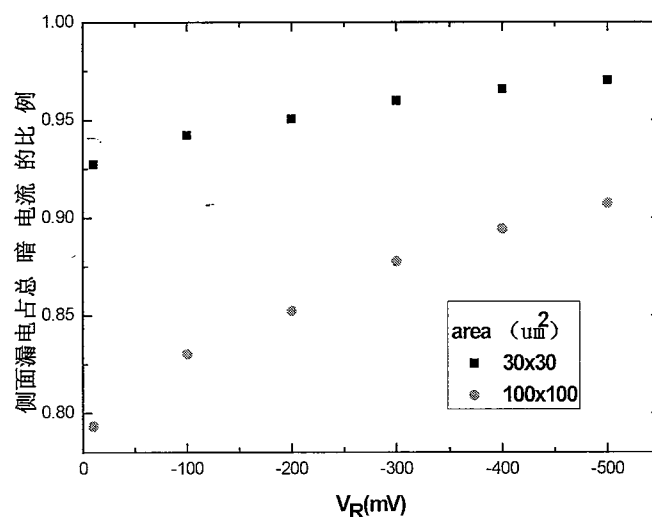


图 3.4.8 在不同反偏压下样品 A 的侧面漏电占总漏电流的比例 (T=290K)

Fig3.4.8 I_S/I vs. V_R (T=290K)

3.4.4 不同温度下的激活能

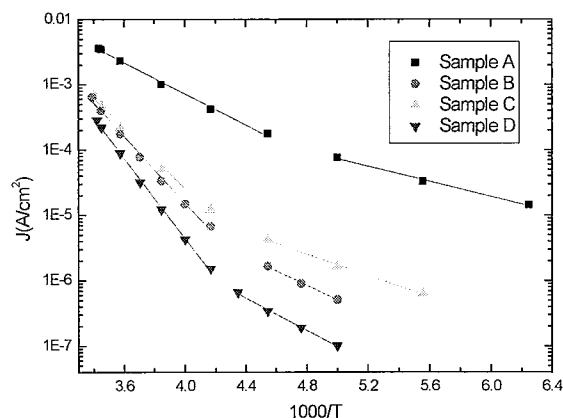


图 3.4.9 J_d ($V_R=100\text{mV}$) -1000/T 曲线

Fig.3.4.9. The curve of J_d ($V_R=100\text{mV}$) -1000/T

图 3.4.9 所示为暗电流密度 ($V_R=100\text{mV}$) 随温度的变化关系, 光敏元大小

选为 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 。在不同的温度下，呈不同的指数关系，在 300K-200K 的范围内，器件基本上以热电流为主，通过拟合 $J_g \propto \exp(-E_g/kT)$ 可得热激活能，如表 3.4.5 所示。

表 3.4.5 各样品在不同温度范围内的激活能 ($V_R=100\text{mV}$)Table 3.4.5. The thermal activation energy at different temperatures ($V_R=100\text{mV}$)

E_a/eV		
Sample A	0.24(290K-220K)	0.12(200K-160K)
Sample B	0.45(290K-240K)	0.16(220K-180K)
Sample C	0.50(290K-240K)	0.22(220K-200K)
Sample D	0.60(290K-240K)	0.25(230K-200K)

由上表可知，采用 ICPCVD 生长的 SiN_x 钝化膜，热激活能较大，在 290-240K 温度范围内以扩散电流为主，在 230-200K 温度范围内以产生-复合电流为主；而采用 PECVD 生长的 SiN_x 钝化膜，则器件的热激活能较小，在 290-220K 温度范围内以产生-复合电流为主。

3.4.5 缺陷能级

空间电荷区的杂质或缺陷作为产生-复合中心引起产生-复合电流，如下式：

$$I_g = \frac{qAn_iW_{dep}V}{V_t\tau_g} \quad (3.3)$$

$$\tau_g = \frac{1}{N_{c,v}v_{th}\sigma \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right)} \quad (3.4)$$

其中 W_{dep} 为耗尽区宽度， V 为 p-n 结所加偏压， V_{bi} 为 p-n 结内建电场长度， $V_t=V_{bi}+V$ ， $N_{c,v}$ 为导带或价带的态密度， E_t 为陷阱能级， τ_g 为产生时间， σ 为俘获界面， v_{th} 为热速度， k 为波尔兹曼常数，其中 $N_{c,v}$ 正比于 $T^{3/2}$ ， v_{th} 正比于 $T^{1/2}$ 。偏压较小时，产生-复合电流与 $1/kT$ 呈对数关系，如下式：

$$I_g \propto T^2 \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right) \quad (3.5)$$

通过拟合 $\ln I/T^2$ 与 $1/kT$ 的关系图，即标准 Arrhenius 方法，直线的斜率就是能级大小。由表 3.4.5 可知，在 -100mV 的偏压下，样品 A 在 290-220K 范围内激

活能为 0.24eV ，为禁带宽度的一半，即此时以产生-复合电流为主，样品 D 在 $230\text{-}200\text{K}$ 温度范围内激活能为 0.25eV ，以产生-复合电流为主，以这两段区间的数据进行拟合，如图 3.4.10 所示。样品 A 和 D 在产生-复合电流为主的温度范围内拟合得直线斜率分别为 -0.0907 和 -0.0910 ，换算成 e 对数，则对应的缺陷能级分别为 0.2088eV 和 0.2095eV ，两者基本相同，都接近禁带中间，表明此能级与材料本身有关，是材料内部的本征缺陷能级，而与材料表面无关。

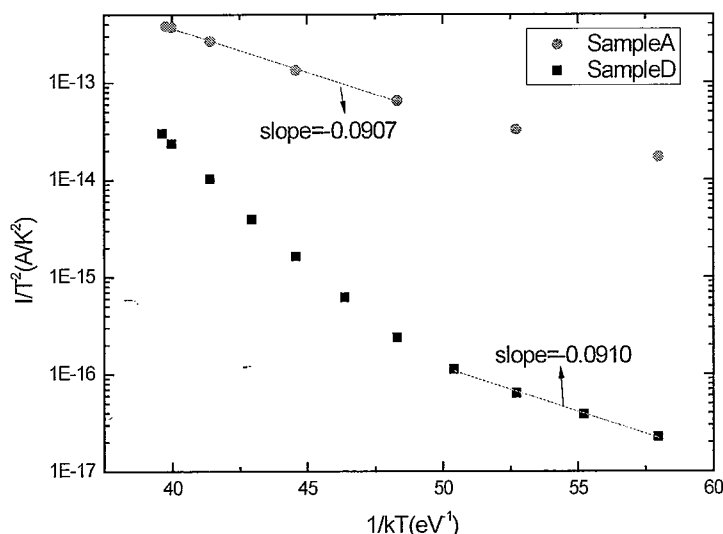


图 3.4.10 器件 A 与 D 的 I/T^2 随 $1/kT$ 的变化关系 ($V_R=-100\text{mV}$ ，面积为 $30\times 30\mu\text{m}^2$)

Fig3.4.10 I/T^2 vs. $1/kT$ for Sample A and D ($V_R=-100\text{mV}$, area: $30\times 30\mu\text{m}^2$)

3.4.6 ICPCVD highrate SiN 膜在两种不同工艺下的钝化效果对比

采用 ICPCVD highrate 模式生长的 SiN 做钝化膜，分别采用两种工艺 I 和 II 制备测试器件，采用的材料 M118L 具体参数见表 3.4.6。

表 3.4.6 M118L 外延材料结构及参数

Table 3.4.6 The structure and parameters epitaxial materials

	导电类型	掺杂物质	厚度 (μm)	掺杂浓度 (cm^{-3})
$\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$	P^+	Be	0.6	$2\text{E}18$
$\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$	n^-	Si	1.5	$1\text{E}16$
InAlAs buf	N^+	Si	2.0	$2\text{E}18$
InP substrate	S.I.	Fe	350 ± 20	

两种工艺制备的器件 I-V 特性（光敏元： $30\times 30\mu\text{m}^2$ ，室温 295K ）以及 J-P/A（室温 295K ）见图 3.4.11 所示。与 ICPCVD lowrate 生长的 SiN 膜钝化效果相反，钝化膜经过高温过程（工艺 I）的器件反而暗电流低一些，而且暗电流密度

随 P/A 变化不明显, 而未经过高温过程 (工艺 II) 的器件暗电流较大, 随着反偏压的增大, 暗电流增大的较快, 暗电流密度也随着 P/A 变化较明显。值得指出的是, ICPCVD highrate 生长的 SiN 膜在工艺 I 中经过高温过程之后会钝化膜会出现一些气泡状的突起, 如图 3.4.12 所示, 而工艺 II 制备的器件则无这种现象出现。上述现象表明, ICPCVD highrate SiN 膜与材料存在应力, 界面态较高, 钝化效果差, 经过高温过程之后, 应力释放, 界面态减少, 钝化效果得到改善, 然而在应力释放过程中, SiN 膜会出现一些气泡状突起, 有可能影响器件的可靠性。

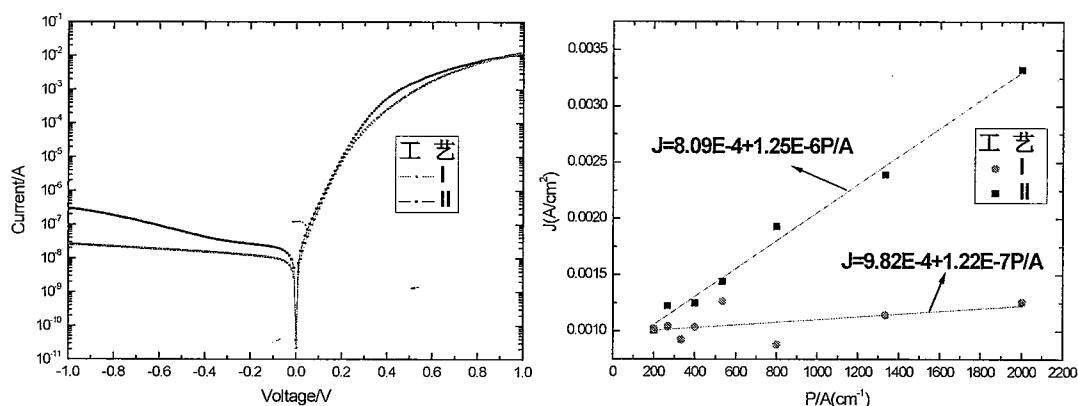


图 3.4.11 采用 ICPCVD highrate SiN 钝化膜在两种工艺下制备器件的 I-V 及 J-P/A
Fig 3.4.11 I-V and J-P/A for two detectors (I and II) with ICPCVD highrate SiN passivation

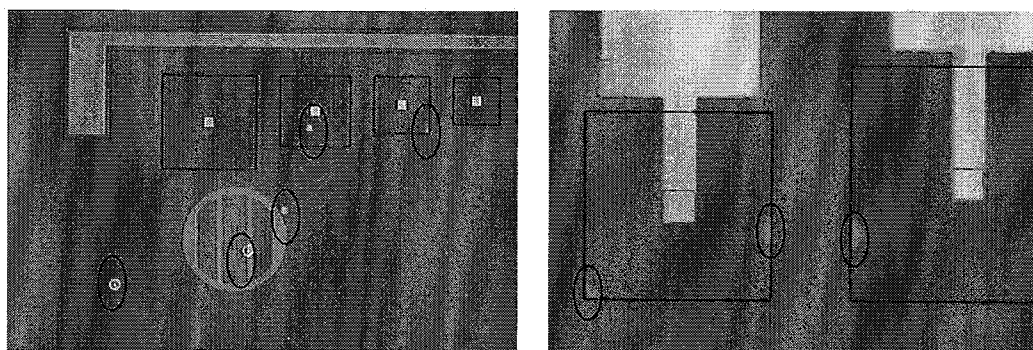


图 3.4.12 ICPCVD highrate SiN 膜在工艺 I 之后出现小气泡状突起
Fig3.4.12 The photo of detector after process I

3.5 台面成型损伤修复及双台面结构的初步研究

3.5.1 台面成型损伤修复的初步研究

台面成型是制备台面型探测器的关键技术之一, 主要有湿法腐蚀和干法刻蚀两种方法实现台面成型。湿法腐蚀对器件不会带来等离子体损伤, 且工艺步骤简单, 腐蚀中需要控制的参数有: 浓度、时间、温度、搅动、批次 (更换溶液), 但湿法腐蚀存在横向钻蚀现象, 因此适合大尺寸图形的腐蚀, 而对于高密度小光

敏元的面阵探测器则不适合用湿法腐蚀进行台面的制备。干法刻蚀分为物理刻蚀、化学刻蚀、化学物理共同作用的刻蚀。化学腐蚀类似于湿法腐蚀，也是各向同性的。物理刻蚀：等离子体产生的带能粒子（轰击的正离子）在强电场作用下朝材料表面加速，这些离子通过溅射刻蚀作用去除未被保护的表面材料，一般用惰性气体（如 Ar），具有很好的刻蚀方向性，可获得高的各向异性刻蚀剖面，溅射刻蚀速率高，但选择比差；被溅射作用去除的元素是非挥发性的，可能会重新淀积到材料表面，带来颗粒和化学污染；且有可能产生电荷（可用电子枪中和）；对晶格产生物理损伤。物理和化学混合作用：刻蚀剖面可以通过调节等离子体条件和气体组分从各向同性向各向异性改变；对不需要刻蚀的材料的高选择比；获得可接受产能的刻蚀速率；侧壁剖面可以较好得控制；可获得较好的片内均匀性；较低的器件损伤；较宽的工艺制造窗口。ICP（感应耦合等离子体）刻蚀则属于最后一种，是高密度等离子体刻蚀，具有以上优点，但仍会造成一定的物理损伤。刻蚀过程中非均匀性等离子体会在材料中产生陷阱电荷、能量离子的轰击会产生晶格损伤。对于高 In 组分的 InGaAs 探测器，材料本身的缺陷浓度较高，刻蚀过程中更容易造成电荷堆积，晶格易位，形成点缺陷及线缺陷，从而产生较大的表面漏电流。

本节中尝试采用高温热处理加非选择性湿法腐蚀修复的方法，去除刻蚀残留物，释放晶格应力和修复晶格^[123]，释放表面堆积电荷，以减小刻蚀造成的损伤。

制备器件（ 32×32 ， $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ ）采用材料 M104L，参数如表 3.5.1 所示，试验工艺中高温过程为：在 N_2 气氛下，温度为 450°C ，维持时间为 120s。两种工艺关键步骤比较如下：

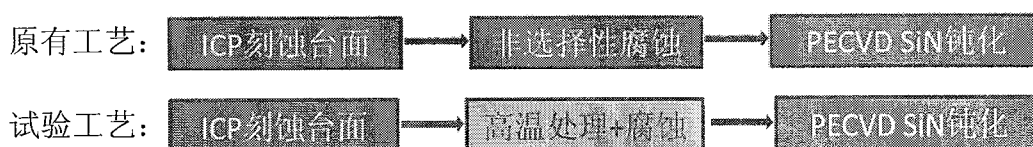


表 3.5.1 M104L 外延材料结构及参数

Table 3.5.1 The structure and parameters epitaxial materials

	导电类型	掺杂物质	厚度 (μm)	掺杂浓度 (cm^{-3})
$\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$	P^+	Be	0.6	$3\text{E}18$
$\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$	n^-	Si	1.5	$3\text{E}16$
$\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As buf}$	N^+	Si	1.9	$3\text{E}18$

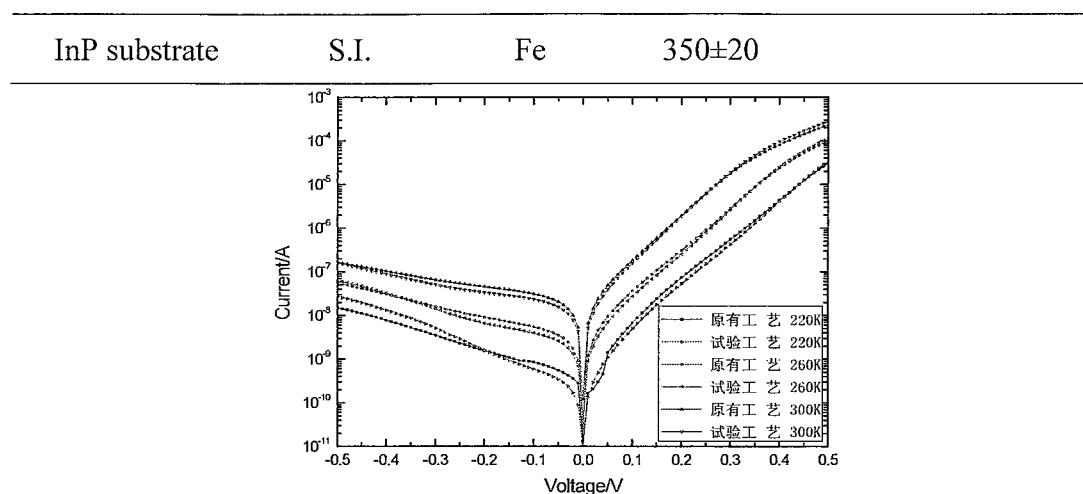


图 3.5.1 两种工艺制备的器件 I-V 特性曲线

Fig3.5.1 I-V plots for the two samples

在不同的温度（300K，260K，220K）下，两种工艺制备器件的 I-V 曲线如图 3.5.1 所示。经过高温处理的器件，在偏压较小时，暗电流（@-0.1V）约降低 30%左右，但在反偏压较大时，隧穿电流增大较快，且温度越低，现象越明显。可见高温热处理过程对器件产生了一定的影响，减少了晶格损伤，降低了表面电荷，一定程度上降低了器件暗电流，然而温度过高也可能引入了新的缺陷或使原有的某种缺陷增加，从而导致在反偏压较大时暗电流增长较快。通过选择合适的温度和时间，应该能够高温处理到达更好的效果。

