

密级：公 开

中国科学院研究生院

博士学位论文

低串音的碲镉汞红外探测器芯片技术研究

作者姓名：黄 建

指导教师：胡晓宁 研究员 中科院上海技术物理研究所

叶振华 副研究员 中科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

2012 年 5 月

学位论文原创性声明

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

学位论文作者签名：

年 月 日

学位论文使用授权说明

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

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

论文作者签名：

黄建

2012年6月4日

指导教师签名：

胡晓宁

叶振宇

年 月 日

2012.6.5

Studies on Chip Techniques of Crosstalk-Suppressing
HgCdTe IRFPAs

By
Jian Huang

A Dissertation Submitted to
Graduate University of Chinese Academy of Sciences

In partial fulfillment of the requirement

For the degree of
Doctor of Philosophy

Field of Solid electronics and microelectronics

Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences

May, 2012

致 谢

时光荏苒，五年的研究生生涯行将结束，一路走来，经历了很多，感动也很多。在此，对给予我帮助和关怀的每一个人致以最诚挚的谢意。

首先，我要衷心感谢我的导师——胡晓宁研究员对我的关心，谆谆教导。胡老师渊博的知识、严谨的作风，使我不仅在她那学到了专业知识，还受到了精神的启迪。我还要深深地感谢我的导师——叶振华老师，他不但在学业上给我以精心指导，并在生活上给予无微不至的关心。导师尽可能地为我在科研能力、论文写作、工作能力等方面得到锻炼并有了很大的提高。他们严谨的治学态度和渊博的科学知识使我受益匪浅，我的每一项研究成果都得益于两位导师的悉心指导，在此再次表示诚挚的感谢！

另外，我要感谢在我课题期间给我指导和帮助的老师。感谢林春、廖清君、陈洪雷、魏彦峰、陈路、丁瑞军、杨建荣、张勤耀、陈建兴等老师给予我实验和理论上的指点和帮助。

感谢新技术小组的周松敏、钟艳红、黄月、刘丹、冯婧文、陈兴国老师、王正官老师，芯片组的马伟平老师、朱建妹老师、王建新老师、曹菊英老师、吴云老师、陈昱、邢雯、周诚、吴廷祺、何闵、张健仪、杨勇斌、何高胤，衬底组的周昌鹤、徐华莲、孙仕文，LPE组的孙权志等在器件制备工艺中提供的无私帮助。

感谢研究生部的汪骏发老师、廖应良老师、陈东老师、曾尚瑾老师、李淑薇老师和朱晓琳老师等。

感谢材技物所的同学们的有益讨论和无私帮助，陪我渡过了快乐的研究生生涯。他们是周文洪师兄、刘非师兄、林加木师兄、沈晓师兄、刘斌师兄、邓屹师兄、李海滨师兄、傅祥良师兄、崔晓攀、金巨鹏、尹文婷、徐竞杰、朱耀明、沈川、顾仁杰、王伟、步海军、邓若汉、张姗、周易、谢晓晖、仇光寅、陈星、董美凤、华桦、盛锋锋、李杨、何楷、崔宝双、刘珊珊、庞玉林、陈喆、李艳鹏等。

感谢我的好友多年来对我的关心与支持。他们是胡瀚杰、鄢真真、王强、陈刚、龚伶俐、冯静、何清、胡黎、陈春、邢宏宇、李柳暗、冯蕾、徐启荣等。

我要衷心感谢我的父母在生活和学习上对我的支持和关心，没有他们就没有我的一切。

最后，感谢各位专家教授在百忙之中对本论文的审阅和评议。

黄 建

2012年5月

摘 要

在远距离探测和高分辨率应用需求的推动下,碲镉汞(HgCdTe, MCT)红外焦平面(infrared focal plane arrays, IRFPAs)探测器像元密度不断提高,致使像元之间的空间串音也越来越大,严重影响了碲镉汞红外焦平面探测器的成像质量的进一步提高。为此,本文展开了具有抑制器件串音作用的碲镉汞探测芯片微结构的理论和工艺技术研究。其主要内容为:

1. 具有抑制器件串音作用的碲镉汞探测芯片微结构的理论设计。理论计算了常规碲镉汞焦平面器件、微台面隔离结构碲镉汞焦平面器件以及背集成微透镜结构的碲镉汞焦平面器件的材料和器件参数与像元串音的关系,分析了微台面隔离结构和背集成微透镜结构的器件的串音抑制效果,获得了抑制串音的探测器结构和优化设计方法。

2. 碲镉汞高占空比微台面探测芯片的电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)干法刻蚀工艺研究。获得了一种等离子体轰击改性的掩膜硬化技术,将掩膜的刻蚀选择比提高了约6倍,有效抑制了刻蚀台面的退缩。基于刻蚀气体组分、气压、刻蚀温度等ICP刻蚀工艺参数与刻蚀台面占空比的关系研究,获得了优化的工艺参数,显著地提高了隔离微台面的占空比和刻蚀速率,并验证了该工艺在新一代高密度焦平面器件微台面隔离应用中的可行性。

3. 碲镉汞ICP干法刻蚀损伤的产生机理以及损伤修复研究。基于碲镉汞损伤的电学特性,获得了一种简单方便的图形阻抗损伤测试技术,并结合剥层霍尔测试方法,获得了材料组分、工艺气体组分、刻蚀温度、直流偏压、刻蚀气压等材料和刻蚀工艺参数与刻蚀损伤的对应关系,加深了对碲镉汞刻蚀损伤产生机理的理解。采用热处理方法,研究了材料的载流子输运特性和少子寿命与损伤修复工艺条件的关系,确定了210℃左右热处理是修复刻蚀损伤的最佳条件。

4. 碲镉汞微台面芯片的干法刻蚀技术集成与验证。通过对台面成形工艺对器件PN结性能影响的研究,建立了制备台面器件的优化工艺流程。通过优化台面形貌,提高了台面钝化质量。获得了像元规模为320×256、像元中心距为30μm、结构为n⁺-on-p的焦平面台面器件,该器件具有一定的性能,完成了技术验证和实验室演示成像。

5. 碲锌镉 (CdZnTe, CZT) 微透镜列阵的制备工艺及其性能评估方法研究。采用光刻胶熔融与 ICP 组合刻蚀的方法, 分析了工艺参数对微透镜形貌的影响, 建立了制备工艺参数提取方法, 获得了优化的碲锌镉微透镜阵列的制备工艺。建立了激光共聚焦显微镜辅助光线追迹评估微透镜性能的方法, 并基于辅助监测实现了微透镜焦距的微调。获得了面阵规模为 128×128 、像元中心距为 $50 \mu\text{m}$ 的碲锌镉微透镜阵列, 能够将 80% 的入射光会聚到像元中心 30% 的区域, 并初步验证了制备获得的微透镜的串音抑制效果。

关键词: 碲镉汞, 串音, ICP 刻蚀, 刻蚀损伤修复, 碲锌镉微透镜

作者: 黄建

学科: 电子科学与技术

专业: 微电子学与固体电子学

导师: 胡晓宁 研究员, 叶振华 副研究员

字数: 50000 字

ABSTRACT

Jian Huang (Solid electronics and microelectronics)

Directed by Prof. Xiaoning Hu

Pixel size of infrared focal plane arrays (IRFPAs) is driven to shrink continuously by higher and higher resolution of advanced infrared detection system. However, pixel crosstalk will be increased at the same time, which will result in a reduction in image clarity and degrade system performance. A theoretical and practical study on suppressing crosstalk of IRFPAs was carried out in this thesis. The main work is summarized as follows.

1. A theoretical computation for pixel crosstalk in HgCdTe IRFPAs with various structures was explored. The relationship between the crosstalk and device parameters was accomplished in this thesis. Pixel crosstalk was suppressed obviously using mesa-pixel IRFPAs or integrating micro-lens arrays on IRFPAs, dependent on depth of isolated mesa arrays and focal spot size of micro-lens arrays respectively.

2. Inductively coupled plasma (ICP) etching process to isolate IRFPAs arrays was investigated. Etching mask hardening technology was developed firstly. Aspect ratio of etching trench was increased by 30% and etching rate was increased by 6 times compared with original process, by optimizing process parameters of gas composition, pressure, DC bias, temperature.

3. Damage mechanism of HgCdTe etching process and annealing process to recover induced damage were studied. Thickness, spatial distribution and thermal diffusion property of damaged layer were measured. The results deduced that damage mechanism was related to Hg interstitials which were created during the ICP etching process and diffused into MCT and acted as donor or recombine with Hg vacancies. A N₂ atmosphere annealing process has been achieved to recover ICP etching induced damage on p type mercury vacancy HgCdTe film.

4. 320×256 mesa-pixel HgCdTe IRFPAs preliminary detector was fabricated using the optimized ICP etching and damage recovering process. Passivation of mesa-pixel arrays was improved by adding a Br₂/ethanol wet-etch process after HgCdTe ICP etching. The optimized process to form HgCdTe mesa arrays was verified to be available and effective by IRFPAs

acceptable performance at 77k.

5. CdZnTe micro-lens arrays were obtained and evaluated. CdZnTe micro-lens arrays were developed by a photo-resist reflow and ICP etching process. Fill-factor and topography of microlens were enhanced by parameters optimization. A novel method to evaluate microlens effect was established by light tracking based on actual CZT microlens surface topography. The evaluation results show 80 % incident light of pixel was concentrated on the 30 % central region by the micro-lens fabricated.

Keywords: HgCdTe, crosstalk, ICP etching, etching damage recovering, CdZnTe microlens

目 录

致 谢.....	I
摘 要.....	III
ABSTRACT.....	V
目 录.....	VII
第 1 章 绪论.....	1
1.1 碲镉汞红外焦平面探测器.....	1
1.1.1 碲镉汞的材料特性.....	1
1.1.2 碲镉汞红外焦平面探测器的发展历程.....	2
1.1.3 第三代碲镉汞红外焦平面器件的关键技术.....	4
1.2 碲镉汞红外焦平面器件的像元串音.....	5
1.2.1 像元串音的基本概念.....	5
1.2.2 像元串音对成像质量的影响.....	7
1.2.3 像元串音的抑制方法及研究现状.....	8
1.3 本文的研究目的和结构安排.....	9
1.3.1 研究目的.....	9
1.3.2 结构安排.....	10
第 2 章 低串音的红外探测芯片的微结构设计.....	12
2.1 低串音芯片微结构设计的研究意义.....	12
2.2 背入射式平面结器件的串音.....	12
2.2.1 理论模型.....	12
2.2.2 计算结果.....	14
2.3 台面结构器件的串音.....	16
2.3.1 理论模型.....	16
2.3.2 计算结果.....	16
2.4 背集成微透镜 IRFPAs 器件的串音.....	18
2.4.1 理论模型.....	19
2.4.2 计算结果.....	19
2.5 串音抑制效果综合比较.....	20
2.6 小结.....	23
第 3 章 碲镉汞微台面的 ICP 干法刻蚀工艺研究.....	24
3.1 ICP 干法刻蚀技术的研究意义.....	24
3.1.1 微台面隔离的应用需求和技术要求.....	24
3.1.2 微台面隔离技术.....	25
3.1.2.1 化学湿法腐蚀技术及其局限性.....	25
3.1.2.2 等离子体干法刻蚀技术特点及优势.....	27
3.1.3 碲镉汞的 ICP 刻蚀原理简介.....	29

3.1.3.1 刻蚀的物理化学机理	29
3.1.3.2 刻蚀设备简介	30
3.1.3.3 刻蚀工艺参数	31
3.2 干法刻蚀掩膜的优化	32
3.2.1 刻蚀掩膜的重要性	33
3.2.2 碲镉汞干法刻蚀掩膜的主要问题	34
3.2.3 刻蚀掩膜的硬化研究	35
3.3 高深宽比 V 形微台面的刻蚀研究	36
3.3.1 高深宽比 V 形微台面的研究意义	36
3.3.2 刻蚀工艺参数与刻蚀剖面形貌关系	37
3.3.3 气体组分对微台面形貌影响	39
3.3.4 刻蚀温度对刻蚀效果影响	39
3.3.5 腔体压力与刻蚀表面	40
3.3.6 高占空 V 形隔离微台面的优化刻蚀工艺	41
3.4 小结	42
第 4 章 碲镉汞的刻蚀损伤产生机理及其修复研究	44
4.1 引言	44
4.2 碲镉汞刻蚀损伤的测试方法	44
4.2.1 传统测试方法	44
4.2.2 图形阻抗检测法	46
4.3 干法刻蚀损伤的产生机理研究	48
4.3.1 刻蚀损伤与材料及刻蚀工艺参数关系研究	48
4.3.2 刻蚀损伤与刻蚀温度的关系	49
4.3.3 刻蚀损伤与刻蚀气体组分关系	50
4.3.4 刻蚀损伤与材料组分关系	51
4.3.5 刻蚀损伤与腔体压力关系	52
4.3.6 刻蚀损伤与 DC bias 关系	53
4.4 刻蚀损伤的分布及其热扩散特性研究	54
4.4.1 刻蚀损伤的横向和纵向分布	55
4.4.2 刻蚀损伤在高温中的扩散特性	56
4.5 干法刻蚀损伤的修复研究	57
4.5.1 干法刻蚀损伤的消除方法	57
4.5.1.1 湿法腐蚀去损伤及其局限性	57
4.5.1.2 热退火修复原理及其可行性	59
4.5.2 损伤修复效果的载流子的输运特性表征	59
4.5.2.1 退火温度、退火时间与载流子输运特性关系	59
4.5.2.2 退火后载流子输运特性纵向变化	61
4.5.3 损伤修复效果的少子寿命表征	63
4.5.3.1 微波反射法测试少子寿命原理	63
4.5.3.2 退火工艺与少子寿命关系	64
4.5.4 损伤修复工艺与 PN 结特性	65
4.5.4.1 实验设计与工艺流程	65
4.5.4.2 结果与讨论	65
4.6 小结	66

第 5 章 干法刻蚀技术的芯片集成与验证.....	68
5.1 干法刻蚀技术的微台面芯片集成.....	68
5.1.1 台面成形与 PN 结成形工艺的整合优化	68
5.1.1.1 实验设计与工艺流程.....	68
5.1.1.2 结果与分析	69
5.1.2 台面结构器件钝化工艺优化	70
5.1.2.1 常规台面钝化的问题及其解决办法	70
5.1.2.2 优化的台面钝化处理工艺	71
5.2 干法刻蚀的台面芯片验证.....	72
5.2.1 芯片的结构及工艺流程	72
5.2.2 验证器件的测试与评估	73
5.2.2.1 器件的阻抗特性.....	73
5.2.2.2 器件的焦平面性能参数测试.....	74
5.2.2.3 器件实验室成像.....	74
5.3 干法技术的原位掺杂芯片的验证.....	75
5.3.1 材料的结构及器件制备工艺流程	75
5.3.2 验证芯片的测试与评估	76
5.3.2.1 器件的阻抗特性测试.....	76
5.3.2.2 器件的光谱特性测试.....	77
5.4 小结.....	78
第 6 章 碲锌镉微透镜阵列的制备工艺与评估.....	79
6.1 引言.....	79
6.2 碲锌镉微透镜阵列的研究目标.....	80
6.2.1 微透镜制备的研究目标	80
6.3 光刻胶热熔+ICP 刻蚀技术制备微透镜阵列的原理	80
6.4 碲锌镉微透镜阵列的性能评估	81
6.4.1 碲锌镉微透镜阵列性能的评估方法	81
6.4.2 模拟光线追迹法的微透镜评估原理	82
6.5 碲锌镉微透镜的制备工艺优化.....	83
6.5.1 工艺参数及其对微透镜形貌影响	83
6.5.2 微透镜掩膜的制备工艺研究	84
6.5.3 工艺稳定性研究	86
6.5.4 微透镜焦距的设计与控制方法	87
6.5.4.1 ICP 刻蚀选择比的选择.....	88
6.5.4.2 微透镜表面后处理条件	88
6.5.4.3 微透镜焦距的控制工艺参数的提取	89
6.6 微透镜阵列的评估结果.....	91
6.7 小结.....	93
第 7 章 结束语.....	95
7.1 主要结论.....	95
7.2 存在的问题.....	96

7.3 未来展望.....	96
参考文献.....	98
作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果.....	107

第1章 绪论

碲镉汞 (HgCdTe , $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, MCT) 红外焦平面探测器是一种重要并且应用广泛的探测红外辐射的传感器^[1-16], 目前已发展到以大列阵、小型化、多色化和集成化为特征的第三代焦平面的重要阶段^[4-33], 其为探测器的性能提出了很高的要求, 也为探测器的制备技术提出了许多新的严峻的挑战。本章介绍了碲镉汞红外焦平面探测器的特点及其发展历程, 总结了第三代碲镉汞红外焦平面探测器的发展方向和关键技术, 重点分析了碲镉汞红外焦平面探测器的像元串音对器件成像质量的影响及其研究意义, 最后介绍了本文的研究目的与结构安排。

1.1 碲镉汞红外焦平面探测器

红外辐射是波长介于可见光与微波之间的电磁波, 人眼无法直接察觉。不同的物体发射出的红外辐射的波段和强度是特定的, 因此人们可以利用这种特定的红外辐射来实现对目标物体的探测与跟踪。而要探测和跟踪这种辐射必须先把它转变成可以察觉和测量的其他物理量。红外探测器就是担任这样的任务: 把红外辐射量转换成可以测量的其他物理量^[34]。

红外探测器是将不可见的红外辐射能转变成其它易于测量的能量形式的能量转化器, 目前已广泛应用于空间观测、环境监测、机器人视觉、搜索与跟踪、医用热成像、工业控制、导弹精确制导等诸多领域^[1-16]。碲镉汞红外焦平面探测器由于其在材料和结构上面的独特优势, 目前成为红外探测器的研究热点, 并随着技术的发展和应用的加深, 在进一步提高其性能方面, 面临许多新的挑战^[4-33]。

1.1.1 碲镉汞的材料特性

碲镉汞是 II—VI 族半导体材料, 其可以看成碲化汞 (HgTe) 和碲化镉 (CdTe) 的赝二元半导体^[35]。半金属化合物 HgTe ($E_g = -0.3\text{eV}$) 和宽禁带半导体化合物 CdTe ($E_g = 1.6\text{eV}$) 都是闪锌矿结构, 它们的晶格常数很接近, $\Delta a/a = 0.3\%$, 使 HgTe 与 CdTe 能以各种配比形成连续固溶体 $(\text{HgTe})_{1-x}(\text{CdTe})_x$, 即 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料。通过调制组分 x , $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料的 E_g 能够在 $0 \sim 1.6\text{eV}$ 之间连续变化, 所以能完全响应短波 ($1 \sim 2.7\mu\text{m}$)、中波 ($3 \sim 5\mu\text{m}$)、长波 ($8 \sim 12\mu\text{m}$) 和甚长波 ($12 \sim 18\mu\text{m}$) 红外波段的辐射。它被应用于制备红外探测器广泛

应用于卫星、遥感、夜视及制导等领域，从而使它成为仅次于 Si 和 GaAs 而排列第三的半导体材料，和近几十年来红外研究的热点^[4-16]。

相比较其他材料， $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 材料具有以下几个方面的优点^[1-3,35]：

1. 禁带宽度可调节，能覆盖整个红外波段；
2. 直接带隙半导体材料，能制成本征型红外探测器，具有量子效率高和响应快的特点；
3. 电子迁移率高，并有较大的电子空穴迁移率比；
4. 有较长的少子寿命和较低的热产生率；
5. 晶格常数几乎不随 x 变化，利于生长多层异质结构；
6. 光吸收系数大，使在 10~15 微米厚的器件芯片中，产生的内量子效率接近 100%；
7. 制备技术较成熟，可通过液相外延（LPE）、分子束外延（MBE）、金属有机化学气相外延（MOCVD）等多种方法制备薄膜敏感材料；
8. 可掺杂成 p 型、n 型材料；
9. 比较适中的介电常数，能得到较小的 p-n 结电容；
10. 热膨胀系数比较接近读出电路的 Si 材料，可采用倒装焊成的互连技术；
11. 可以通过钝化减小表面复合速率，提高器件性能；

1.1.2 碲镉汞红外焦平面探测器的发展历程

自 1959 年 Lawson 等首次报道三元半导体碲镉汞以来， HgCdTe 红外探测器得到了迅速发展，现第一、第二代 HgCdTe 红外探测器已进入实用阶段，而第三代 HgCdTe 红外焦平面探测器正处于实用化开发阶段^[12-17]。

第一代 HgCdTe 红外探测器（线列光导探测器）于上世纪七十年代末问世，现在线列光导探测器已批量生产，并广泛应用于各种红外成像系统。但线列光导探测器的阻抗低，不能与 Si 读出电路直接耦合，且需要复杂的二维扫描系统，限制了它的进一步开发和应用^[14]。

上世纪八十年代，第二代 HgCdTe 红外探测器得到了开发，并于九十年代初期开始生产销售。第二代红外探测器是与 Si 读出电路（ROIC）直接耦合的光伏二极管阵列，主要分为扫描积分型线列器件和小规模焦平面（FPAs）器件。图 1.1 是一种典型的光伏探测器结构示意图。该结构是背入射的光伏型探测器，像元通过焊柱（Indium Bump）与读出电路相连。扫描积分型器件的光伏二极管结构能够与时间延迟积分电路（TDI）很好的耦合，使光电探

测和信号处理集于单一芯片，同时，通过增加光敏元数目，可大大提高探测器的灵敏度和空间分辨率。HgCdTe 红外焦平面 (IRFPAs) 器件是高性能二维光伏二极管凝视阵列，它集光电转换和信号处理于一体，在红外系统中不仅可以简化或省去光机扫描系统，而且可以提高系统的灵敏度和分辨率，简化信号处理电路，降低对制冷系统的要求。经过多年的研究，已研制出了一系列单片式和混合式红外焦平面阵列^[14,17]。

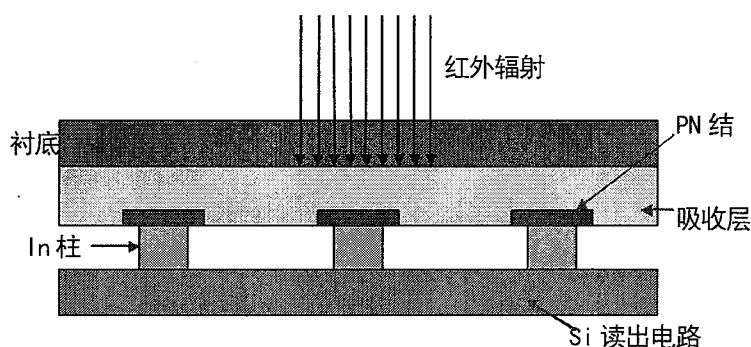


图 1.1 背入射式碲镉汞光伏探测器结构示意图

最近十多年，HgCdTe 红外探测器的发展已经进入了第三代^[8-17]。第三代碲镉汞红外探测器通常是指能够使系统性能有所突破的新型红外探测器，一般是指具有更高探测、识别性能、更少操作约束，更低成本的探测器。随着应用的不断推动，第三代 HgCdTe 红外探测器将会沿下面几个方向发展^[8-17]。

- 焦平面：采用焦平面器件，更好地满足系统的要求。
- 集成化：充分利用半导体材料生长技术的最新成果，采用集成化的焦平面结构，以便简化双色、多色探测系统的焦平面组件复杂度，并降低成本。
- 大列阵：为明显地提高系统的探测范围，探测器将向大面阵和长线列发展。
- 小型化：这不仅有利于简化红外系统的光学设计与加工，以及解决制冷组件的大面积、大功率的制冷难题，还能提高 IRFPAs 的可靠性和探测分辨率。
- 多色化：随着材料、芯片和系统技术的进步，探测器将向更多的光谱波段发展，既包括拓宽光谱波段，也包括将光谱波段划分成更为细致的波段，以获得目标的“彩色”热图像，更丰富、更精确和更可靠地获取目标信息。
- 新结构：在第三代红外探测器的发展中，异质结长波红外探测器、双色红外探测器和碲镉汞雪崩二极管 (APD) 红外探测器的研究越来越受到重视。

1.1.3 第三代碲镉汞红外焦平面器件的关键技术

为满足高级红外系统的应用需求，第三代碲镉汞红外焦平面器件急需突破一些关键技术，其主要包含以下几个方面^[8-17]：

- 大尺寸碲镉汞外延晶片的生长和成本的降低。为适应制造大规模 IRFPAs、减小器件成本、提高产能等实际需求，碲镉汞的单片晶圆面积需要不断提高。同时还要不断提高材料的均匀性和成品率，以保证器件性能。
- 多层结构材料的 MBE 生长技术。采用 MBE 技术，生长多层异质、能带结构理想的 HgCdTe 外延材料。需要根据材料设计，严格地控制各层的组分、厚度、掺杂浓度，以及组分异质结位置、掺杂电学结位置、组分渐变宽度和掺杂渐变宽度等参数，以精确地实现材料能带结构的“剪裁”。以使其满足诸如多色探测、3D 主动探测等第三代红外焦平面器件对材料的要求。
- 碲镉汞的干法等离子体刻蚀技术。高性能的碲镉汞原位 PN 结、异质结、APD、多色红外焦平面器件需要高密度深微台面隔离像元。由于传统的湿法腐蚀存在各向同性、均匀性差等不可避免的缺点，致使它不能满足器件成形工艺的要求。而等离子体干法刻蚀具有各向异性好、均匀性高等特点，能够满足第三代 IRFPAs 的应用需求。然而，碲镉汞的干法刻蚀涉及的刻蚀损伤较大等难题，是其实用化所必须解决的问题。
- 小尺寸像元的混成互连。为减小系统规模、重量和成本，增加产能，提高 IRFPAs 分辨率，单位晶圆面积上的像元数量不断增加，像元尺寸被不断减小，然而像元尺寸的减小，为器件芯片与读出电路的混成互连预留的面积越来越小，从而不断地提升了芯片互连的难度。
- 新结构器件的结成形与台面钝化。由于新的诸如多色探测、3D 主动探测等第三代红外焦平面器件材料本身具有原位 pn 结或是异质结，为保证器件性能必须要实现对诸如 In、As 等掺杂杂质的电学活性的有效激活；另外，由于这类器件通常需要台面隔离，致使空间电荷区在近表面产生缺陷，这就亟需提高器件的台面钝化技术。
- 具有特殊处理功能的读出电路。为不断提高 IRFPAs 的性能，读出电路需要实现：小信号下的高线性读出、低噪声、极小像元的存储电容提高、高帧频、多光谱读出、3D 成像信号读出、焦平面片上数模转换与信号处理、系统交互界面简化等。这些

应用需求的实现的主要挑战是在越来越小的像元面积上，实现越来越复杂的多功能读出电路的制备。

1.2 碲镉汞红外焦平面器件的像元串音

目前，碲镉汞红外焦平面进入到以大列阵、小型化、多色化和集成化为特征的第三代焦平面的重要阶段，为进一步提高其对远距离目标的探测与识别能力，焦平面器件面阵规模不断增大，像元密度不断提高，传统平面结器件的像元串音也越来越大^[40-51]，极大地影响了焦平面器件性能的进一步提高。因此，寻找到能够有效抑制像元串音的方法和突破相关的关键技术就变得越来越迫切和重要。

1.2.1 像元串音的基本概念

在红外焦平面阵列的众多特性参数中，像元串音(crosstalk)是一个非常重要的参数，美国军方将其列为红外焦平面阵列性能评价时的必测参数^[36]。像元串音是指由于像元对相邻像元的串扰，是相邻像元引起的信号 V_{NB} 与本像元信号 V_{LC} 之百分比，符号 CT ，从而有^[37]：

$$CT = V_{NB} / V_{LC} * 100\%$$

红外焦平面器件的像元串音的产生机制可分为两种：光学串音和电学串音。

1) 光学串音

光学串音主要由探测器的各种窗口、界面对入射光的反射、散射、折射和衍射造成入射光照射到临近像元而产生的额外响应所引起（如图 1.2 所示）^[40]。其不但跟探测器芯片本身有关，而且还受封装杜瓦的影响^[40]。图 1.3 是典型的红外焦平面探测器组件的结构图。通过优化光学系统参数（减小到达器件入射光的入射角等）、生长增透膜（减小入射光在界面间的来回反射引起的光能转移）、去除器件衬底（减小衬底的反射、缺陷散射、衍射等影响）、背集成微透镜等工艺在一定程度上可减小 IRFPA 的光学串音^[50,51]。通常而言，红外探测器的光学串音远小于器件的电学串音^[40-49]。

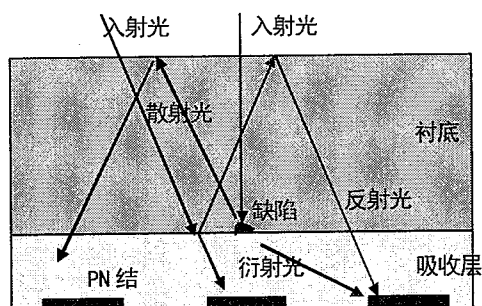


图 1.2 焦平面探测器光串音的产生示意图

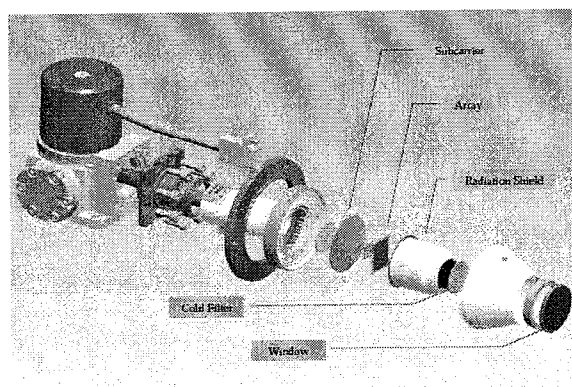


图 1.3 红外焦平面探测器组件的结构图

2) 电学串音

电学串音指入射红外光产生的光生载流子在向 PN 结区运动时，横向扩散被临近像元收集所引起的串话^[40]。图 1.4 是光电串音产生的示意图。抑制电学串音常用的技术手段有对光敏元进行台面物理隔离或 PN 结电学隔离、调整器件材料的电学参数、优化器件结构等，以此来达到抑制光生载流子向临近光敏元扩散的目的^[40-49]。电学串音是红外焦平面器件串音的最主要来源^[40-49]。