3.5.2 双台面器件的初步研究

传统的台面型器件，帽层与吸收层的台面宽度相同，双台面结构中帽层的台面宽度略小于吸收层的台面宽度，从而形成双台面，剖面示意图如下所示。制备双台面结构的器件（正照射， $10\times 1, 100\times 100\mu\text{m}^2$ ），所用材料为 M54L，参数如表 3.5.2 所示。

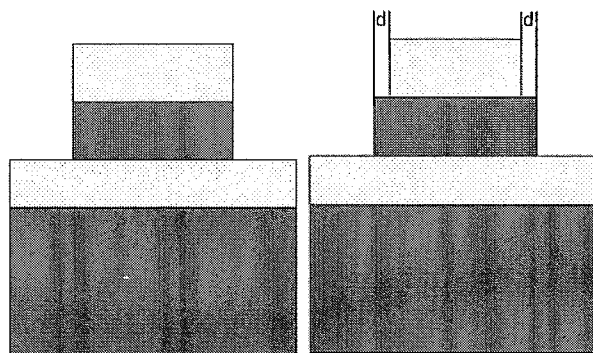


图 3.5.2 两种不同台面结构的剖面示意图

Fig3.5.2 Schemes of two mesa structures

表 3.5.2 外延材料结构及参数

Table 3.5.2 The structure and parameters epitaxial materials

	导电类型	掺杂物质	厚度 (μm)	掺杂浓度 (cm^{-3})
$\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$	P^+	Be	0.6	$2\text{E}18$
$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$	n^-	Si	1.5	$3\text{E}16$
$\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As buf}$	N^+	Si	1.4	$3\text{E}18$
InP substrate	S.I.	Fe	350 ± 20	

传统工艺台面成型全部采用 ICP 刻蚀,而双台面结构则先采用选择性腐蚀液 ($\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=3:1$, 对 InGaAs 的选择比为 2000:1) ^[124] 腐蚀掉 InAlAs, 再 ICP 刻蚀 InGaAs 吸收层。刻蚀完台面之后使用选择性腐蚀液酒石酸进行湿法修复, 采用 PECVD 生长 SiN_x 钝化膜, 热蒸发 p 电极 Ti/Pt/Au(20/30/20nm), 退火条件为 420°C & 40s, 溅射生长加厚电极 Cr/Au(20/400nm)。双台面间距 d 分别为 1、2、3、4、 $5\mu\text{m}$, 常温下器件 I-V 曲线如图 3.5.3 所示, 在 -0.1V 偏压下暗电流、器件优值因子 R_0A 以及响应信号(黑体温度为 900K, 调制频率为 800Hz, 黑体孔径 Φ 为 8mm, 环境温度 T_0 为 293K, 测试距离 19cm, 前置放大器 $1\text{E}-8$) 随 d 的变化关系如图 3.5.4 所示。由图可以看出, 随着参数 d 的增大, 暗电流逐渐降低, 优值因子增大, 然而器件的响应信号也在一定程度上减小。双台面结构器件有利于钝化膜在台面侧面有较好的覆盖, 从而减小侧面的漏电, 而且也可能抑制界面处的漏电, 但由于正照射结构会导致器件周围发生光的散射等会使器件吸收的光减小, 从而使信号降低, 若采用背照射结构, 则情况可能会改善。

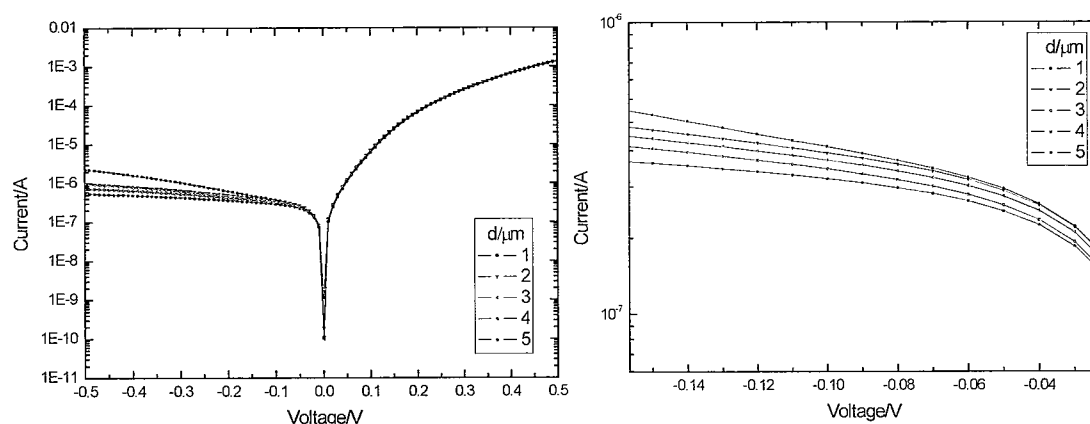


图 3.5.3 双台面器件的 I-V 特性

Fig3.5.3 I-V plots of dual-mesa detectors

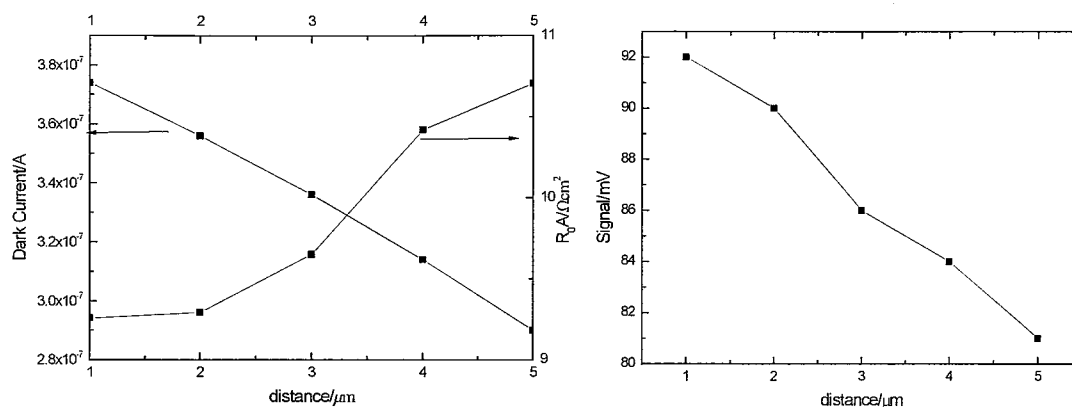


图 3.5.4 暗电流 (@-0.1V)、优值因子及响应信号随 d 的变化

Fig3.5.4 I_d , $R_0 A$ and Signal vs. distance

3.6 本章小结

本章首先介绍了器件的复合机理及其钝化方法，并对比了 PECVD 和 ICPCVD 两种薄膜生长技术的优缺点；对比分析了不同的钝化膜对器件的钝化效果，并对不同器件的暗电流机理、激活能及缺陷能级进行了分析，结果表明采用改进工艺及 ICPCVD lowrate 生长 SiN_x 钝化膜的器件钝化效果最好，侧/表面漏电得到了较好的抑制，器件暗电流相比之前工艺制备的器件降低了约 2-3 个数量级，而且暗电流密度在不同的温度下都基本不随 P/A 而变化。随着焦平面技术的发展，器件规模越来越大，而光敏元则越来越小，因此有效的钝化并抑制侧面漏电是非常重要的，本章采用的钝化技术为此奠定了较好的基础。

另外对台面型器件的台面损伤修复及双台面技术做了初步的研究，结果表明在高温处理或采用双台面结构之后，器件的暗电流会有一定程度的降低。

第四章 延伸波长 InGaAs 探测器量子效率初步理论研究

量子效率 (Quantum Efficiency) 也称为光电转化效率 (Incident-Photon-to-electron Conversion Efficiency), 是指探测器产生的电子-空穴对数目与入射到探测器表面的光子数目之比, 这里的电子-空穴对是指形成光电流的部分。探测器的量子效率与探测器对照射在表面的各个波长的光的响应有关, 理想的探测器在各个波长 (小于截止波长) 的量子效率是一个常数, 但是绝大多数探测器的量子效率会由于复合效应而降低, 这部分的电荷载流子不能流到外部电路中, 因此材料内部及界面处的复合中心对量子效率有较大影响。探测器的结构同样会影响量子效率的大小, 比如对于背照射 P-on-N 结构来说, 由于材料对各个波长的光的吸收系数不同, 一般短波长的光吸收系数大, 光进入到吸收层被吸收的快, 界面的复合及体复合将会使被收集的载流子减少。另外探测系统的反射、器件的串联电阻、并联电阻等也会影响量子效率的大小。因此研究量子效率与材料参数、器件结构的关系, 对于提高器件量子效率具有一定的指导作用。

4.1 量子效率计算模型

对于背入射的 InGaAs/InAlAs 探测器, 入射到半导体内能量大于禁带宽度(E_g)的光子通过带间跃迁激发产生电子-空穴对。进入空间电荷区的光生电子和空穴在内建电场作用下被分开, 电子向 n 区、空穴向 p 区运动, 形成光电流 J_R 。按照光生载流子位置的不同, 光电流可分为两部分: 其一是耗尽层中产生的光激发载流子对光电流的贡献 (只考虑吸收层内的耗尽区, 因为帽层为重掺杂层, 帽层内的耗尽区宽度可以忽略); 其二为空间电荷区之外产生通过扩散作用进入空间电荷区内被收集的电子或空穴所形成的光电流 (只考虑在吸收层内的区域, 帽层禁带较宽, 如果只考虑能量小于该禁带宽度的光子, 则可以不用考虑)。考虑 P on N 结构器件的量子效率, 光入射示意图如下所示。

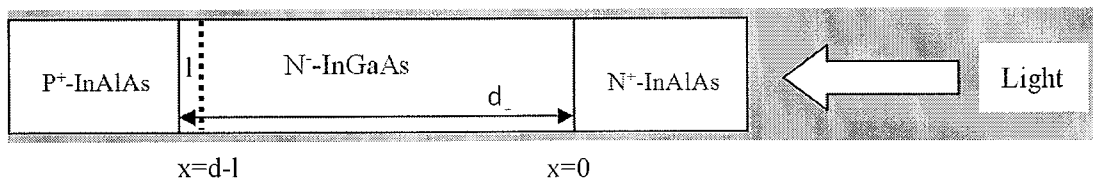


图 4.1.1 光入射 P-on-N 器件的示意图

Fig4.1.1 Schematic diagram of light incident to the device

首先通过计算少子稳态情况下的分布, 计算空间电荷区之外的区域产生的光电流。

当入射光辐照 Φ_0 照在器件表面时, 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^[125]:

$$g(x) = \Phi_0 \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad (4.1)$$

在吸收层耗尽区外的少子连续性方程如下:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = \Phi_0 \alpha e^{-\alpha x} - \frac{\Delta p}{\tau} + D_h \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} \quad (4.2)$$

稳态情况下:

$$\Phi_0 \alpha e^{-\alpha x} - \frac{\Delta p}{\tau} + D_h \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = 0 \quad (4.3)$$

这一方程的解为:

$$\Delta p(x) = A_1 e^{-x/L_h} + A_2 e^{x/L_h} + M e^{-\alpha x} \quad (4.4)$$

其中 $M = \frac{\alpha \Phi_0 \tau}{1 - L^2 \alpha^2}$, L 为空穴扩散长度, 边界条件为:

$x=0$ 处的光电流由界面复合速度决定:

$$D \frac{d\Delta p}{dx} \Big|_{x=0} = S \Delta p \quad (4.5)$$

其中 S 为界面复合速度, D 是空穴扩散系数。

空穴一旦扩散到空间电荷区边界上它立刻被电场拉走, 因此 $x=d-l$ 处即耗尽区边上 (l 为 n 区空间电荷区的宽度), $\Delta p = 0$ 。

代入可求得:

$$A_1 = \frac{\left[(\alpha D + S) e^{(d-l)/L} - \left(S - \frac{D}{L} \right) e^{-\alpha(d-l)} \right] M}{\left[\left(S - \frac{D}{L} \right) e^{-(d-l)/L} - \left(S + \frac{D}{L} \right) e^{(d-l)/L} \right]} \quad (4.6)$$

$$A_2 = \frac{\left[-(\alpha D + S) e^{-(d-l)/L} + \left(S + \frac{D}{L} \right) e^{-\alpha(d-l)} \right] M}{\left[\left(S - \frac{D}{L} \right) e^{-(d-l)/L} - \left(S + \frac{D}{L} \right) e^{(d-l)/L} \right]} \quad (4.7)$$

有空穴扩散而产生的光电流为：

$$J_1 = -qD \frac{d\Delta p}{dx} \Big|_{x=d-l} \quad (4.8)$$

这部分光电流贡献的量子效率如下：

$$\eta_1 = J_1 / q\Phi_0 \quad (4.9)$$

耗尽区内（PN结），处于短路或反向偏压下，势垒区的净热复合可以忽略，另外对于势垒区内的界面复合和能带不连续所带来的影响也暂不考虑，光激发的电子和空穴立即被结电场分开，分别漂向N区和P区，只要积分这里的光生电子空穴对，即能算出量子效率：

$$\eta_2 = \alpha \int_{d-l}^d \exp(-\alpha x) dx = \exp(-(d-l)\alpha) - \exp(-d\alpha) \quad (4.10)$$

因此可得总量子效率 $\eta = \eta_1 + \eta_2$ 。

4.2 材料参数

材料参数的选取对模拟结果的准确性具有重要的影响。对于延伸波长的 InGaAs 探测器，由于高 In 组分的 InAlAs 和 InGaAs 材料的相关报道较少，而且采用不同缓冲层技术生长的外延材料晶体质量差异较大，材料参数也不同。因此在模拟计算过程中， $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 部分参数源自相关手册和文献，部分采用二元材料 InAs 和 GaAs 相应的差值，材料的吸收系数则采用椭圆偏振光技术进行实测。

椭圆偏振光测量技术是一个真正的无接触非侵入测量表面反射光偏振态变化的技术，是基于测量偏振光的偏振态^[126]。考虑面偏振光入射到一个平面上，可以被分解为平行于入射光平面的 E_p 和垂直于入射平面的 E_s 。对于有吸收的材料，这两个组分就要经历不同的振幅和位移，位移的不同引入了一个附加的对入射光束偏振 90° 的组分，致使反射光偏振极化。对椭圆偏振光测量来说，偏振光的关键特性就是通过反射面偏振光变成椭圆偏振光，或是椭圆偏振光变成面偏振光。总的电场包括平行组分 E_p 和垂直组分 E_s ，但反射系数

$$R_p = \frac{E_p(\text{反射光})}{E_p(\text{入射光})} \quad R_s = \frac{E_s(\text{反射光})}{E_s(\text{入射光})} \quad (4.11)$$

不能单独测量，然而复合的反射比 ρ 可以测量，它由反射系数 R_p 和 R_s 或者椭圆仪的角度 Ψ 和 Δ 确定，如下式：

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = (\tan \Psi) e^{j\Delta} \quad (4.12)$$

椭偏仪的角度 Ψ ($0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$) 和 Δ ($0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$) 在椭偏测量中是两个最常用的变量, 定义如下:

$$\Psi = \tan^{-1} |\rho| \quad \Delta = \text{微分相的变化} = \Delta_p - \Delta_s \quad (4.13)$$

角度 Ψ 和 Δ 是平行和垂直于入射平面的电场矢量的分量振动分别决定的振幅和相的微分变量。可以通过 Ψ 和 Δ 确定样品的光学常数。

椭偏测量所用样品分别为 i-InGaAs 吸收层/p-InAlAs 缓冲层/衬底和 p-InAlAs 缓冲层/衬底两种材料, 具体参数如表 4.2.1 所示。实验测得两种样品的椭圆偏振光谱如图 4.2.1 所示, 波长范围为 300nm-2500nm。首先对 p-InAlAs 缓冲层/衬底进行拟合, 将结果作为衬底材料的参数, 再对吸收层材料的数据进行拟合。采用 Tauclorentz 模型拟合得到室温下吸收层 $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 的折射率 n 及消光系数 k 随波长的变化, 由 k 与吸收系数 α 的关系 $\alpha = 4\pi k/\lambda$ 可得吸收系数随波长的变化。

表 4.2.1 材料编号、结构和参数

Table 4.2.1 The number, structure and parameter of materials

	材料	掺杂类型	掺杂元素	厚度/ μm	浓度/ cm^{-3}
GM11128Z	$\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$	n^-	Si	2.0	$3\text{E}16$
	$\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$ buf.	P^+	Be	1.9	$4\text{E}18$
	InP substrate	S.I.	Fe	350 ± 20	
GM11129Z	$\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$ buf.	P^+	Be	1.9	$4\text{E}18$
	InP substrate	S.I.	Fe	350 ± 20	