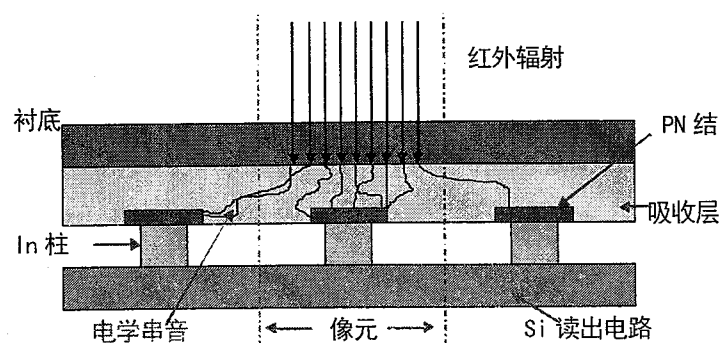


图 1.4 光电串音的产生示意图

1.2.2 像元串音对成像质量的影响

红外技术的发展对碲镉汞红外焦平面器件的性能提出了很高的要求。然而，在红外焦平面阵列中，由于像元串音的存在，致使本该在自身像元响应的信号扩散到邻近像元，造成邻近像元的响应信号失真，进而致使整个焦平面成像图像失真，其会严重降低红外系统的性能。图 1.5 是具有不同像元串音的焦平面器件的成像效果模拟图。过高的像元串音将会使图像完全模糊，使其无法达到分辨图形目标的目的。像元串音对红外焦平面器件的成像质量和功能实现具有非常重要的意义。

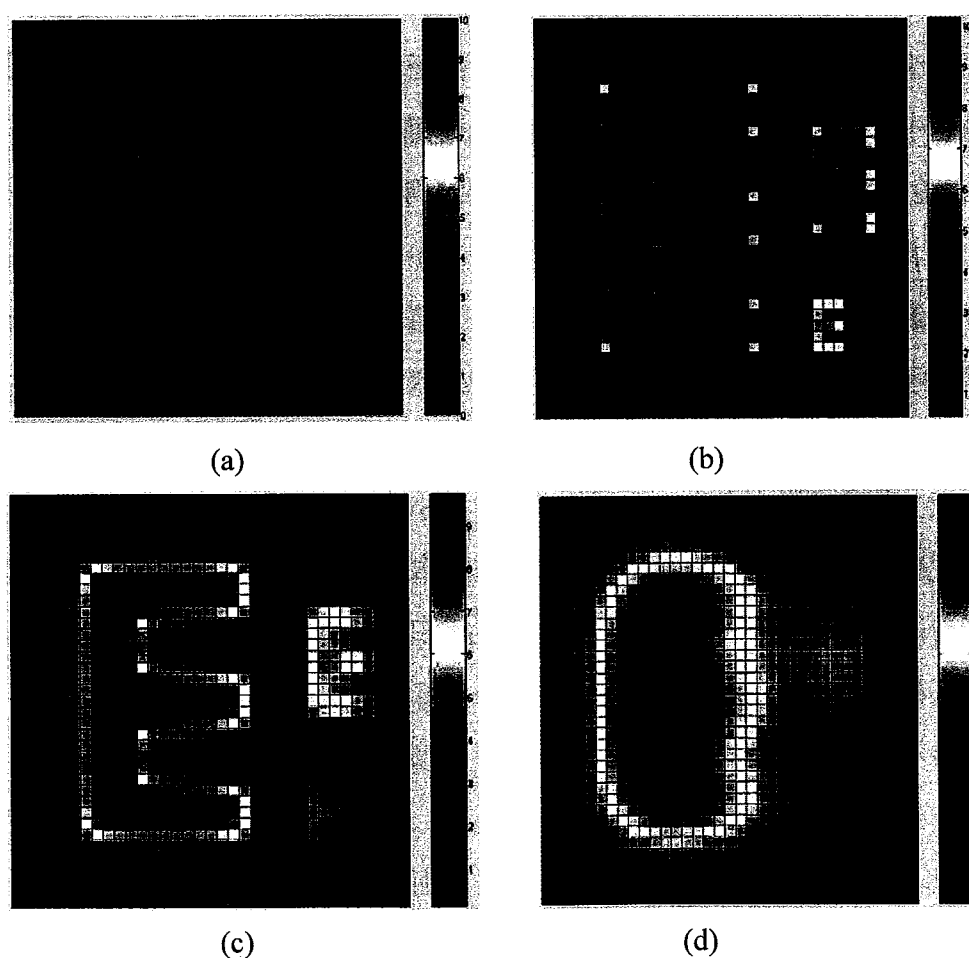


图 1.5 焦平面器件成像效果模拟图：(a) 0%串音；(b) 10%串音；(c) 15%串音；(d) 20%串音

随着红外焦平面探测器技术的发展，像元密度和响应率被不断提高，传统的平面结型焦平面的相邻像元之间的光串音也随之不断增大。因为提高像元密度，为保证单个小像元器件具有足够的响应，应尽可能地保证其内部的光生载流子横向收集区面积不被减小，从而致使像元之间光生载流子横向收集区的间距变得非常小，光生载流子被邻近像元收集的几率增大，

其必然会导致空间电学串音的增大，进而致使系统的调制传递函数(MTF)降低，红外系统分辨率难以进一步提高，从而导致整个系统的性能不能得到有效提高^[45-51]。因此，为得到高质量的红外图像，在设计和制备高性能的红外焦平面阵列时，必须要解决由于器件像元密度提高所带来的光串音增加的问题。

1.2.3 像元串音的抑制方法及研究现状

为了适应红外系统在远距离探测和高分辨率应用方面的需求，亟需解决由于器件像元密度提高所带来的光串音增加的问题。有文献对焦平面器件串音的产生机理和抑制方法做了一些理论分析^[38-51]。根据这些文献报道，抑制焦平面器件像元串音可以从以下几个方面考虑。

1. 调整材料参数和器件结构参数。如吸收层厚度、像元面积、光敏面积、少子寿命和扩散长度^[42-49]、垂直芯片表面的内建电场^[47]等。减小吸收层厚度可以减小光生载流子扩散到结区的距离，进而减小载流子扩散到周围邻近像元的比例；增大像元面积、减小光敏面积、减小少子寿命和扩散长度，可以减少光生载流子扩散到周围邻近像元的几率；通过合理调节器件材料组分梯度或是掺杂在垂直芯片表面添加一个内建电场，可以加速光生载流子向结区的扩散，增大光生载流子在本像元的收集几率；减小公共电阻和增大偏置电阻可以抑制由公共电阻和偏置电阻耦合引起的电学串音。这些方法虽然可以在一定程度内减小器件串音，但是也有其固有弊端：减小吸收层厚度、增大像元面积、减小光敏面积会造成对红外辐射的吸收不充分，从而致使器件响应率的降低；减小少子寿命和扩散长度会增加光生载流子的复合速率，从而减小焦平面器件的响应率；优化内建电场效果并不显著但会增加材料生长和器件制备工艺的复杂程度。

2. 背集成微透镜的红外焦平面：在红外焦平面光入射面与像元对应的位置集成微透镜阵列，通过该微透镜阵列把红外入射光汇聚到光敏面中心，同时在像元之间形成无光照的暗区，其可以增大载流子扩散到邻近像元的距离，进而达到减小器件串音的目的^[50,51]。图 1.6 为背集成微透镜阵列红外焦平面结构示意图。通过全知觉等人的理论计算背集成微透镜结构红外焦平面探测器可将器件串音减小 5 倍以上^[51]。采用这种方法抑制器件串音，需要突破在碲镉汞衬底材料制备高性能的微透镜阵列、与焦平面原位对准的高精度双面光刻、低应力下的芯片操作与加工等关键技术，具有很高的工艺实现难度。

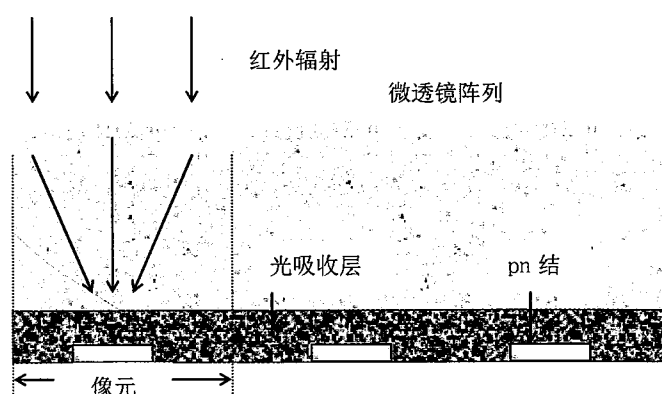


图 1.6 背集成微透镜阵列红外焦平面结构示意图

3. 台面或 PN 结隔离焦平面器件：通过台面或 pn 结来实现焦平面器件像元之间的物理或电学隔离，抑制载流子的横向扩散，从而减小光敏元之间的串音^[42,43,48,49]。对于 pn 结隔离，要实现串音的有效抑制，隔离用 pn 结的结深需要具有一定的深度，由于 MCT 材料具有易受损伤的特性，这会大幅增加器件工艺难度和器件损伤；另外，由于 pn 结的横向扩展还会造成器件响应面积的大幅减小（器件占空比显著减小），造成红外辐射的利用率和器件响应率的降低。而台面隔离实现工艺相对比较简单，而且从理论上可以获得很高的器件响应面积占空比，基本不会造成红外辐射的额外损失，从而可以有效抑制器件串音，提高红外系统分辨率。目前以美国为首红外技术先进国家的红外焦平面探测器都是采用台面隔离结构^[52]。

目前，美国的雷神视觉系统公司（Raytheon Vision Systems, RVS）已经开发出 1600 万像素（4096×4096）的红外焦平面，而 HRL、Rockwell、sofradir、DRS 等研究机构和公司也都有像素规模达到百万以上、像元尺寸小于 30 μm 的串音得到有效抑制的 MCT 红外焦平面器件产品上市^[52-58]。

1.3 本文的研究目的和结构安排

1.3.1 研究目的

在远距离探测和高分辨率应用需求的推动下，传统平面结构碲镉汞红外焦平面探测器因像元密度不断提高，像元串音也越来越大，严重影响了碲镉汞红外焦平面探测器的成像质

量的进一步提高。为此，本文针对低串音的碲镉汞红外探测芯片技术的关键问题，主要展开两个方面的研究：

(1) 具有串音抑制效果的红外探测芯片的微结构设计。理论分析获得红外焦平面器件材料、器件结构参数与串音的关系，获得优化的具有串音抑制效果的红外探测芯片的微结构设计。

(2) 具有串音抑制效果的红外探测芯片的制备工艺技术的实现。通过对优化设计的探测芯片的微结构设计要求和工艺技术现状的分析，突破工艺难点，获得具有串音抑制效果的红外探测芯片的制备工艺。

1.3.2 结构安排

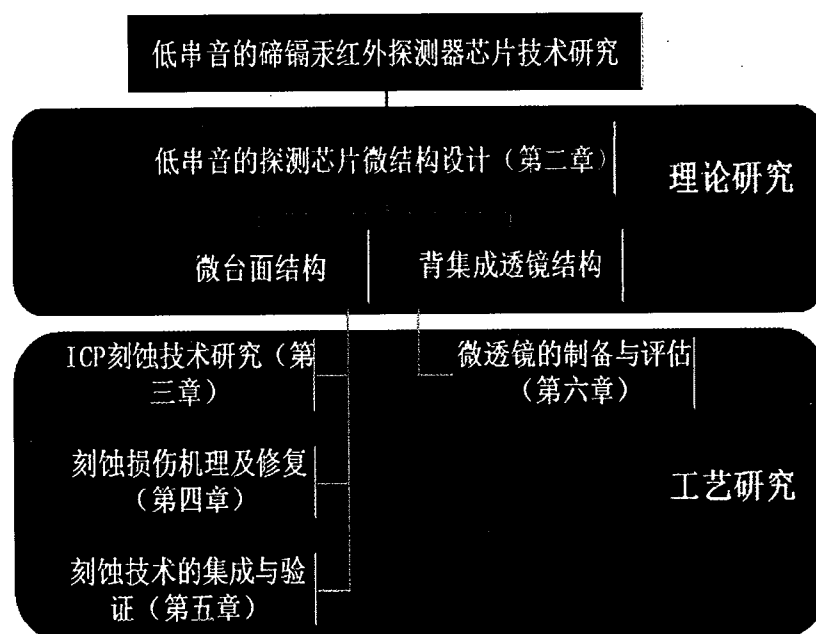


图 1.7 本文的结构安排

根据上述研究目的，本文结构安排（如图 1.7）如下：

第一章：绪论。

第二章：具有抑制器件串音作用的碲镉汞探测芯片微结构的理论设计。理论计算了常规碲镉汞焦平面器件、微台面隔离结构碲镉汞焦平面器件以及背集成微透镜结构的碲镉汞焦平面器件的材料和器件参数与像元串音的关系，分析了微台面隔离结构和背集成微透镜结构的器件的串音抑制效果，获得了抑制串音的探测器结构和优化设计方法。

第三章：碲镉汞高占空比微台面探测芯片的 ICP 干法刻蚀工艺研究。总结了碲镉汞的 ICP 干法刻蚀的研究意义及原理，分析了碲镉汞高占空比刻蚀研究的关键问题，获得了一种高刻蚀选择比的掩膜改性硬化技术。基于刻蚀气体组分、气压、刻蚀温度等 ICP 刻蚀工艺参数对刻蚀台面占空比的影响，获得了优化的工艺参数，获得了优化的高占空比 V 形微台面的刻蚀工艺参数，验证了其在高密度碲镉汞微台面隔离应用中的可行性。

第四章：碲镉汞 ICP 干法刻蚀损伤的产生机理以及损伤修复研究。基于碲镉汞损伤的电学特性，获得了一种简单方便的图形阻抗损伤测试技术，并结合剥层霍尔测试方法，获得了材料组分、工艺气体组分、刻蚀温度、直流偏压、刻蚀气压等材料和刻蚀工艺参数与刻蚀损伤的对应关系。采用热处理方法，研究了材料的载流子输运特性和少子寿命与损伤修复工艺条件的关系，确定了修复刻蚀损伤的最佳条件。

第五章：碲镉汞微台面芯片的干法刻蚀技术集成与验证。通过对台面成形工艺对器件 PN 结性能影响的研究，建立了制备台面器件的优化工艺流程。通过优化台面形貌，提高了台面钝化质量。获得了像元规模为 320×256 、像元中心距为 $30\mu\text{m}$ 、结构为 n^+ -on-p 的焦平面台面器件，测试了其阻抗特性和焦平面性能参数，完成了技术验证和实验室演示成像。

第六章：碲锌镉微透镜列阵的制备工艺及其性能评估方法研究。采用光刻胶熔融与 ICP 组合刻蚀的方法，分析了工艺参数对微透镜形貌的影响，建立了制备工艺参数提取方法，获得了优化的碲锌镉微透镜阵列的制备工艺。建立了激光共聚焦显微镜辅助光线追迹评估微透镜性能的方法，并基于辅助监测实现了微透镜焦距的微调。获得了聚光效果良好的碲锌镉微透镜阵列。

第七章：结束语。总结了研究的主要结论，分析了还存在的问题，对未来的研究方向进行了展望。

第2章 低串音的红外探测芯片的微结构设计

2.1 低串音芯片微结构设计的研究意义

红外技术的发展对红外焦平面的性能提出了很高的要求。然而，随着碲镉汞红外焦平面探测器技术的发展，像元密度和响应率被不断提高，传统的平面结型焦平面的相邻像元之间的光串音也随之增大。这是因为提高像元密度，为保证单个小像元器件具有足够的响应，应尽可能地保证其内部的光生载流子横向收集区面积不被减小，从而致使像元之间光生载流子横向收集区的间距变得非常小，光生载流子被邻近像元收集的几率增大，其必然会导致空间电学串音的增大，进而致使系统的调制传递函数(MTF)降低，红外系统分辨率难以进一步提高，从而导致整个系统的性能不能得到有效提高^[45-51]。因此，为得到高质量的红外图像，在设计高性能的红外焦平面阵列时，必须要解决好由于器件像元密度提高所带来的光串音增加的问题。

为解决这一问题，本章展开了对红外焦平面探测器串音抑制方法的研究，拟通过设计和优化器件微结构来达到有效抑制器件串音的目的。

2.2 背入射式平面结器件的串音

背入射平面结红外焦平面具有量子效率高、工艺简单、可靠性高、成品率高等优点，可以获得较高的器件性能，是目前主流的红外焦平面之一。为了指导器件的结构设计，本节基于该结构器件，完成了对串音与材料器件参数关系的理论计算。

2.2.1 理论模型

图 2.1 是背入射式平面结器件的串音计算示意图。红外辐射射入碲镉汞焦平面器件，被吸收产生光生载流子，然后被芯片正面的 pn 结所收集，产生光生电流信号。光生载流子到达上表面和下表面的时间需要：

$$t_{up} = (y_p - y) / (v_d * \cos(\theta) + \mu E) \quad (1)$$

$$t_{di} = y_p / (v_d * \cos(\theta) + \mu E) \quad (2)$$

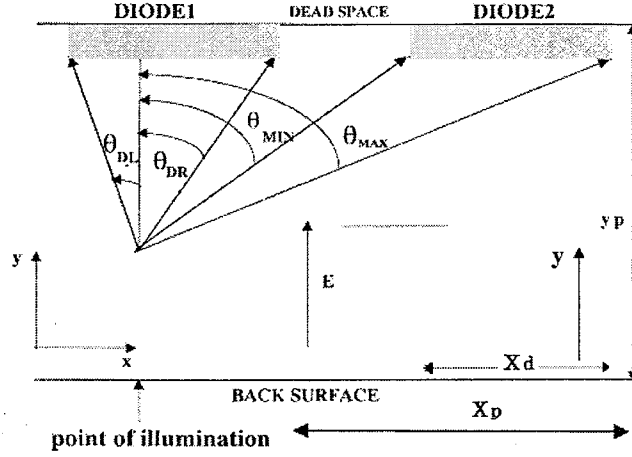


图 2.1 背入射式平面结器件的串音计算示意图

其中, y_p 为碲镉汞外延层厚度, μ 为载流子迁移率, E 为内建电场, θ 为载流子的扩散运动方向, $v_d = (D/\tau)^{1/2}$ 为扩散速度, D 为扩散系数, τ 为少子寿命。载流子到达二极管的角度需满足:

$$\tan(\theta') = x / (y_p - y) = v_d * \sin(\theta) / (v_d * \cos(\theta) + \mu E) \quad (3)$$

载流子从产生的位置到上表面的距离为:

$$r = (y_p - y) / \sec(\theta') \quad (4)$$

根据 V.Dhar 模型^[42,47], 载流子被吸收的几率由以下 3 个方面决定: 1. 材料对红外辐射的吸收 $\exp(-\alpha * y)$ 和载流子的扩散 $\exp(-r/L_d)$; 2. 载流子够被 pn 结收集的扩散包络角度 $\theta_1 \sim \theta_2$ (θ_1, θ_2 分别为考虑内建电场后, 载流子由产生位置扩散到结区的临界角度)。3. 内建电场的补偿作用 $\text{erfc}(r / (2 * (D * t)^{1/2}))$ 。从而有光生载流子被二极管收集到的几率有:

$$p(x, y, \theta) = k(y) * \exp(-\alpha * y) * \exp(-r / L_d) * \text{erfc}(r / (2 * (D * t)^{1/2})) * \Delta\theta \quad (5)$$

其中, $k(y)$ 为归一化因子, α 为吸收系数。由上式对所有载流子求和, 可得相应的产生的光电流:

$$I(x) = s \int k(y) * \exp(-\alpha * y) \int \exp(-r / L_d) * \text{erfc}(r / (D * t)^{1/2}) d\theta dy \quad (6)$$

其中, $s = q\eta\phi\alpha / 2\pi$, η 为量子效率, ϕ 为辐射光子流量。载流子在 Diode1 产生的光电

流为：

$$SIG = I(x) \Big|_{-\theta_{DL}}^{\theta_{DR}} = s \int k(y) * \exp(-\alpha * y) \int_{-\theta_{DL}}^{\theta_{DR}} \exp(-r/L_d) * \operatorname{erfc}(r/(D*t)^{1/2}) d\theta dy \quad (7)$$

$$\theta_{DR} = \arctan((\frac{x_p + x_d}{2} - x)/(y_p - y)) \quad (8)$$

$$\theta_{DL} = \arctan((x - \frac{x_p - x_d}{2})/(y_p - y)) \quad (9)$$

以上计算的是单束光在二极管产生的光响应，为了计算光串音，需要将光束在整个焦平面做扫描，对整个像元区的光生电流积分，获得整个光敏元的空间响应，进而求出像元串音 CT ：

$$CT = \frac{\int_{x_p/2}^{3x_p/2} I(x) dx}{\int_{-x_p/2}^{x_p/2} I(x) dx} \quad (10)$$

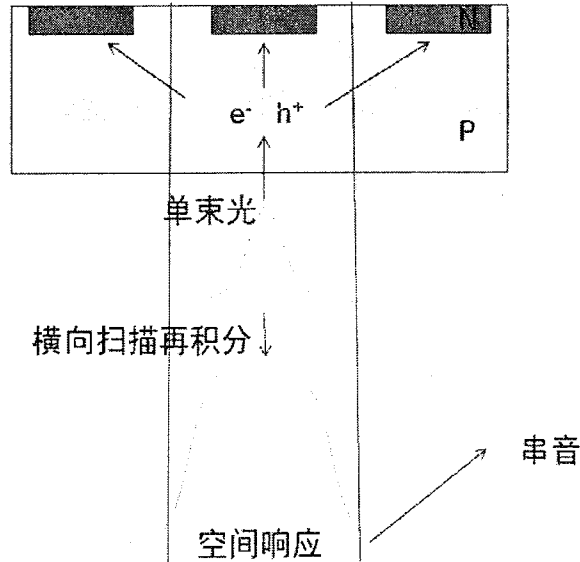


图 2.2 背入射式平面结器件串音的计算

2.2.2 计算结果

本文采用上节所述的模型，针对像元大小为 $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 的碲镉汞背入射平面结器件，通过分别改变材料的少数寿命、组分梯度、器件结深、二极管尺寸等参数，研究了其与串音大

小的关系。

图 2.3 是获得的材料和器件结构参数与串音的关系曲线图。由图可知：少子寿命对器件串音影响极大，虽然减小少子寿命可以抑制像元串音，但是也会相应地减小器件的响应率，所以通过控制少子寿命不宜用来抑制器件串音；合适的组分梯度可以减小器件串音，但效果并不明显；推进 PN 结深也可以有效地减小器件串音，但是模型中并未考虑器件结区的载流子复合问题，所以抑制效果比起实际情况有些偏高；减小器件 PN 结尺寸也可适当地抑制串音，但是也有减小器件响应率的缺点，实用性不高。

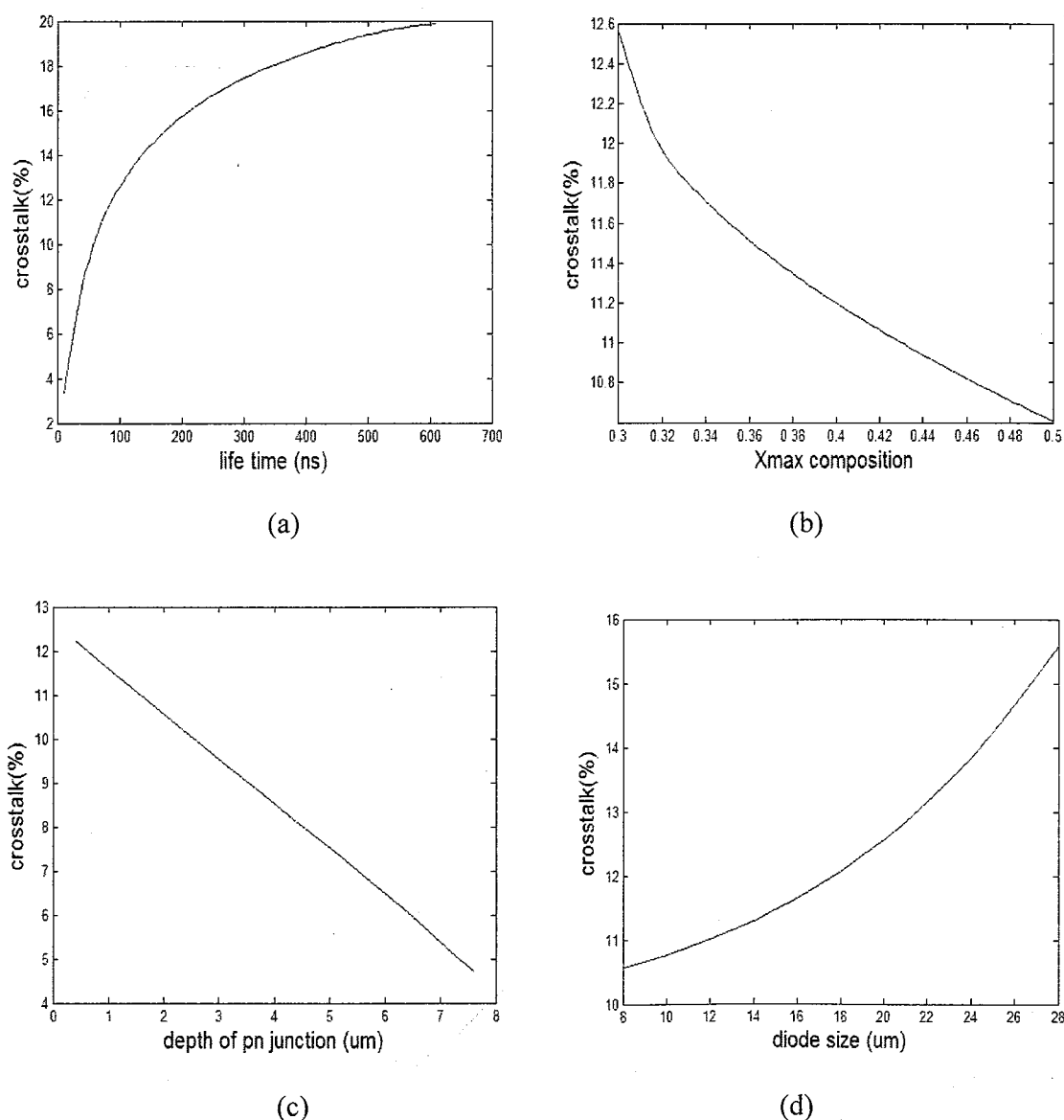


图 2.3 材料和器件结构参数与串音的关系图(a)少子寿命与串音关系；(b)组分梯度与串音关系；(c)结深与串音关系；(d)二极管尺寸与串音关系

2.3 台面结构器件的串音

台面结构的碲镉汞红外焦平面器件，光敏区采用微台面进行了物理隔离，限制了光生载流子向邻近像元的扩散，可以起到减小器件像元串音的作用。另外，台面侧壁的内反射还能提高量子效率。台面隔离是一种有效的抑制器件串音的手段。

2.3.1 理论模型

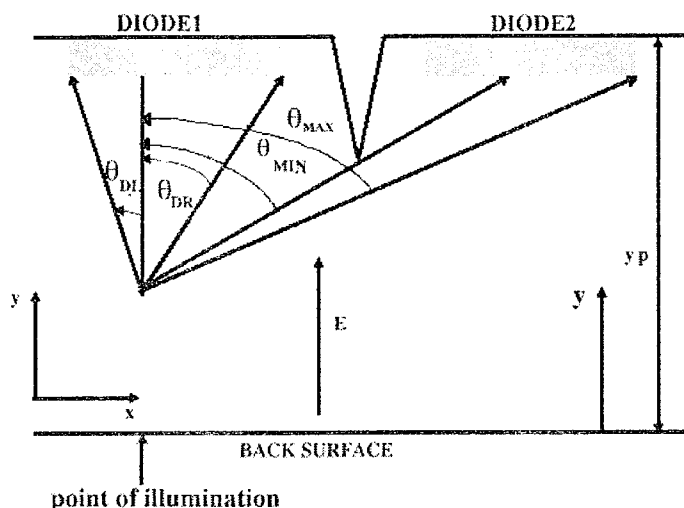


图 2.4 台面结构焦平面器件的串音计算模型

本节采用的碲镉汞台面结构器件的串音计算模型仍旧基于 V.Dhar 模型，只是在光敏元间增加了一个隔离沟槽，用以限制光生载流子向邻近像元的扩散（如图 2.4）。其串音计算公式仍旧可以沿用 2.3.1 节的 7~10 式，只是积分区间需要做相应的改动。

2.3.2 计算结果

本节主要针对碲镉汞背入射台面结构器件，采用表 2.1 所示的计算参数，计算了获得了像元串音与其隔离微台面深度的关系，如图 2.5 所示。由图可知，碲镉汞微台面结构器件的像元串音大小受台面深度影响很大，台面过浅（小于 $3\mu\text{m}$ ），串音抑制效果不明显；台面越深，串音抑制效果越好；台面深度达到 $6\mu\text{m}$ 时，器件串音已经减小了 4 倍，而且从理论上讲，通

过台面隔离可以达到将像元串音控制到接近为 0 的效果。由此可见，通过台面隔离能够有效抑制像元串音，其效果主要受台面隔离深度影响。考虑到器件对红外辐射的吸收、制备工艺的误差容忍度、器件基电阻影响等因素，我们认为对于碲镉汞中波焦平面器件台面隔离深度为 $5\sim 6\mu\text{m}$ 为宜，长波 $6\sim 7\mu\text{m}$ 为宜。

另外，本文还对台面隔离占空比对器件响应率的影响进行了理论计算（如图 2.6 所示），发现台面隔离占空比对器件响应率影响很大。所以在对台面隔离结构红外焦平面器件进行设计和加工的时候，在满足公共基区的连通的前提下，应尽可能地提高微台面的隔离深度和微台面的占空比，从而最大限度地保证器件的响应率不被减小。

表 2.1 本节串音计算所采用的参数

材料 Cd 组分	0.300
像元尺寸	$30\mu\text{m}\times 30\mu\text{m}$
PN 结尺寸	$20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}$
外延层厚度	$8\mu\text{m}$
少子寿命	100ns
温度	77k

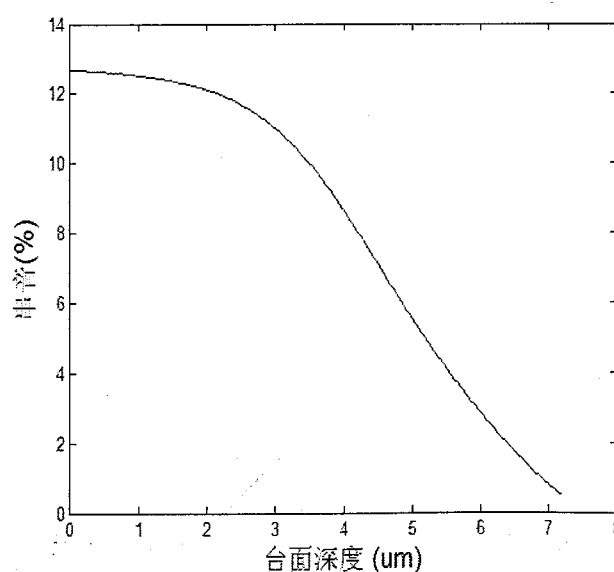


图 2.5 隔离微台面的深度与串音关系

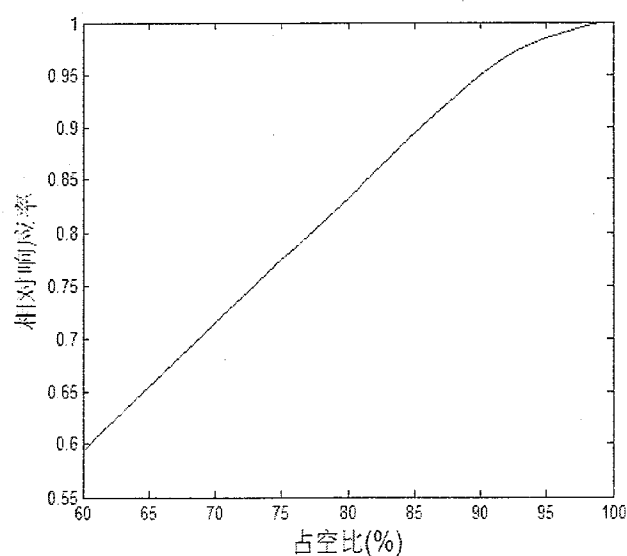


图 2.6 隔离微台面的占空比与器件相对响应率关系

2.4 背集成微透镜 IRFPAs 器件的串音

背集成微透镜 IRFPAs 器件，如图 2.7 所示，通过背集成与探测单元对准的会聚微透镜阵列，将入射光汇聚到像元中间的光敏响应区，其能增加光敏面收集区单位面积上的光强，从而提高红外光能利用率，进而可提高器件响应率；同时在相邻像元中间形成无光照的暗区，从而可以减小能形成串音的载流子的产生，进而减小器件的光学串音，提高焦平面的调制传递函数（MTF），进而提高焦平面器件的分辨率。

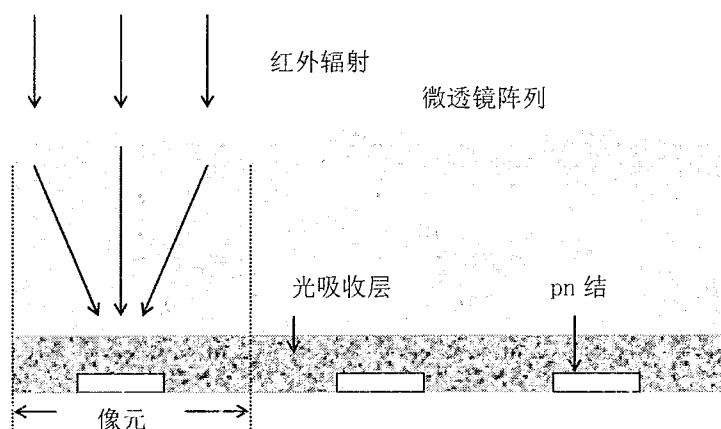


图 2.7 背集成微透镜阵列的红外焦平面器件原理图

2.4.1 理论模型

本节采用的碲镉汞台面结构器件的串音计算模型仍旧基于 V.Dhar 模型，只是在器件背面增加了一个微透镜阵列，用以将入射光会聚到像元中央，从而减小光生载流子扩散到邻近像元的几率。其串音计算公式仍旧可以沿用 2.3.1 节的 10 式，只是 x 轴的积分区间和入射光强度分布需要做相应的改动。

2.4.2 计算结果

本节针对背集成微透镜结构器件，采用表 2.2 所示的计算参数，计算了获得了像元串音与微透镜会聚到器件界面的光斑大小的关系，如图 2.8 所示。有图可知，背集成微透镜结构器件的像元串音大小受微透镜聚光效果影响很大，会聚光斑越小，串音抑制效果越好。由此可见，背集成微透镜结构器件也可以有效地抑制器件串音，串音抑制效果主要由会聚光斑大小决定。为此，针对背集成微透镜的红外焦平面器件的结构设计，应尽可能地提高微透镜的聚光效果，减小会聚光斑大小。

表 2.2 本节串音计算所采用的参数

材料 Cd 组分	0.300
像元尺寸	$30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$
PN 结尺寸	$20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$
外延层厚度	$8\mu\text{m}$
少子寿命	100ns
温度	77k

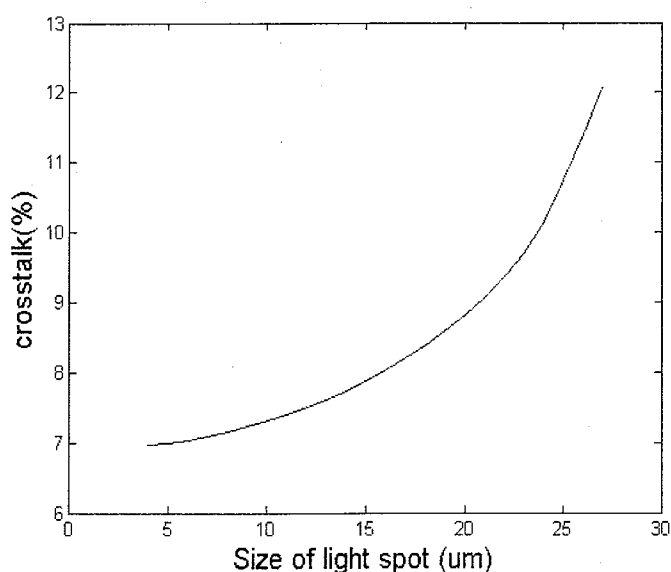


图 2.8 微透镜会聚光斑与像元串音的关系

2.5 串音抑制效果综合比较

通过改变材料和器件结构参数、采用微台面隔离像元、背集成微透镜阵列都可以实现对碲镉汞红外焦平面器件的串音的抑制。为了寻找到更为合理的串音抑制方法，本节分别针对像原尺寸为 $30\mu\text{m}$ 和 $15\mu\text{m}$ 的背入射式碲镉汞红外探测器，采用前文所述的计算模型，比较了这几种方法的串音抑制效果。

表 2.3 和表 2.4 分别是像原尺寸为 $30\mu\text{m}$ 和 $15\mu\text{m}$ 的背入射式碲镉汞红外探测器，分别采用改变材料和器件结构参数、微台面隔离像元、背集成微透镜阵列的方式抑制串音，通过理论计算所获得的材料、结构参数与器件相对响应率和串音的关系。由图可知，台面隔离、背集成微透镜结构器件都能够很好地抑制像元串音，而且效果都好于通过改变材料和器件结构参数来抑制串音。微台面结构器件串音抑制效果最好，背集成微透镜结构器件响应率更高。由此可见，通过合理的微结构设计是最有效的抑制像元串音的手段。

表 2.3 30 μm 中心距器件的串音抑制效果综合比较

串音抑制方法	像元中心距 (μm)	PN 结尺寸 (μm)	温度 (K)	微透镜 光斑大小 (μm)	组分	外延层 厚度 (μm)	台面隔离深度 (μm)	梯度组分最大值	少子寿命 (ns)	PN 结深 (μm)	相对响应率	串音 (%)
常规平面结器件	30	20	77	30	0.3	8	0	0.3	100	0.2	1	12.6
调节组分梯度	30	20	77	30	0.3	8	0	0.35	100	0.2	1.07	11.6
推进结深	30	20	77	30	0.3	8	0	0.3	100	4	2.24	10.5
减小 PN 结尺寸	30	15	77	30	0.3	8	0	0.3	100	0.2	0.85	11.6
减小少子寿命	30	20	77	30	0.3	8	0	0.3	20	0.2	0.85	5.6
背集成微透镜	30	20	77	10	0.3	8	0	0.3	100	0.2	1.46	<u>7.0</u>
台面隔离	30	20	77	30	0.3	8	5.5	0.3	100	0.2	0.84	<u>3.8</u>

表 2.4 15 μm 中心距器件的串音抑制效果综合比较

串音抑制方法	像元中心距 (μm)	PN 结尺寸 (μm)	温度 (K)	微透镜 光斑 (μm)	组分	外延层 厚度 (μm)	台面隔离深度 (μm)	梯度组分最大值	少子寿命 (ns)	PN 结深 (μm)	相对响应率	串音 (%)
常规平面结器件	15	10	77	15	0.3	8	0	0.3	100	0.2	1	27.7
调节组分梯度	15	10	77	15	0.3	8	0	0.35	100	0.2	1.03	26.6
推进结深	15	10	77	15	0.3	8	0	0.3	100	4	2.19	16.9
减小 PN 结尺寸	15	7	77	15	0.3	8	0	0.3	100	0.2	0.74	26.1
减小少子寿命	15	10	77	15	0.3	8	0	0.3	20	0.2	0.83	17.8
背集成微透镜	15	10	77	5	0.3	8	0	0.3	100	0.2	1.10	18.0
台面隔离	15	10	77	15	0.3	8	5.5	0.3	100	0.2	0.96	6.8

2.6 小结

本章主要展开了低串音的碲镉汞探测芯片的微结构设计研究。

总结了低串音的碲镉汞探测芯片的微结构设计的研究意义，介绍了碲镉汞探测芯片像元串音的分类和抑制办法。

理论计算了常规碲镉汞平面结器件诸如材料组份梯度、少子寿命、PN结深、像元尺寸等材料、器件参数与像元串音的关系，分析了其抑制串音的效果和实施可行性。

理论计算了碲镉汞台面结构器件隔离微台面深度与像元串音的关系，分析了其抑制串音的效果和实施可行性。发现碲镉汞微台面结构器件的像元串音主要受台面隔离深度影响，台面越深，串音抑制效果越好；从理论上讲，通过台面隔离可以达到将像元串音控制到接近为0的效果。针对该结构器件的设计，在满足公共基区的连通的前提下，应尽可能地提高微台面的隔离深度，以及保持微台面的占空比。

理论计算了背集成微透镜阵列碲镉汞器件的微透镜聚光性能与像元串音的关系，分析了其抑制串音的效果。发现背集成微透镜结构器件的像元串音主要受微透镜聚光效果影响，会聚光斑越小，串音抑制效果越好。针对背集成微透镜的红外焦平面器件的结构设计，应尽可能地提高微透镜的聚光效果，减小会聚光斑大小。

综合比较了通过改变材料和器件结构参数，采用微台面隔离以及背集成微透镜的方式抑制串音的效果。发现台面隔离、背集成微透镜结构器件都能够很好地抑制像元串音，而且效果都好于通过改变材料和器件结构参数来抑制串音。微台面结构器件串音抑制效果最好，背集成微透镜结构器件响应率更高。通过合理的微结构设计是最有效的抑制像元串音的手段。

第3章 碲镉汞微台面的 ICP 干法刻蚀工艺研究

干法等离子体刻蚀技术是发展第三代碲镉汞红外焦平面器件的关键技术之一，是获得微台面结构的碲镉汞红外焦平面器件的关键工艺，在抑制焦平面器件串音，制备高密度原位同质结、原位异质结、多色、APD 等第三代红外焦平面器件有着广泛的应用，随着科技的发展，受到越来越多的重视与研究^[59-67]。而 ICP 干法刻蚀由于具有大离子密度、低刻蚀能量、高均匀性、低成本等有优点，成为目前碲镉汞干法刻蚀的主流技术^[65-79]。

3.1 ICP 干法刻蚀技术的研究意义

3.1.1 微台面隔离的应用需求和技术要求

1) 应用需求

碲镉汞的微台面隔离主要有两个方面的应用：

其一，实现原位结器件的功能性隔离。通过适当的刻蚀技术形成微台面阵列，将原位掺杂生长的碲镉汞多层异质结红外材料隔离成各自独立的光电二极管，从而形成焦平面器件阵列。其中，微台面隔离必须同时保证原位掺杂 p-n 结的隔断和公共基区的连通。双色、多色、原位异质结和雪崩二极管等新一代碲镉汞红外焦平面探测器的光敏感探测芯片的台面隔离就基于这个应用。

其二，抑制焦平面器件像元串音。通过微台面隔离改变光生载流子的扩散路径，抑制光生载流子向邻近光敏元的扩散，从而实现抑制焦平面器件的像元串音的目的。大规模高密度红外焦平面器件的微台面隔离就是其主要应用之一。

2) 技术要求

为了满足碲镉汞微台面隔离的应用需求，碲镉汞的微台面隔离技术需要满足以下几个技术要求：

- 高占空比。由于碲镉汞焦平面器件的台面隔离会造成一定的红外辐射吸收面积的损失，为保证器件在隔离后仍然具有足够的响应率，微台面隔离技术必须要尽可能地保证微台面的高占空比。微台面的占空比直接与干法刻蚀沟槽的深宽比相关，要实现微台面隔离的高占空比即要求隔离沟槽具有高的深宽比。

- 良好的刻蚀表面和剖面形貌。为保证碲镉汞台面结构器件具有较好的钝化效果，刻蚀表面粗糙度必须尽可能的低，而且刻蚀剖面形貌也需要被优化与控制，V 字形被认为是最理想的刻蚀剖面形貌。
- 低损伤或无损伤。微台面列阵隔离技术需要兼顾碲镉汞材料存在 Hg-Te 键相对较弱的特点，在具体的工艺过程中需要避免引入过多的物理损伤或电学损伤，从而保证隔离后光敏感元的正常的光电特性。
- 刻蚀精确性。为同时达到原位掺杂 p-n 结的隔断和公共基区保持相通的目的，碲镉汞微台面列阵的隔离技术要求光敏感元隔离沟槽深度可精确地被控制。
- 刻蚀均匀性、刻蚀速率、刻蚀重复性等。为保证碲镉汞焦平面器件的微台面隔离技术具有较好的工业产出，刻蚀均匀性、刻蚀速率、刻蚀重复性等都需要实现较好的控制。

3.1.2 微台面隔离技术

半导体制造工艺有两种基本的微台面隔离工艺：湿法腐蚀和干法刻蚀。湿法腐蚀通过化学腐蚀液（如酸、碱和溶剂等）以化学腐蚀的形式去除芯片表面的材料。干法刻蚀则是通过等离子体与芯片表面发生物理或化学反应（或者两种反应）来实现表面材料的去除。

3.1.2.1 化学湿法腐蚀技术及其局限性

湿法腐蚀是一种重要的半导体芯片制造工艺技术，其在漂洗、去除残留物、表面剥离以及大尺寸图形刻蚀等应用方面有着非常广泛的应用。湿法腐蚀具有选择比高、对器件不易产生损伤以及工艺设备简单等优点。其在碲镉汞红外探测器的制造过程中也被广泛应用。

目前，主流的碲镉汞腐蚀剂都是 Br_2 基化学溶液，如 Br_2 /甲醇、 Br_2 /乙醇、 Br_2 /丁醇、 Br_2 /乙二醇及其混合液^[80-84]。中性环境中碲氧化物的溶解度非常低，而在 Br_2 溶液中， Br_2 分子被吸附在碲镉汞晶体表面和 Te^{2-} 反应，生成 Br^- 阴离子和 Te^0 ，中性的 Te^0 很快以原子的形式离开腐蚀表面。同时， Br^- 阴离子氧化镉阳离子和汞阳离子生成 Cd 和 Hg 的溴化物：二甲基镉和二甲基汞，其也是易溶的（溴/甲醇/丁醇/乙二醇）。表 3.1 给出了碲镉汞的不同湿化学腐蚀剂、腐蚀后表面特点及腐蚀速率^[69,80-83]。

表 3.1 碲镉汞湿法腐蚀工艺的总结

腐蚀液	表面情况	腐蚀速率
Br ₂ /甲醇 (1~10%)	可能是碲的氧化物 有碳的污染	~1μm/min 7.3× ([Br]的百分比)
Br ₂ /HBr (1~5%)	富碲表面	约为 10μm/min
Br ₂ /HBr/乙二醇 (在不同的比例下)	氧化物和碳含量 化学配比几乎不变	0.6-4μm/min 取决于混合物的比例
K ₂ Cr ₂ O ₇ :HNO ₃ :H ₂ O: 4gm:10ml:20ml	碲和镉的氧化物 有碳的污染	用于 CdTe 的选择性刻蚀
光电气化学腐蚀 1M HClO ₄	镉耗尽 没有氧化物 几乎是 HgTe	没有报道
光电气化学腐蚀 1M HCl	Te 的氧化物 镉耗尽	没有报道

各种碲镉汞的腐蚀液都表现出各向同性的腐蚀特点，在腐蚀工程中，其会在掩膜材料边缘下面产生钻蚀，形成各向同性的侧壁^[69,80-83]，难以获得具有高深宽比的腐蚀沟槽，图 3.1 是典型的碲镉汞湿法腐蚀剖面。图 3.2 是采用湿法腐蚀获得的，微台面结构红外焦平面器件隔离台面深度与填充因子的关系图。由图可见，在像元尺寸为 30μm、隔离台面深度为 5μm 时，湿法腐蚀获得的台面填充因子就已经小于 50%了，而该条件只是高密度红外焦平面台面隔离的最低要求。

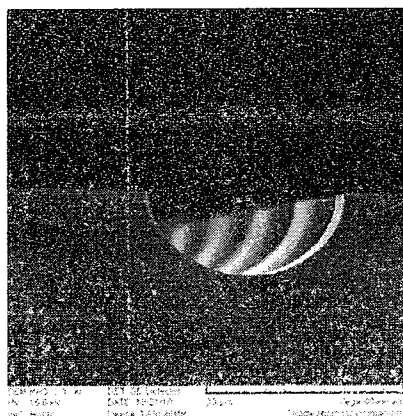


图 3.1 是典型的碲镉汞湿法腐蚀剖面

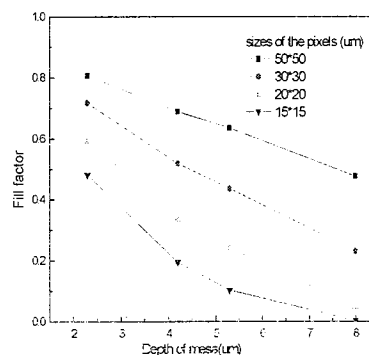


图 3.2 湿法腐蚀的微台面深度与填充因子的关系

因此,湿法腐蚀不适用于对占空比有着很高要求的高密度碲镉汞红外焦平面器件的微台面隔离。

3.1.2.2 等离子体干法刻蚀技术特点及优势

干法刻蚀可以精确地把掩膜图形复制到芯片表面,是半导体生产中最重要刻蚀方法。相比于湿法腐蚀,干法刻蚀有一些非常重要的优点,如刻蚀剖面各向异性、刻蚀速率可控性和掩蔽膜图形复制精确,以及片内、片间、批次间的刻蚀均匀性好^[69,85-89]。

在干法刻蚀过程中,用低压等离子体放电来去除芯片样品未被掩蔽膜图形保护区域的材料,其刻蚀过程见图 3.3。如图 3.3 所示,等离子体的干法刻蚀是由工艺气体被高能电子碰撞而产生的刻蚀基,在扩散达到暗区并在暗区被 V_{dc} 加速运动到刻蚀样品的表面后,与芯片样品表面材料反应形成易挥发的刻蚀生成物而被刻蚀机的真空系统抽走来完成的。

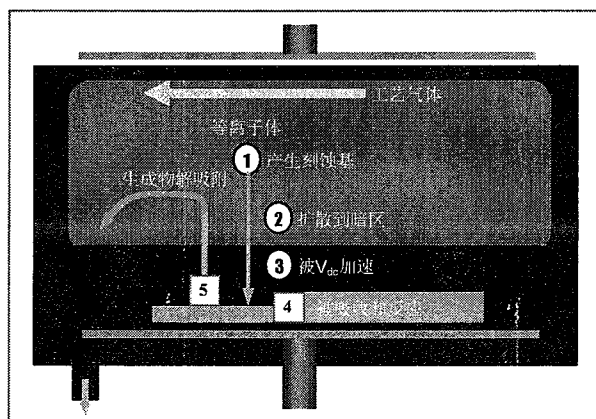


图 3.3 等离子体刻蚀的过程示意图

干法刻蚀系统中,刻蚀作用是通过化学作用或物理作用,或化学和物理的共同作用来实现的。表 3.2 总结了化学作用、物理作用、化学与物理混合作用的刻蚀中的不同刻蚀参数^[69]。所以,需要根据不同的工艺目的,选择合理的刻蚀类型。

表 3.2 化学干法等离子体刻蚀和物理干法等离子体刻蚀

刻蚀参数	物理刻蚀(RF 电场垂直于芯片表面)	化学刻蚀(RF 电场平行于芯片表面)	化学刻蚀	物理和化学刻蚀
刻蚀机理	物理离子溅射	等离子体中的活性基与芯片表面反应	液体中的活性基与芯片表面反应	在干法刻蚀中,刻蚀包括离子溅射和活性元素与芯片表面的反应

侧壁剖面	各向异性	各向同性	各向同性	各向同性至各向异性
选择比	差/难以提高 1: 1	一般/好 5: 1 至 100: 1	高/很高 高于 500: 1	一般/高 5: 1 至 100: 1
刻蚀速率	快	适中	慢	适中
线宽控制	一般/好	差	非常差	好/非常好

碲镉汞的干法刻蚀技术开始发展于 20 世纪八十年代末至九十年代初^[92-97]。对于碲镉汞的干法刻蚀，刻蚀剂必须能够同时去除碲镉汞材料中的三种组分，所以他们的生成物必须都具有较好的化学挥发性。最初，卤素（ F_2 、 Cl_2 ）辉光放电的方法被用来刻蚀 II-VI 族半导体化合物^[69]，但由于镉的卤化物蒸汽压很低、反应生成物具有很强的腐蚀性和毒性等缺点而遭到淘汰。而在这之后发展起来的化学刻蚀剂 CH_4/H_2 和 $CH_4/H_2/Ar$ 受到了碲镉汞等离子体刻蚀研究的青睐^[93-99]。这是因为这些刻蚀剂可以与 $HgCdTe$ 反应成挥发性较好的化合物 TeH_2 、 $Te(CH_3)_2$ 、 $Cd(CH_3)_2$ 和 $Hg(CH_3)_2$ 等，并且工艺气体相对而言毒性也更小。

等离子体干法刻蚀种类繁多，按反应器种类可分为射频（RF）辉光放电、反应离子刻蚀（RIE）、磁增强反应离子刻蚀、低能量电子增强刻蚀（ LE_4 ）和电子回旋共振（ECR）刻蚀等。这些反应器产生的等离子都被称为低压（ 10^{-4} to 10 托）或冷等离子体，其带电离子和自由基的密度比中性的要更小。刻蚀中的离子和自由基的能量都很低，可以用以 II-VI 族化合物的低损伤刻蚀，并且良好的各向异性可以实现碲镉汞精细图形的刻蚀。

为提高碲镉汞的刻蚀速度和降低刻蚀离子能量，需要采用高密度的等离子体刻蚀系统。在这种刻蚀系统中，可以实现离子能量和离子密度的单独控制。通常用以产生高密度离子源的功率比偏压控制源（加载于晶片电极）的功率大很多。因此，偏压功率与等离子体密度和离子束流之间的关系不大，实质上是相互独立的。众所周知，偏压功率近似等于离子能量和离子束流的乘积。因此，如果提高产生高密度离子源的功率（保持偏压功率不变）来增加离子束流，离子能量则必然会降低。ECR 和 ICP 等高密度等离子体反应器都采用了这个重要原理^[62-65]。图 3.4 是传统 RIE 和 ICP 增强型 RIE 的结构区别图。如图所示，传统 RIE 设备只有一个 RF 源，为获得高的等离子体密度和快的刻蚀速率，就必须加大等离子体能量；而 ICP 增强型 RIE 设备则有两个 RF 源，从而将产生等离子体的源和控制等离子体刻蚀能量的源分开，可实现低能量、高密度的等离子体刻蚀。于是，ICP 增强型 RIE 技术不仅可以通过增加

等离子体的密度来保证快的刻蚀速率，而且可以通过控制等离子体的能量来控制刻蚀微结构形貌和抑制刻蚀诱导电学损伤。

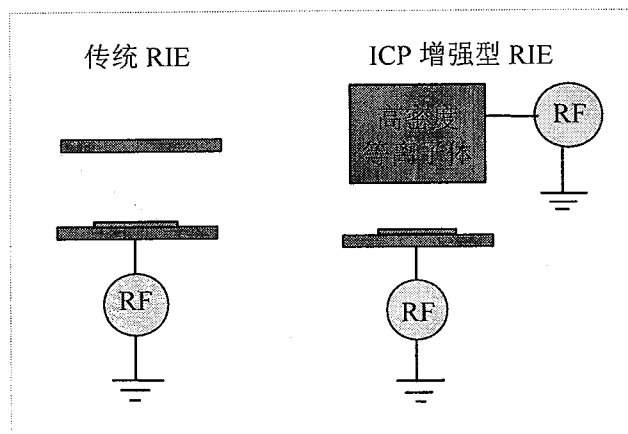


图 3.4 传统 RIE 和 ICP 增强型 RIE 的结构区别图

干法刻蚀技术能够满足碲镉汞微台面隔离的技术要求，是实现高性能的碲镉汞微台面隔离的必不可少的关键技术，是碲镉汞刻蚀技术的研究热点^[68-79,94-99]。

3.1.3 碲镉汞的 ICP 刻蚀原理简介

3.1.3.1 刻蚀的物理化学机理

目前，大多数的碲镉汞干法刻蚀工艺主要基于 CH_4/H_2 、 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ 、 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}/\text{N}_2$ 混合气体^[68-79,94-99]，其是采用金属氧化物气相外延（MOVPE）来生长碲镉汞材料的逆过程。这个过程非常复杂，它涉及物理刻蚀作用与化学刻蚀作用、反应生成物的沉积与解吸附、聚合物的沉积与解吸附等方面的动态平衡问题。

图 3.5 简单地描绘了采用 $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}/\text{N}_2$ 混合气体进行碲镉汞反应离子刻蚀的整个过程。如图 3.5 所示， CH_4 和 H_2 是最主要的化学刻蚀剂， CH_4/H_2 分子与高速运动电子碰撞而裂解产生的甲基（ CH_3 ）和 H 原子在扩散到下电极区后，与 HgCdTe 样品表面的 Te、Cd 或 Hg 反应，并生成可挥发的化合物 $\text{Te}(\text{CH}_3)_2$ 、 $\text{Cd}(\text{CH}_3)_2$ 、 $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$ 和 TeH_2 等。其中，等离子体中 CH_3 和 H 的含量直接关系到 HgCdTe 材料的刻蚀速率^[95-98]。在 CH_4 分子裂解形成 CH_3 的同时，也会伴随着 CH_2 和 CH_1 的出现，而它们正是形成碳氢聚合物的先驱物（precursor）。precursor 可以形成聚合物（Polymer），造成刻蚀的停止和刻蚀表面的粗糙。为抑制该过程，采取 CH_4

从下进气口进入腔体，而其它工艺气体从上进气口进入腔体的进气的方法可以缩短从 CH_4 分子裂解出来的 CH_3 到达刻蚀样品表面的距离，从而减少了等离子体与 CH_3 碰撞并进一步裂解成 CH_2 和 CH 的几率，进而能抑制 Polymer 的沉积^[99]。另外，一些研究表明在工艺气体中引入 N_2 可以有效抑制 Polymer 的形成^[76,95,96,99]。因为 N_2 在等离子体中形成的 N 原子能与 CH_2 和 CH 反应，即通过减小 Polymer 先驱物的浓度来抑制 Polymer 的形成。同时，激活态的 N_2 也会和等离子体中的 H 原子反应生成 NH_3 ，从而减小等离子体中 H 原子的浓度，进而降低碲镉汞反应离子刻蚀后表面的粗糙度和表面富 Cd 的问题。而 Ar 在刻蚀过程中主要起提高等离子体稳定性和提供物理刻蚀的作用，因为 Ar 气具有很高的电离率，能够获得稳定的等离子体。