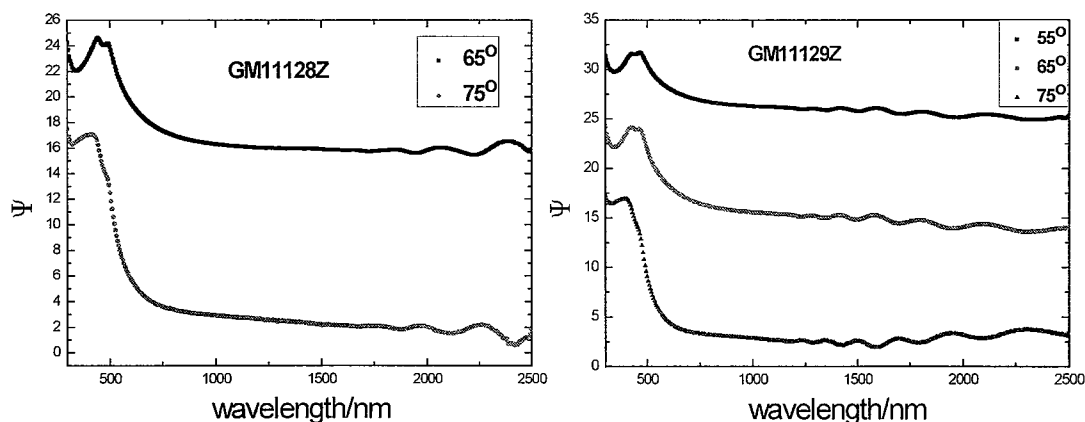


图 4.2.1 样品的椭圆偏振光谱

Fig4.2.1 Ellipsometry spectrum of the samples

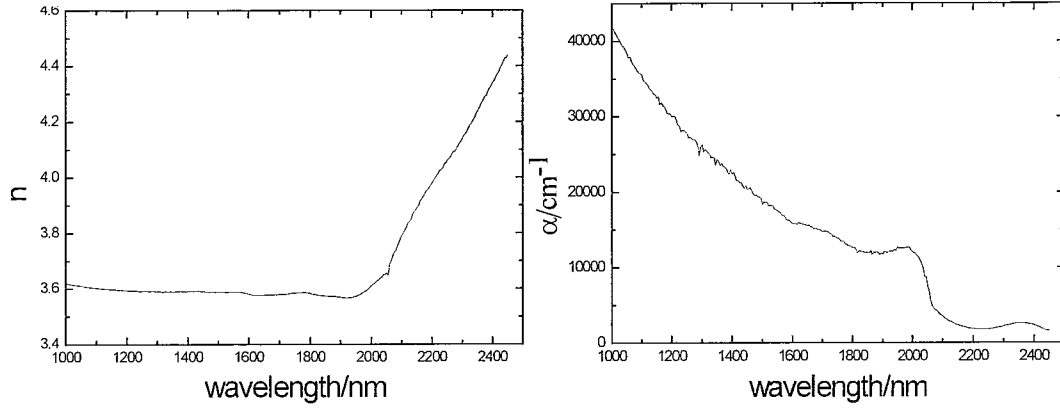

 图 4.2.2 In_{0.83}Ga_{0.17}As 折射率 n 及吸收系数 α 随波长的变化关系

 Fig4.2.2 n and α of In_{0.83}Ga_{0.17}As vs. wavelength

迁移率是描述半导体内部电荷输运的重要电学参数，本章采用 M.Sotoodeh 提出的低场迁移率模型^[127]，其表达式如下所示：

$$\mu_{LF}(N, T) = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max}(300K)(300K/T)^{\theta_1} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{ref}(300K)(T/300K)^{\theta_2}} \right)^{\lambda}} \quad (4.14)$$

表 4.2.2 迁移率计算中用到的参数

Table4.2.2 The parameters in the calculation of mobility

Materials	$\mu_{p,\max}(300K)$ (cm ² /V·s)	$\mu_{p,\min}$ (cm ² /V·s)	λ_p	θ_{p1}	θ_{p2}
InAs	530	20	0.46	2.3	3
In _{0.53} Ga _{0.47} As	320	10	0.403	1.59	
GaAs	491.5	20	0.38	2.2	3
In _{1-x} Ga _x As	530-808.9x+7 70.4x ²	20-40.1x+40.1 x ²	0.46-0.158x+0 .078x ²	2.3-2.76x+2.6 6x ²	3

Materials	$N_{n,ref}(300K)$ cm ⁻³	$N_{p,ref}(300K)$ cm ⁻³	$\lg N_{n,ref}$	$\lg N_{p,ref}$
InAs	1.1E18	1.1E17	18.04	17.04
In _{0.53} Ga _{0.47} As	1.3E17	4.9E17	17.11	17.69
GaAs	6E16	1.48E17	16.78	17.17
In _{1-x} Ga _x As			18.04-2.62x+1 .36x ²	17.04+2.49x-2 .36x ²

materials	Electron or hole	$\mu_{\max}(300K)$	$\mu_{\min}(300K)$	$N_{ref}(300K)$	λ	θ_1	θ_2
In _{0.83} Ga _{0.17} As	electron	25038.4	651.6	4.27E17	0.404	1.53	3.39
	hole	412.9	14.34	2.51E17	0.435	1.91	3

In_{0.83}Ga_{0.17}As 迁移率计算中所用参数基本都采用二次多项式拟合所得, 如表 4.2.2 所示, 所用数据分别为 InAs、GaAs、In_{0.53}Ga_{0.47}As 三种材料的数据。采用表中所得数据计算 300K 下迁移率随掺杂浓度的变化, 如图 4.2.3 所示, 另外根据爱因斯坦关系由迁移率可以进一步推算材料的扩散系数。

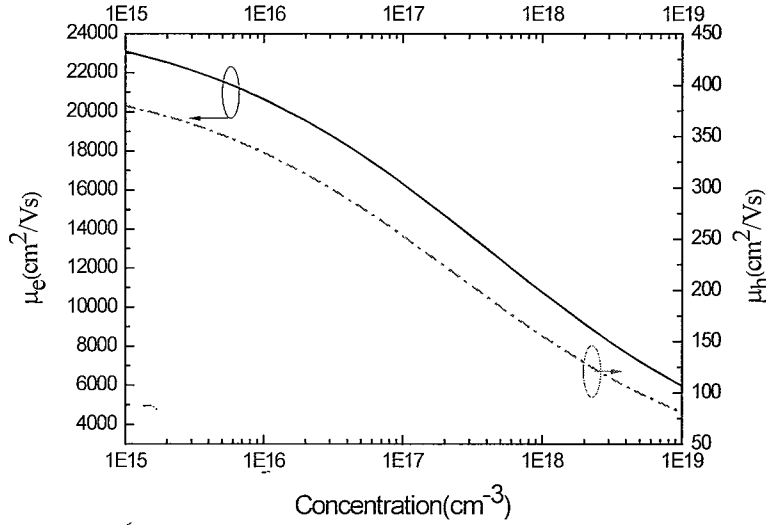


图 4.2.3 300K 下 In_{0.83}Ga_{0.17}As 材料载流子迁移率随掺杂浓度的关系

Fig4.2.3 mobility of In_{0.83}Ga_{0.17}As vs. N at 300K

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, 通常低掺杂时少子寿命主要由 SRH 复合决定, 重掺杂时主要由俄歇复合决定, 中间掺杂时辐射复合起主要作用。少子寿命表达式如下:

$$\tau(N) = (A + B \frac{N}{R} + CN^2)^{-1} \quad (4.15)$$

其中 N 为 In_{0.83}Ga_{0.17}As 层的掺杂浓度, 根据文献^[128,129]可得 $A=1.3 \times 10^6 s^{-1}$, $C=0.7 \times 10^{-28} cm^6/s$, 另外由文献^[130]中 $B \propto E_g^2 / (kT)^{3/2}$, 并且对于晶格匹配的 InGaAs 材料 (0.74eV) $B=1.5 \times 10^{-10} cm^3/s$, 由此可得对于 In_{0.83}Ga_{0.17}As (0.48 eV) 可得 $B=6.3 \times 10^{-11} cm^3/s$ 。由于双异质结 InGaAs 材料中的光子循环效应^[131], 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, 如此重复, 直至光子逸出 InGaAs 材料, R 为循环因子。综合可得:

$$\tau(N) = (1.3 \times 10^6 + 6.3 \times 10^{-11} \frac{N}{R} + 0.7 \times 10^{-28} N^2)^{-1} \quad (4.16)$$

图 4.2.4 为 5 计算所得 In_{0.83}Ga_{0.17}As 材料的少子寿命随掺杂浓度的变化关系。

再由以上所得迁移率可得扩散系数，进一步可以得到材料的扩散长度 $L = \sqrt{D\tau}$ 。

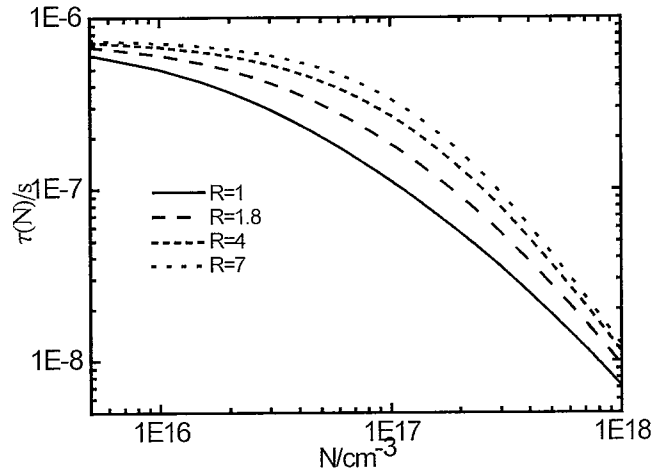


图 4.2.4 In_{0.83}Ga_{0.17}As 材料中载流子寿命与掺杂浓度的关系

Fig4.2.4 τ of In_{0.83}Ga_{0.17}As vs. N_d

表 4.2.3 计算中用到的一些材料参数

Table4.2.3 some parameters used in calculation

In _{0.83} Al _{0.17} As	E_g	χ	m_{hh}	m_{lh}	N_v	N_A	ϵ
	0.79eV	4.62eV	0.445m ₀	0.047m ₀	7.70E18cm ⁻³	2E18cm ⁻³	14.317
In _{0.83} Ga _{0.17} As	E_g	χ	m_e^*		N_c	N_D	ϵ
	0.48eV	4.759eV	0.029m ₀		1.24E17 cm ⁻³	3E16cm ⁻³	14.63

根据表 4.2.3 中所示的材料参数，计算 p-n 结内建电场：

$$\begin{aligned}
 V_d &= (\phi_2 - \phi_1) / q = ([\chi_2 + E_{g2} + kT \ln(N_{A2} / N_{v2})] - [\chi_1 - kT \ln(N_{D1} / N_{c1})]) / q \\
 &= ([4.62 + 0.79 + kT \ln(2E18 / 7.7E18)] - [4.759 - kT \ln(3E16 / 1.24E17)]) / q \\
 &= 0.579V
 \end{aligned} \quad (4.17)$$

在 p 区和 n 区的耗尽区宽度分别为：

$$W_2 = \left[\frac{2\epsilon_1\epsilon_2N_{D1}}{qN_{A2}(\epsilon_1N_{D1} + \epsilon_2N_{A2})} V_d \right]^{1/2} = 2.6E-3\mu m \quad (4.18)$$

$$W_1 = \left[\frac{2\epsilon_1\epsilon_2N_{A2}}{qN_{D1}(\epsilon_1N_{D1} + \epsilon_2N_{A2})} V_d \right]^{1/2} = 0.175\mu m \quad (4.19)$$

在 p 区和 n 区的电压降分别为：

$$V_{D2} = V_d - V_{D1} = 0.009V$$

$$V_{D1} = V_d / \left(1 + \frac{\epsilon_1N_{D1}}{\epsilon_2N_{A2}} \right) = 0.570V \quad (4.20)$$

假设冶金结位置为 0，计算耗尽区内的电场强度如图 4.2.5 所示：

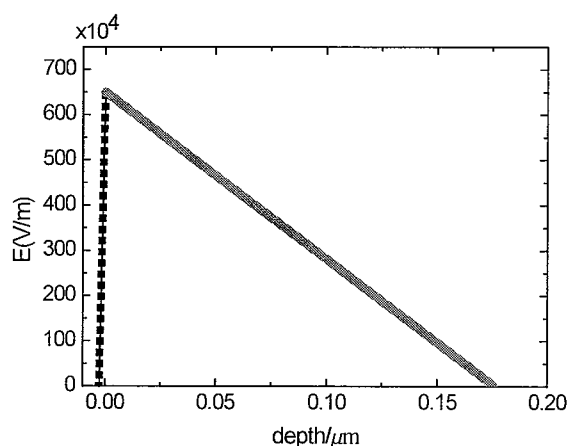


图 4.2.5 耗尽区内电场分布

Fig4.2.5 Electric field in the depletion region

4.3 材料参数与延伸波长 InGaAs 探测器量子效率的关系

采用前述理论模型，并根据之前所得材料参数，本节对结构如图 4.1.1 所示的背照射 P-on-N 器件的光响应特性进行了模拟分析。由于帽层禁带宽度大于吸收层禁带宽度，因此这里只考虑能量介于二者之间的光子的吸收情况，即只考虑 $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 层的光吸收，因而这里主要就 InGaAs 层的厚度、掺杂浓度、界面复合速度（吸收层与缓冲层之间的界面，即 $\text{InGaAs}/\text{N}^+\text{InAlAs}$ ）以及吸收系数对内量子效率的影响进行了分析讨论。本节只考虑单一波长的光照射器件的情况，由于器件对不同波长的光的吸收系数不同，因此这里分析了三种典型的吸收系数对器件量子效率的影响， α 分别为 6000cm^{-1} 、 $1\text{E}4\text{cm}^{-1}$ 、 $3\text{E-}4\text{cm}^{-1}$ ，拟合过程中 R 取 1。

首先假设界面复合速率为零时即 $S=0$ ，器件内量子效率在不同的掺杂浓度下（单位为： cm^{-3} ）随吸收层厚度的变化关系如图 4.3.1 所示。在同一掺杂浓度下，吸收层厚度 d 较小时，对光的吸收较少，有一部分光未被吸收，因此随着 d 的增大，对光的吸收增加，器件的内量子效率增大。当量子效率到达峰值之后， d 继续增大，则由于吸收光子产生的载流子要在器件内部扩散较长的距离才能到达耗尽区边界被收集，被复合的几率增大，从而使量子效率下降。随着掺杂浓度的增大，由于少子寿命的减小及迁移率的降低等，导致扩散长度减小，非空间电荷区内的复合几率增大，因此量子效率峰值降低，而且峰值处对应的 d 也减小。另外随着吸收系数的增大，相同掺杂浓度的器件量子效率峰值增大，光进入吸收层后

很快被吸收，因此峰值处对应的 d 也减小。

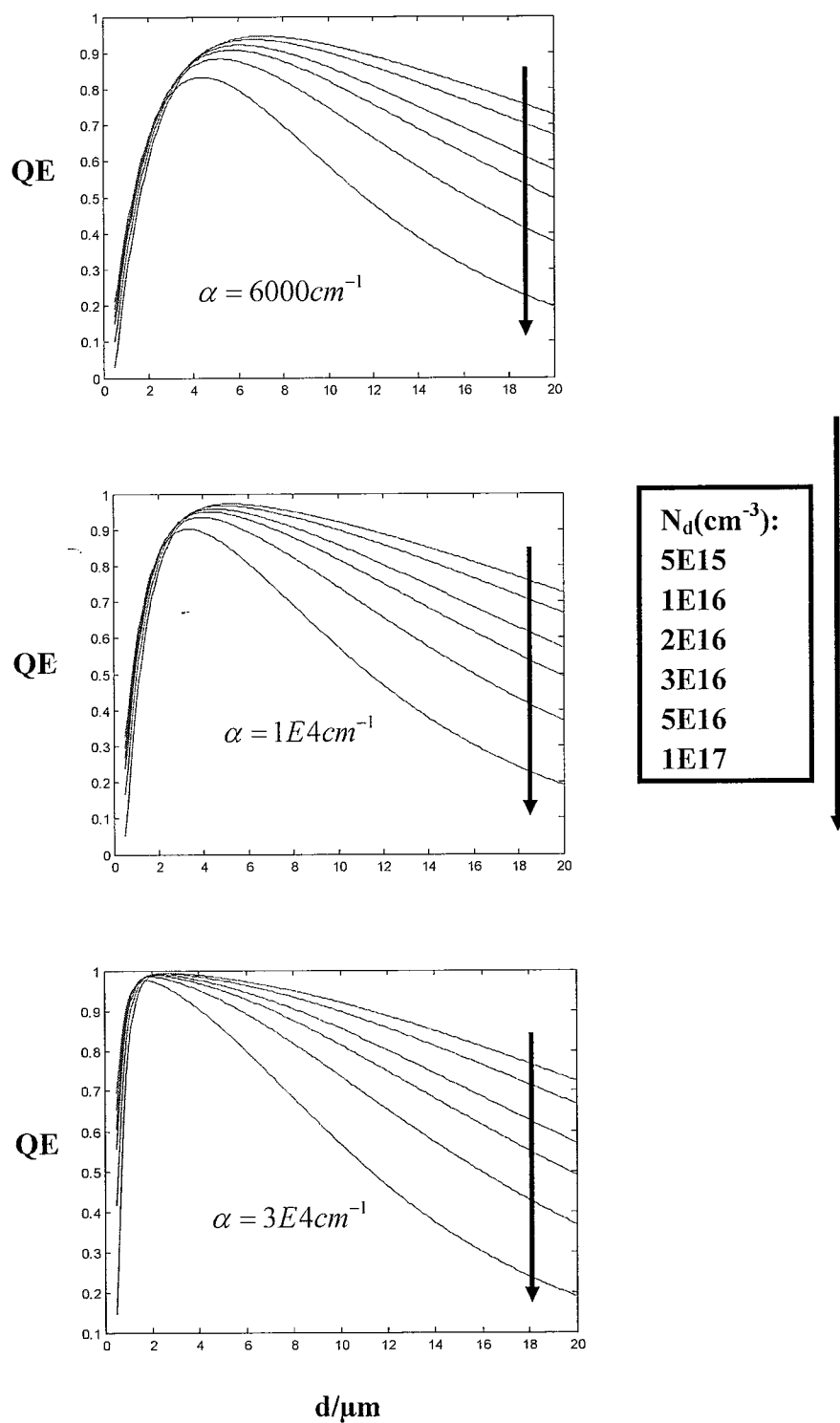
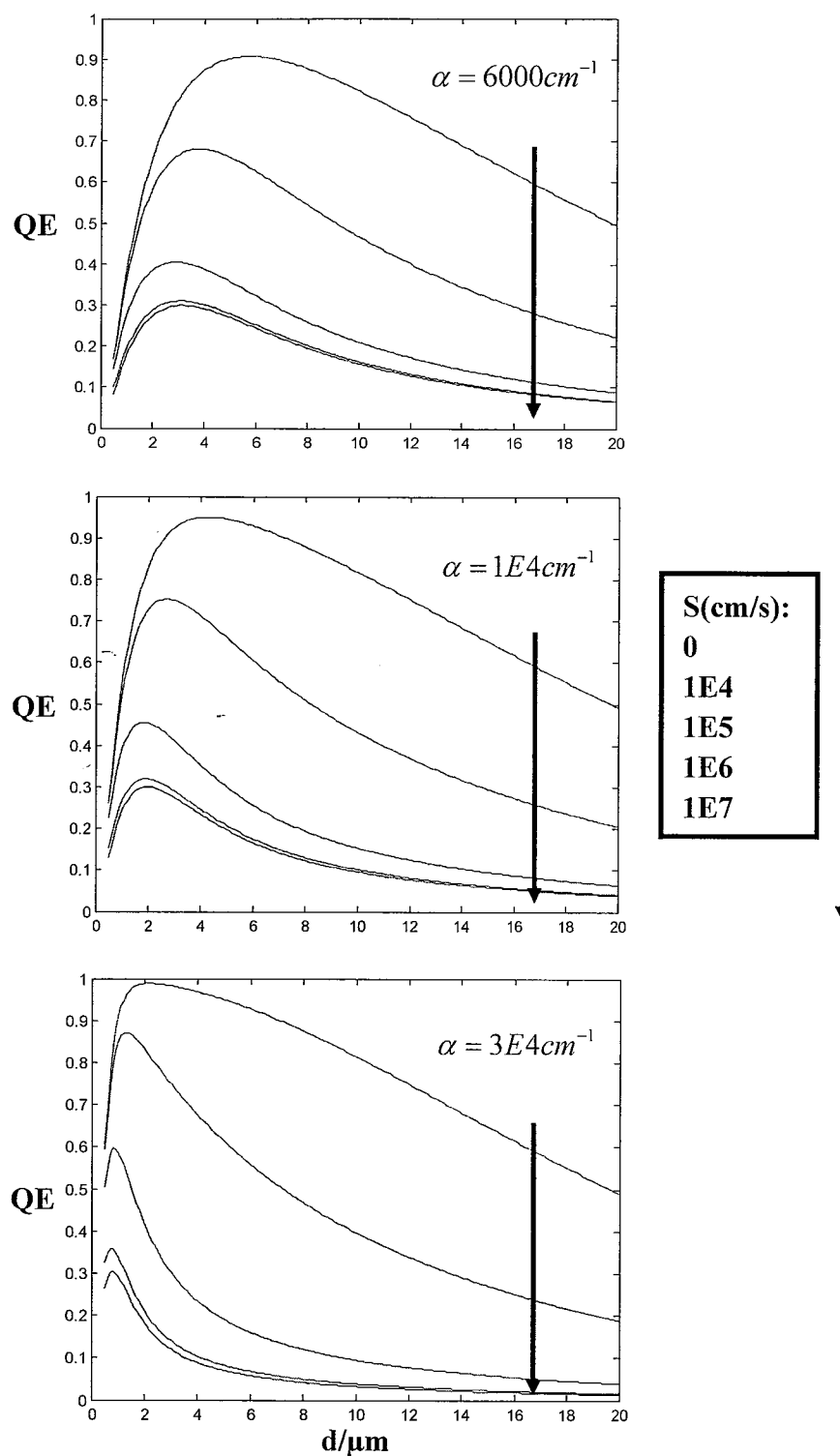