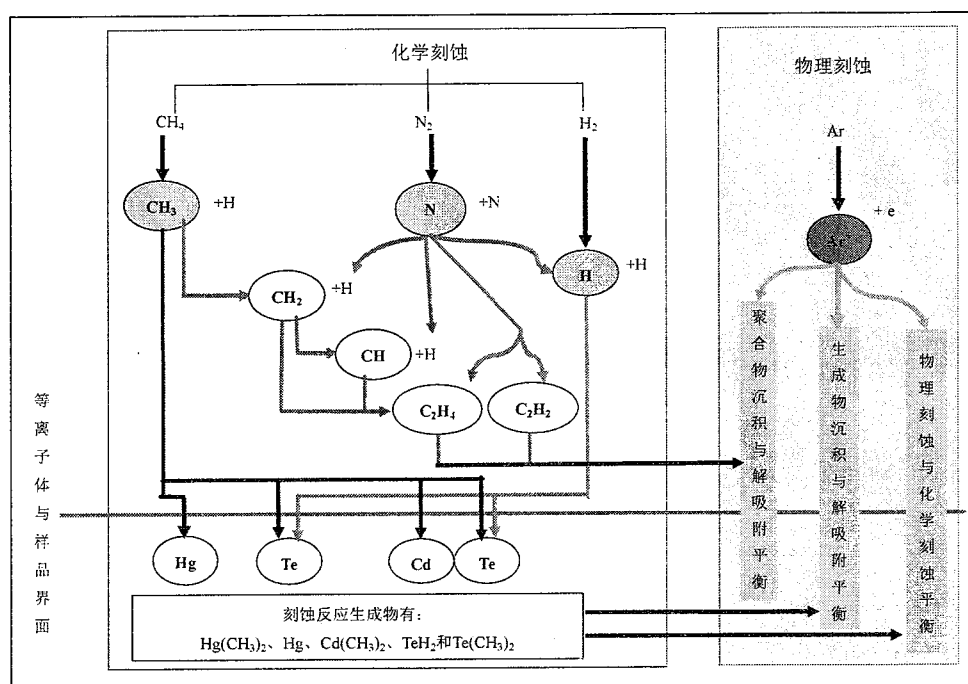


图 3.5 碲镉汞反应离子刻蚀过程的示意图

3.1.3.2 刻蚀设备简介

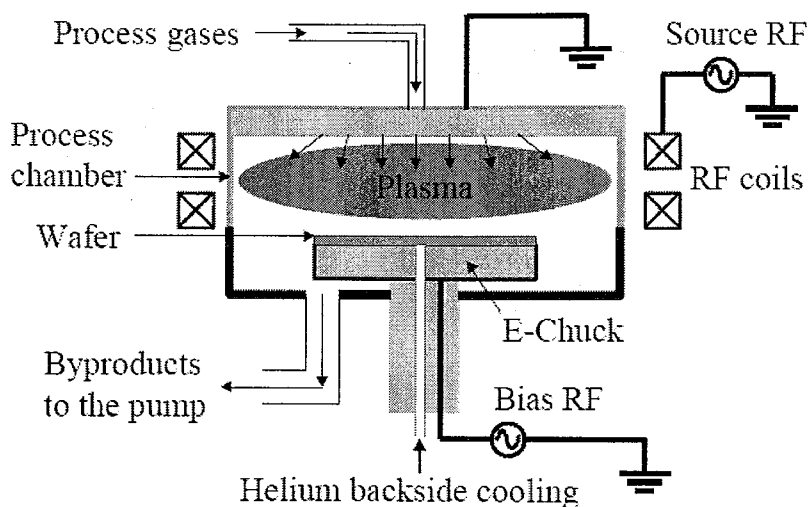


图 3.6 OXFORD 的 Plasmalab 80Plus 刻蚀系统原理图

本研究采用的 ICP 增强型 RIE 设备是牛津（OXFORD）仪器公司的 Plasmalab 80Plus。如图 3.6 所示，ICP 增强型 RIE 设备有两个的 RF 源，一个与电感线圈连接，用以产生 ICP 等离子体和控制等离子体密度；另一个与下电极相连，可以调制等离子体的直流自偏压，用以控制刻蚀时等离子体的能量。为了真正地确保电感耦合，在制冷的电感线圈与腔体之间的静电屏蔽层能防止电容耦合。该 ICP 设备的主要技术参数见表 3.3。

表 3.3 Oxford 公司的 Plasmalab 80Plus 的主要技术参数

样品台		RF 源		气路		极限真空度
尺寸	背面 He 致冷	功率	频率	路数	流量	
2 inch	可	0~600W	13.56MHz	5	0~50sccm	10^{-7} Torr

3.1.3.3 刻蚀工艺参数

与 ECR 刻蚀技术类似，碲镉汞 ICP 刻蚀也必然会受到工艺气体的成分与配比、腔体工作压力、ICP 源输入功率、底电极 RF 功率（自偏压）、晶片温度、掩蔽层选择比和掩蔽层图形轮廓等因素的影响。这些因素对碲镉汞微台面刻蚀而言都非常重要，下面简单地介绍它们各自对刻蚀的影响^[69,99]。

- 工艺气体的成分和配比：直接关系到刻蚀生成物的种类及其挥发性、刻蚀表面的化学配比，以及物理刻蚀与化学刻蚀、Polymer 沉积与解吸附之间的动态平衡问题。
- ICP 源输入功率：是主导工艺气体裂解度与离化度的关键因素，它直接与等离子体密度相关，也会影响等离子体的粒子种类、粒子能量和角度分布等。增加 ICP 功率可以提高刻蚀速率，间接降低系统的直流自偏压。
- 底电极 RF 功率：直接决定等离子体中离子的刻蚀能量，与刻蚀诱导的碲镉汞材料电学损伤关系最为密切，也会影响物理刻蚀与化学刻蚀、反应生成物的沉淀与解吸附、聚合物的沉积与解吸附等方面的动态竞争。增加 RF 功率，可以提高离子能量。
- 腔体压力：直接影响刻蚀台面的占空比和刻蚀表面。通常工作压力大等离子体密度高，会缩短离子运动的平均自由程，从而减小等离子体的粒子能量，但也会抑制等离子体刻蚀生成物的挥发，影响刻蚀表面的质量。
- 掩膜层刻蚀选择比：与刻蚀偏差直接相关，直接影响台面的占空比。通常刻蚀材料与掩膜层之间的选择比较小，就需要很厚的掩蔽膜层，致使在刻蚀过程中易发生微负载效应，而且还会引起刻蚀侧壁不平滑；对于高占空比刻蚀，希望实现高选择比的掩膜层
- 掩膜层图形轮廓：与刻蚀图形工艺设计有关。轮廓形状会影响入射离子角度，并随着刻蚀的不断进行，其影响不断地发生变化。
- 衬底的温度：关系到刻蚀基与 HgCdTe 材料的化学反应速率、刻蚀生成物的挥发速度以及 Polymer 的沉积速率等。

以上六个工艺参数实际上是共同作用且相互关联的，是一个复杂的工艺体系。除此之外，在刻蚀过程中，直流偏压 (*DC Bias*) 也是一个非常重要的刻蚀状态参量。它不仅能反映与 ICP 输入功率、RF 功率和工作压力等工艺参数直接相关的等离子体刻蚀能量，还能根据其在刻蚀过程中的变化来判断 Polymer 沉积、刻蚀生成物沉积和刻蚀速率等许多刻蚀状态。

3.2 干法刻蚀掩膜的优化

碲镉汞的干法刻蚀研究的主要目的是实现碲镉汞微台面的隔离，其技术要求如 3.1.1 节所述，为了达到该研究目标，刻蚀掩膜至关重要，因为刻蚀掩膜对定义刻蚀图形和转移刻蚀图

形有着非常重大的影响。

3.2.1 刻蚀掩膜的重要性

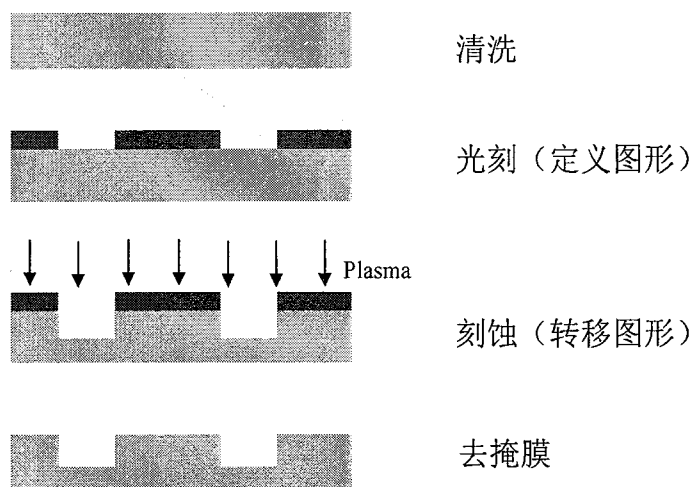


图 3.7 干法刻蚀图形转移原理

碲镉汞微台面的干法刻蚀是通过先对刻蚀掩膜进行刻蚀图形定义，然后采用具有高选择比的刻蚀等离子体去除材料来实现的（如图 3.7 所示）。所以，刻蚀掩膜对于干法刻蚀图形转移非常重要，刻蚀掩膜的耐刻蚀性及其形貌会影响到转移后的图形形貌。而这种影响主要由掩膜对衬底的选择比、掩膜的图形倾斜角决定。在各向异性刻蚀假设下（ICP 刻蚀本身特点，大多数情况下满足这一假设），有如下关系式（如图 3.8 所示）。

$$Selectivity(film / mask) = \tan(\theta_{film}) / \tan(\theta_{mask})$$

其中 $Selectivity(film / mask)$ 为被刻蚀材料对掩膜材料的选择比， θ_{film} 、 θ_{mask} 分别为掩膜材料的倾角和被刻蚀材料的倾角。

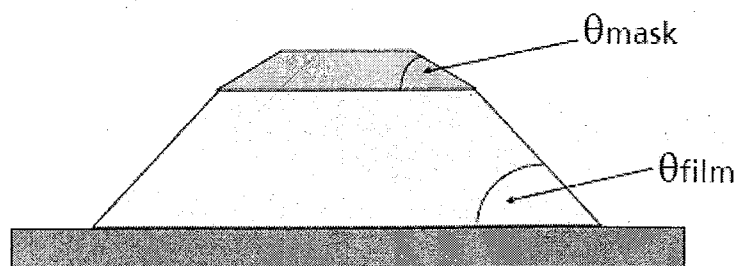


图 3.8 刻蚀材料形貌与掩膜形貌关系

由此可见，要实现高得刻蚀占空比，需要获得较大的 θ_{film} ，可以从提高掩膜的选择比和提高掩膜的倾角两方面入手。而对于刻蚀掩膜来说，其倾角很难实现有效控制与提高，所以要实现高的刻蚀占空比，需要尽可能地提高刻蚀掩膜的选择比。

3.2.2 碲镉汞干法刻蚀掩膜的主要问题

对于碲镉汞的干法刻蚀，为了获得高占空比的刻蚀微台面，对刻蚀掩膜的选择比具有很高的要求。传统的光刻胶和 SiO₂ 刻蚀掩膜由于其自身的一些缺陷，极大地影响了刻蚀效果提高。

光刻胶刻蚀掩膜，由于和碲镉汞刻蚀工艺气体有一定的化学反应，刻蚀选择比较低。在刻蚀过程中会造成刻蚀掩膜的退缩，带来刻蚀偏差，从而使刻蚀深宽比和台面占空比难以提高。图 3.9 是典型的由于光刻胶刻蚀选择比过低所形成的低倾斜角的刻蚀剖面。

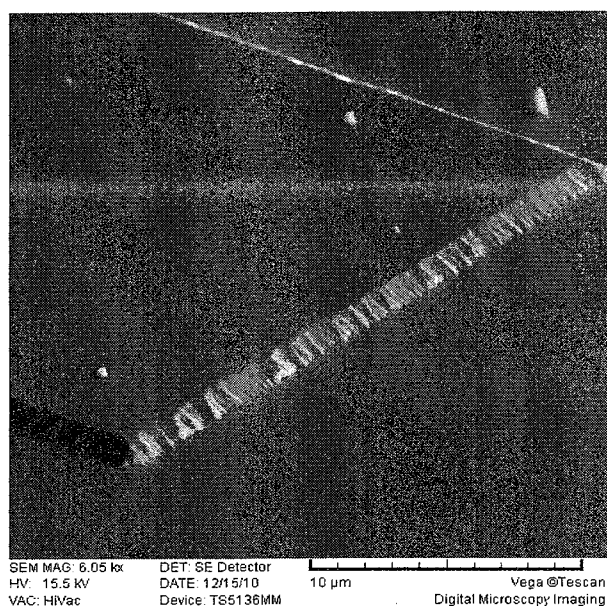
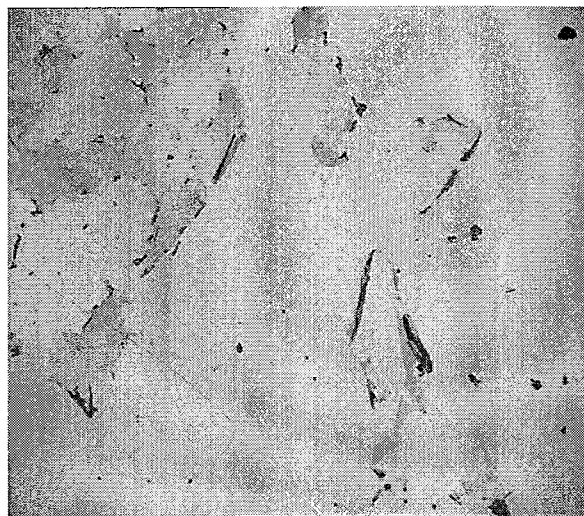


图 3.9 光刻胶掩膜的刻蚀剖面

对于 SiO₂ 掩膜，虽然对碲镉汞具有较好的刻蚀选择比，但是经 ICP 刻蚀工艺刻蚀过后，薄膜可能有所变性，局部区域极难去除干净，致使后无法获得正常性能的器件。图 3.10 是刻蚀过后的 SiO₂ 掩膜经 HF 溶液长时间腐蚀后的残留物图像。

图 3.10 SiO₂ 掩膜腐蚀后的残留物

为此，寻找到一种即具有高的刻蚀选择比，又极易去除的刻蚀掩膜，对于碲镉汞的干法刻蚀就显得尤其的重要了。

3.2.3 刻蚀掩膜的硬化研究

针对碲镉汞的干法刻蚀对掩膜的要求，本文开发了一种通过 ICP 预刻蚀改性光刻胶的掩膜硬化技术，可以显著地提高光刻胶对碲镉汞的选择比。

该掩膜硬化过程为：首先在碲镉汞上淀积生长一定厚度的 ZnS 薄膜，由于 ZnS 与碲镉汞具有极好的粘附特性，薄膜生长质量较高，而且 ZnS 也极易去除，在去除刻蚀掩膜后能够很好地保持碲镉汞表面的清洁度；然后再在芯片表面涂覆光刻胶，经行光刻，定义好刻蚀的微台面图形；将光刻好的芯片放进 ICP 刻蚀腔体，采用相应的刻蚀工艺条件，对光刻胶进行预刻蚀，改性光刻胶，同时去除碲镉汞表面上需要刻蚀的区域上面的 ZnS 薄膜；最后采用常规的碲镉汞刻蚀工艺对芯片经行刻蚀，获得高占空比的刻蚀图形。

图 3.11 分别是采用传统光刻胶和改性硬化后的光刻胶作为掩膜，在相同的刻蚀工艺条件下刻蚀所获得的碲镉汞刻蚀形貌对比。由图可见，由于未经过硬化的光刻胶刻蚀选择比较低，掩膜退缩严重，刻蚀偏差很大，致使刻蚀剖面倾角很小，但是经硬化后的光刻胶，由于选择比大幅提高，刻蚀偏差被抑制，从而提高了刻蚀剖面倾角。经台阶仪测试计算，硬化后的光刻胶掩膜选择比提高了约 6 倍，能够满足碲镉汞干法刻蚀微台面隔离常规工艺的需要。

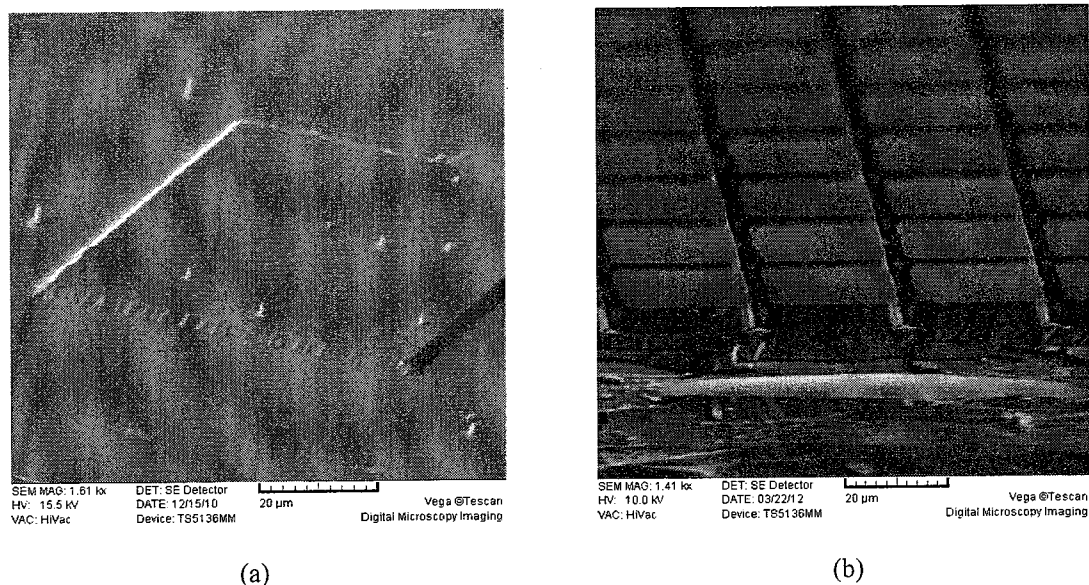


图 3.11 分别是采用传统光刻胶和改性硬化后的光刻胶作为掩膜,在相同的刻蚀工艺条件下刻蚀所获得的碲镉汞刻蚀形貌对比: (a)传统光刻胶; (b)改性光刻胶

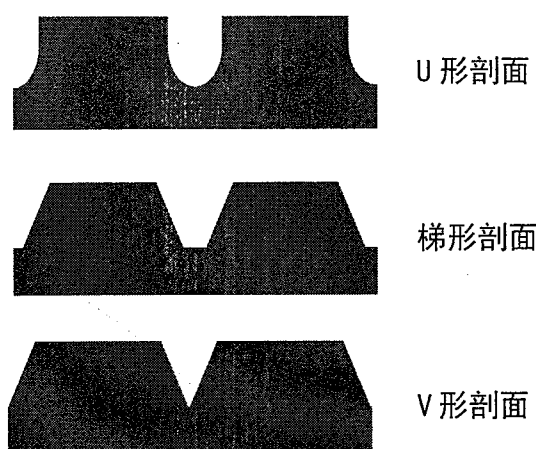
3.3 高深宽比 V 形微台面的刻蚀研究

碲镉汞的隔离微台面剖面形貌对于保证焦平面器件的性能和抑制像元串音有着非常重要的意义,良好的刻蚀剖面不仅能够最大限度地保证焦平面器件的响应率,而且还能更有效地抑制像元串音。

3.3.1 高深宽比 V 形微台面的研究意义

碲镉汞焦平面器件的微台面隔离对刻蚀剖面形貌有很高的要求,其主要表现在以下几个方面:

一方面,微台面的刻蚀形貌必须具有高的占空比,也即刻蚀隔离沟槽必须具有高的深宽比。在满足台面隔离的功能性要求的前提下(即保证足够的台面隔离深度),需要保持尽可能高的台面占空比(隔离沟槽的高深宽比),以尽量提高器件对光的吸收面积,从而保证器件的响应率不被大幅减小。而在台面隔离深度相同的情况下,不同的刻蚀剖面对光的吸收面积也有所不同,如图 3.12 所示。V 形隔离微台面具有较大的光吸收面积,在保证足够的微台面隔离深度的情况下,具有更高的材料利用率,能够最大限度地保证器件的响应。



3.12 典型的干法刻蚀剖面形貌

另一方面，微台面的刻蚀形貌必须便于器件钝化材料的生长。由于目前大多数的钝化工艺都是采用蒸发或溅射的方式生长钝化材料，钝化材料在器件表面的分布受器件表面形貌影响较大，倾角较大的区域难以接收到钝化材料，比如图 3.12 的 U 形剖面，台面侧壁几乎垂直于表面，钝化层材料很难溅射并附着到侧壁表面，难以达到钝化的效果。而 V 形剖面对钝化层材料生长源具有更大的并且较为一致的张角，能够更好地接收并吸附住钝化材料，能够实现更好的钝化效果。

从上面的分析可以看出，V 形微台面，不仅具有很高的占空比，而且还能够提高器件的钝化质量。除此之外，V 形微台面由于其侧壁相对入射光的角度较大，能够起到增强红外辐射在台面侧壁的内反射，最大限度地增强器件的内量子效率。

所以，微台面的干法刻蚀工艺无论出于对占空比，还是钝化材料的生长，亦或是增强器件的内量子效率的考虑，高深宽比 V 形刻蚀剖面都是一个理想的选择。

3.3.2 刻蚀工艺参数与刻蚀剖面形貌关系

干法刻蚀是一个复杂的物理化学过程，既有物理的溅射、化学的刻蚀、离子辅助刻蚀、生成物保护性刻蚀等去除材料过程，又有负载效应、微负载效应、产物及聚合物淀积等效应阻碍材料的去除。干法刻蚀具有众多的控制工艺参数，其都会影响到刻蚀形貌，调节各种参数可以实现对刻蚀形貌的有效控制。通常我们可以将刻蚀对刻蚀形貌的影响，分为各向同性和各向异性刻蚀两个方向来对工艺参数进行分析，如图 3.13 所示。增加刻蚀工艺气体组分中

化学反应气体比例，减小物理刻蚀气体组分，增加气体压力，提高刻蚀温度，减小射频功率，刻蚀剖面向各向异性发展；反之则向各向同性发展。另外受刻蚀掩膜选择比、刻蚀掩膜材质与形貌等因素的影响，刻蚀剖面轮廓（刻蚀形貌）也会有所反映，刻蚀的时候也需要特别注意。

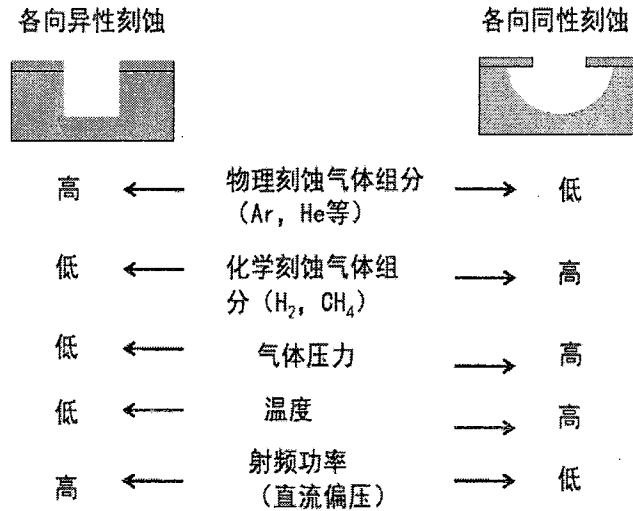


图 3.13 刻蚀工艺条件与刻蚀形貌变化趋势关系

刻蚀形貌的控制与获得，可以通过对预刻蚀的样品形貌的观察，分析与查找造成该现象的原因，然后将参数调节到合适的位置来实现。图 3.14 总结了各种典型的刻蚀形貌及其形成的原因。

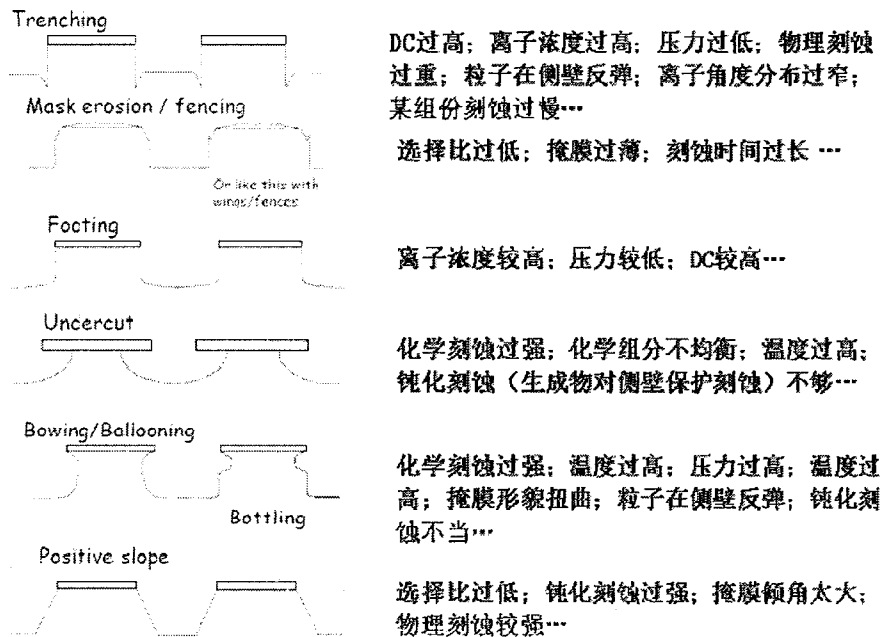


图 3.14 典型的刻蚀形貌及其形成的原因

3.3.3 气体组分对微台面形貌影响

干法刻蚀工艺气体中的反应活性基种类很多，其与碲镉汞材料的反应方式也各有差别，造成的刻蚀形貌也差别很大。其中，中性的化学反应活性基，由于其不能被射频电场加速，各向能量差别不大，通常表现为各向同行的刻蚀效果。而物理刻蚀基和高能的化学反应离子由于能量的各向异性，刻蚀效果也通常表现为各向异性。干法过程中需要通过合理地调节刻蚀气体组分比例，以期获得优质的刻蚀剖面形貌。

图2分别是 Ar/H₂ 比例为 4:1 的混合气体与纯 Ar 气的刻蚀剖面图。由图可见，对于 Ar/H₂ 混合气体中化学刻蚀基成分过高，造成了刻蚀的 Bowing 效应，刻蚀台面侧壁有钻蚀，这样的剖面无法钝化，无法满足刻蚀要求。而物理刻蚀太重，刻蚀的深宽比受到影响，在对刻蚀深宽比具有较高要求的情况下，也无法达到刻蚀效果。另外，中性的化学刻蚀反应基，由于其能量较低，与碲镉汞反应后的生成物的能量也较低，常常吸附在碲镉汞衬底表面，增加了刻蚀表面的粗糙度，而物理刻蚀则一般不会出现这种情况。为了得到光洁的粗糙度低的刻蚀表面，仔细的刻蚀工艺条件的研究显示，对于 Oxford 公司的 Plasmalab 80Plus 系统，化学刻蚀气体组分不能高于 25%。

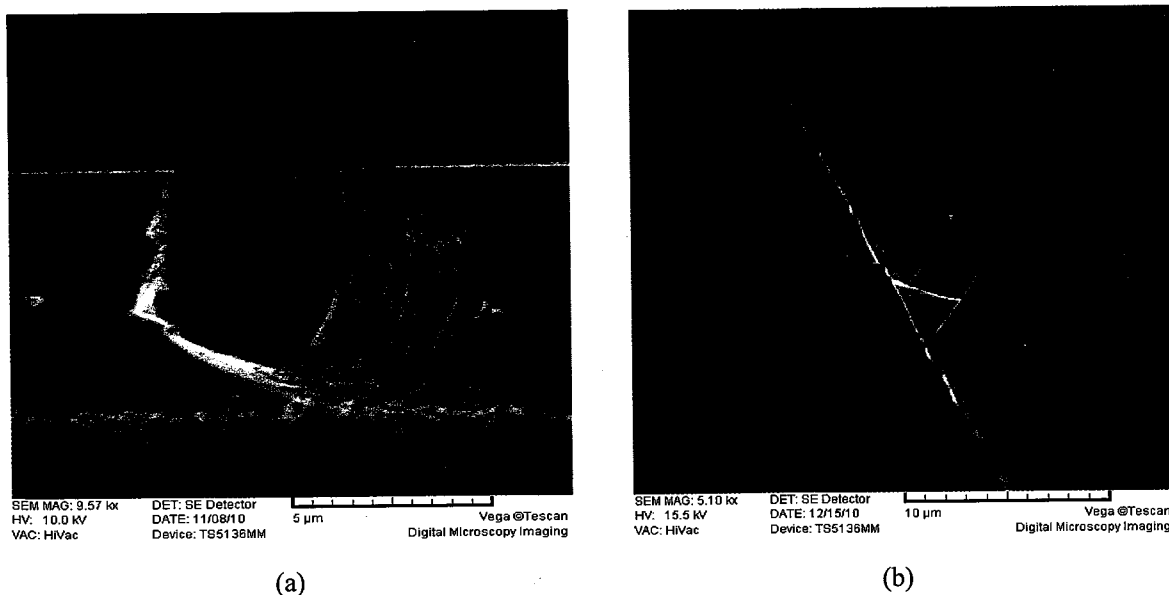


图 3.15 不同刻蚀气体组分的刻蚀剖面图(a) Ar/H₂ 4:1; (b) 纯 Ar

3.3.4 刻蚀温度对刻蚀效果影响

干法刻蚀的温度，直接影响了刻蚀反应的活性和刻蚀产物的吸附与解吸附过程，对刻蚀

剖面影响极大。随着温度的升高，会增强化学刻蚀效果，致使刻蚀剖面向各向同性方面发展。同时，由于在刻蚀等离子体中由于不同的刻蚀活性基，对特定的材料原子具有不同的选择性，从而可能在材料表面形成与材料内部不同的组分差异，而且这种现象会随着气体的选择性和刻蚀产物解吸附的增强而增强，从而增加刻蚀表面的粗糙度。另外，由于碲镉汞中的 Hg 在较高温度下极容易逸出材料，也会在材料表面形成空洞，进而影响表面状况。

图 3.16 是分别在 110℃ 和 0℃ 下刻蚀获得的碲镉汞刻蚀剖面图。由图可见，温度越高，刻蚀剖面钻蚀越严重，刻蚀粗糙度也越大。这可能是因为刻蚀温度的升高，增强了化学刻蚀效果，也就增强了对刻蚀原子的选择性（碲镉汞的纯物理刻蚀对各原子的选择性极小），造成表面的钻蚀与粗糙度增加。也有可能是由于刻蚀表面受高能离子的轰击，局部温度过高，造成碲镉汞材料中汞原子的逃逸，形成材料空洞，从而增加了刻蚀表面的粗糙度。对于提高碲镉汞刻蚀表面粗糙度而言，在保证刻蚀产物的解吸附的情况下，刻蚀温度应尽量低。

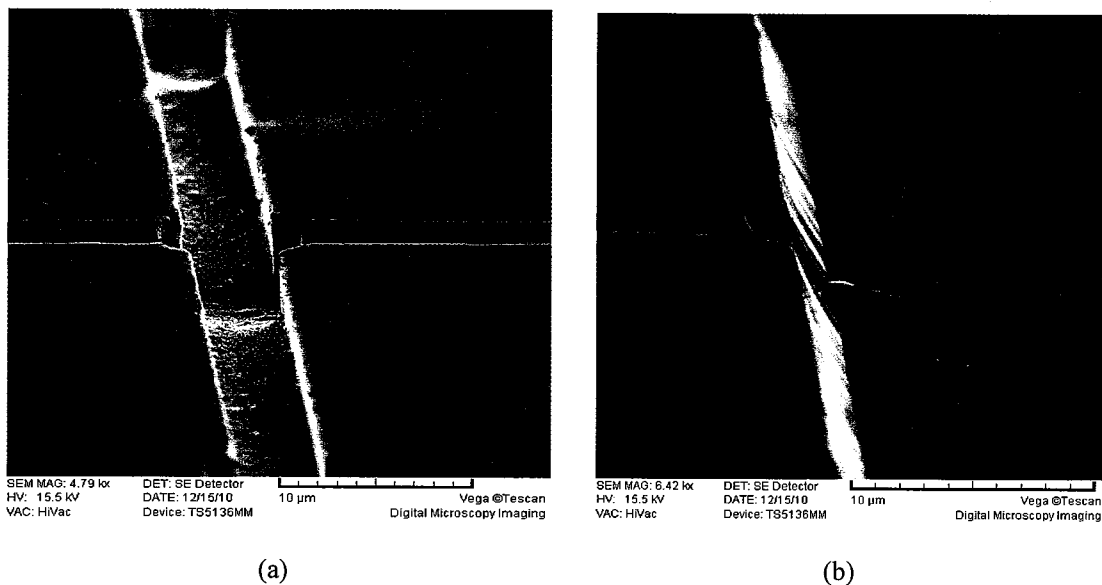


图 3.16 不同刻蚀温度的刻蚀剖面图(a) 110℃; (b) 0℃

3.3.5 腔体压力与刻蚀表面

干法刻蚀的腔体压力控制着工艺过程中的等离子体密度、刻蚀等离子体能量、等离子体角度分布、刻蚀产物的吸附与解吸附等。增加腔体压力，一方面可以增加可电离的气体分子数量，在一定的 DC bias 和 ICP 范围内，可增加腔体内的等离子体浓度；另一方面可以增加等离子体的碰撞几率，减小离子的自由程，从而增强化学刻蚀效果，并且减小离子能量，增

强粒子的吸附作用,从而会增强微负载效应,以及聚合物与反应产物的淀积;再者,其可以改变气体各组分的电离度,从而使刻蚀等离子体中各活性基的比例发生变化。

图 3.17 是不同腔体压力下的碲镉汞刻蚀效果图,由图可见,随着气压的增加,碲镉汞刻蚀表面粗糙度也增加。这可能是随着气压增加,刻蚀反应产物以及刻蚀的聚合物前驱物的淀积也几率也随之增加。研究显示,对于碲镉汞的干法刻蚀,在只考虑刻蚀表面粗糙度以及抑制刻蚀产物和聚合物沉积的情况下,腔体压力越小越好。

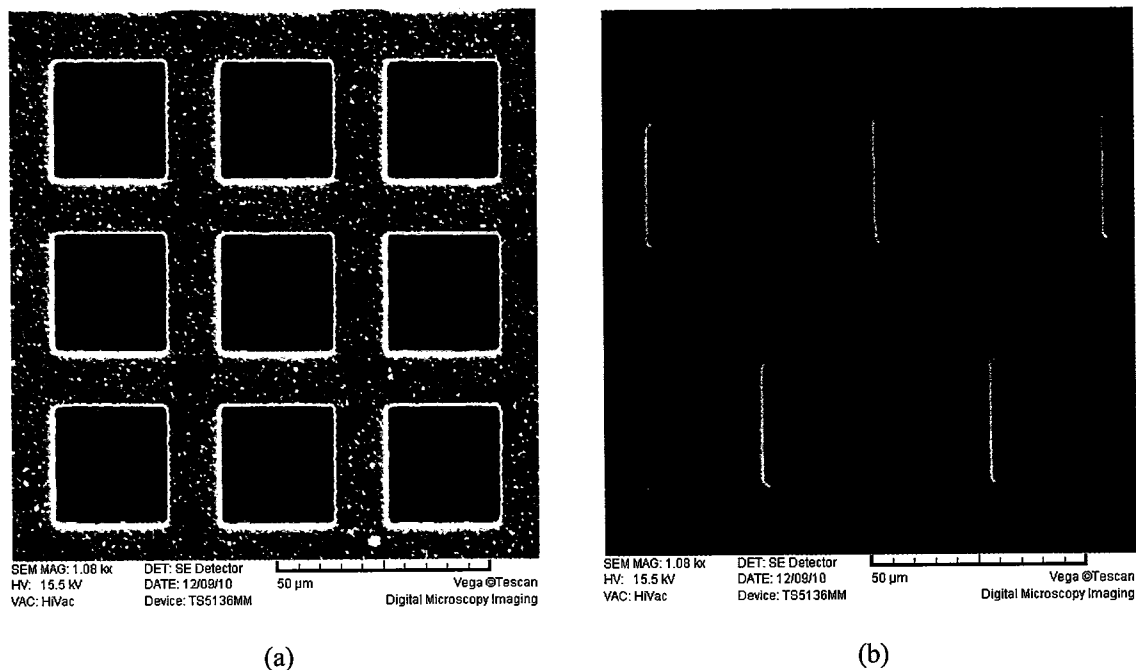


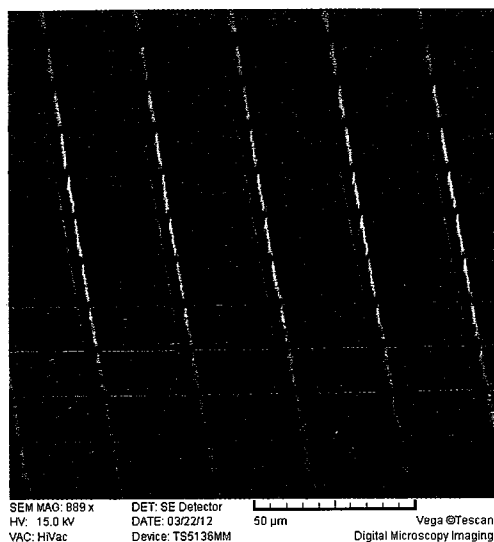
图 3.17 不同刻蚀气体压力的刻蚀剖面图(a) 30mtorr; (b) 4.5mtorr

3.3.6 高占空 V 形隔离微台面的优化刻蚀工艺

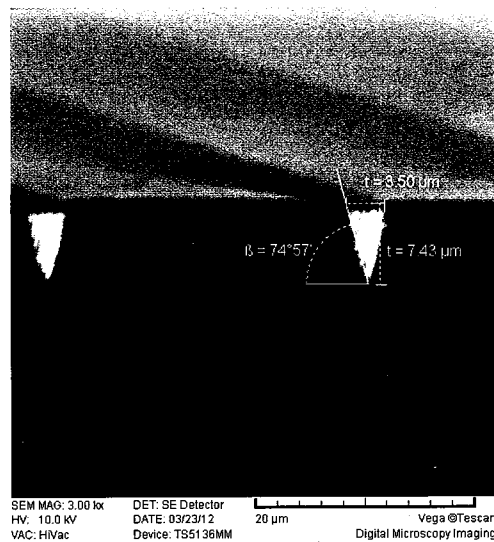
高占空比的 V 形隔离微台面是碲镉汞干法刻蚀的追求目标之一,也是实现高密度红外焦平面器件台面隔离的关键工艺。本节通过对刻蚀工艺参数的优化,获得了制备高占空比的 V 形碲镉汞微台面的工艺条件。

图 3.18(a,b)是制备获得的占空比的 V 形碲镉汞微台面的剖面图。由图可知,该工艺能够获得占空比很高的刻蚀微台面,其刻蚀沟槽深宽比达到 2 以上,刻蚀剖面倾斜角大于 70 度。与原来的刻蚀工艺条件相比^[99],刻蚀沟槽深宽比提高了约 30%,刻蚀速度提高了约 3 倍。图 3.18(c)是该工艺在不同的刻蚀要求下,所获得的像元尺寸与台面占空比对应关系图。由图可知,对于目前较为普遍的像元大小为 $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 的高密度单色焦平面器件的微台面隔离(隔

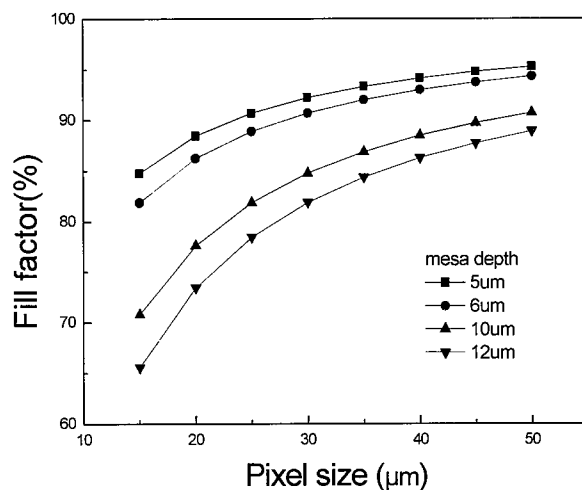
离台面深度 $5\sim 6\mu\text{m}$), 台面占空比可以达到 85% 左右; 而在刻蚀深度为 $12\mu\text{m}$ 、光敏元尺寸为 $15\mu\text{m}$ 的极限情况下, 刻蚀台面占空比也能达到 65% 以上。由此可见, 该工艺能够满足高深宽比台面的刻蚀要求。



(a)



(b)



(c)

3.18 (a)优化工艺的刻蚀剖面斜视图; (b)优化工艺的刻蚀剖面图; (c) 优化工艺的台面占空比与像元尺寸的对应关系图

3.4 小结

本章对碲镉汞的高占空比微台面探测芯片的 ICP 干法刻蚀工艺进行了研究。

分析了高占空比碲镉汞微台面刻蚀的研究意义，总结了干法刻蚀刻蚀的研究目标。

介绍了碲镉汞的 ICP 刻蚀原理。分析了碲镉汞的干法刻蚀的物理化学机理，介绍了 ICP 刻蚀系统的原理，总结了干法刻蚀的技术评价参数。

分析了干法刻蚀掩膜选择比对干法刻蚀占空比的影响及其重要性。获得了一种等离子体轰击改性的掩膜硬化技术，将掩膜的刻蚀选择比提高了约 6 倍，有效抑制了刻蚀台面的退缩，提高了干法刻蚀沟槽深宽比。

研究了高占空比 V 形微台面的干法刻蚀隔离工艺。总结了干法刻蚀工艺参数对刻蚀形貌影响，建立了通过预先刻蚀新貌的观察与分析调节工艺参数的方法。研究了刻蚀工艺气体组分对刻蚀形貌的影响，发现了为抑制刻蚀产物的沉积，工艺气体中化学刻蚀组分不能多于 25%。研究了刻蚀温度对刻蚀剖面形貌的影响，发现了较高的温度可能提高碲镉汞刻蚀表面的粗糙度。研究了腔体压力对刻蚀表面的影响，发现腔体压力越小表面粗糙度越低。获得了优化的高占空比 V 形微台面的刻蚀工艺参数，使刻深宽比提高了约 30%、刻蚀速率提高了约 3 倍，验证了其在像元中心距大于 15 μm 的高密度碲镉汞微台面隔离应用中的可行性。

第4章 碲镉汞的刻蚀损伤产生机理及其修复研究

4.1 引言

等离子体干法刻蚀是一种需要带能离子辅助的材料处理方法，所以通常会给材料带来额外的刻蚀损伤。对于 HgCdTe，由于其本生存在损伤阈值较低的问题^[3,35,69]，等离子体中的带能离子、电子和激发的分子会在 HgCdTe 刻蚀区域的表面引起较大的等离子体诱导损伤，从而使材料的电学特性发生改变，如出现 p 型到 n 型或弱 n 到 n⁺ 的电学特性变化^[95-106]。在碲镉汞的干法刻蚀过程中，损伤问题非常突出，是实现新一代高密度微台面碲镉汞红外探测器的干法刻蚀技术实用化所必须要解决的关键问题^[4-15,95-106]。为了从工艺上更好地抑制刻蚀损伤和修复损伤，弄清碲镉汞干法刻蚀损伤产生机理就显得尤为重要。

本章首先总结了检测刻蚀损伤的常用方法，通过对刻蚀损伤特性的分析，提出了一种通过特殊图形的阻抗测试实现刻蚀损伤检测的方法。通过该方法和剥层 Hall 测试研究了不同干法刻蚀工艺对碲镉汞材料诱导电学损伤的分布的影响，分析了其可能的内在机理，并通过对干法刻蚀损伤的空间分布及其在高温中的扩散特性的研究间接验证了该刻蚀损伤机理。采用热退火修复碲镉汞损伤的方式，研究了损伤修复工艺条件与材料的载流子输运特性、少子寿命、光谱特性的关系，获得了能够修复刻蚀损伤的退火工艺参数，并验证了其对于恢复材料的特性参数的有效性。

4.2 碲镉汞刻蚀损伤的测试方法

碲镉汞的刻蚀损伤问题是碲镉汞干法刻蚀中的核心问题，精确地获得刻蚀损伤的厚度对于评估干法刻蚀工艺非常重要。传统的刻蚀损伤测试方法有激光束诱发电流（Laser Beam Induced Current、LBIC）^[107,108]、剥层霍尔（Hall）^[109]、扫描探针显微镜^[99]（Scanning Probe Microscope）等测试方法。本文介绍了传统损伤测试方法的原理，并根据碲镉汞材料刻蚀诱导损伤反型层本身的电学特性，提出了一种图形阻抗检测碲镉汞刻蚀损伤的方法。

4.2.1 传统测试方法

（1）LBIC 检测

激光束诱发电流 LBIC (Laser Beam Induced Current) 技术是一种高分辨、无破坏性的材料特性表征技术。它采用激光显微扫描探测由激光束诱发的电流, 来建立样品表面电池的不均匀性分布情况。大量的研究结果已经证明了 LBIC 方法研究 HgCdTe 材料及其功能结构的有效性^[6,7,8]。

LBIC 电流产生的原理为, 一束激光在样品上扫过, 这时在光聚焦处产生电子-空穴对。若该局部区域存在由半导体结或一些电学缺陷造成的电场, 则光生电子和空穴在电场作用下分开, 导致该区域电荷的重新分布, 形成电流, LBIC 电流通过样品两端两个电极输出。通过移动激光照射位置和检测 LBIC 电流可以获得半导体样品内部的电场分布信息。它代表了样品中具有电学机制的特征空间分布, 诸如杂质、掺杂参数、堆积缺陷、带隙参数等的空间分布。LBIC 技术用低能量激光束照射样品, 对样品没有改变, 故可作无损检测。

(2) 剥层霍尔测试

霍尔效应是一种非常重要的半导体材料测量技术, 广泛应用于半导体材料导电或输运过程的测试。其本质通过外加磁场使半导体材料中的载流子借助洛伦兹力的作用在两侧产生电荷积累, 形成垂直于电流方向的电场, 最终使载流子受到的洛伦兹力与电场斥力相平衡, 从而在两侧建立起一个稳定的电势差即霍尔电压。分析其与正交电场、电流强度、磁场强度等参数关系, 即可获得半导体材料的载流子浓度、迁移率、电阻率、霍尔系数等重要参数。

碲镉汞的剥层霍尔测试过程为: 首先采用无损伤的溴基腐蚀液逐层腐蚀碲镉汞, 然后分别对其经行常规霍尔测试, 获得 77K 温度下霍尔迁移率与霍尔浓度与碲镉汞的腐蚀深度的对应关系。对于刻蚀损伤材料, 其霍尔系数会在某一厚度会有一突变, 对应材料损伤边界。另外, 通过采用不同的温度、磁场等参数经行霍尔测试与分析, 还可以获得材料的杂质电离能、禁带宽度、杂质补偿度等信息。

(3) 扫描探针显微镜检测

扫描探针显微镜 (Scanning Probe Microscope, SPM) 是扫描隧道显微镜及在扫描隧道显微镜的基础上发展起来的各种新型探针显微镜 (原子力显微镜 AFM, 激光力显微镜 LFM, 磁力显微镜 MFM 等等) 的统称。其可以测量样品的表面特性, 如形貌、粘弹性、摩擦力、吸附力和磁/电场分布等等。

扫描探针显微镜的工作原理是利用电子隧道现象, 将样品本身作为一具电极, 另一个电极是一根非常尖锐的探针。把探针移近样品, 并在两者之间加上电压, 当探针和样品表面相

距只有数十埃时，由于隧道效应在探针与样品表面之间就会产生隧穿电流，并保持不变。若材料表面具有损伤，将会在有损伤与无损伤区域产生显著的隧穿电流变化。这些信息输入电子计算机，经过处理后即可获得损伤的分布图像。

4.2.2 图形阻抗检测法

传统的材料损伤测试方法如激光束诱导电流、剥层微分霍尔、扫描探针显微镜（Scanning）等都有其某些固有缺点：LBIC 测试精度过分依赖激光光点大小，从而影响了测试精度与测试成本；剥层微分 Hall 测试由于需要对材料经行多次的腐蚀与测试，过程过于繁琐；SPM 方法目前尚不够成熟，特别是尚未实现低温测试，而碲镉汞材料很多的电学参数在器件工作的低温下才有意义。

为此，根据碲镉汞刻蚀损伤本生具有类似 PN 结的电学特性，本文设计了一种干法刻蚀损伤的图形阻抗检测法。该方法基于在汞空位碲镉汞外延薄膜上，利用光刻形成一系列的中心正方形面积相同（图 4.1 中的 1 区），回形区宽度（图 4.1 中的 3 区）渐变的回形图形，回形图形中心（图 4.1 中的 1 区）和外部（图 4.1 中的 2 区）为刻蚀区；然后通过干法刻蚀、表面钝化、电极孔腐蚀、电极孔金属化等工艺形成一系列的具有 pn 结特性的干法刻蚀损伤测试结构，如图 4.2 所示。图 4.1 的 1 区相当于 PN 结区，2 区相当于公共电极区（2 区面积远远大于 1 区）。然后通过测试该系列结构的回形图形中心区域（图 4.1，4.2 中的 4）与公共刻蚀区（图 4.1，4.2 中的 5）之间的 I—V 特性，分析其变化特性，可获得该干法刻蚀造成的损伤的宽度。

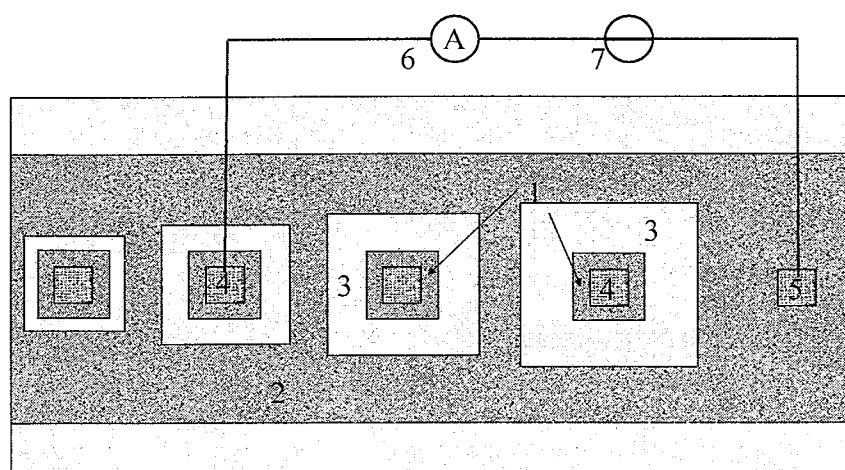


图 4.1 图形阻抗检测法的刻蚀图形定义原理图

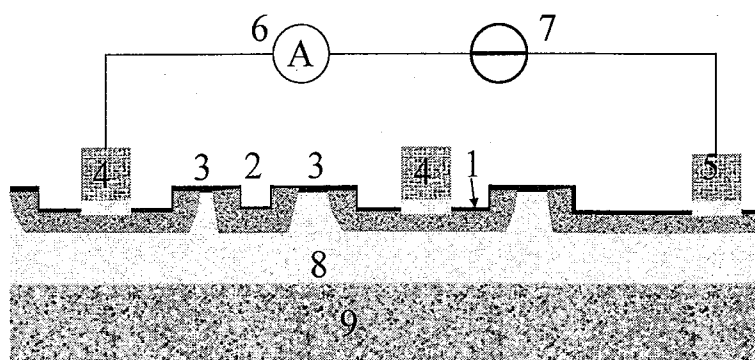
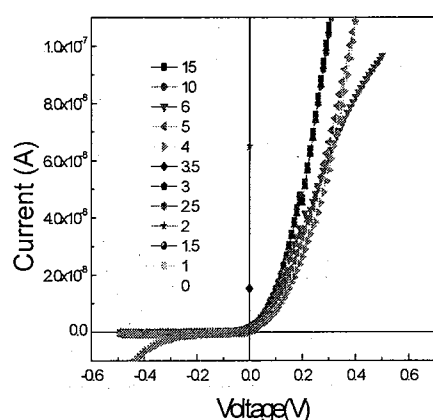
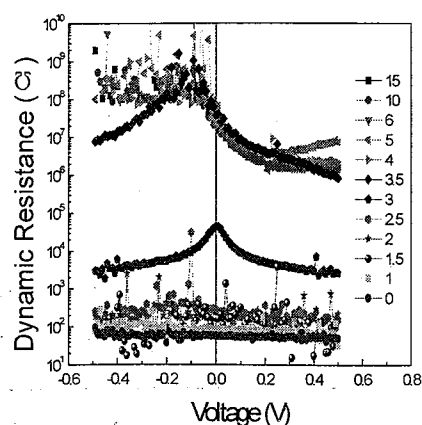


图 4.2 图形阻抗法的测试结构图

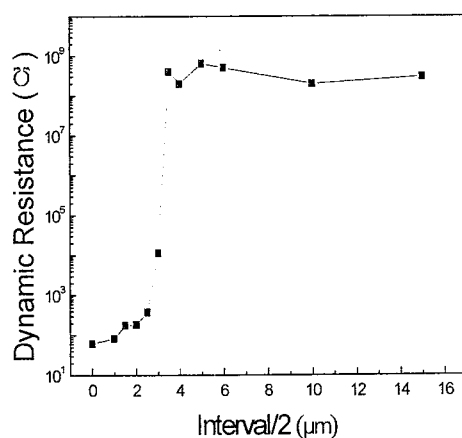
图 4.3a, 是 $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 在 $\text{Ar}/\text{CH}_4/\text{H}_2$ 气氛下采用图 4.1 定义刻蚀图形, 经 ICP 刻蚀后形成的测试结构, 通过测试获得的 I-V 曲线图。其中, 图中标签上的数字表示回形区一半的宽度值。由图可见, 碲镉汞的刻蚀损伤具有类 pn 结的 IV 特性曲线。对其做微分阻抗与电压关系图如图 4.3b 所示, 由于在零偏压附近, pn 结既不会击穿也不会正向导通, 其可以有效地监测刻蚀损伤的阻抗特性变化, 为更直观地分析, 在零偏压附近将 R-V 曲线转换为 R 与刻蚀区间距 (回形区宽度) 的对应曲线 (图 4.3c)。在刻蚀间距较宽的情况下, 其阻抗几乎不变, 这是因为回形区中央的正方形刻蚀窗口与公共刻蚀区还未被刻蚀损伤层连通, 阻抗主要由正方形刻蚀区的 n 区与衬底的 p 区形成的 pn 结贡献。随着刻蚀区间距的减小, 在某个阈值下 (图中的 $3.5 \times 2 \mu\text{m}$), 零偏压附近阻抗急剧减小, 这是因为, 在该情况下, 正方形刻蚀区的刻蚀损伤 n 型反型层与公共刻蚀区的 n 型反型层连通, 从而显示出一个电阻的特性, 而 n 型碲镉汞具有很低的电阻率。该域值对应的就是刻蚀损伤宽度的一半, 图中的刻蚀损伤就为 $3.5 \mu\text{m}$ 左右。



(a)



(b)



(c)

图 4.3(a)不同刻蚀间距的刻蚀损伤的 I-V 特性曲线; (b) 不同刻蚀间距的刻蚀损伤的 R-V 特性曲线; (c) 刻蚀损伤的零偏阻抗与刻蚀区间间距的关系图

该方法所采用的测试结构的制备与常规干法刻蚀碲镉汞光伏器件工艺完全兼容, 可在器件制备过程中, 预留刻蚀损伤检测区域附带制备获得而无需单独制备, 该方法具有成本低廉, 测试简单, 结果可靠、便于损伤的跟踪与监测等优点。

4.3 干法刻蚀损伤的产生机理研究

碲镉汞的干法刻蚀损伤是碲镉汞干法刻蚀研究需要解决的最重要的核心问题之一, 而加深对干法刻蚀损伤的产生机理的认识, 对于解决该问题有着非常重要的意义。

4.3.1 刻蚀损伤与材料及刻蚀工艺参数关系研究

汞空位 P 型 HgCdTe 材料的离子注入反型处理研究表明^[110-115], HgCdTe 表面的 Hg 原子在高能离子的轰击下, 可以被推入材料内部而产生 Hg 填隙, 从而使材料电学性质发生从 P 到 N 的转变。而在干法刻蚀过程中, 正好存在大量带能离子, 这就可能产生 Hg 填隙施主性的缺陷, 从而使材料的电学性质被诱导反型, 产生刻蚀损伤。

在汞空位 P 型 HgCdTe 材料的反型处理过程中, 反型层的分布主要依赖于注入离子的类型、能量、束流密度、注入角度、热处理等工艺过程, 另外碲镉汞组分对其也有一定影响。类似的, 在干法刻蚀过程中, 刻蚀诱导损伤可能主要与等离子体组分、等离子体能量、等离

子体密度、离子角度分布、刻蚀温度、碲镉汞组分等有关,如图4.4所示。在ICP刻蚀系统中,等离子体组分由刻蚀气体源组分提供,等离子体能量主要由DC bias(或RIE功率)、腔体压力等决定,等离子体密度主要受ICP功率、腔体压力影响,离子角度分布主要受DC bias、ICP功率、腔体压力、等离子体温度、反应器构型、掩膜修饰等因素控制,刻蚀温度主要由样品台的冷却、等离子体温度、反应放热与吸热、掩膜与衬底的热传导等支配。为了弄清干法刻蚀损伤的产生机理,本文展开了刻蚀气体组分、刻蚀温度、碲镉汞组分、RF功率、腔体压力等与干法刻蚀损伤关系的研究。