图 4.3.1 内量子效率在不同掺杂浓度下随吸收层厚度的变化关系 ($S=0$)

Fig4.3.1 QE vs. d with different concentrations ($S=0$)

实际器件的界面复合速率并不为零，考虑掺杂浓度为 $3E16$ 时，器件内量子效率在不同界面复合速率下随吸收层厚度 d 的变化如图 4.3.2 所示。

图 4.3.2 内量子效率在不同复合速率下随吸收层厚度的变化关系 ($N_d=3\text{E}16\text{cm}^{-3}$)Fig4.3.2 QE vs. d with different interface recombination velocities ($N_d=3\text{E}16\text{cm}^{-3}$)

选取的复合速率值如图中所示, 分别为 0、1E4、1E5、1E6、1E7cm/s, 随着界面复合速率的增加, 器件的量子效率急剧下降, 趋势如图中所示。而且复合速率越大, 量子效率到达峰值之后随着 d 的增大下降的很快, 因为此时大部分载流子在界面复合掉了, 没有到达耗尽区被收集。吸收系数对量子效率的影响与图

4.3.1 中情况基本相似。

4.4 延伸波长 InGaAs 探测器量子效率随波长的变化

由于 InGaAs 吸收层对不同波长的光的吸收系数不同（如图 4.2.2），因此对应的峰值量子效率也不同，而且峰值处对应的吸收层厚度也不同。考虑掺杂浓度为 $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，界面复合速率为 $5 \times 10^4 \text{cm/s}$ 的情况下，不同吸收层厚度的器件内量子效率随波长（ $1.2 \sim 2.6 \mu\text{m}$ ）的变化关系，如图 4.4.1 所示。在所考虑的波段内， d 越小，短波的量子效率越大， d 越大，长波的量子效率越大，这是因为短波的吸收系数大，在较短的距离内基本被吸收， d 越小，越容易通过扩散被收集，从而减小了复合的几率，而长波的则相反。

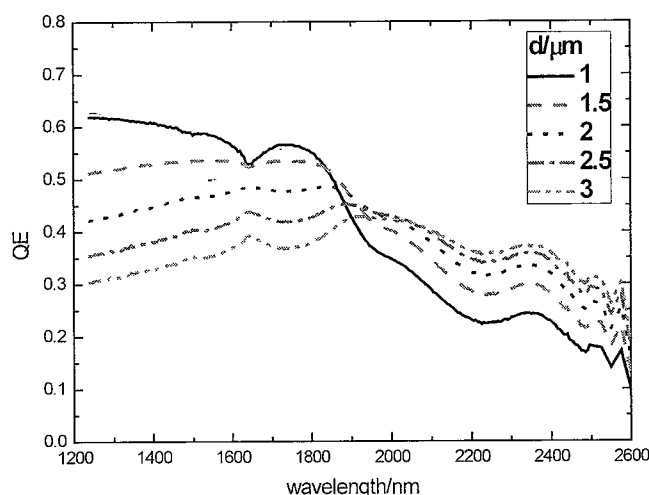


图 4.4.1 不同吸收层厚度的器件量子效率随波长的变化关系($N_d=3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $S=5 \times 10^4 \text{cm/s}$)

Fig4.4.1 QE vs. wavelength with different thicknesses ($N_d=3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $S=5 \times 10^4 \text{cm/s}$)

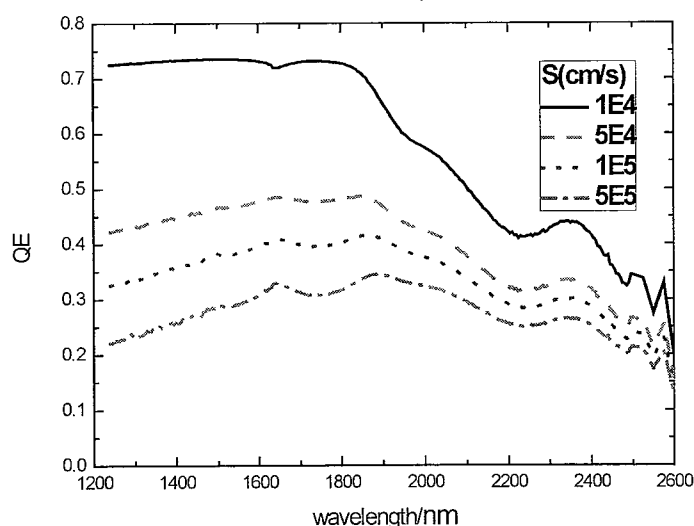


图 4.4.2 不同界面复合速率的器件量子效率随波长的变化关系($N_d=3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, $d=2 \mu\text{m}$)

Fig4.4.2 QE vs. wavelength with different interface recombination velocities

界面复合速率对器件量子效率的影响也较大，考虑掺杂浓度为 $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，

吸收层厚度为 $2\mu\text{m}$ 的情况下, 不同复合速率的器件量子效率随波长的变化关系如图 4.4.2 所示。由图可以看出, 界面复合速率 S 越大, 器件的量子效率越小, 而且由于短波被吸收的地方离界面较近, 因此量子效率下降相对较快。

以上的讨论都没有考虑表面的反射。这里假设在背面生长一层 $\text{ZnS}(n=2.3)$, 而 InP 衬底在所考虑的波段范围内折射率约为 3.15, 而且基本不吸收光, 则光在表面的反射情况如图 4.4.3 所示。 R_1 为空气/ ZnS 表面的光强反射率, T_1 为空气/ ZnS 表面的光强透射率, R_2 为 ZnS/InP 界面的光强反射率, T_2 为 ZnS/InP 界面的光强透射率。

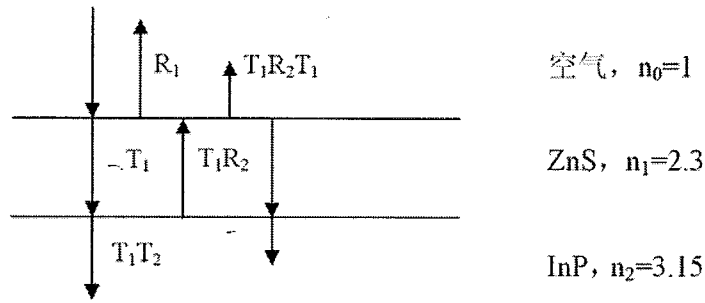


图 4.4.3 光在薄膜中的传播

Fig4.4.3 The spread of light in the film

不考虑表面的漫反射, 由菲涅耳公式可知:

$$R_1 = \frac{(2.3-1)^2}{(2.3+1)^2} = 0.155 \quad T_1 = 1 - R_1 = 0.845 \quad (4.21)$$

$$R_2 = \frac{(3.15-2.3)^2}{(3.15+2.3)^2} = 0.024 \quad T_2 = 1 - R_2 = 0.976 \quad (4.22)$$

考虑垂直入射的情况, 反射干涉主要发生在直接反射光和经薄膜一次透射和反射后的光束之间, 因此只考虑两次反射, 光程差为

$$\delta = 2n_1l \quad (4.23)$$

其中 n_1 为 ZnS 的折射率, l 为 ZnS 薄膜的厚度, 则总的反射率、透射率如下:

$$R = \frac{I_R}{I_0} = R_1 + T_1R_2T_1 + 2\sqrt{R_1T_1R_2T_1} \cos \frac{2\pi\delta}{\lambda} \quad (4.24)$$

$$T = 1 - R \quad (4.25)$$

在 $1.2 \sim 2.6\mu\text{m}$ 的波段范围内, 总的透射率随波长的变化如图 4.4.4 所示。

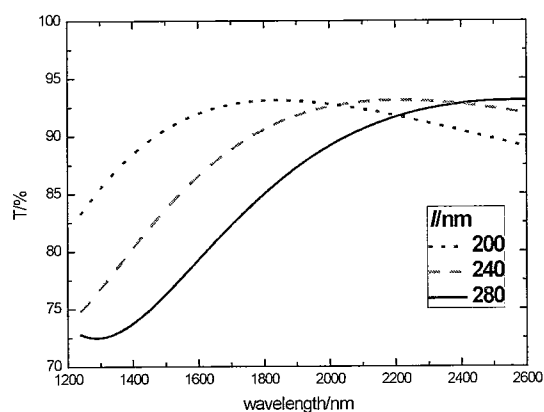


图 4.4.4 透射率随波长的变化 (不同的 ZnS 厚度 l)

Fig4.4.4 Transmittance vs. wavelength

考虑背面反射 (ZnS厚度为240nm) 之后, 器件的量子效率如下所示:

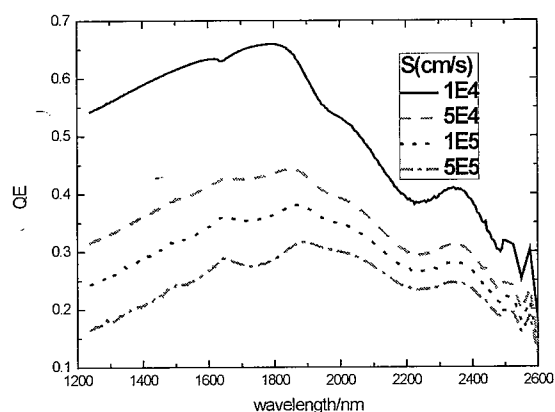


图 4.4.5 考虑背面反射之后不同界面复合速率的器件量子效率随波长的变化关系

($N_d=3E16cm^{-3}$, $d=2\mu m$, $l=240nm$)

Fig4.4.5 QE vs. wavelength with different interface recombination velocities ($N_d=3E16cm^{-3}$, $d=2\mu m$, $l=240nm$)

将上图转化成归一化 (即各波长的入射功率归一化且强度归一化) 的响应光谱如图 4.4.6 所示:

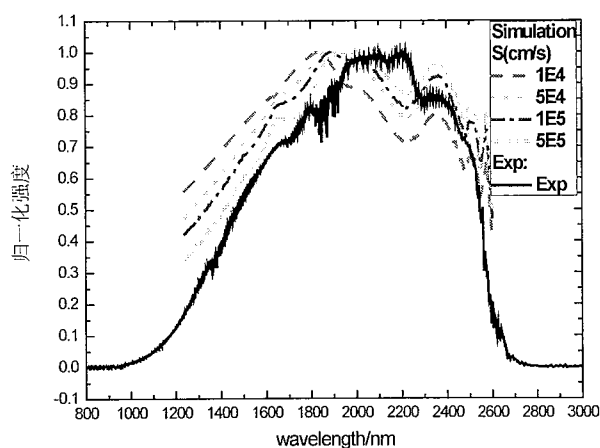


图 4.4.6 理论拟合归一化响应光谱与实验所得归一化光谱

Fig4.4.6 Normalized response spectrum of simulation and experiment

4.5 本章小结

本章通过建立物理模型,并通过测试以及参考文献获得材料参数,对P-on-N结构器件的量子效率进行了理论模拟,分析了吸收层掺杂浓度、吸收层厚度、界面复合速率以及材料对光的吸收系数等对器件量子效率的影响,而且对量子效率随波长的变化也进行了分析,为提高器件量子效率提供了一定的理论参考。由于在理论模拟过程中,采用了一些简化模型,并且所用参数也有一部分是参考文献或假设的,因此与实际的量子效率存在一定的差别。

第五章 台面型延伸波长 InGaAs 面阵探测器研究

由于 1~3 μm 短波红外波段包含很多有用的光谱特征信息,因此在遥感、天文观测、大气监测、光谱成像等领域引起了广泛关注。尤其在 1.7~2.6 μm 短波红外波段包含 O-H、C-H、C-O、C=O 和 N-H 等功能键的大量特征吸收^[23],这些光谱信息占整个 1~3 μm 短波红外波段的一半以上。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^[32],长线条和面阵 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。2001 年 ESA 新一代环境卫星 ENVISAT 上大气分布扫描成像吸收光谱仪(SCIAMACHY)采用 1024 元 InGaAs 线列探测器用于延伸短波红外的探测($\sim 2.4\mu\text{m}$)^[132]。随着 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中 In 组分的增大,其响应波长范围向长波方向延伸,当 In 组分增大到 0.8、0.83 时, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料响应截止波长分别延伸到 2.4 μm 、2.6 μm ,波长延伸的 InGaAs 探测器需求前景更为广泛,如 1.9 μm 的农作物水分探测、1.9~2.5 μm 波段资源卫星中高分辨率多光谱成像等。因此发展延伸波长 InGaAs 面阵焦平面探测器对航天遥感应用具有十分重要的意义。随着 In 组分增大,材料的缺陷增多,器件的性能也会下降,因此研究影响器件性能的各种因素对于提高器件性能具有指导意义。

5.1 台面型波长延伸至 2.4 μm 32 $\times$ 32 InGaAs 面阵探测器研究

5.1.1 光敏芯片制备

所用材料为 GSMBE 生长的 PIN 结构 InAlAs/InGaAs/InAlAs 双异质结材料 M54L,材料具体参数见表 5.1.1。芯片制备工艺流程见图 3.4.3 中流程 I。采用 ICP 刻蚀技术进行台面成型,并用 $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ 水溶液进行湿法修复腐蚀以减小刻蚀损伤。采用 PECVD 生长 SiN_x 膜进行表面及侧面的钝化,钝化前使用 HF 缓冲液去除氧化层。p 电极采用 Ti/Pt/Au 金属膜系,退火条件为 420 $^\circ\text{C}$ & 40s, n 电极采用 Cr/Au 金属膜系,电极制备完成后生长 In 柱,正面保护并对芯片背面进行抛光减薄,低温生长 2800 $\text{\AA}$ ZnS 增透膜。芯片为 32 $\times$ 32 的面阵,其中心距为 30 μm ,光敏元大小为 25 $\times$ 25 μm^2 。探测器芯片与读出电路通过 In 柱进行倒焊互连,探测器及焦平面组件实物如图 5.1.2 所示。将样品标记为 Sample A。

将芯片与中测电极板、电路分别倒焊，芯片的变温 R_0 、I-V 特性采用 Keithely 6430 进行测量，焦平面性能采用焦平面测试系统进行测量。

表 5.1.1 M54L 材料编号、结构和参数

Table 5.1.1 The structure and parameter of materials

	导电类型	掺杂物质	厚度 (μm)	掺杂浓度(cm^{-3})
$\text{In}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$	P^+	Be	0.6	$2\text{E}18$
$\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$	n^-	Si	1.5	$3\text{E}16$
$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As buf}$	N^+	Si	1.4	$3\text{E}18$
InP substrate	S.I.	Fe	350 ± 20	

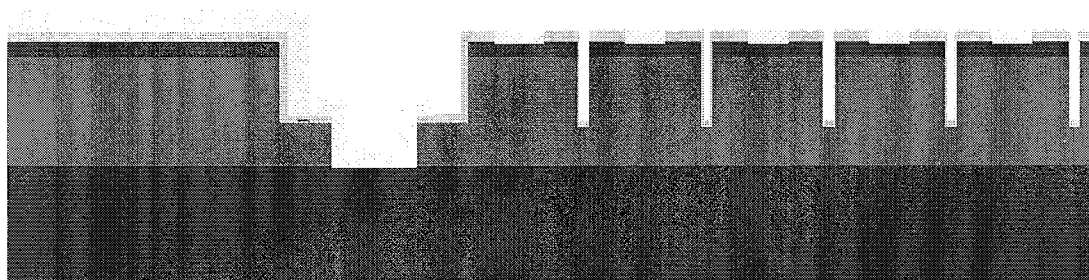


图 5.1.1 32×32 器件剖面结构图（未画出 In 柱）

图 5.1.1 Scheme of 32×32 mesa PIN photodiode

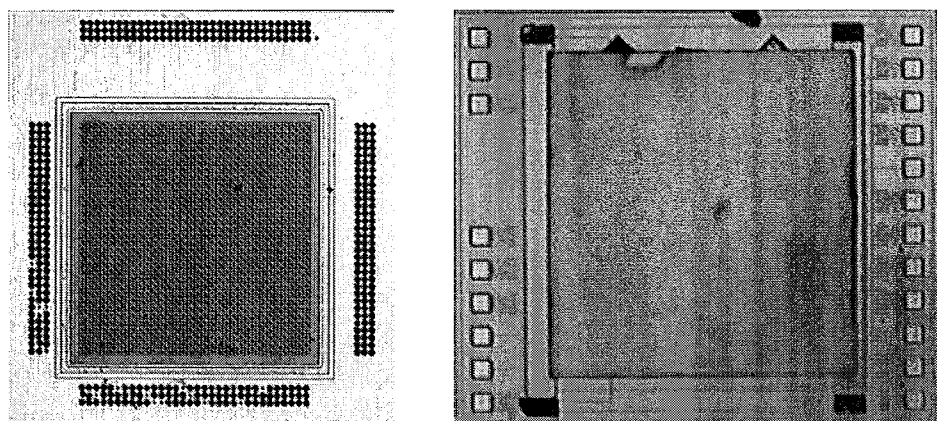


图 5.1.2 32×32 元 InGaAs 面阵焦平面探测器及组件实物图

Fig5.1.2 photos of 32×32 InGaAs detector and FPA

5.1.2 芯片特性分析

5.1.2.1 R_0 -T 关系

器件的 R_0 对数与 $1000/T$ 的关系图及其拟合结果如图 5.1.3 所示。扩散电流和产生复合电流是热电流机制，对于所研究的 p-i-n 结构器件，扩散主要考虑空

穴扩散电流，对于有限厚度的外延层 p-i-n 结构来说，假设从耗尽区边为 0，吸收层边为 H，则少子浓度连续性方程：

$$\frac{d^2 \Delta p(x)}{dx^2} - \frac{\Delta p(x)}{L_p^2} = 0 \quad (5.1)$$

边界条件为：

$$\Delta p(0) = p_0(e^{\frac{qV}{kT}} - 1), -qD_p \frac{d\Delta p(x)}{dx} \Big|_{x=H} = S \Delta p(x) \Big|_{x=H} \quad (5.2)$$

由此可得扩散电流如下所示：

$$I_{diff} = \frac{AqD_p n_i^2}{N_D L_p} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1) \frac{\sinh(\frac{H}{L_p}) + \alpha \cosh(\frac{H}{L_p})}{\cosh(\frac{H}{L_p}) + \alpha \sinh(\frac{H}{L_p})} \quad (5.3)$$

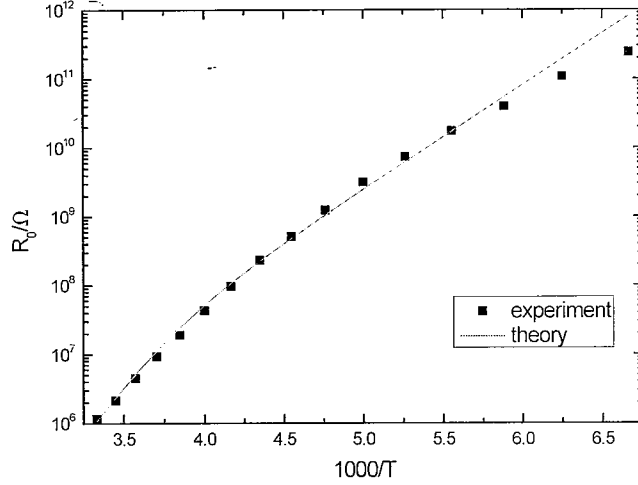


图 5.1.3 器件的零偏动态阻抗 R_0 与 $1000/T$ 的实验曲线和拟合结果

Fig5.1.3 The dependence of the measured zero-bias differential resistance R_0 on temperature and the fitting results

其中 S 为界面复合速度， A 为光敏元面积， L_p 为空穴扩散长度， $\alpha = \frac{SL_p}{D_p}$ 。

对于产生复合电流^[110]：

$$I_{gr} = \frac{qn_i A W_{dep}}{2\tau_{gr}} \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (5.4)$$

由式 (5.3) 和式 (5.4) 可得到扩散电流和产生复合电流的零偏动态阻抗分别为：

$$R_{0diff} = \frac{N_D L_p kT}{A q^2 D_p n_i^2} \frac{\cosh(\frac{H}{L_p}) + \alpha \sinh(\frac{H}{L_p})}{\sinh(\frac{H}{L_p}) + \alpha \cosh(\frac{H}{L_p})} \quad (5.5)$$

$$R_{0gr} = \frac{4\tau_{gr} kT}{q^2 n_i A W_{dep}} \quad (5.6)$$

在测试的温度范围内，采用如下公式 $\frac{1}{(R_0)_{thermal}} = \frac{1}{(R_0)_{diff}} + \frac{1}{(R_0)_{gr}}$ ，与实验数

据进行拟合，得到吸收层少子寿命 τ_p 及其空间电荷区的产生复合寿命 τ_{gr} 分别为

$\tau_p = 3 \times 10^{-7} s$, $\tau_{gr} = 1 \times 10^{-7} s$ ，所得结果与由文献^[129,130]中分析所得结果较为吻合。

在拟合时，由于较高温下漏电流引起的并联电阻相对较大，因此暂不考虑。取界面复合速度 $S = 5 \times 10^5 \text{ cm/s}$ ，并使用公式^[133]来计算材料的禁带宽度 E_g 和本征载流子浓度 n_i ，而空穴迁移率 μ_p 则采用低场迁移率模型^[127]进行计算，扩散长度为 $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ 。在测试的温度范围内，主要以热电流机制为主，而隧穿电流则几乎可以忽略， R_0 随温度的增大基本呈指数减小。

5.1.2.2 器件的I-V特性分析

器件的变温 I-V 曲线如图 5.1.4 所示。分别对 300K 和 220K 时的 I-V 实验曲线进行各种暗电流的拟合计算，在拟合过程中，调整材料参数和器件的一些不确定量，使 I_{th} (theoretical value) 和 I_{exp} (experiment value) 在不同的偏压下尽量接近，即使 $I_{exp} = I_{th} = I_{diff} + I_{gr} + I_{bbt} + I_{lat} + I_{ohmic}$ 。扩散电流和产生复合电流分别采用式 (5.3) 和式 (5.4)，带间隧穿电流采用下面的公式^[110]：

$$\frac{I_{bbt}}{A} = \frac{q^3 F_m V_{bias}}{h^2} \sqrt{\frac{2m^*}{E_g}} \exp \left[\frac{-8\pi}{3qF_m h} \sqrt{2m^* E_g^3} \right] \quad (5.7)$$

因为 pn 结内电场不为常量，此处的 F_m 取为常量即结内电场的平均值：

$$F_m = \sqrt{\frac{q(V_{bi} - V_{bias})N_D N_A (\epsilon_1 N_D + \epsilon_2 N_A)}{2\epsilon_1 \epsilon_2 (N_D + N_A)^2}}, m^* \text{ 为载流子的平均有效质量: } m^* \approx \frac{m_e^* m_h^*}{m_e^* + m_h^*},$$

对于 $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$, $m_e^* = 0.031m_0$, $m_h^* = 0.037m_0$, $m^* = 0.017m_0$ 。器件的陷阱辅助隧穿电流采用如下的公式^[130]：

$$I_{tot} = A[\pi^2 q^2 m^* M^2 N_t |V_{bi} - V| / h^3 (E_g - E_t)] \times \exp[-8\pi (2m^*)^{1/2} (E_g - E_t)^{3/2} / 3qhF_m] \quad (5.8)$$

其中 N_t 为陷阱浓度, M 为陷阱势垒矩阵元, m^* 为有效质量, F_m 为结内电场的平均值, E_t 为陷阱能级。

欧姆漏电流 I_{ohmic} 采用以下公式^[134]:

$$I_{ohmic} = V/R_{sh} \quad (5.9)$$

其中 R_{sh} 为器件并联电阻。

计算中, 假设 $E_t = E_g/2$ ^[135], M^2 取为 $1 \times 10^{-20} \text{eV}^2 \text{cm}^3$ 。300K 时的 I-V 曲线拟合结果如图 5.1.5 所示, 其中少数寿命与产生复合寿命采用 5.1.2.1 中所得结果, 拟合得并联电阻为 $R_{sh} = 1.9 \times 10^7 \Omega$ 。拟合结果表明在 300K 时, 在所考虑的偏压范围内, 暗电流主要由扩散电流、产生复合电流及其欧姆漏电流构成, 而带间隧穿电流和陷阱辅助隧穿电流都可以忽略。T=220K 时, 其 I-V 曲线拟合结果如图 5.1.6 所示, 小偏压下暗电流主要由产生复合电流和欧姆漏电流组成, 反偏压增大时, 陷阱辅助隧穿电流开始占主导作用, 产生复合寿命、并联电阻及陷阱浓度的拟合结果分别为 $\tau_{gr} = 6 \times 10^{-8} \text{s}$, $R_{sh} = 1.7 \times 10^9 \Omega$, $N_t = 1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 。

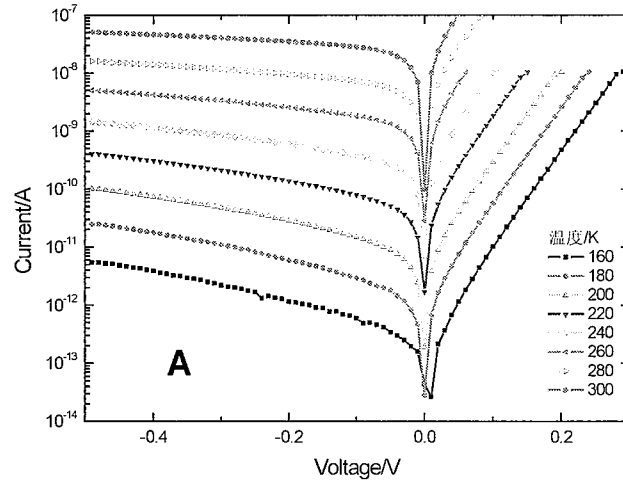


图 5.1.4 器件的 I-V 实验曲线 (160K-300K)

Fig5.1.4 I-V curves of the photodiode (160K- 300K)

由拟合结果可以明显的看出, 在室温时, 扩散电流远大于产生复合电流, 由式 (5.3) 可以看出扩散电流主要由半导体的材料参数及其结构如吸收层厚度及掺杂浓度等决定, 通过优化材料结构, 改善材料性能, 可以较大幅度的降低扩散电流。随着温度的降低, 扩散电流和产生复合电流都快速的减小, 且扩散电流下降幅度远大于产生复合电流, 这是因为 $I_{diff} \propto n_i^2$ 而 $I_{gr} \propto n_i$ 。当温度到达 200K 左

右, 隧穿电流已不可忽略, 尤其在大的偏压下。另外 220K 和 300K 时的 I-V 拟合结果都表明欧姆漏电流贡献较大, 且欧姆漏电流随温度的降低没有产生复合电流和扩散电流减小的幅度大。欧姆漏电流主要由漏电通道所致, 在本文所研究的器件中, 可能的漏电通道有以下两个可能: ICP 刻蚀台面成型时损伤导致的光敏元侧面漏电通道; 外延材料内部缺陷形成的漏电通道。结果表明目前的 ICP 刻蚀条件所引入的损伤较大。有研究^[136]表明, 通过热退火和湿法腐蚀可以极大的修复刻蚀台面所形成的损伤, 而且 S 钝化与低温生长 SiN_x 钝化技术^[137]相结合可以有效的中和表面及其侧面的悬挂键, 减小复合中心浓度, 从而降低欧姆漏电流。因此可对低损伤 ICP 刻蚀以及有效的钝化作进一步的研究。

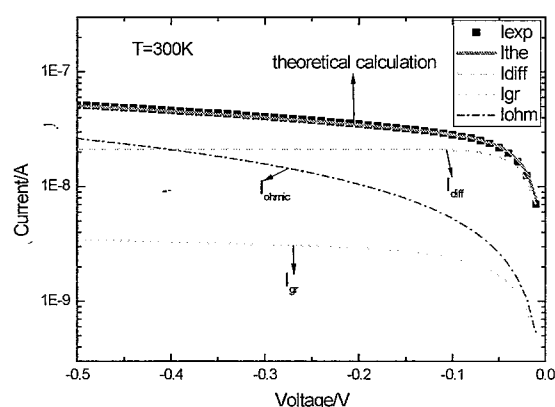


图 5.1.5 T=300K 时, I-V 实验曲线和各种暗电流机理的理论拟合结果

Fig5.1.5 At 300K, the I-V characteristic of experiment and theoretical fitting of different dark current mechanism

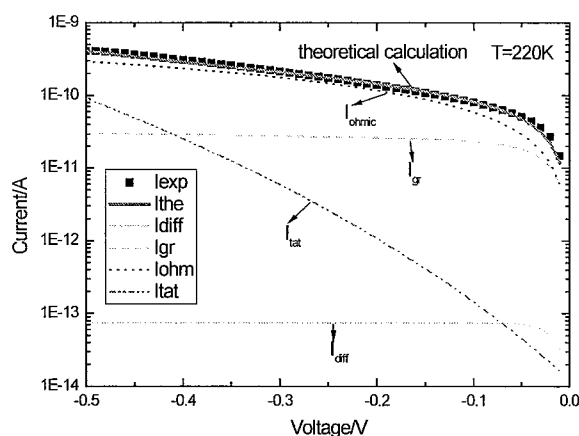


图 5.1.6 T=220K 时, I-V 实验曲线和各种暗电流机理的理论拟合结果

Fig5.1.6 At 220K, the I-V characteristic of experiment and theoretical fitting of different dark current mechanism

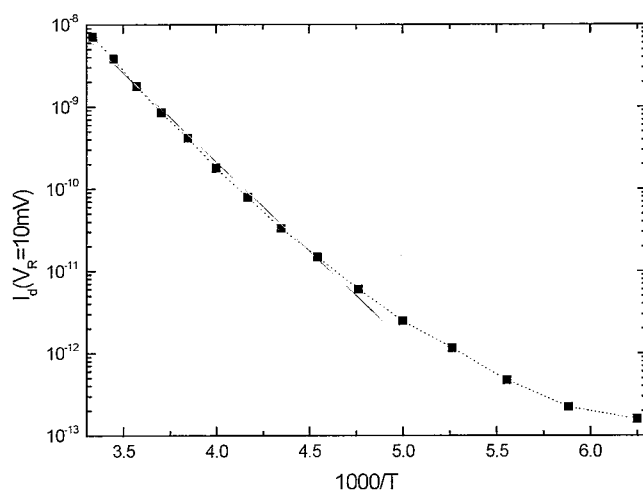
图 5.1.7 $I_d (V_R=10\text{mV}) - 1000/T$ 曲线Fig5.1.7 the curve of $I_d (V_R=10\text{mV}) - 1000/T$

图 5.1.7 所示为 $I_d (V_R=10\text{mV})$ 随温度的变化关系，在 220K-300K 的温度范围内，呈指数关系，为热电流主导，与 5.1.2.1 中所得结论吻合，通过拟合 $I_d \propto \exp(-E_a/kT)$ 可得热激活能 $E_a=0.443\text{eV}$ ，与文献^[38]中所得的 $E_a=0.4365\text{eV}$ 基本一致。较大的热激活能表明扩散电流较大，与 I-V 拟合结果相吻合。

5.1.2.3 光谱特性

图 5.1.8 所示为抽测 5 元的常温归一化光谱曲线，5 条曲线基本重合。在归一化强度的 50% 处的截止波长为 $2.46\mu\text{m}$ 。

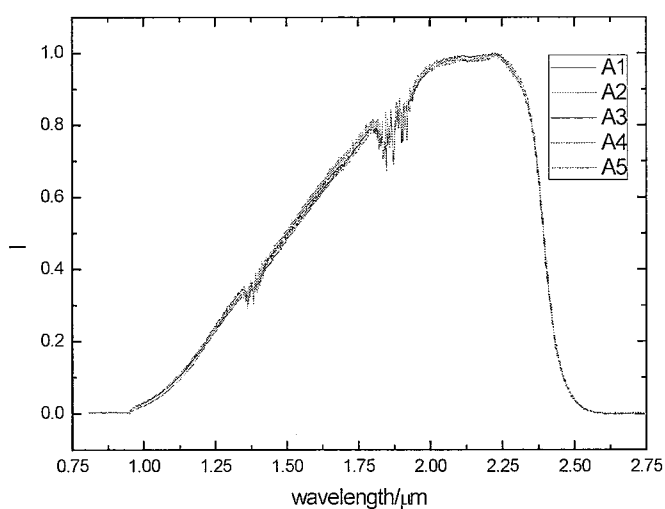


图 5.1.8 常温归一化响应光谱

Fig5.1.8 The normalized response spectrum at room temperature

5.1.2.4 信号和噪声的温度特性

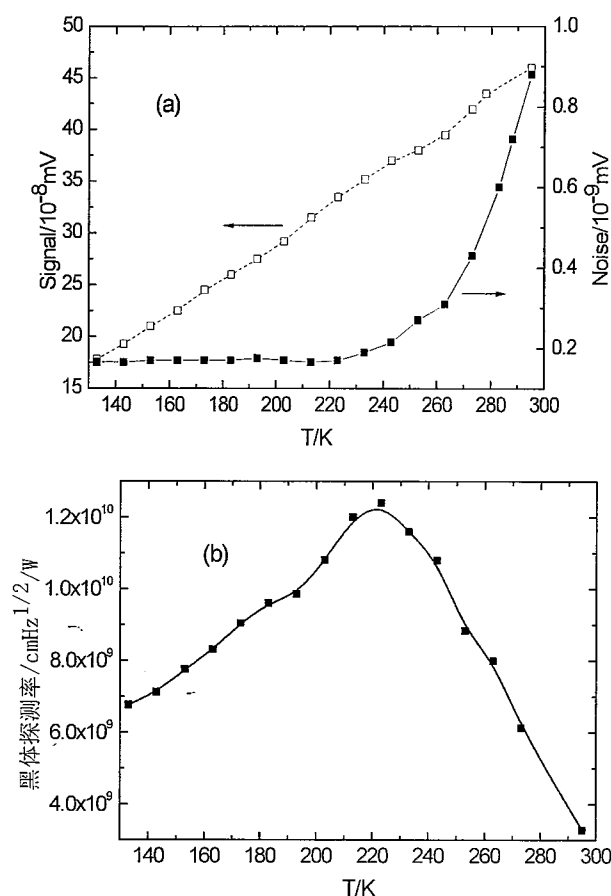


图 5.1.9 (a) 信号及噪声与温度的关系; (b) 黑体探测率与温度的关系

Fig5.1.9 (a) Signal and noise versus temperature; (b) D_{bb} versus temperature

图 5.1.9 (a) (b) 所示为器件黑体信号和噪声与温度的关系及黑体探测率随温度的关系, 测试条件如下: 黑体孔径 8mm、距离 19cm、黑体温度 900K。随着温度的降低, 信号和噪声的变化规律是不同的, 信号随温度降低均匀减小, 而噪声则是先快速减小后逐渐趋于平稳。因为受到测量系统的限制, 当温度低于 220K 时噪声趋于平稳, 因此温度在 220K 以下时所得的噪声并不能反映出器件本身的噪声变化趋势。因此图中 150K-220K 时黑体探测率的变化趋势并不能反映真实的情况。220K 时, 黑体探测率为 $1.24 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。