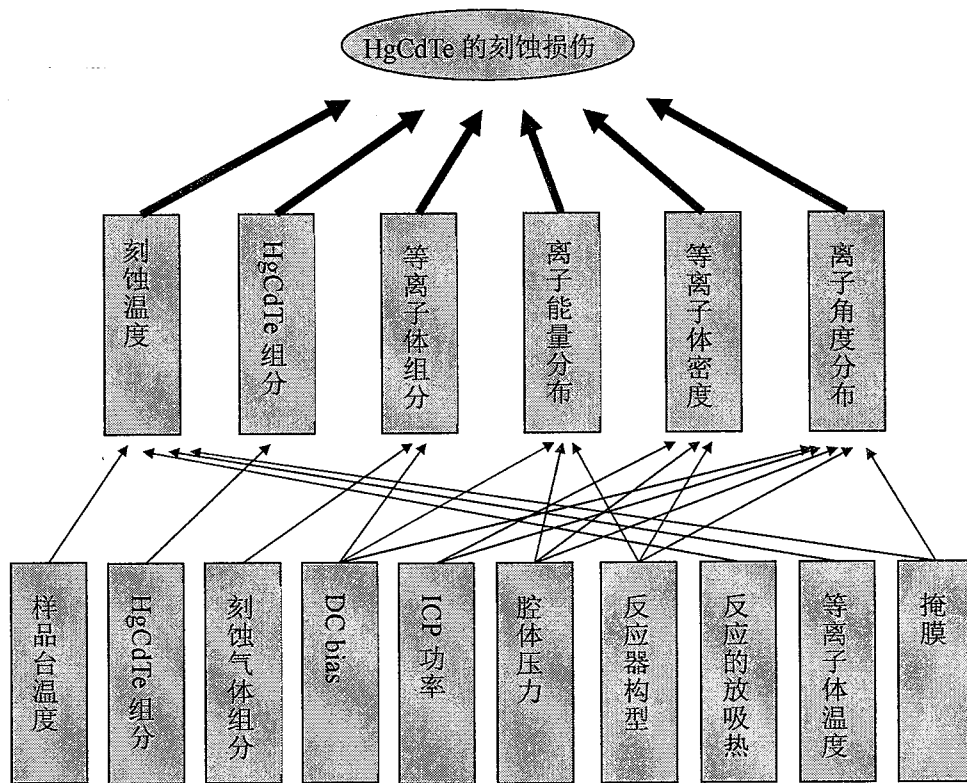


图 4.4 影响刻蚀损伤的因素

4.3.2 刻蚀损伤与刻蚀温度的关系

汞空位型碲镉汞材料在一定的汞蒸气下,通过合适的热退火工艺,可以将游离态的 Hg 以 Hg 填隙原子的形式向材料内扩散,引起材料的 P 到 N 的反型。退火温度在其中起到了非常重要的作用,其一方面作为工艺关键参数控制着汞压,另一方面又影响着 Hg 原子向材料内部的扩散。由于 Te-Hg 键极容易断裂,在干法刻蚀过程中极容易生成游离态的 Hg 原子,

从而可能出现如下情况：Hg 原子由于材料的吸附作用而在刻蚀表面形成局部的汞压，在温度的推动下，Hg 原子向材料内部扩散，从而形成汞填隙原子，致使材料出现诱导反型。所以，温度可能对干法刻蚀损伤深度有着很大的影响。

图 4.5 是，组分为 0.2911 的 p 型碲镉汞材料在不同温度下，经 ICP 干法刻蚀后采用剥层霍尔检测损伤深度，所得到的干法刻蚀损伤反型层深度与刻蚀温度的关系曲线。在本组实验中，仅仅改变了刻蚀温度，而工艺气体流量及配比、DC bias、ICP 功率、腔体压力等其他工艺参数保持不变。由图可见，随着温度的升高，刻蚀损伤深度厚度也随之增大。这可能是由于随着温度的升高，刻蚀产生的 Hg 填隙原子在碲镉汞中具有更大的扩散系数，扩散距离也随之增加，从而使刻蚀诱导损伤层深度也随之显著增加。

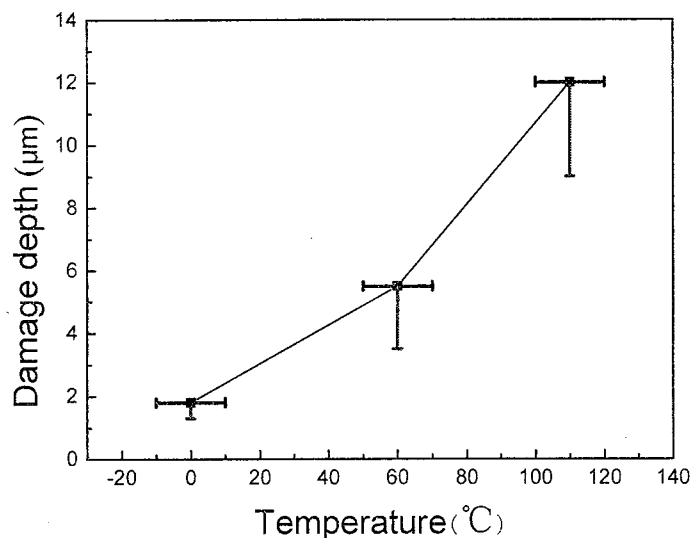


图 4.5 刻蚀温度与刻蚀损伤的关系图

4.3.3 刻蚀损伤与刻蚀气体组分关系

ICP 刻蚀主要通过带能粒子与材料的物理化学反应来实现的，而不同的工艺气体将产生不同的等离子体，也就会产生不同的刻蚀效果。其中，带能离子由于其能量与化学活性高，是干法刻蚀的最主要的活性粒子。不同气体的离化率差别很大，比如 Ar 可达 10%，而氢气一般都低于 1%，所以不同气体的离子浓度也会有较大差别。另外由于离子本身的质量、电荷、碰撞截面积、自由程等差别也较大，经射频源加速后，离子速度、能量也会有较大差别，其溅射到材料表面的能量也会有较大差别，从而造成刻蚀损伤的不同。由此可见，刻蚀工艺

气体组分,可能对刻蚀等离子体各活性基的浓度及其能量影响较大,从而可能造成刻蚀损伤的较大差别。

表 4.1 是,组分为 0.2911 的 p 型碲镉汞材料经不同工艺气体刻蚀后,采用图形阻抗法检测刻蚀损伤宽度,获得的干法刻蚀损伤反型层宽度与刻蚀工艺气体组分的对应关系表。在本组实验中,仅仅改变了刻蚀工艺气体流量及配比,而刻蚀温度、RF 功率、ICP 功率、腔体压力等其他工艺参数保持不变。由表可知,随着刻蚀工艺气体中 H_2 组分的增加,刻蚀损伤深度厚度也随之增大。这可能是由于随着 H_2 组分增加,电离产生的 H^+ 浓度也随之增加,而 H^+ 具有很长的自由程和较高的能量,从而对材料造成更大的损伤。而这种损伤可能由两种机制产生,一是高能 H^+ 的轰击使较弱的 Hg-Te 键大量断裂,从而在材料表面形成更多的 Hg 原子,从而增加了 Hg 原子向材料内部扩散形成 Hg 填隙 N 型反型层的几率;二是 H^+ 的本生溅射入材料内部钝化 Hg 空位、形成施主,造成电学损伤。

表 4.1 刻蚀损伤与工艺气体组分关系

序号	工艺气体组分				ICP 功率 (w)	RF 功率 (w)	气 压 (mtorr)	刻蚀损伤 (μm)
	Ar	CH ₄	H ₂	N ₂				
1	20	1.2	0	5	600	10	5	2
2	20	0	0	0	600	10	5	2
3	28	1	1	0	600	10	5	2
4	20	0	5	0	600	10	5	3

4.3.4 刻蚀损伤与材料组分关系

Te—Hg 键极容易断裂,在干法刻蚀过程中易生成游离态的 Hg 原子,而碲镉汞组分不同,Te—Hg 键的数量也有差别,从而产生游离态 Hg 原子的数量也有差别,所以在相同的刻蚀工艺中,不同组分的碲镉汞材料可能具有不同的刻蚀损伤深度。

图 4.6 是,组分不同的 p 型碲镉汞材料经 ICP 干法刻蚀后采用剥层霍尔检测损伤深度,所得到的干法刻蚀损伤反型层深度与组分的关系曲线。在本组实验中,只有材料的组分不同,而工艺气体流量及配比、DC bias、ICP 功率、腔体压力、刻蚀温度等其他工艺参数保持不变。由图可见,随着碲镉汞 Cd 组分的减小,刻蚀损伤深度厚度随之增加。这可能是由于随着 Cd

组分的减小，易断裂的 Te—Hg 键增加，从而使刻蚀产生的游离态的 Hg 原子也随之增加，能够扩散进材料内部形成 Hg 填隙的原子也更多，从而致使刻蚀诱导损伤层深度也随之增加。另外，随着碲镉汞 Cd 组分的减小，刻蚀损伤深度厚度随之增加并不是线性的，随着组分的减小，损伤厚度增加速度加快。这可能是由于低 Cd 组分碲镉汞刻蚀对 Hg 原子具有更高的扩散系数。

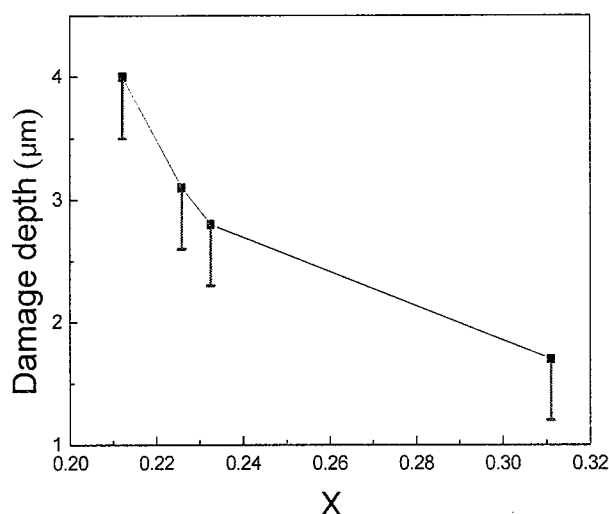


图 4.6 碲镉汞组分与刻蚀损伤的关系图

4.3.5 刻蚀损伤与腔体压力关系

改变刻蚀腔体的压力也可以改变刻蚀系统的等离子体密度、刻蚀等离子体能量、等离子体角度分布、刻蚀产物的吸附与解吸附等。增加腔体压力，可产生如下的效果：

- 增加可电离的气体分子数量，在一定的 DC bias 和 ICP 范围内，可增加腔体内的等离子体浓度。
- 增加等离子体的碰撞几率，减小离子的自由程，从而减小离子能量，使粒子能量分布函数展宽变宽。
- 增强粒子的吸附作用，从而增强化学刻蚀效果，增强微负载效应，增强聚合物与反应产物的淀积。
- 改变气体各组分的电离度，从而使刻蚀等离子体中各活性基的比例发生变化。

图 4.7 是, 组分为 0.2326 的 p 型碲镉汞材料经 ICP 干法刻蚀后采用图形阻抗法检测损伤宽度, 所得到的干法刻蚀损伤反型层宽度与组分的关系曲线。在本组实验中, 只有刻蚀腔体压力不同, 而工艺气体流量及配比、DC bias、ICP 功率、刻蚀温度等其他工艺参数保持不变。干法刻蚀诱导反型层的深度随腔体压力先增加后减小, 其原因可能是: 当腔体压力小于 10mtorr 时, 随着腔体压力增加腔体中的等离子体密度增加, 从而致使有更高的高能离子轰击到样品表面, 造成更大的损伤; 也有可能由于随着腔体压力增加导致腔体中离子的平均自由程减小, 而等离子体中的 H^+ 离子由于体积小, 速度快, 发生碰撞的几率低, 更容易达到样品表面, 从而使参与刻蚀作用的 H^+ 离子比例增加, 致使刻蚀诱导损伤加重。当体压力高于 15mtorr 后, 由于离子密度增加, 离子碰撞几率大幅增加, 离子能量被显著减小, 化学刻蚀增强, 而刻蚀产物与聚合物淀积增加, 阻碍了刻蚀的继续顺利经行, 从而减小了刻蚀损伤。

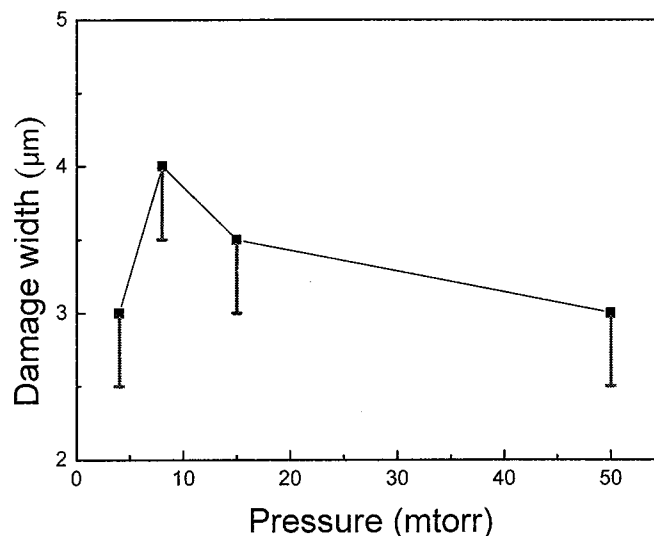


图 4.7 刻蚀工艺的腔体压力与诱导损伤反型层的关系

4.3.6 刻蚀损伤与 DC bias 关系

在 ICP 刻蚀系统中, 离子的能量主要受直流偏压 (DC bias) 电场控制。而离子能量的高低, 会极大地影响到离子的化学活性、自由程、在材料中的穿透能力等。而对于碲镉汞的 ICP 刻蚀, 高能离子会加速 HgCdTe 材料中较弱的 Hg-Te 键在刻蚀过程中断裂, 增强产生的游离态的 Hg 填隙原子向材料内扩散, 从而引起 p-to-n 的诱导损伤的增加。另一方面, 高能 H^+ 具

有很强的穿透能力，可能造成更深的诱导损伤层。所以，干法刻蚀中离子能量越大刻蚀产生的诱导损伤越严重。

图 4.8 是，组分为 0.299 的 p 型碲镉汞材料经 ICP 干法刻蚀后采用剥层霍尔检测损伤深度，所得到的干法刻蚀损伤反型层深度与组分的关系曲线。在本组实验中，只有刻蚀 DC bias 的不同，而工艺气体流量及配比、ICP 功率、腔体压力、刻蚀温度等其他工艺参数保持不变。由图可见，随着 DC bias 的增加，刻蚀损伤深度厚度随之增加。这可能是由于随着 DC bias 的增加，脆弱的 Te—Hg 键断裂几率增加，从而使刻蚀产生的游离态的 Hg 原子也随之增加，能够扩散进材料内部形成 Hg 填隙的原子也更多，从而致使刻蚀诱导损伤层深度也随之增加。也有可能是由于高能 H^+ 具有更强的穿透能力，在材料内部形成更深的离子替换从而造成更深的诱导损伤。

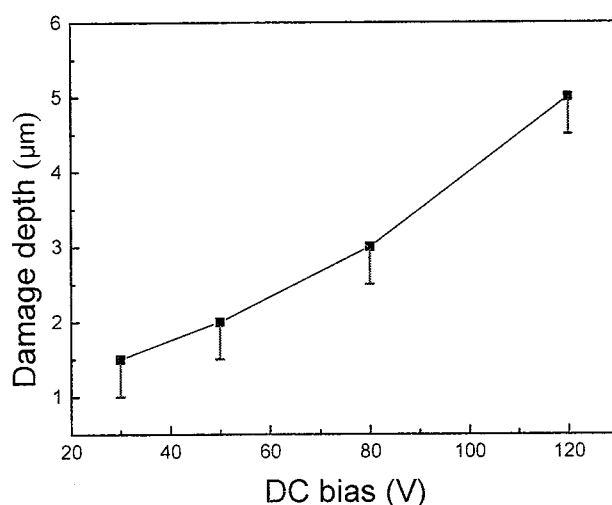


图 4.8 DC bias 与刻蚀损伤的关系图

4.4 刻蚀损伤的分布及其热扩散特性研究

碲镉汞的干法刻蚀的目的是实现焦平面器件在空间上的物理隔离，为保证隔离之后的器件具有正常的性能，实用的干法刻蚀台面成形工艺必须具有低损伤或无损伤的特点。对于原位成结 n-on-p 焦平面器件，不能引入刻蚀损伤，否则器件表面 n 型层和刻蚀反型 n 型层连通，无法形成分离的 pn 结阵列，如图 4.9(a)所示。对于 n-on-p 型离子注入成结器件，刻蚀损伤不能大于离子注入区之间的间隙，否者也会使器件失效，如图 4.9(b)；另外，刻蚀损伤的大小及其与离子注入区之间的距离都会对器件性能造成影响，所以对刻蚀损伤的评估不仅要考察

刻蚀损伤的厚度, 还要考虑其空间分布情况, 以给器件制备和损伤修复提供更多可参考的数据。

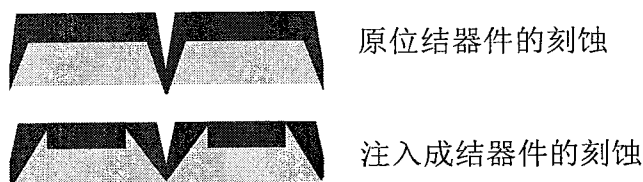


图 4.9 刻蚀损伤致使器件失效的原理图

碲镉汞的干法刻蚀诱导损伤可能主要由以下两种机制产生: 一是, 干法刻蚀产生 Hg 游离原子并向材料内部扩散形成 Hg 填隙或者和 Hg 空位复合; 二是, H 离子溅射入材料内部作为受主或起钝化 Hg 空位的作用。由于前者的损伤产生主要靠扩散, 与温度关系很大, 而后者则主要靠溅射注入, 与离子能量相关度更高。所以两种机制产生的损伤分布也有可能不同。

为此, 本节研究了刻蚀损伤的横向和纵向的分布以及其在高温中的扩散特性。

4.4.1 刻蚀损伤的横向和纵向分布

图 4.10 是, 组分为 0.2326 的 p 型碲镉汞材料经 ICP 干法刻蚀后分别采用图形阻抗法和剥层霍尔检测刻蚀损伤的横向宽度和纵向深度, 所得到的阻抗—刻蚀区间间隔曲线和腐蚀深度—霍尔浓度曲线。其中, 刻蚀条件为: Ar/H₂/CH₄ 混合气体、RF15w、ICP600W、压力 5mtorr, 温度 8℃。由图 4.10(a)可知, 刻蚀图形在刻蚀间距为 4μm 时阻抗急剧下降, 表明刻蚀损伤的横向宽度约为 3.5~4μm; 由图 4.10(b)可知, 刻蚀损伤的纵向深度约为 3~4μm。刻蚀损伤的横向宽度和纵向深度非常接近。这可能是由于刻蚀损伤主要由 Hg 原子的产生以及扩散决定所引起, 因为扩散所引起的损伤在横向和纵向的分布应该是接近的, 并且随着温度的升高, 刻蚀损伤应该更大, 因为 Hg 原子在材料中的扩散主要受温度影响, 温度更高 Hg 原子扩散距离更远。而如果刻蚀损伤主要与高能刻蚀离子的定向轰击有关, 如高能的 H 离子溅射, 那么碲镉汞材料在横向的刻蚀损伤厚度应该要小于纵向的刻蚀损伤厚度, 因为刻蚀等离子体的纵向动量大于横向动量, 离子在纵向能够穿透的深度也越深。这就说明 Hg 原子的产生及扩散可能是诱导碲镉汞刻蚀损伤的主要因素。

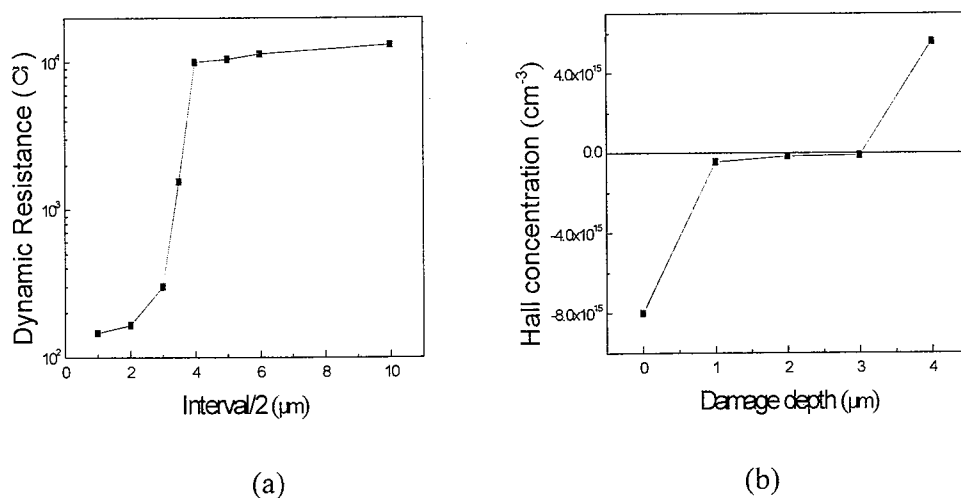


图 4.10(a) 刻蚀损伤横向宽度; (b) 刻蚀损伤纵向厚度

4.4.2 刻蚀损伤在高温中的扩散特性

碲镉汞刻蚀损伤主要由产生的汞原子扩散入材料形成汞填隙或氢离子注入所引起，其在材料中的热扩散效应必将影响到刻蚀损伤层的再分布和反型层电学性质的变化，从而可以为在器件制备过程中利用该损伤或修复该损伤提供相关的信息和方法指导。因此，本节研究了干法刻蚀损伤在高温中的扩散特性。

图 4.11 是，组分为 0.2326 的 p 型碲镉汞材料经 ICP 干法刻蚀后经 170℃ 退火 20 分钟，采用图形阻抗法，所得到的电阻—刻蚀间隔曲线。其中，刻蚀条件为：Ar/H₂/CH₄ 混合气体、RF15w、ICP600W、压力 5mtorr，温度 8℃。由图 1 可知，退火前刻蚀损伤的横向宽度约为 3.5μm 左右，退火后刻蚀损伤略微变宽，约为 4μm 左右，这可能主要由刻蚀产生的汞填隙原子的扩散所引起的。另外，刻蚀后损伤的反型强度有所下降，因为在大刻蚀间隔情况下，损伤层所形成的 PN 结阻抗变低了，这可能主要跟退火产生汞空位，从而复合掉一部分汞填隙原子或相对降低了施主（汞填隙）浓度有关。而在刻蚀区间较小的情况下，损伤层阻抗变大，这可能也是由汞空位的产生和汞填隙原子被复合所造成的。

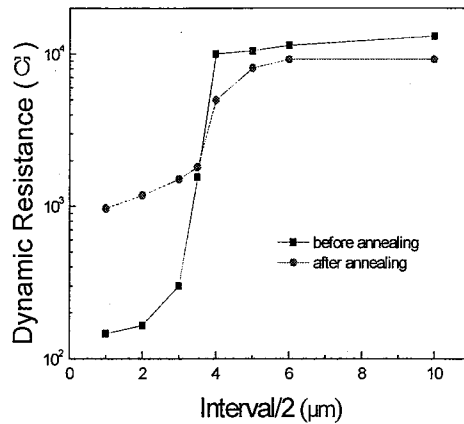


图 4.11 退火前后刻蚀损伤的变化

由此可见，热退火处理可以是刻蚀损伤展宽变宽，同时损伤层反型强度变弱。如果采用合适的退火条件，有可能使刻蚀损伤层弱化到忽略不计，从而修复材料的刻蚀损伤。

4.5 干法刻蚀损伤的修复研究

干法刻蚀是第三代碲镉汞焦平面器件的关键技术之一，然而由于碲镉汞材料本生的易受损伤的特性，仅仅依靠干法刻蚀工艺的优化，很难完全消除刻蚀诱导损伤。而刻蚀损伤对碲镉汞焦平面器件来说，是一个致命的缺陷，其会使器件性能大幅度降低或完全失效。为了减小或者消除刻蚀诱导损伤对器件性能的伤害，需要在刻蚀工艺完成之后，增加一个工艺来修复刻蚀损伤。

4.5.1 干法刻蚀损伤的消除方法

在传统的半导体工艺中，湿法腐蚀和热退火是常用的两种消除材料损伤的方法。前者直接依靠化学腐蚀从物理上去除材料的损伤层，后者依靠热能实现对材料晶格原子重新排列来实现损伤的修复。

4.5.1.1 湿法腐蚀去损伤及其局限性

湿法腐蚀是一种温和的材料去除方式，一般不会对材料造成额外损伤，其在半导体工艺中被大量用于材料的漂洗、残留物去除、表面的剥离以及大尺寸图形的腐蚀。湿法腐蚀是一

种能够保持材料物理结构和电学特性的良好的损伤去除方法。

对于碲镉汞的湿法腐蚀通常采用 Br_2 基化学溶液，如 Br_2 /甲醇、 Br_2 /丁醇、 Br_2 /乙二醇及其混合液等。这些腐蚀液对碲镉汞来说，都是各向同性的。所以在干法刻蚀完成以后，依靠湿法腐蚀去除刻蚀损伤层材料，会使刻蚀形貌发生很大变化。本文设计了一组实验研究了干法刻蚀后经不同时间湿法腐蚀后，刻蚀剖面形貌的变化。其具体过程如下：

首先采用常规工艺对碲镉汞样品进行干法刻蚀，然后采用 0.75% 的 Br_2/HBr 溶液对样品进行分类腐蚀，湿法腐蚀时间从 20s~150s 不等。腐蚀后的样品形貌如图 4.12 所示。

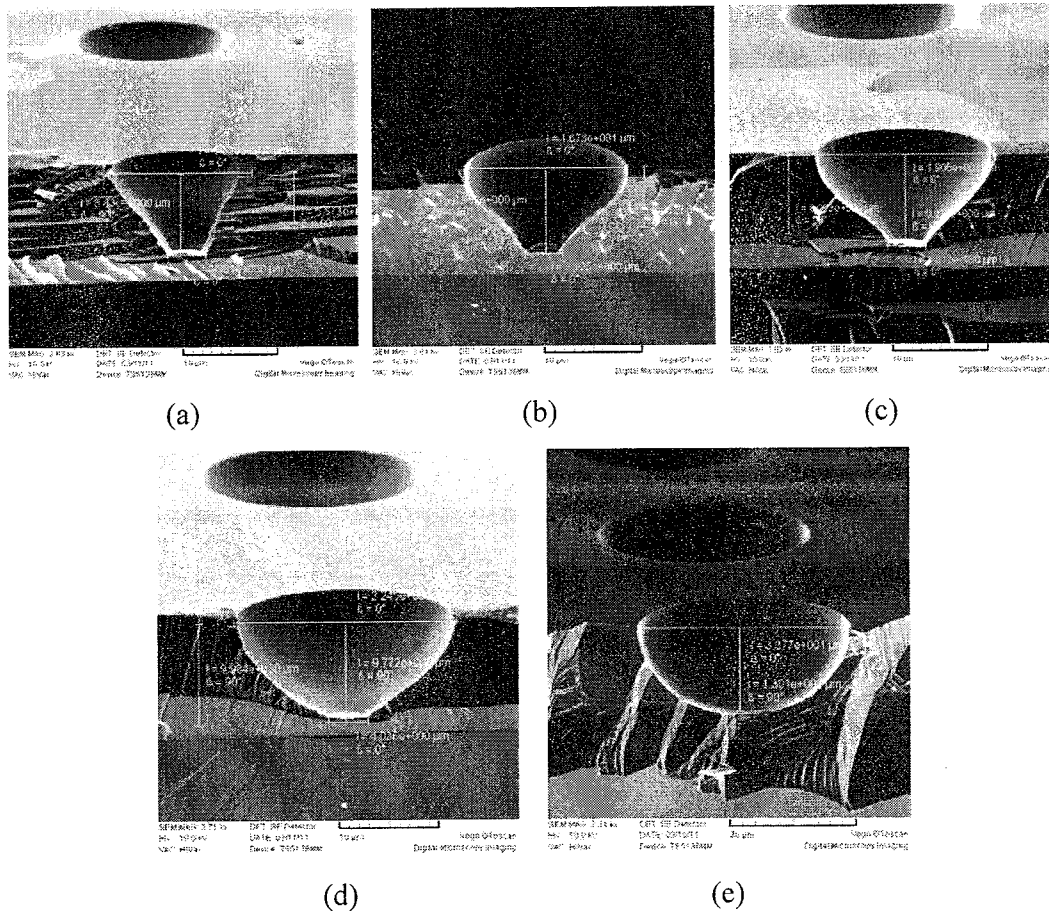


图 4.12 干法刻蚀孔经不同时间湿法腐蚀后形貌变化图，其腐蚀时间分别为：(a)20s；(b)40s；(c)60s；(d)90s；(e)150s

由图可知：在不过腐蚀情况下，随湿法腐蚀时间增加，刻蚀孔底部平整面的面积大小基本不变，由此可见，其大小主要由干法刻蚀结果决定。微结构在各点的湿法腐蚀速率与其初始形貌具有一定独立性，腐蚀去除的材料主要与腐蚀时间相关。经过较长时间腐蚀后，微结构形貌与纯湿法腐蚀基本相同。

由此可见，湿法腐蚀虽然可以无损地去除干法刻蚀损伤层，但是其对形貌破坏较大，使

占空比的损失接近纯湿法腐蚀，所以难以满足第三代碲镉汞红外焦平面器件工艺对高占空比台面隔离的技术要求。

4.5.1.2 热退火修复原理及其可行性

由已知的文献报道^[104,116-119]和实验结果可知，碲镉汞的干法刻蚀损伤主要由物理作用诱导产生的 Hg 填隙原子及其扩散，以及可能的 H 离子在材料中的扩散所引起。所以，碲镉汞的刻蚀诱导损伤的修复工艺需要满足以下条件：

- 产生剩余汞空位复合掉刻蚀所产生的 Hg 填隙原子，或者使 Hg 填隙原子向材料表面扩散和逃逸。
- 使 H 原子转变为施主，或者使 H 原子向材料表面转移和释放。
- 不致使材料电学与光学特性发生大幅变化。

退火处理具有对材料晶格经行重排，以及加速某些特定粒子逃逸出材料的效果。有研究表明，退火处理可以修复碲镉汞材料的晶格损伤，降低缺陷密度，控制施主和受主浓度，以及使没有成键的 H 逃逸出材料内部的效果。所以，寻找合适的退火工艺，有可能使干法刻蚀损伤得到有效的修复。

4.5.2 损伤修复效果的载流子的输运特性表征

由前文分析可知，退火处理是一种能够修复干法刻蚀诱导损伤的方法。为寻找到有效的退火工艺条件，表征退火修复刻蚀损伤工艺的有效性，需要对退火后，材料的载流子输运特性进行测试验证。本文主要通过霍尔测试来获取材料的载流子输运特性，并且根据碲镉汞材料的工作温度要求，测试温度被设置为 77K。

4.5.2.1 退火温度、退火时间与载流子输运特性关系

本文基于 p 型汞空位碲镉汞材料，经 ICP 刻蚀和表面钝化后，在不同的时间与温度下退火后，采用范德堡法霍尔测试，提取碲镉汞的载流子浓度、迁移率等载流子输运特性参数，对退火修复刻蚀损伤工艺条件进行了分析与研究。

图 4.13 是 p 型汞空位碲镉汞材料经 ICP 刻蚀后，在 160℃ 和 210℃ 对其经行 0~10 小时

退火后，获得的退火时间与霍尔浓度的关系曲线。由图有，未经任何刻蚀的样品显示为 P 型碲镉汞材料，载流子浓度约为 $4e15\text{cm}^{-3}$ ，经刻蚀后，材料反型成为 n 型，载流子浓度约为 $4.4e15\text{cm}^{-3}$ 。在 160°C 温度下，经 0~10 小时退火，材料始终为 n 型，显示出材料的刻蚀损伤未被修复。但在 210°C 温度下退火，经过 2 小时后，材料就显示为 P 型了，说明此时碲镉汞的刻蚀损伤反型层可能已经被修复；继续增加退火时间，材料的导电类型没有变化，载流子浓度略有增加，这可能跟高温下，碲镉汞中汞空位受主的产生有关。

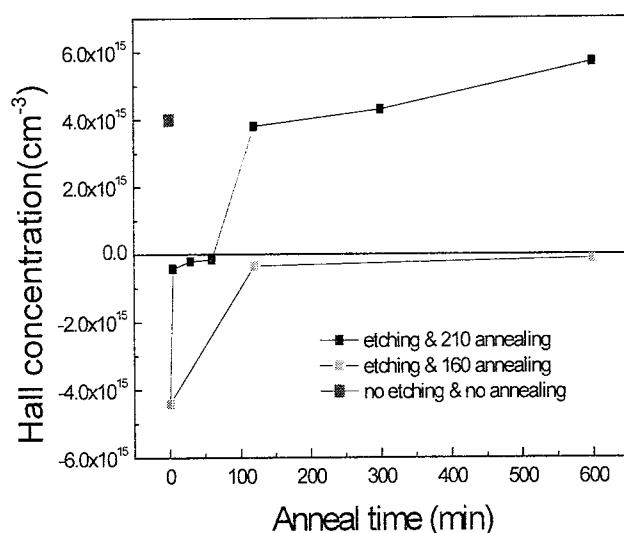


图 4.13 刻蚀损伤材料的霍尔浓度与退火工艺条件关系

图 4.14 是 p 型汞空位碲镉汞材料经 ICP 刻蚀后，在 160°C 和 210°C 对其经行 0~10 小时退火后，获得的退火时间与霍尔迁移率的关系曲线。由图有，未经任何刻蚀的样品显示为 P 型碲镉汞材料，霍尔迁移率约为 $365\text{cm}^2/(\text{vs})$ ，经刻蚀后，材料反型成为 n 型，迁移率约为 $19450\text{cm}^2/(\text{vs})$ 。在 160°C 温度下，经 0~10 小时退火，材料迁移率均大于 $3000\text{cm}^2/(\text{vs})$ ，显示出材料始终为 n 型，刻蚀损伤未被修复。刻蚀样品在 210°C 温度下退火，经过 5 分钟后，材料迁移率变高，这可能跟刻蚀反型层里的 Hg 填隙原子的分布的变化，以及材料的缺陷、晶格的刻蚀损伤的修复有关；当退火时间多于 2 小时后，材料的迁移率锐降到 $400\text{cm}^2/(\text{vs})$ 以下，说明碲镉汞的导电类型转变为 P，碲镉汞的刻蚀损伤反型层可能已经被修复。继续增加退火时间，材料的导电类型没有变化，迁移率略有下降，这可能跟高温下，碲镉汞中汞空位受主的浓度增加有关。

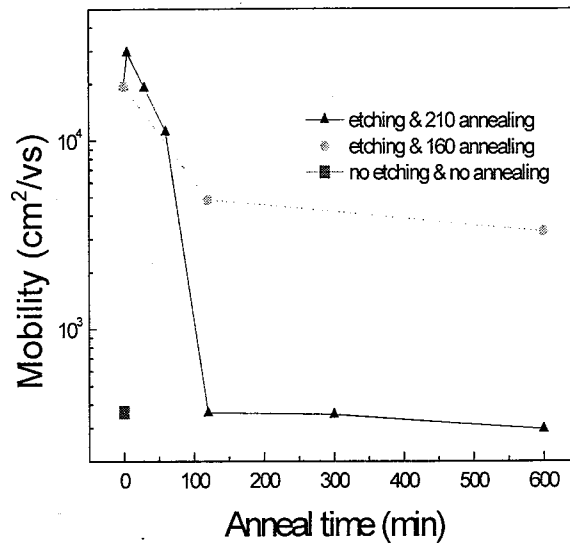


图 4.14 刻蚀损伤材料的霍尔迁移率与退火工艺条件关系

由此可见，在过低的温度下（低于 160℃）退火是很难修复刻蚀损伤的。采用合适的温度与合适的时间对碲镉汞刻蚀芯片进行退火处理，是可以实现刻蚀损伤的修复的，并且能够使其霍尔浓度、迁移率恢复到接近未经刻蚀的样品的水准。

4.5.2.2 退火后载流子输运特性纵向变化

碲镉汞材料的干法刻蚀损伤的修复，不仅要求其电学参数在宏观数量上恢复到接近未刻蚀前的水平，而且要求其空间分布也要得较好地恢复，这样才能保证经过干法刻蚀过后的器件的性能不被降低。本文通过剥层霍尔测试的方法，研究了未刻蚀样品，刻蚀不退火样品，以及刻蚀后退火样品的霍尔浓度、迁移率等电学参数的变化。刻蚀条件与上节相同，退火条件为：210℃下退火 2 小时，剥层霍尔腐蚀液采用溴乙醇溶液。

图 4.15 是未刻蚀样品，刻蚀不退火样品，以及刻蚀后退火样品的芯片腐蚀厚度与霍尔浓度的关系曲线。由图有，未经任何刻蚀的样品载流子浓度始终保持在 $4.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 左右。刻蚀不退火样品，在腐蚀厚度小于 $2 \mu\text{m}$ 情况下，载流子浓度均为负数，说明材料类型为 n 型，刻蚀损伤层厚度为 $2 \mu\text{m}$ 左右；继续腐蚀，载流子浓度接近未刻蚀样品，说明测试损伤层去除干净。刻蚀后在 210℃下退火 2 小时的样品，材料载流子浓度始终为正值，显示其恢复为 P 型碲镉汞材料，其数值接近未刻蚀样品，只是略微大于未刻蚀样品，说明材料经刻蚀损伤修复工艺处理后，材料的载流子浓度空间分布也得到了较好的恢复。

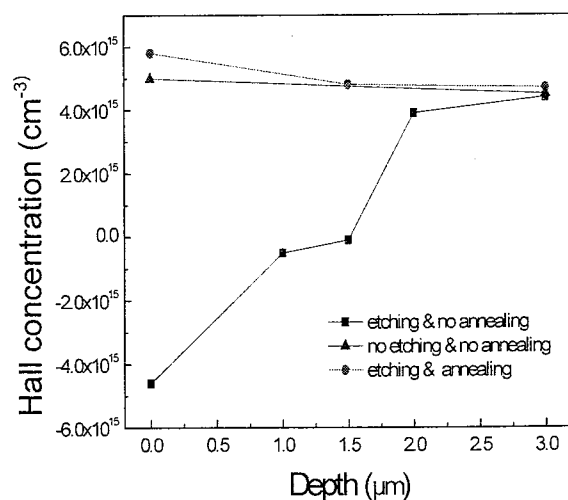


图 4.15 未刻蚀样品，刻蚀不退火样品和刻蚀后退火样品的芯片腐蚀厚度与霍尔浓度的关系曲线

图 4.16 是未刻蚀样品，刻蚀不退火样品，以及刻蚀后退火样品的芯片腐蚀厚度与霍尔迁移率的关系曲线。由图有，未经任何刻蚀的样品霍尔迁移率始终保持在 $350 \text{ cm}^2/(\text{vs})$ 左右。刻蚀不退火样品，在腐蚀厚度小于 $2 \mu\text{m}$ 情况下，霍尔迁移率始终大于 $10000 \text{ cm}^2/(\text{vs})$ ，说明材料类型为 n 型，刻蚀损伤层厚度为 $2 \mu\text{m}$ 左右；继续腐蚀，霍尔迁移率接近未刻蚀样品，说明测试损伤层去除干净。刻蚀后在 210°C 下退火 2 小时的样品，霍尔迁移率在整个材料内都接近未刻蚀样品，只是略微小于未刻蚀样品，这说明该损伤修复工艺对材料的载流子输运特性的恢复效果是较好的。

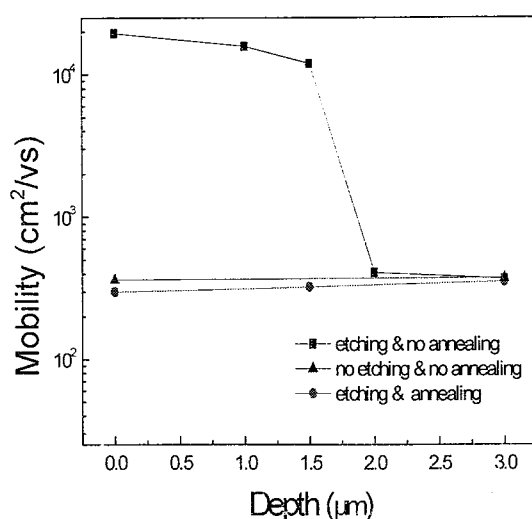


图 4.16 未刻蚀样品，刻蚀不退火样品和刻蚀后退火样品的芯片腐蚀厚度与霍尔迁移率的关系曲线

4.5.3 损伤修复效果的少子寿命表征

少子寿命是碲镉汞材料的一个非常重要的材料特性参数，其对器件性能有着非常大的影响。所以干法刻蚀损伤修复工艺需要考虑其对材料的少子寿命的影响。本文通过微波反射发对不同损伤修复工艺的处理过的碲镉汞样品进行了少子寿命的测试与分析，获得了较好的损伤修复工艺条件。

4.5.3.1 微波反射法测试少子寿命原理

半导体材料和半导体结的光电特性对半导体器件的性能起着至关重要的作用。迄今为止出现了大量测量少子寿命的方法，但大部分方法都需要在半导体材料表面形成有效的结。通常这个制备结过程会在材料中引入一些杂质可能导致原始寿命的改变，因此非接触、无损伤地测量半导体材料中少子寿命的方法引起了人们的广泛注意。微波反射光电导方法就是非接触方法中的典型代表^[120,121]。

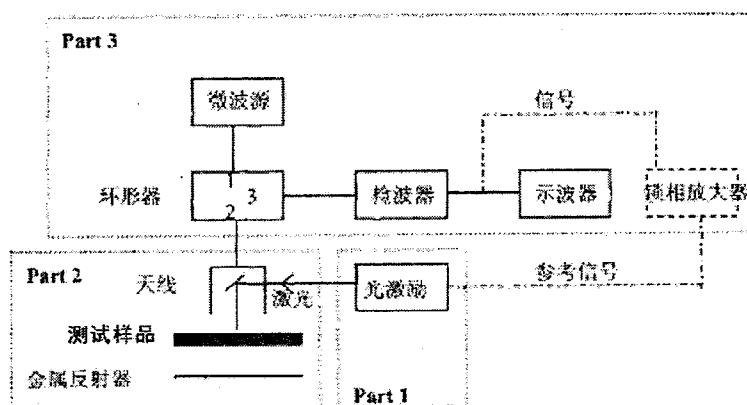


图 4.17 微波光电导少子寿命测试装置示意图

图 4.17 是微波光电导少子寿命测试装置示意图。整套装置可分为三部分：光源激励部分、样品及样品后的金属反射器、检测装置和显示设备。光源激励用于激发样品产生非平衡载流子引起光电导变化，微波源用于产生分析光电导变化的微波，环形器的主要作用是将入射微波和反射微波分开，检波器的作用是检测到反射的微波信号，并将微波的电信号转化为电压信号，并送入示波器或其他显示设备，如计算机进行显示、存储、处理和分析等。

测试时，用能量大于测试半导体禁带宽度的脉冲激励光源和微波同时照射到测试的半导体样品上，如图 1，在半导体中会产生非平衡载流子，由于光脉冲产生的光电导瞬态变化引起的微波反射功率 ΔP 在一级近似（小注入）下为：

$$\Delta P = A * \Delta \sigma$$

其中 σ 为电导率， $\Delta\sigma$ 为光注入后光电导的增加。测出 ΔP 即可或得 $\Delta\sigma$ 变化，从而获得少子的寿命。

4.5.3.2 退火工艺与少子寿命关系

由前文有，干法刻蚀诱导损伤在 210℃退火 2 小时以上，能够实现损伤层的修复，使其霍尔电学参数恢复到接近未刻蚀样品的水平。为了获得该损伤修复工艺对少子寿命的影响，评估其对器件性能的影响，本文基于 p 型汞空位碲镉汞材料，经 ICP 刻蚀和表面钝化后，在 210℃下退火不同时间后，采用微波反射法提取碲镉汞的少子寿命特性参数，对退火修复刻蚀损伤工艺条件进行了分析与研究。

图 4.18 是未刻蚀样品和刻蚀后退火样品的退火时间与少子寿命的关系曲线。由图可知，未经任何刻蚀的样品的少子平均寿命约为 83ns。刻蚀后，未退火的样品的少子平均寿命约为 180ns，这是因为 ICP 刻蚀致使材料反型。刻蚀后在 210℃下退火 2 小时以下的样品，其少子寿命升高，这是由于材料反型层还未被修复，材料载流子；退火时间为 2 小时时，损伤被修复，材料恢复为 P 型，少子平均寿命接近 80ns，略微小于未刻蚀样品。继续增加退火时间，少子寿命逐渐减小，这可能是由于退火时间增加，材料中汞空位增加，致使深能级缺陷增加，从而降低了材料的少子寿命。

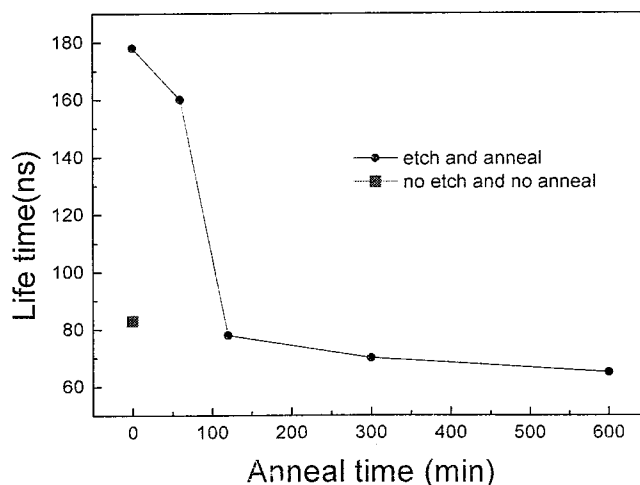


图 4.18 未刻蚀样品和刻蚀后退火样品的退火时间与少子寿命的关系曲线

由此可见，选择合适的损伤修复退火工艺条件可以使材料的少子寿命恢复到接近未刻蚀

样品的水准。在保证能够有效修复刻蚀损伤的情况下，退火时间越短越好。

4.5.4 损伤修复工艺与 PN 结特性

损伤修复工艺的目的是修复刻蚀损伤，并保持材料的电学性质，以使获得跟无刻蚀损伤的材料制备的器件的性能相当。为此，本文通过设计实验工艺流片验证了损伤修复工艺的有效性。

4.5.4.1 实验设计与工艺流程

本实验基于组分为 0.2856 的 p 型碲镉汞材料，通过分为 3 组进行材料预处理：不刻蚀不退火（原生材料）、刻蚀不退火以及刻蚀退火，其中退火工艺分为 2 种：210℃2 小时、210℃10 小时。然后通过常规的离子注入平面结器件的制备工艺制备碲镉汞红外焦平面器件。刻蚀加退火的芯片工艺流程如图 4.19，而不刻蚀不退火没有 ICP 刻蚀与退火两个步骤，刻蚀不退火有 ICP 刻蚀处理无退火处理，其与工艺与图 1 相同。

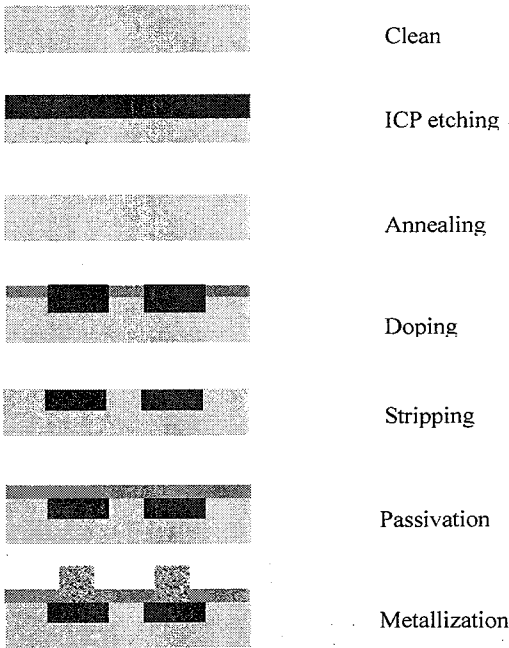


图 4.19 刻蚀损伤修复后的材料制备焦平面器件工艺流程图

4.5.4.2 结果与讨论

图 4.20 是分组实验获得的 R-V, I-V 特性曲线。由图可知刻蚀之后未退火的芯片呈现一个电阻特性, 这是由于刻蚀损伤层与离子注入形成的 N 型层连通, 致使整个焦平面器件连成一体, 电流未通过 PN 结, 其失效机理如图 4.21 所示。刻蚀后, 在 210℃ 下退火 2 小时的器件性能接近于未刻蚀未退火芯片的性能, 这就证明了该工艺具有较好的损伤修复能力, 能够保持材料的电学特性。而继续增加退火时间到 10 小时, 样品电阻特性性能下降, 这可能是因为在退火过程中, 材料中的汞空位增加过量所导致。

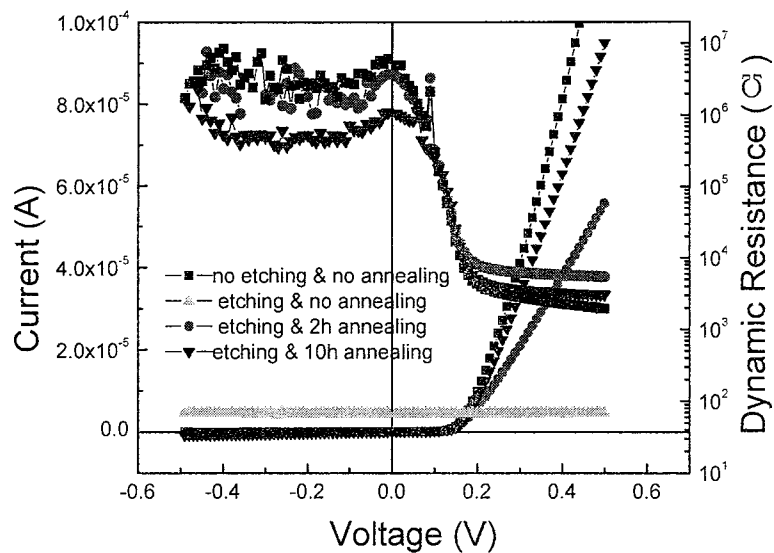


图 4.20 原生材料、刻蚀不退火以及刻蚀退火材料制备的器件的 R-V, I-V 特性曲线

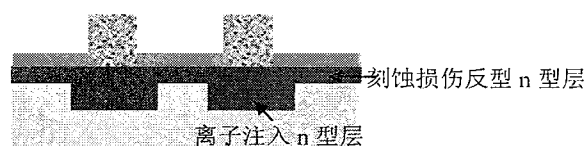


图 4.21 刻蚀损伤致使器件失效原理图

4.6 小结

本章主要研究了碲镉汞的刻蚀损伤产生机理及其修复。

总结了干法刻蚀损伤的常规测试方法。基于碲镉汞刻蚀损伤的电学特性, 获得了一种借助芯片图形设计的刻蚀损伤的高精度测试方法。

研究了材料组分、工艺气体组分、刻蚀温度、直流偏压、刻蚀气压等材料和刻蚀工艺参数与刻蚀损伤的对应关系,分析了其可能的内在机理,发现了刻蚀过程中的 Hg 的产生及其扩散、H 离子的溅射注入可能是造成损伤的原因。研究了刻蚀损伤的空间分布及其扩散特性,发现刻蚀过程中的 Hg 的产生及其扩散可能是造成损伤的最主要因素。

分析了湿法腐蚀去刻蚀损伤层的局限性,热处理去损伤的可行性及其优势。采用热处理方法,研究了材料的载流子输运特性和少子寿命与损伤修复工艺条件的关系,在 210℃ 左右获得了热处理修复刻蚀损伤的最佳条件。基于该损伤修复条件,通过器件的制备与测试,发现采用该条件修复损伤后的材料,能够制备获得与原生未刻蚀材料性能相当的器件。

第5章 干法刻蚀技术的芯片集成与验证

碲镉汞的干法刻蚀作为第三代碲镉汞红外焦平面器件的关键技术，其研究目的是实现诸如高密度、原位结、多色、APD 碲镉汞红外焦平面器件的高占空比和无损伤的台面隔离。在研究初步获得了高占空比的刻蚀工艺和刻蚀诱导损伤的修复技术的基础上，为推进该技术在红外焦平面器件制备过程中的实用化，本章展开了干法刻蚀技术的芯片集成与验证研究。针对 ICP 干法刻蚀的工艺在集成于常规的碲镉汞器件工艺中的诸如损伤修复工艺损伤离子注入结、台面钝化效果差等问题，展开了台面器件制备工艺流程优化和台面钝化工艺优化研究，并制备获得了验证型的 320×256 的像元中心距为 $30\mu\text{m}$ 的高密度碲镉汞中波红外焦平面器件， 128×128 的像元中心距为 $50\mu\text{m}$ 的原位结碲镉汞中波焦平面器件，最后对其进行了基本光电性能的测试和分析。

5.1 干法刻蚀技术的微台面芯片集成

传统的碲镉汞探测器制备工艺是基于平面结结构的器件工艺，要在传统工艺上集成碲镉汞干法刻蚀台面工艺，会遇到许多新的问题，势必要对器件制备工艺进行相应的改进。本节内容是对工艺的集成整合进行研究。

5.1.1 台面成形与 PN 结成形工艺的整合优化

干法刻蚀台面成形工艺集成于传统的平面工艺，需要在传统工艺中寻找到一个合适的插入点。通常而言，干法刻蚀台面成形工艺可以安置与离子注入成结工艺之前或者之后。由于 ICP 干法刻蚀过后必须通过退火来修复刻蚀损伤层，所以如果在此之前已经通过离子注入形成 PN 结了，那么 PN 结有可能会发生变化，因为碲镉汞材料本身具有对温度比较敏感的特性，台面成形后的退火工艺可能会对离子注入所形成的 PN 结造成影响。为此，本节展开了台面成形与离子注入成结的相互影响，以及其工艺的先后顺序对器件性能影响的研究。

5.1.1.1 实验设计与工艺流程

实验基于组分为 0.2982 的 GaAs 基的碲镉汞外延薄膜材料，将材料分为 A、B 两组，分别按下图所示的工艺流程进行流片，如图 5.1 所示。两者的主要区别为 A 组为先离子注入

成结，然后再进行台面隔离损伤退火等工艺；B 组则为先台面隔离损伤退火，然后离子注入成结。器件的钝化以及金属化完全一样。

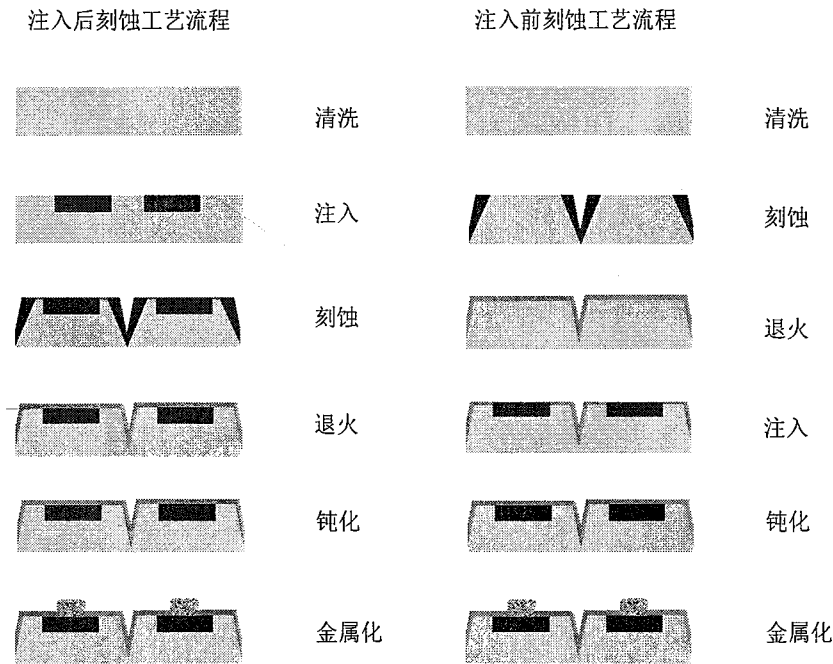


图 5.1 先台面隔离后注入与先注入后台面隔离器件的制备工艺流程

5.1.1.2 结果与分析

流片完成后，分别对两组器件进行 I-V 和 R-V 特性测试，其结果如图 5.2 所示。由图可知，A 组样品的零偏阻抗特性低于 B 组样品，即离子注入后进行台面成形的器件比先台面隔离再离子注入成结的器件的零偏阻抗特性差。这可能是由于台面成形的退火去损伤工艺中，产生了额外的 Hg 空位稀释或者湮灭了注入形成的施主 Hg 填隙原子，抑或是由于注入形成的 Hg 填隙原子的热扩散，从而降低了施主浓度，造成 PN 结内建电势降低，从而致使 PN 结阻抗下降。

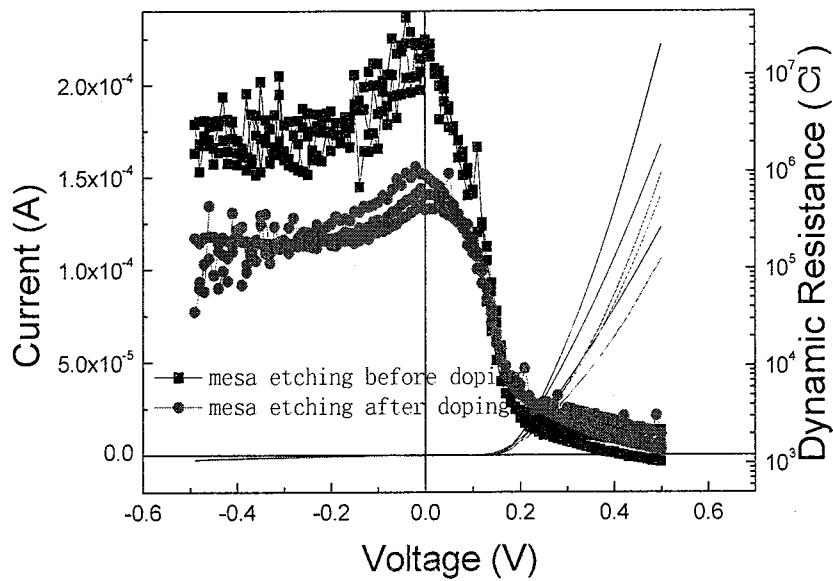


图 5.2 先台面隔离后注入与先注入后台面隔离器件的 I-V 和 R-V 特性曲线

5.1.2 台面结构器件钝化工艺优化

5.1.2.1 常规台面钝化的问题及其解决办法

传统的红外器件的钝化工艺，通常是采用蒸发或是磁控溅射的方式生长钝化层的，其能够对平面结构器件实现较好的钝化。但是对于具有深微台面结构的器件，由于钝化涉及垂直和水平两个方向的薄膜生长，及附着应力分布和可靠性等问题，其必然会对台面器件表面的钝化带来新的挑战。

图 5.3 分别是由湿法腐蚀和干法刻蚀所获得的台面经常规钝化工艺钝化后所得到的台面剖面图。由图可知，对于常规的钝化工艺形成的台面钝化层，均匀性较差，钝化层厚度跟台面的开口和倾角有较大关系。这是由于钝化材料溅射的具有阴影效应，即由于台面的遮挡，在某些角度入射的钝化材料无法溅射覆盖到台面的底部区域。另外，钝化层在台面的转角处常常会形成断裂，严重影响器件的钝化效果。这一现象可能是由于尖锐的转角所带来的对钝化材料的附着力太小所造成的。