5.1.3 焦平面特性分析

读出电路采用 CTIA 作为输入级并采用相关双采样电路来减小噪声。读出电路前 32×16 是常规结构, 积分电容为 0.1pF; 后 32×16 是测试结构, 其中包含变积分电容部分, 积分电容分别为 5fF、10fF、20fF、30fF、50fF。将光敏芯片与读出电路芯片通过 In 柱进行互连, 焦平面模块封装在真空杜瓦瓶中, 采用液氮

控制温度，利用焦平面测试系统对焦平面模块性能进行测试，测试温度分别为 150K-210K，测试条件：测试环境温度 300K，黑体温度 900K，黑体孔径 10mm，固定测试距离 40cm，读出频率 100KHz。对应读出电路前 32×16 元的测试结果，如图 5.1.10 所示为 200K 时积分时间为 1ms 的响应直方图，盲元率为 1.6%。

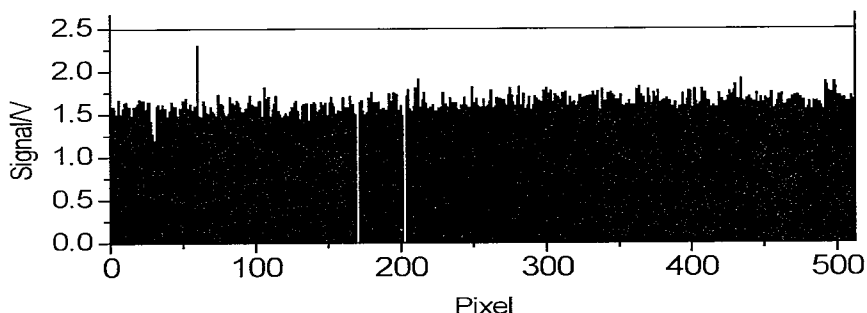


图 5.1.10 组件 32×16 元信号响应直方图

Fig5.1.10 Response histogram of 32×16 elements

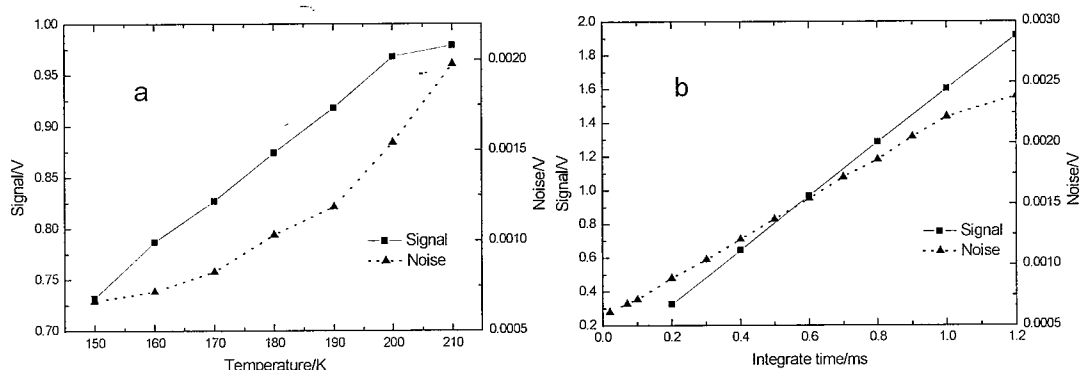


图 5.1.11 a.信号和噪声与温度的关系 ($T_{int}=0.6ms$) b.信号和噪声与积分时间的关系 ($T=200K$)

Fig5.1.11 a. Signal and Noise versus Temperature ($T_{int}=0.6ms$)

b. Signal and Noise versus Integrate time ($T=200K$)

信号和噪声与温度的关系以及信号和噪声与积分时间的关系如图 5.1.11 所示。信号和噪声随温度的降低都是减小的，与芯片测试结果一致，且随着积分时间的增大信号与噪声基本呈线性增大。平均探测率随积分时间的变化基本保持不变，随温度的降低而增大，如图 5.1.12 所示，200K 时，其黑体探测率达到 $1.0E10cmHz^{1/2}/W$ ，150K 时黑体探测率可达到 $2.40E10cmHz^{1/2}/W$ ，比芯片测试结果略低。焦平面信号非均匀性随积分时间和温度的变化如表 5.1.2 所示，随着温度的降低，信号的非均匀性基本是减小的，在 150K-200K 时随着积分时间的增大，信号的非均匀性减小。

由前 32×16 焦平面测试结果可知，通过降低工作温度，以及在一定的温度范围内，通过增加积分时间，可以有效的改善焦平面组件的性能。

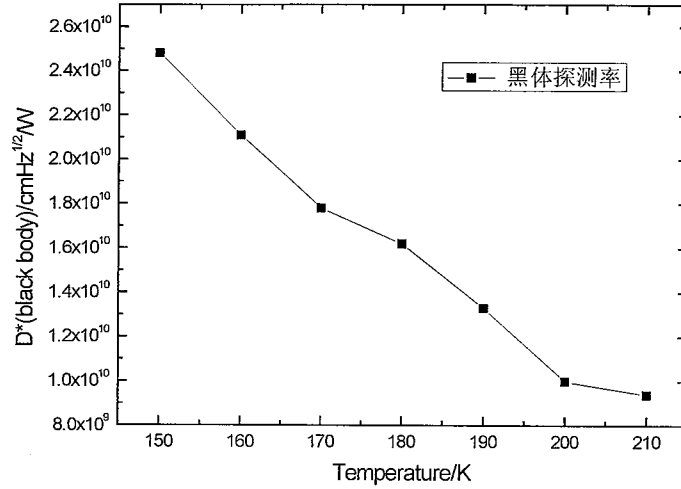


图 5.1.12 黑体探测率与温度的关系

Fig5.1.12 D_{bb} versus Temperature

表 5.1.2 信号非均匀性随积分时间及温度的变化

Table5.1.2 Non-uniformity of signal versus integrate time and temperature

温度/K	信号非均匀性 (%)			
	0.2ms	0.4ms	0.6ms	1.0ms
150	7.0	6.9	6.9	5.4
160	7.5	6.8	6.7	5.3
170	7.6	7.4	7.1	5.8
180	7.6	7.4	7.1	6.0
190	7.8	7.7	7.4	6.3
200	8.0	7.9	7.9	6.9
210	8.2	8.6	9.0	10.8

通过对读出电路变积分电容 C_{int} 测试结构部分的焦平面测试结果进行分析，对电路上积分电容的寄生电容 C_p 进行了估算。计算过程中，假设在一个固定的温度下，每个读出电路上积分电容的寄生电容 C_p 相等。组件暗信号表达如下：

$$V_{dark} = \frac{I_{dark} * T_{int}}{\eta(C_{int} + C_p)} + V' \quad (5.10)$$

其中 V' 为 $T_{int}=0s$ 时测得信号， I_{dark} 为不同温度下的暗电流， η 为读出电路增益。则随积分时间的变化斜率为 $K = \frac{I_{dark}}{\eta(C_{int} + C_p)}$ ，即： $\frac{1}{K} = \frac{\eta}{I_{dark}} C_{int} + \frac{\eta}{I_{dark}} C_p$ ，对于不同的积分电容，可以得到 $1/K$ 与 C_{int} 的关系。作 $1/K \sim C_{int}$ 曲线，线性拟合

$\frac{1}{K} = \frac{\eta}{I_{dark}} C_{int} + \frac{\eta}{I_{dark}} C_p$, 从而积分电容可表示为:

$$C_p = \frac{\text{截距}}{\text{斜率}} \quad (5.11)$$

分别在 150K、170K 和 210K 温度下, 进行拟合计算, 如表 5.1.3 所示。通过对不同积分电容 C_{int} 的组件暗信号与积分时间关系进行分析, 计算出积分电容上的寄生电容约为 10fF。在后续设计小积分电容的读出电路时, 考虑减小、校正寄生电容影响, 从而提高焦平面组件的性能。

表 5.1.3 寄生电容的拟合计算结果

Tab5.1.3 the simulation results of C_p

温度/K	$\frac{\eta}{I_{dark}}$	$\frac{\eta}{I_{dark}} C_p$	C_p/fF
150	1.722	11.24	6.5
170	0.3351	3.001	8.9
210	0.0166	0.183	11.0

5.2 台面型波长延伸至 $2.6\mu\text{m}$ 64×64 InGaAs 面阵探测器研究

5.2.1 芯片制备

所用材料为 GSMBE 生长的 PIN 结构 InAlAs/InGaAs/InAlAs 双异质结材料, 材料具体参数见表 5.2.1。芯片为 64×64 的面阵, 其中心距为 $30\mu\text{m}$, 光敏元大小为 $28 \times 28\mu\text{m}^2$ 。样品 B 同 5.1.1 中样品 A 采用工艺 I, 样品 C 采用工艺 II (具体步骤见图 3.4.3), 样品 B 采用 PECVD 生长 SiN_x 钝化膜, 样品 C 采用 ICPCVD lowrate 模式生长 SiN_x 钝化膜。探测器芯片与中测电极板通过 In 柱进行倒焊互连, 如图 5.2.1 所示, 芯片结构剖面如图 5.2.2 所示。

表 5.2.1 材料编号、结构和参数
Table 5.2.1 the structure and parameter of materials

材料		导电类型	掺杂物质	厚度 (μm)	掺杂浓度 (cm ⁻³)	制备工艺
B	In _{0.83} Al _{0.17} As	P ⁺	Be	0.6	2E18	I
	In _{0.83} Ga _{0.17} As	n ⁻	Si	1.5	3E16	
	In _x Al _{1-x} As buf	N ⁺	Si	1.9	3E18	
	InP substrate	S.I.	Fe	350±20		
C	In _{0.83} Al _{0.17} As	P ⁺	Be	0.6	2E18	II
	In _{0.83} Ga _{0.17} As	n ⁻	Si	1.5	1E16	
	In _x Al _{1-x} As buf	N ⁺	Si	2.0	2E18	
	InP substrate	S.I.	Fe	350±20		

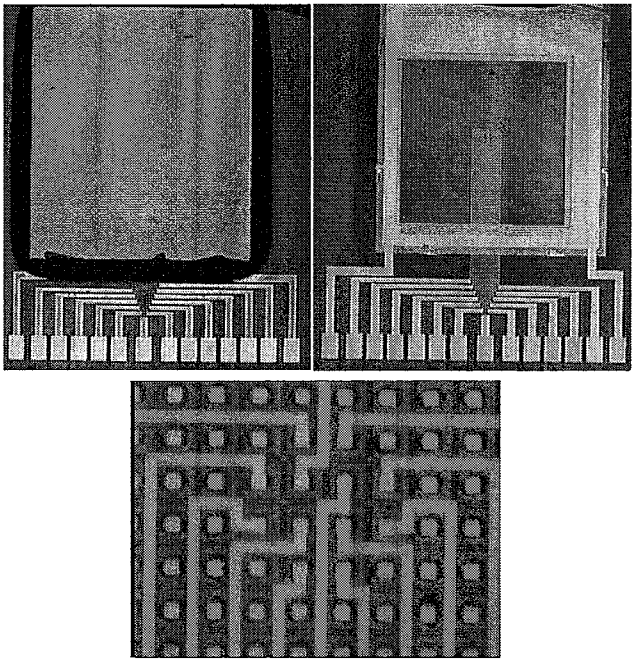


图 5.2.1 64×64 元 InGaAs 面阵焦平面探测器实物图
Fig5.2.1 photos of 64×64 InGaAs detector

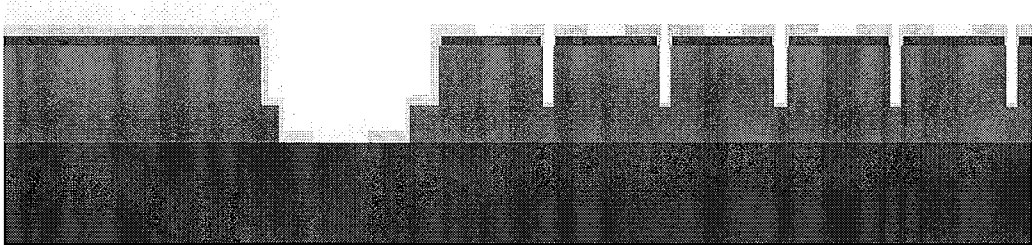


图 5.2.2 64×64 器件剖面结构图（未画出 In 柱）
Fig5.2.2 Scheme of 64×64 mesa PIN photodiode

5.2.2 芯片特性分析

5.2.2.1 I-V 特性

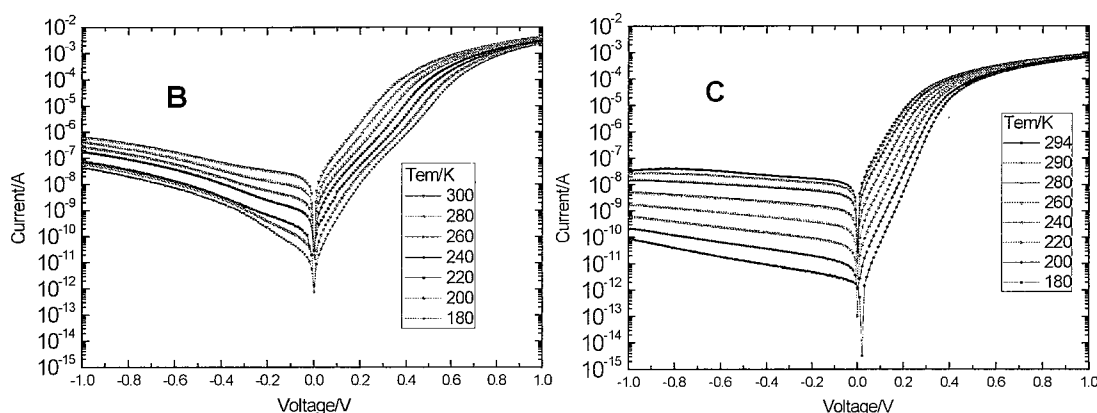


图 5.2.3 样品 B、C 的器件 I-V 变温实验曲线

Fig5.2.3 I-V curves of the photodiode

表 5.2.1 波长扩展 InGaAs 探测器系列变温 I-V 测试数据

Table 5.2.1 J_d @-10mV and -100mV and R_0A of Sample A, B and C

	J_d @-10mV (A/cm^2)			J_d @-100mV (A/cm^2)			R_0A (Ωcm^2)		
	280K	220K	180K	280K	220K	180K	280K	220K	180K
Sample A	2.85E-4	2.37E-6	7.54E-8	0.00118	1.28E-5	4.67E-7	28.1	3225	1.09E5
Sample B	2.22E-4	2.53E-6	7.27E-7	0.00116	3.99E-5	7.13E-6	40.2	1090	1.08E4
Sample C	1.45E-4	1.89E-6	7.03E-8	6.14E-4	8.19E-6	3.67E-7	55.1	4430	7.73E4

器件 B、C 的变温 I-V 特性曲线如图 5.2.3 所示（横、纵坐标范围相同）。由 Sample A 和 Sample B 的 I-V 对比可以看出，采用相同的工艺，样品 B 的暗电流要大的多，而且随着反偏压的增大或温度的降低，这种现象越明显。结果表明通过进一步增加 InGaAs 层中的 In 组分，将波长扩展的双异质结 $In_{0.83}Ga_{0.17}As$ 探测器的响应波长进一步扩展到 $2.6\mu m$ 左右，更大的失配导致材料缺陷更多，引入了更多的产生-复合中心，而且台面侧面的漏电也更明显。由图中可以看出，样品 C 相对于样品 B，暗电流下降了数个量级，而且随着反偏压的增大，暗电流增大趋势较缓，表明 ICPCVD lowrate 生长的 SiN 膜对器件的钝化效果远远好于 PECVD 生长的 SiN，尤其是对台面侧面的钝化，这与第三章中的结论一致。表 5.2.2 列出了部分温度下三种样品的暗电流密度以及优质因子数据。-10mV 偏压下样品 A 的暗电流密度从 280K 下 $2.85E-4 A/cm^2$ 下降到 220K 时的 $2.37E-6 A/cm^2$ ，到 180K 时为 $7.54E-8 A/cm^2$ ；样品 B 从 $2.22E-4 A/cm^2$ 下降到 $2.53E-6 A/cm^2$ ，再

到 $7.27\text{E-}7 \text{ A/cm}^2$ ；样品 C 从 $1.45\text{E-}4 \text{ A/cm}^2$ 下降到 $1.89\text{E-}6 \text{ A/cm}^2$ ，再到 $7.03\text{E-}8 \text{ A/cm}^2$ 。三个样品中样品 C 的暗电流密度最低，在较大的反偏压下更明显。图 5.2.4 所示为三种样品在 280K、220K、180K 时的 I-V 曲线对比。

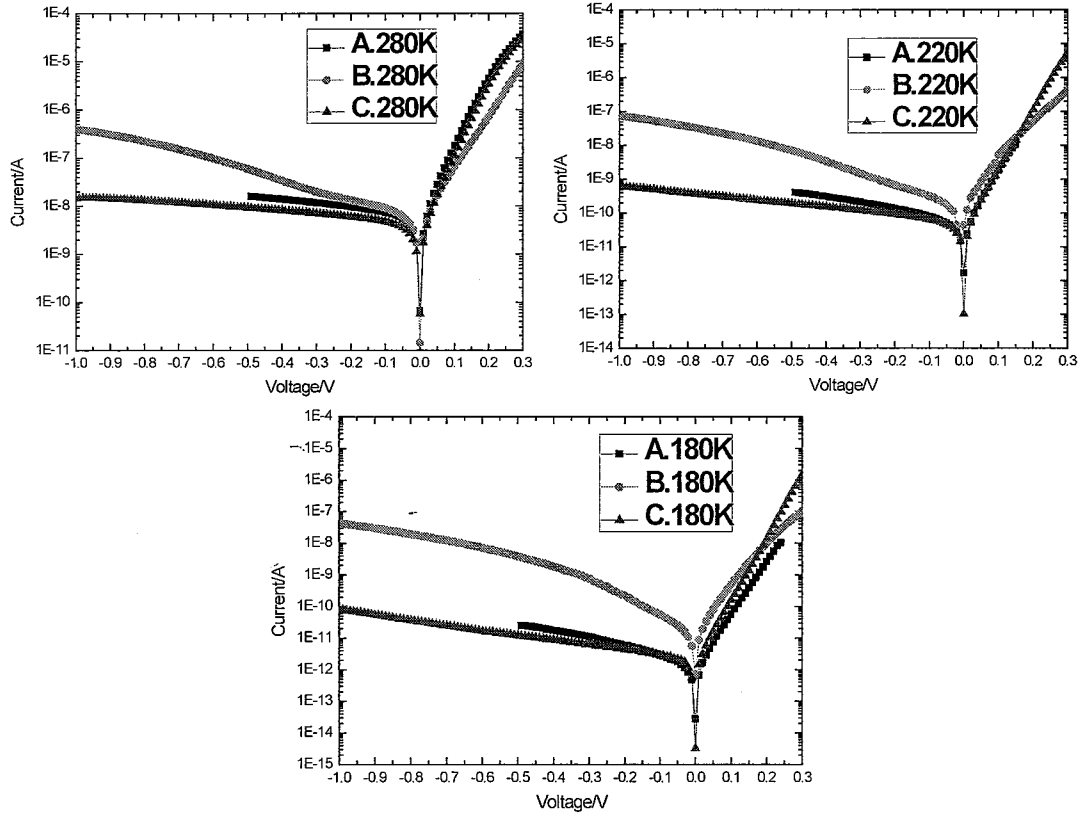


图 5.2.4 样品 A、B、C 在 180K、220K、280K 下的器件 I-V 曲线

Fig5.2.4 I-V curves of Sample A, B and C at 180K, 220K and 280K

为了进一步研究温度对器件暗电流特性的影响，图 5.2.5 中绘出了各样品在不同偏压下(-10mV,-20mV,-50mV,-100mV 和-200mV)器件暗电流随温度的变化曲线。图中可以看出，-10mV 反偏压下在 300K-180K 范围内样品 A 的暗电流随温度有着明显的指数关系，该温度范围内 Johnson 噪声占主导，电流主要为热电流，暗电流与激活能有 $I_d \propto \exp(-E_d/kT)$ 的关系，对于样品 C 同样有此现象，而对于样品 B 则在低温时暗电流随温度的变化斜率变缓，此时隧穿电流占主导。通过拟合可以计算出在不同偏压下，各个样品在不同的温度范围内的热激活能，如表 5.2.3 所示，各样品在相同的温度范围内（300K-240K）的热激活能随着反偏压的增大都在减小，其中样品 A、C 热激活能减小的趋势较缓，基本在 0.4eV 左右，扩散电流占主导；而样品 B 的热激活能随着反偏压的增大迅速减小，从-10mV 的 0.303eV 到-500mV 的 0.169eV，说明该器件有较大的隧穿电流及欧姆电流，

随着反偏压的增大,这部分电流成分占主导。在更低的温度范围内(220K-180K)样品 A、C 的激活能在 0.25eV 左右,约为禁带宽度的一半,而样品 C 的激活能则非常小,缺陷隧穿电流及欧姆电流占主导。

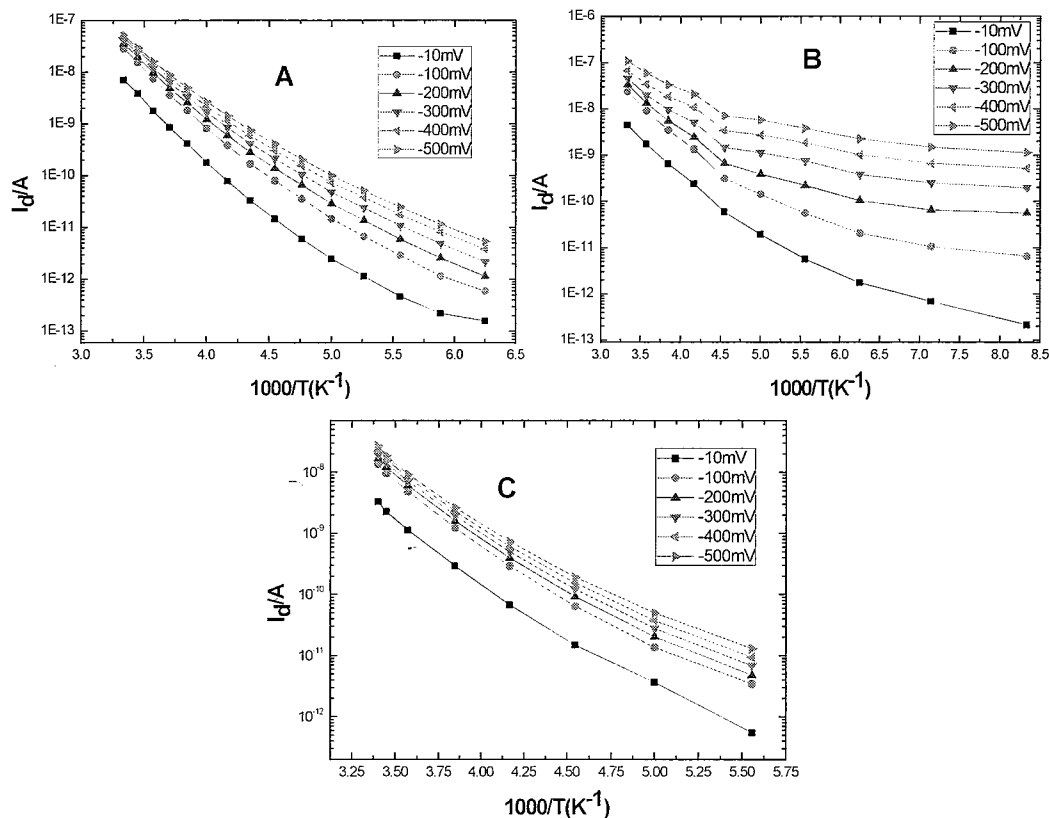


图 5.2.5 样品 A、B、C 的器件暗电流随温度的变化关系 (不同偏压下)

Fig5.2.5 I_d vs. $1000/T$ at different bias voltages

表 5.2.3 拟合所得样品 A、B、C 的器件热激活能

Table5.2.3 E_a of Sample A, B and C

	Sample A		Sample B		Sample C	
E_a /eV	300-240K	220-180K	300-240K	220-180K	300-240K	220-180K
-10mV	0.443	0.291	0.303	0.2	0.432	0.282
-100mV	0.422	0.282	0.302	0.138	0.429	0.249
-200mV	0.411	0.268	0.271	0.093	0.418	0.252
-300mV	0.39	0.252	0.245	0.075	0.408	0.244
-400mV	0.372	0.242	0.188	0.068	0.402	0.238
-500mV	0.358	0.239	0.169	0.065	0.399	0.229

三个样品的优值因子 R_0A 与温度的关系见图5.2.6, 可见随着温度从300K降低

到180K时,器件的 R_0A 可提高3~4个数量级,如表5.2.2所示,样品A的 R_0A 在280K下为 $28.1\Omega\cdot\text{cm}^2$,温度降到220K时为 $3.225\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$,工作温度降低到180K时 R_0A 为 $109\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$;对于样品C,器件在280K、220K和180K下的 R_0A 为 $55.1\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $4.43\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 $77.3\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$;而对于样品B,器件在280K、220K和180K下的 R_0A 为 $40.2\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、 $1.09\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 $10.8\text{K}\Omega\cdot\text{cm}^2$,随着温度的降低 R_0A 的增大较缓。这充分说明了,采用相同的制备工艺,In组分大的器件,暗电流较大,优值因子较小,隧穿电流及漏电流较明显,而采用改进工艺II,则可以有效的降低器件的暗电流,改善器件性能。与第三章中相比,器件暗电流降低的幅度没有测试结构器件的结果理想,可能的原因有:此次所用材料吸收层掺杂浓度为 $1\text{E}16\text{cm}^{-3}$,略小于测试结构中所用材料吸收层掺杂浓度($3\text{E}16\text{cm}^{-3}$),可能导致了暗电流的增大;测试结构中基本为单元器件,而本节中所制备的器件为面阵探测器,光敏元间距只有 $2\mu\text{m}$,因此两种器件的钝化情况可能不同,从而影响了钝化效果。

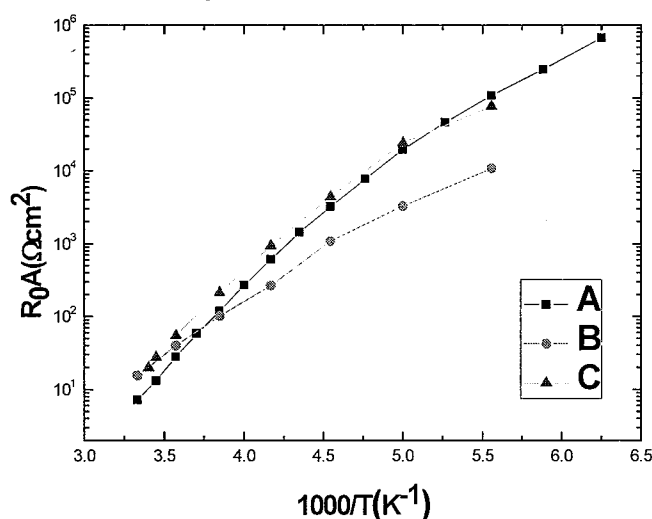


图 5.2.6 样品 A、B、C 的器件优值因子随温度的变化关系

Fig5.2.6 R_0A of Sample A, B and C vs. $1000/T$

5.2.2.2 光谱特性

图 5.2.7 所示为样品 B、C 器件的变温归一化响应光谱曲线,由图中可以看出样品 C 的器件响应光谱在短波响应偏高,样品 C 所用材料吸收层掺杂浓度偏小,扩散长度增大,有益于收集吸收短波光所产生的载流子。在归一化强度 10% 处的截止波长如图 5.2.8 所示,样品 C 器件的截止波长略大于样品 B (测试中存在温度的误差以及噪声的影响,因此对器件的响应光谱略有影响),室温下为 $2.6\mu\text{m}$ 左右。

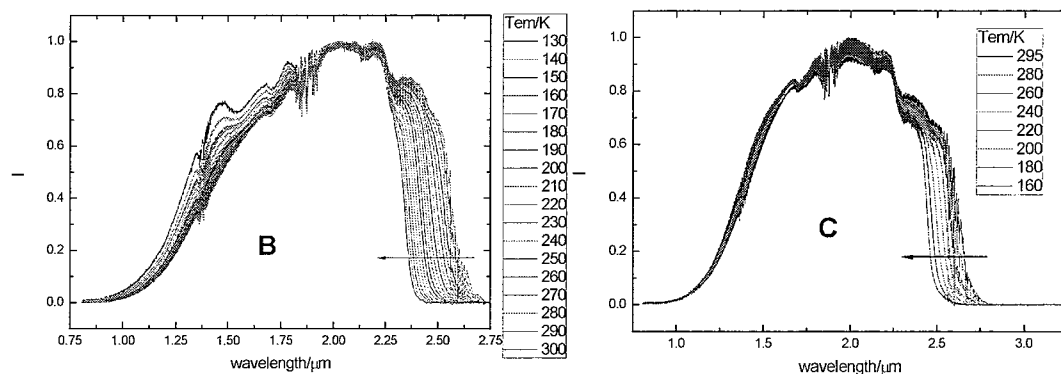
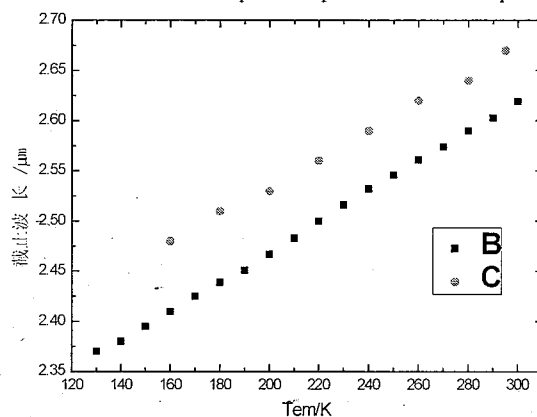


图 5.2.7 样品 B、C 的器件变温归一化响应光谱曲线

Fig5.2.7 The normalized response spectrum of Sample B and C

图 5.2.8 样品 B、C 的器件截止波长 λ_c Fig5.2.8 λ_c of Sample B and C

5.2.2.3 信号和噪声的温度特性

图 5.2.9 所示为器件黑体信号和噪声与温度的关系, 信号测试系统条件如下: 黑体孔径 8mm、距离 19cm、黑体温度 900K, 室温 295K, $1E-8$ (前置放大器)。测量噪声前置放大器档位为 $1E-9$ 。随着温度的降低, 信号和噪声的变化规律是不同的, 信号随温度降低均匀减小, 而噪声则是先快速减小后逐渐趋于平稳。因为受到测量系统的限制, 当温度低于 220K 时噪声接近空脚噪声而趋于平稳, 因此温度在 220K 以下时所得的噪声并不能反映出器件本身的噪声变化趋势。图 5.2.10 中所示为器件黑体探测率随温度的变化趋势, 计算过程中光敏元大小取为 $30 \times 30 \mu m^2$, 150K-220K 时黑体探测率的变化趋势并不能反映真实的情况, 220K 时, 样品 B、C 器件的黑体探测率分别为 $1.03E10 cmHz^{1/2}/W$, $5.51E10 cmHz^{1/2}/W$ 。由图中可以明显的看出, 样品 C 器件的响应信号大很多, 器件噪声较小, 由此可知台面型器件的侧/表面复合对光电流的损耗影响较大, 良好的钝化对于抑制侧/表面光电流损耗具有重要的作用。

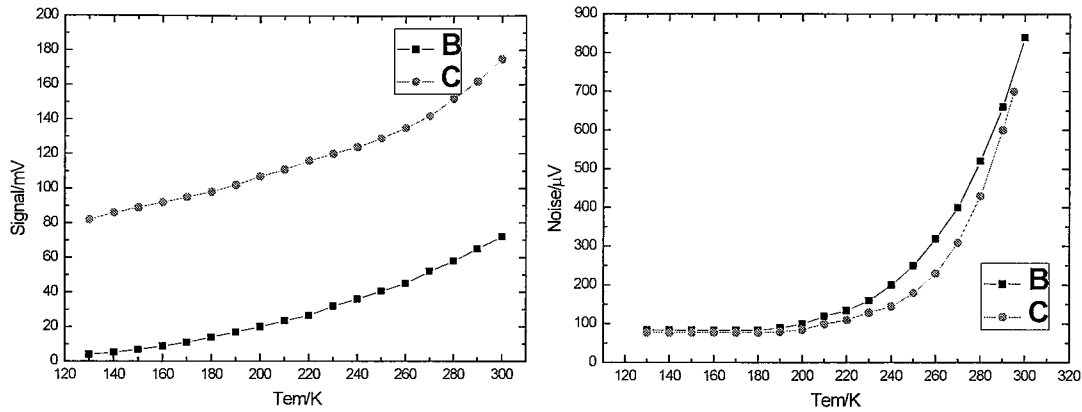


图 5.2.9 信号及噪声与温度的关系
Fig5.2.9 Signal and noise versus temperature

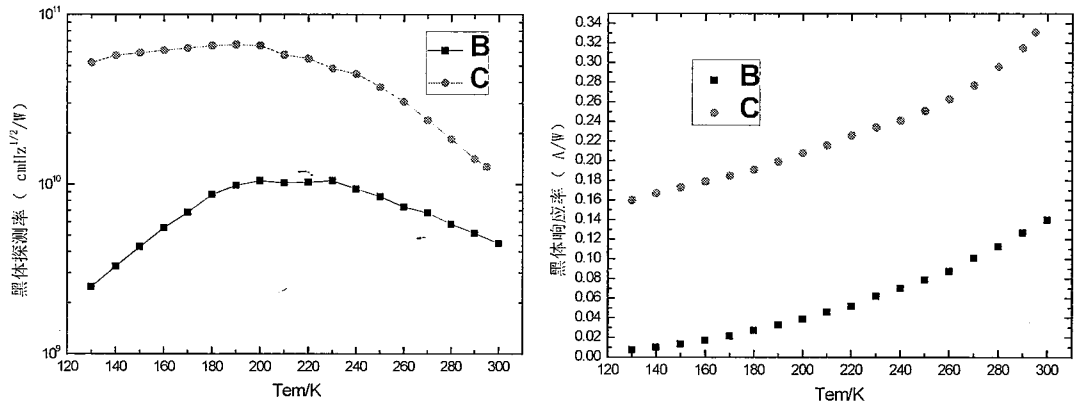


图 5.2.10 黑体探测率与黑体响应率与温度的关系
Fig5.2.10 D_{bb} and R (black body) versus temperature

5.3 台面型波长延伸至 $2.6\mu\text{m}$ 512×256 InGaAs 面阵探测器初步研制

采用改进工艺 II 并用 ICPCVD lowrate SiN 钝化膜在两英寸外延材料上制备了 512×256 InGaAs 面阵焦平面探测器，中心距为 $30\mu\text{m}$ ，光敏元大小为 $28 \times 28\mu\text{m}^2$ 。材料参数见表 5.3.1，探测器照片见图 5.3.1 所示。将芯片与电路倒焊，并置于变温杜瓦内进行了初步测试，暗信号灰度图如图 5.3.2 所示。

表 5.3.1 材料编号、结构和参数

Table 5.3.1 the structure and parameter of materials

材料	导电类型	掺杂物质	厚度 (μm)	掺杂浓度 (cm^{-3})	制备工艺
$\text{In}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$	P^+	Be	0.6	$2\text{E}18$	II (ICPCVD lowrate)
$\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$	n^-	Si	1.5	$3\text{E}16$	
$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ buf	N^+	Si	2.0	$2\text{E}18$	
InP substrate	S.I.	Fe	350 ± 20		

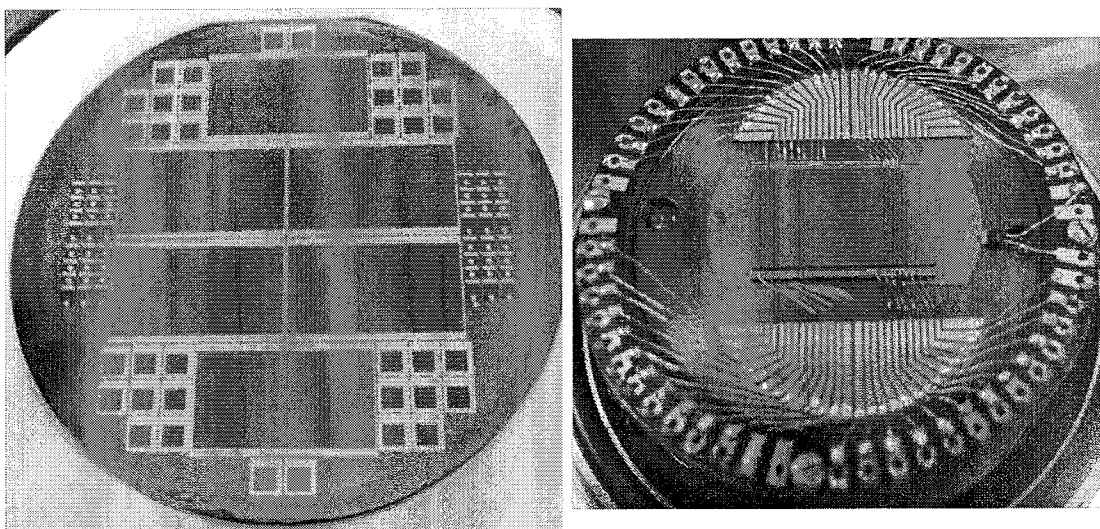


图 5.3.1 516×284 元 InGaAs 面阵焦平面探测器实物图

Fig5.3.1 photos of 516×284 InGaAs detector

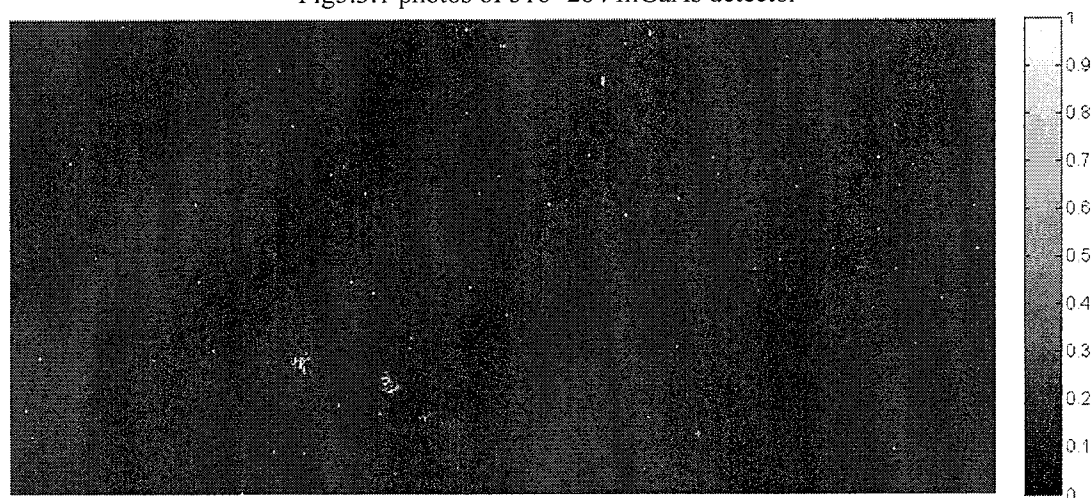
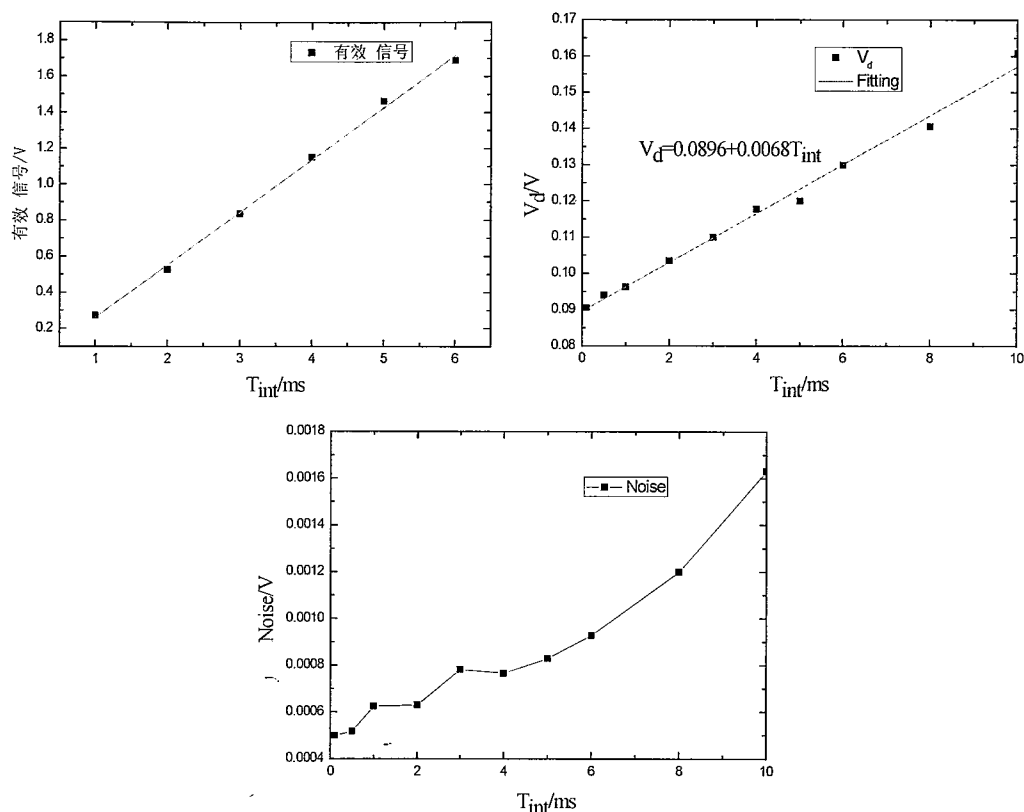


图 5.3.2 516×284 InGaAs 面阵焦平面探测器暗电流灰度图（未处理）

Fig5.3.2 photos of 516×284 InGaAs detector

对焦平面探测器在 200K 时的信号、暗信号以及噪声随积分时间的变化进行了测试如图 5.3.3 所示。信号测试条件为：黑体温度为 900K，器件工作温度 200K，黑体孔径为 0.254cm，距离为 50cm。有效信号随积分时间基本呈线性变化，当积分时间到 6ms 时信号饱和。暗信号随积分时间增大也呈线性增大，根据暗信号公式 $V_d = \eta \frac{I_d T_{int}}{C_{int}}$ ，电路增益 η 为 0.692 时，暗电流为 489.6fA，暗电流密度为 $90\text{nA}/\text{cm}^2$ 。

图 5.3.3 有效信号、暗信号及噪声随积分时间的变化 ($T=200K$)Fig5.3.3 Effective Signal, dark signal and Noise vs. T_{int}

5.4 本章小结

本章首先对 In 组分为 0.8 的 32×32 面阵 InGaAs 焦平面探测器的芯片和焦平面特性进行了测试分析。对芯片的 I-V 及其 R_0 随温度的变化关系进行了理论计算，并与实验数据拟合的较吻合，表明在零偏或反偏压较小时，器件的暗电流主要受扩散电流、产生复合电流和欧姆漏电流的限制。另外通过适当降低工作温度和延长积分时间，可以有效的改善焦平面的性能。通过变积分电容的测试结果，得到了积分电容的寄生电容约为 10fF，通过设计电路参数减小寄生电容的影响，可以改善组件的性能。当 In 组分到达 0.83 时，采用相同的工艺制备的 64×64 面阵 InGaAs 焦平面探测器性能较差，器件隧穿电流及欧姆电流大、信号较小、探测率较低；而采用改进工艺并用 ICPCVD lowrate 低温生长的 SiN_x 钝化膜，器件性能得到改善，220K 时暗电流密度为 $1.89E-6 \text{ A/cm}^2$ (-10mV)、优值因子 R_0A 为 $4.43 \text{ K}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ，黑体探测率为 $5.51E10 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ，峰值探测率为 $5.68E11 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ 。最后采用改进工艺制备了 In 组分为 0.83 的 512×256 InGaAs 面阵焦平面探测器，并对其进行了初步的测试。

第六章 全文总结与展望

6.1 全文总结

InGaAs 是制备短波红外探测器的优良材料,通过调节 In 组分的大小,可以调节材料的探测波段,用其制备的探测器具有良好的稳定性、高的探测率以及抗辐照等优点,已被广泛应用于空间遥感、夜视、光通讯、环境监测等众多领域。本文对晶格匹配 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 及高 In 组分 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 台面型探测器的制备工艺及其器件物理进行了深入的研究。主要包括:对 p-InP 及 p- $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 的欧姆接触等关键工艺进行了研究,并对比了不同帽层对探测器性能的影响;对高 In 组分 InGaAs 台面型探测器的低温钝化工艺进行了研究,对比了不同钝化膜及不同工艺制备的探测器的暗电流成分;研究了外延材料参数及器件结构对量子效率的影响;研究了不同高 In 组分外延材料以及不同制备工艺制备的面阵焦平面探测器的性能。所取得的主要研究成果如下:

1. 晶格匹配 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 探测器性能优化:

1) 对器件 p-InP 电极的欧姆接触进行了研究。通过对比实验发现,经过 450°C 、4min 退火后, $\text{p}^+\text{-InP}$ 与 Ti/Pt/Au 接触电极的比接触电阻可以降低到 $7.3 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$,而且电极形貌较平整;

2) 对 p-InAlAs 的金-半接触进行了研究,通过优化金属膜系,采用浅扩散技术(扩散条件: 530°C & 4min) 进行二次掺杂,经过 450°C 、60s 退火后,实现了 Ti/Pt/Au 在 $\text{p}^+\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 材料上的低阻欧姆接触,其比接触电阻为 $8.88 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$;

3) 采用 4 种不同帽层材料制备了 10×1 器件,测试并分析了探测器的光电性能。结果表明采用 p-InAlAs 帽层并进行二次掺杂的材料制备的器件具有较低的暗电流 (-0.01V 偏压下暗电流密度为 $116\text{nA}/\text{cm}^2$) 以及较高的量子效率。

2. 延伸波长台面型 $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ 探测器关键工艺研究

1) 在高 In 组分 InGaAs 器件的钝化方面,首次采用了 ICP-CVD 低温生长 SiN_x 膜钝化技术,对比 PECVD 生长的 SiN_x 钝化膜,其钝化效果得到了明显改善,并通过改进器件工艺,采用先生长 p 电极、退火再钝化的工艺,使 ICPCVD lowrate SiN_x 钝化膜的钝化效果达到了较理想的状态,其暗电流下降了约 2-3 个数量级,在 -0.01V 、210K 下测试结构器件的暗电流密度约为 $40\text{nA}/\text{cm}^2$,而且暗

电流密度在不同的温度下基本不随 P/A 而变化, 侧面漏电得到非常好的抑制。

2) 采用高温处理加湿法修复, 降低刻蚀过程对表面造成的应力损伤及残留物, 探测器暗电流 ($@-0.1V$) 约降低 30%左右。采用双台面结构制备的器件, 有利于钝化膜在台面侧面有较好的覆盖, 从而减小侧面的漏电, 而且也可能抑制界面处的漏电, 使器件暗电流降低。

3. 延伸波长 InGaAs 探测器量子效率初步理论研究

通过建立物理模型, 并通过测试以及参考文献获得材料参数, 对 P-on-N 结构器件的量子效率进行了理论模拟, 分析了吸收层掺杂浓度、吸收层厚度、界面复合速率以及材料对光的吸收系数等对器件量子效率的影响, 随着掺杂浓度的增大, 由于少子寿命的减小及迁移率的降低等, 导致扩散长度减小, 非空间电荷区内的复合几率增大, 因此量子效率峰值降低, 而且峰值处对应的吸收层厚度 d 也减小。另外随着吸收系数的增大, 相同掺杂浓度的器件量子效率峰值增大, 光进入吸收层后很快被吸收, 因此峰值处对应的 d 也减小。随着界面复合速率的增加, 器件的量子效率急剧下降。而且复合速率越大, 量子效率到达峰值之后随着 d 的增大下降的很快。而且对量子效率随波长的变化也进行了分析, 为提高器件量子效率提供了一定的理论参考。

4. 台面型延伸波长 InGaAs 面阵探测器研究

1) 对 In 组分为 0.8 的 32×32 面阵 InGaAs 焦平面探测器的芯片和焦平面特性进行了测试分析。对芯片的 $I-V$ 及其 R_0 随温度的变化关系进行了理论计算, 与实验数据较吻合, 表明在零偏或反偏压较小时, 器件的暗电流主要受扩散电流、产生复合电流和欧姆漏电流的限制。另外通过适当降低工作温度和延长积分时间, 可以有效地改善焦平面的性能。通过变积分电容的测试结果, 得到了积分电容的寄生电容约为 10fF, 通过设计电路参数减小寄生电容的影响, 可以改善组件的性能。

2) 当 In 组分到达 0.83 时, 采用相同的工艺制备的 64×64 面阵 InGaAs 焦平面探测器性能较差, 器件隧穿电流及欧姆电流大、信号较小、探测率较低; 而采用改进工艺并用 ICPCVD lowrate 低温生长的 SiN_x 钝化膜, 器件性能得到改善, 220K 时暗电流密度为 $1.89E-6 A/cm^2 (-10mV)$ 、优值因子 R_0A 为 $4.43 K\Omega \cdot cm^2$ 、黑体探测率为 $5.51E10 cmHz^{1/2}/W$, 峰值探测率为 $5.68E11 cmHz^{1/2}/W$ 。最后采用改进工艺制备了 In 组分为 0.83 的 512×256 InGaAs 面阵焦平面探测器, 并对其进行

了初步的测试。

6.2 展望

虽然本论文工作取得了一定的研究结果，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。列举几个问题如下：

1. 宽禁带 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ 帽层器件的可靠性问题

根据前面研究结果可以看到，宽禁带的帽层可以有效的抑制漏电，降低探测器的暗电流，而且通过扩散二次掺杂实现了欧姆接触，提高器件的量子效率，器件的稳定性和可靠性并未得到验证。因此，有必要研究此种工艺制备的器件的可靠性问题，从而实现工程应用。

2. 小光敏元面阵探测器的低温钝化技术

虽然在测试结构器件（基本为单元器件）制备过程中，采用低温 SiN 钝化膜及改进工艺，器件的暗电流得到了大幅度的降低，然而在面阵探测器的制备中，器件性能也虽然也得到了较大提高，但仍没有到达最好的效果。可能的原因是光敏元间距非常小（ $2\mu\text{m}$ ），导致了台面侧面的钝化效果不好，因此优化器件结构（如增大光敏元间距）或改进 SiN 膜生长工艺，使沟道处能够得到较好的覆盖，改善钝化效果。

3. 进一步优化台面成型工艺

本论文只是初步研究了高温处理过程及双台面结构对器件性能的影响，虽然使得器件的暗电流得到了部分改善，但仍带来了其他的问题（如大偏压下暗电流增大趋势较快，双台面正照射器件响应降低）。因此对于优化台面成型工艺，如分步刻蚀、高温处理过程的温度和时间，还有待进一步的研究；另外，对于双台面结构对背照射器件性能的影响，也需要进一步的研究。

4. 量子效率理论模型的进一步完善

本论文对量子效率的理论模型进行了初步研究，由于在理论模拟过程中，采用了一些简化模型，并且所用参数也有一部分是参考文献或假设的，因此与实际的量子效率存在一定的差别。因此考虑忽略的因素，如异质结带阶，器件表面的复合等，完善理论模型的工作有待继续；另外对材料参数的测量也需要进一步完善，准确的材料参数才能够使模拟结果更接近真实的情况。