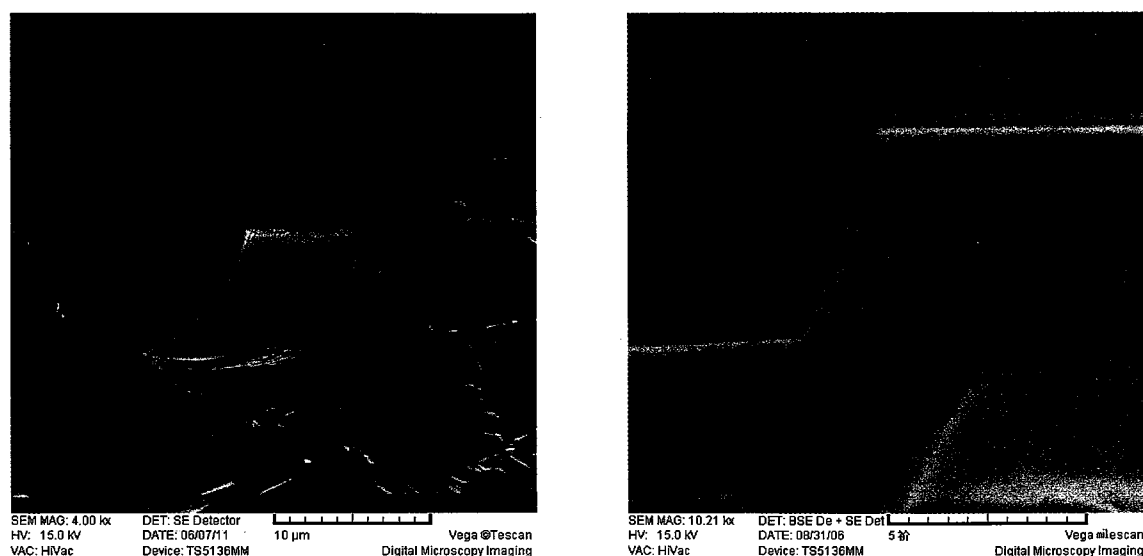


图 5.3 传统工艺获得的台面钝化剖面图

针对台面器件的钝化的这些问题，通常可以从两方面来加以考虑解决。一是通过改变钝化层生长方式，提高钝化材料溅射到台面器件的台面侧壁的几率，从而提高钝化质量。有研究显示采用金属有机化合物气相沉积的方式生长钝化层能够获得较好的钝化效果。二是通过优化台面侧壁形貌和适当增加钝化层生长厚度来改进钝化效果。优化台面形貌，可以减少表面微结构的尖锐转角，提高其对钝化材料的吸附作用；提高钝化薄膜生长厚度，减小影响效应对器件性能的影响。本节就是基于后一种方式，展开了台面钝化工艺的优化研究。

5.1.2.2 优化的台面钝化处理工艺

新的钝化工艺主要是通过湿法腐蚀优化台面侧壁形貌和适当增加钝化层生长厚度来实现的。其具体过程为：在台面成形完成后，去掉台面成形所用的图形掩膜，然后将器件芯片置于 1%Br/乙醇腐蚀 5s 左右，依靠湿法腐蚀本生的对微结构的平滑作用，钝化台面转角，然后将芯片放入电子束蒸发设备生长钝化薄膜，并将薄膜生长厚度提高 1 倍。

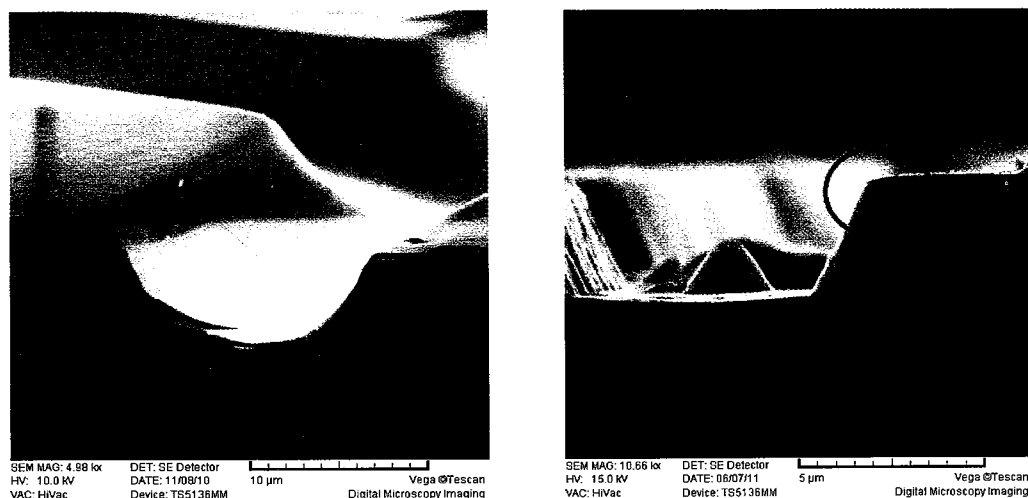


图 5.4 改进工艺后获得的台面钝化剖面图

图 5.4 是采用改进后的钝化工艺生长的台面钝化薄膜 SEM 图像。由图可知改进工艺后生长的钝化薄膜连续光滑，并且在台面转角处无断裂，薄膜厚度也较为均匀，能够满足器件的钝化需要。

5.2 干法刻蚀的台面芯片验证

干法刻蚀技术是制备高密度的红外焦平面台面器件的关键技术之一。在研究初步获得了高占空比的刻蚀工艺和刻蚀诱导损伤的修复技术，以及优化了工艺流程和钝化工艺后，本文进行了对于干法刻蚀技术在碲镉汞红外焦平面器件制备过程中的实用性的器件芯片验证。

5.2.1 芯片的结构及工艺流程

图 5.5 n^+ -on-p 验证芯片结构图

高密度碲镉汞红外焦平面器件验证芯片采用离子注入成结型 n^+ -on-p 台面结构，如图 5.5 所示。该芯片基于组分为 0.2982 的汞空位 p 型中波碲镉汞材料，采用的面阵规模为 320×256 、像元中心距为 $30 \mu\text{m}$ 、离子注入区为 $22 \times 22 \mu\text{m}$ 的版图进行图形定义，通过图 5.6 所示的制备工艺制备获得。其中，干法刻蚀的条件是第 3 章所获得的高占空比，表面清洁的刻蚀工艺条件；刻蚀损伤修复工艺采用 210°C 退火 2 小时；钝化工艺采用上节所述的改进型钝化工艺；离子注入、金属化等工艺则仍旧采用常规的工艺进行。另外，为比较这种台面结器件和常规

的平面结器件性能差别，基于相同的材料采用常规器件工艺制备了 320×256 的离子注入成结型 n^+ -on-p 平面结器件。

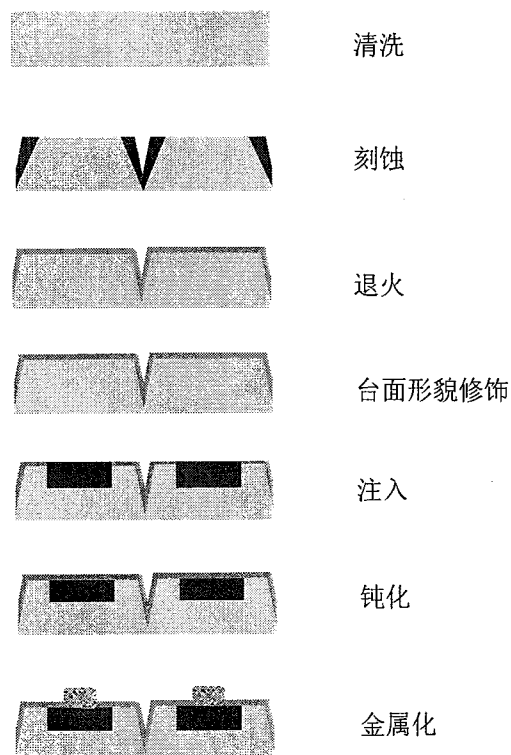


图 5.6 验证芯片工艺流程图

5.2.2 验证器件的测试与评估

为验证高密度碲镉汞红外焦平面台面器件的制备工艺，本文对面阵规模为 320×256 的像元中心距为 $30\mu\text{m}$ 的 n^+ -on-p 台面和平面结构的器件的阻抗特性和焦平面性能参数进行了测试与评估，并完成了焦平面的实验室成像。

5.2.2.1 器件的阻抗特性

图 5.7 是制备的面阵规模为 320×256 的像元中心距为 $30\mu\text{m}$ 的 n^+ -on-p 台面和平面结构的器件在 100K 温度下测试获得的 I-V 和 R-V 特性曲线。由图可知，干法刻蚀台面器件的 I-V 和 R-V 特性曲线表现出良好的二极管特性，证明刻蚀损伤已经被修复，与相应波段的碲镉汞平面结器件相比，其 I-V 特性还有一定差距。这可能跟干法刻蚀刻蚀器件损伤修复条件、台面钝化条件还不够完美有关，致使器件性能有所退化。

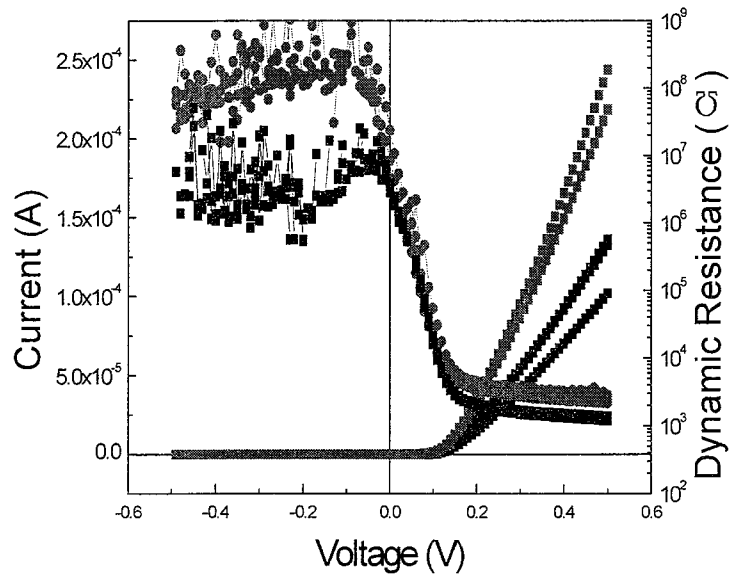


图 5.7 验证芯片的 I-V 和 R-V 特性曲线

5.2.2.2 器件的焦平面性能参数测试

表 5.1 是制备的面阵规模为 320×256 的像元中心距为 $30\mu\text{m}$ 的 $\text{n}^+\text{-on-p}$ 台面和平面结构的器件在 77K 温度下测试获得的焦平面性能参数简表。由表可知，干法台面器件具有一定的器件性能。器件的探测率较为正常，但是器件的噪声还偏大，其可能有两方面的原因。一是，退火条件还不够完美，造成材料中还同时存在汞填隙和汞空位，只是材料总体显示恢复为 p 型，从而器件可看成一个由多个微型器件组成的复杂系统，总信号受外界影响，波动大（类似蝴蝶效应），从而致使噪声偏大；二是，噪声可能是由于台面器件侧壁本身的钝化质量不好造成，因为台面本身就是一种结构损伤，材料在台面侧壁边缘断裂，需要更好地钝化效果。

表 5.1 验证芯片的焦平面性能参数

	Responsivity (V/W)	Peak Detectivity ($\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)	NETD (mK)	RMS noise (mV)	Uniform (%)
台面器件	4.25e7	7.35e10	98.7	1.18	11.88

5.2.2.3 器件实验室成像

图 5.8(a)是制备获得的面阵规模为 320×256 的像元中心距为 $30\mu\text{m}$ 的 $\text{n}^+\text{-on-p}$ 焦平面探测器杜瓦封装组件。图 5.8(b)是制备获得的面阵规模为 320×256 的像元中心距为 $30\mu\text{m}$ 的 $\text{n}^+\text{-on-p}$ 台面和平面结构的器件实验室演示成像图。由图可见，器件能够获得一定的成像效果，但是盲元还比较多。

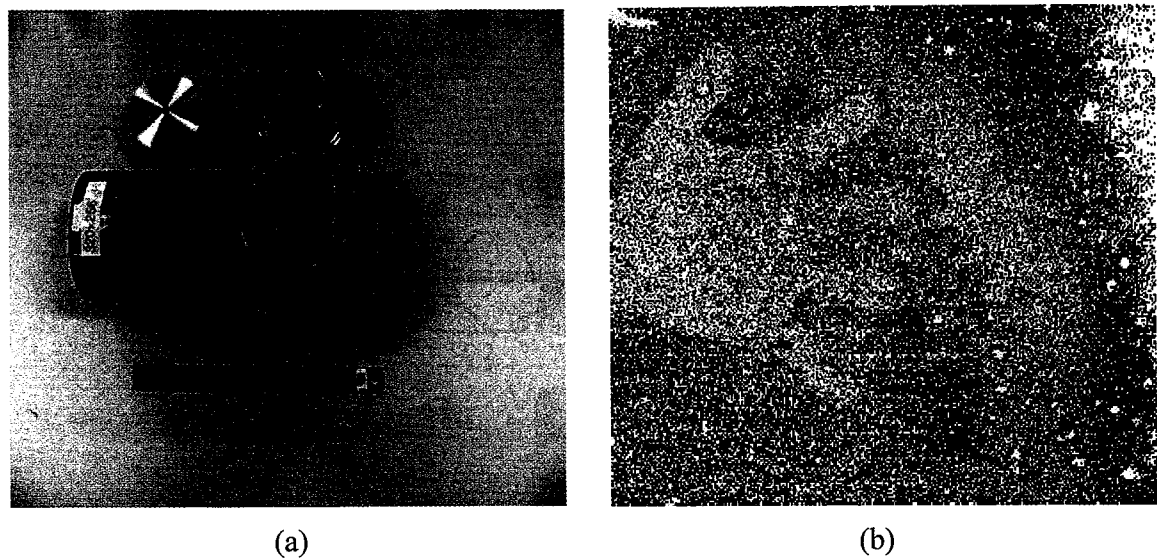


图 5.8 (a) 验证芯片的杜瓦封装组件；(b)干法刻蚀台面结构器件的实验室演示成像图

5.3 干法技术的原位掺杂芯片的验证

目前，大量的碲镉汞焦平面器件是采用原位成结材料制备获得的。碲镉汞的 ICP 干法刻蚀技术，需要能够实现这种材料的像元微台面的有效隔离，才能制备获得性能正常的红外焦平面器件。为此，本文对采用 ICP 干法刻蚀技术制备原位成结碲镉汞红外焦平面器件的工艺可行性进行了流片验证。

5.3.1 材料的结构及器件制备工艺流程

本实验基于组分为 0.314 的原位成结的碲镉汞材料，图 5.9 是其结构示意图。采用该种材料制备红外焦平面器件，器件的 PN 结在材料生长是已经形成，但是像元还没有分离，需要采用刻蚀技术将其隔离定义来实现电学上的分离，从而进一步制备获得高性能的碲镉汞焦平面器件。



图 5.9 原位结验证芯片的材料结构

图 2 是本文采用干法刻蚀技术的制备面阵规模为 128×128 的原位成结碲镉汞焦平面器件的工艺流程图。其中刻蚀工艺条件采用第 3 章所述的高占空比、表面光洁的刻蚀条件；退火工艺采用 210°C 下退火 2 小时；钝化工艺采用本章第 2 节所述的台面钝化工艺；金属化采用常规工艺。同时，采用湿法腐蚀技术制备了该结构器件，用于和干法刻蚀制备的器件进行性能参数比较。

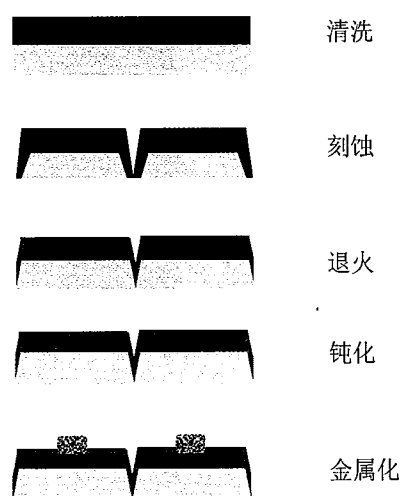


图 5.10 验证芯片的工艺流程

5.3.2 验证芯片的测试与评估

5.3.2.1 器件的阻抗特性测试

图 5.11 是实验制备获得的 128×128 的原位成结碲镉汞焦平面器件的 I-V 和 R-V 特性曲线。由图可知，采用干法刻蚀技术制备的器件呈现出明显的二极管特性曲线，证明干法刻蚀技术，能够较好地隔离定义原位成结材料的像元。零偏结阻抗与湿法腐蚀成结器件相当。但是在负偏压下，该技术制备的器件的阻抗特性明显低于湿法腐蚀器件。这可能是因为干法刻蚀过后的损伤修复工艺对原位所成的结造成了损伤，增大了器件的隧道电流，降低了器件性能。

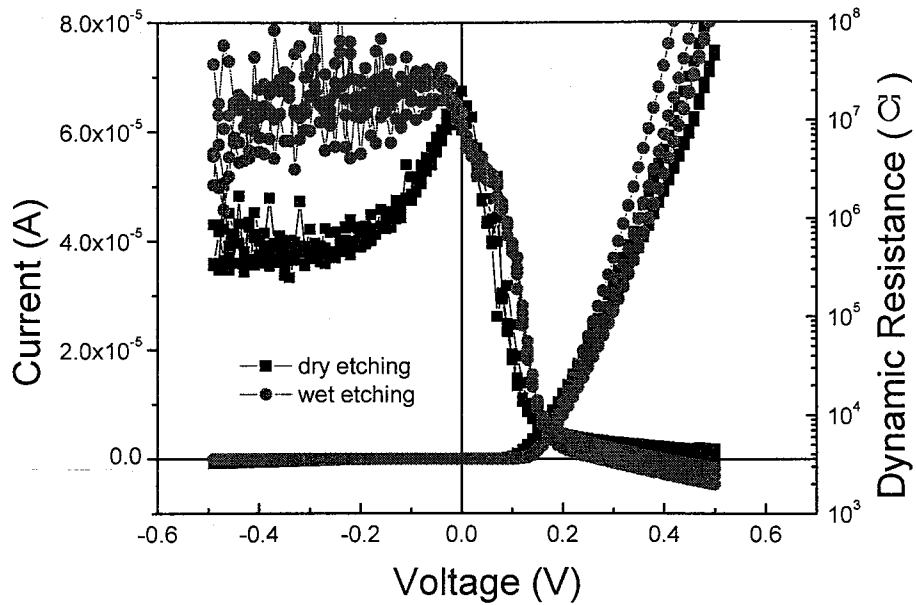


图 5.11 验证芯片的 I-V 和 R-V 特性曲线

5.3.2.2 器件的光谱特性测试

图 5.12 是实验制备的 128×128 的原位成结碲镉汞焦平面器件的在 77K 温度下测试获得了红外响应光谱曲线。由图可知，干法刻蚀与湿法腐蚀制备获得器件具有相似的相应光谱特性。证明干法刻蚀器件不会对器件的光谱特性造成较大的影响。

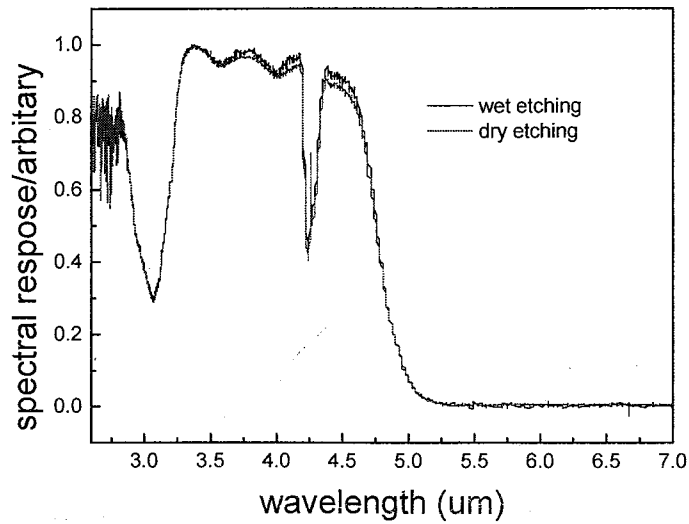


图 5.11 验证芯片的红外响应光谱特性曲线

5.4 小结

本章对干法刻蚀技术制备台面器件的相关工艺的优化与整合进行了研究，并对其在芯片制备工艺中的可行性进行了验证。

通过对干法刻蚀损伤修复工艺对 PN 结性能的影响研究，获得了制备碲镉汞台面结构器件的优化工艺流程。即干法刻蚀台面成形工艺需要在离子注入成结前完成。

通过对台面钝化层生长的分析与研究，通过采用 1%Br/乙醇腐蚀优化台面形貌和适度增加台面钝化层生长厚度的方法，获得了形貌良好的台面器件钝化层。

采用优化后的工艺流程、干法刻蚀技术以及优化后的台面钝化工艺制备获得了像元规模为 320×256 的像元中心距为 $30\mu\text{m}$ 的 n^+ -on-p 焦平面台面器件。通过对其阻抗特性和焦平面性能参数的测试，发现该器件性能只是略低于平面结器件。制备获得了具有正常性能的高密度碲镉汞红外焦平面器件，并完成了实验室成像验证。

采用干法刻蚀技术制备了获得了 128×128 的原位成结器件。通过对该器件的阻抗特性测试与光谱特性测试与分析，证明干法刻蚀技术能够制备获得具有正常性能的原位成结的碲镉汞红外焦平面器件。

第6章 碲锌镉微透镜阵列的制备工艺与评估

6.1 引言

随着红外技术的发展,红外焦平面(FPA)器件的单元像元尺寸被不断减小,为保证单元像元器件具有足够的响应,应尽可能地保证其内部的光生载流子横向收集区面积足够大,对于传统的平面结器件,这就会致使像元之间光生载流子收集区的间距变得越来越小,光生载流子被邻近像元收集的几率被不断增大,其必然会导致像元间的电学串音的增大,从而致使器件分辨率得不到有效提高。

为解决这一难题,有人提出了一种将衬底结构设计为微透镜的红外焦平面新构型(如图6.1) [14,50,51]。该构型红外焦平面通过微透镜的聚光作用将入射光汇聚到光敏元区,从而增大了光生载流子被本像元吸收的几率,同时其还在光敏元间形成光辐射的暗区,增大了光生载流子扩散到邻近像元的距离,也就是减小了光生载流子被邻近像元吸收的几率。因此,这种背集成微透镜的新构型红外焦平面器件可以在不减小器件的光响应的情况下显著地降低器件的像元串音。由此可见,背集成微透镜新结构对于减小焦平面器件串音,提高焦平面探测性能非常有益,而制备该结构的红外焦平面器件的关键就是在碲镉汞衬底材料上制备获得高性能的微透镜阵列。

由于碲锌镉具有透红外光的特性,同时跟碲镉汞具有很好的晶格匹配性,将其用作碲镉汞的外延生长衬底材料可以获得低缺陷高性能的碲镉汞外延薄膜材料。目前,大量的高性能碲镉汞红外焦平面器件都是基于在碲锌镉衬底上外延生长的碲镉汞薄膜材料。所以,本文针对碲锌镉材料,展开了高性能的碲锌镉微透镜阵列的制备工艺的研究。

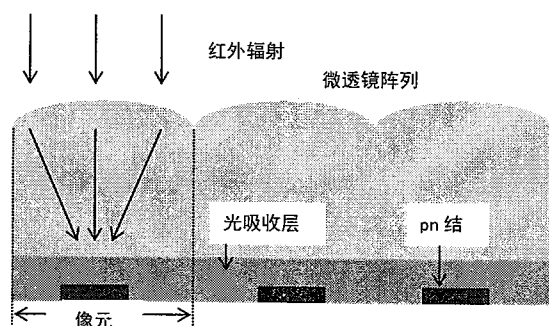


图 6.1 背集成微透镜红外焦平面器件结构图

6.2 碲锌镉微透镜阵列的研究目标

6.2.1 微透镜制备的研究目标

碲锌镉微透镜的作用是将红外焦平面像元的入射光会聚到光敏元响应中心区，以增大光生载流子被本像元吸收的几率，同时增大光生载流子扩散到邻近像元的距离，减小光生载流子被邻近像元吸收的几率，从而减小像元串音。所以碲锌镉微透镜的研究目标主要包括以下几个方面：

- ① 具有高会聚效果的凸面形貌。微透镜表面形貌具有合适的曲率分布，能够将入射光会聚到像元中心区域。
- ② 高占空比。微透镜应具有高的占空比，其大小应该跟像元大小相当，以使入射的红外光都能够被会聚到像元中心区域。
- ③ 光洁的表面。减小入射光的漫反射，增加光的透过率。
- ④ 具有较高的工艺稳定性。能够实现工艺效果的再现，提高微透镜的成品率。
- ⑤ 微透镜会聚焦距的可设计性与工艺的可控性。能够根据器件参数要求，合理地设计微透镜的焦距，并能够通过优化和控制工艺参数，实现设计要求。

6.3 光刻胶热熔+ICP 刻蚀技术制备微透镜阵列的原理

目前，针对碲锌镉的微透镜的制备鲜有报道，但是针对硅、聚合物等材料的微透镜的制备技术已较为成熟。常见的微透镜制备方法有：胶体颗粒自组装法^[122]、离子交换法^[123]、光敏玻璃热成形法^[124]、光刻胶热熔法^[125]、光电反应刻蚀法^[126]、聚焦离子束刻蚀与沉积法^[127]、化学气象沉积法等^[128]、激光直写法^[129]、灰度掩模法^[130]等。在众多的微透镜制作方法中，光刻胶热熔法以其制备工艺简单、成本低廉、设备要求较低、易于控制和制作参数较为稳定等优势，而被大量采用^[131-133]。

本文针对目前 HgCdTe 红外焦平面探测器所普遍使用的碲锌镉衬底材料，采取光刻胶热熔与 ICP 刻蚀的组合刻蚀方法，研究了碲锌镉微透镜阵列的制备工艺，其具体工艺流程如下（如图 6.2）：

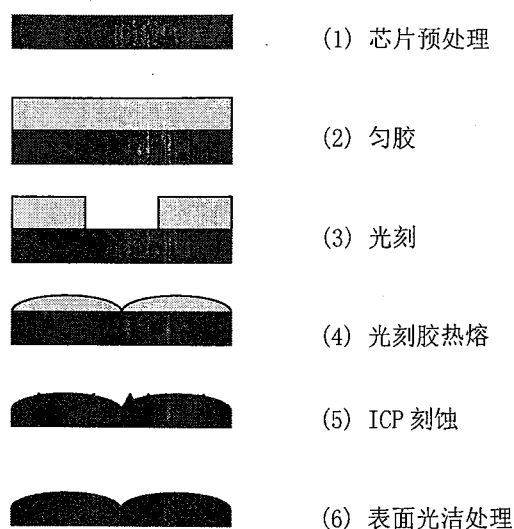


图 6.2 微透镜制备工艺流程图

- (1) 芯片预处理：将制作微透镜阵列的芯片抛光，使其表面平整光滑，然后清洗并烘干。
- (2) 匀胶：在预处理过的芯片上均匀涂覆上合适厚度的光刻胶。
- (3) 光刻：选取合适的光刻图形与光刻参数进行光刻，获得分离的光刻胶图形阵列。
- (4) 光刻胶热回流：将光刻好的芯片，在合适的温度和气氛下，烘烤一定时间，使光刻胶熔融，光刻胶在自身液面张力作用下，形成光刻胶微透镜阵列。
- (5) ICP 刻蚀。将具有光刻胶微透镜阵列的芯片放进 ICP 刻蚀设备腔体中，选取合适的刻蚀参数进行刻蚀，将光刻胶微透镜阵列图形转印到衬底上。
- (6) 表面光洁处理。将 ICP 刻蚀后的微透镜芯片放进一定浓度的化学腐蚀液中，腐蚀一定时间，使微透镜表面更光洁。

6.4 碲锌镉微透镜阵列的性能评估

6.4.1 碲锌镉微透镜阵列性能的评估方法

微透镜制备完成，需要对其聚光性能进行评估。常规的微透镜的性能评估方法有干涉法、电子耦合器件(CCD) 直接成像法、哈特曼波前传感器测量法、刀口振动法、莫尔法、泰伯效应法等^[134]。各种方法所运用的光学原理各有不同，也各有优缺点。但是这些方法大都只是对微透镜会聚效果的直接测量评估，而对微透镜形貌瑕疵对光会聚影响的监测不足，无法为进一步修饰微透镜形貌提供更多的数据。

本文提出了一种依靠激光共聚焦显微镜（Confocal scanning laser microscope、CSLM）辅助光线追迹的微透镜性能间接评估法。这种方法可以对微透镜会聚光线进行模拟跟踪，对于微透镜形貌对会聚效果影响可以直接监测，并可以为进一步修饰微透镜形貌提供数据，结合腐蚀修饰技术可以实现对微透镜会聚焦距的微调与控制。

6.4.2 模拟光线追迹法的微透镜评估原理

本节提供了一种通过光线追迹模拟来评估微透镜形貌质量的方法。其过程为：首先通过激光共聚焦显微镜输出微透镜表面形貌数据，然后结合碲镉汞材料的光学特性参数，根据光的折射定律和 Fresnel 定律模拟追踪光线路径，最后模拟计算输出光强的空间分布、焦距等信息（如图 6.3），从而实现对微透镜性能的间接评估。其具体步骤如下：

1. CLSM 输出表面形貌数据 $Z(x, y)$ 。

2. 根据光的折射定律则有：

$$\vec{n}(x, y) = f(Z(x, y))$$

$$i = i(Z(x, y), n_o)$$

$$\gamma = \gamma(Z(x, y), n_o, n_r)$$

其中： $\vec{n}(x, y)$ 为微透镜表面点 (x, y) 处的法向量， i, γ 分别为为光线入射角和折射角，

而 n_o, n_r 分别为红外光在空气和碲镉汞中的折射率。

3. 选取一个初始焦面 f_0 ，则在该面上的光点空间分布可记为 $p(x, y)$ ：

$$p(x, y) = g(\vec{n}(x, y), i, \gamma)$$

4. 根据 Fresnel 定律，计算焦面上光点的垂直、平行于光传播方向上的偏振光 $T_{\perp}, T_{\parallel}$ 分量的大小：

$$T_{\perp}(x, y) = \frac{2n_o \cos i}{n_r \cos i + n_o \cos \gamma}$$

$$T_{\parallel}(x, y) = \frac{2n_o \cos i}{n_o \cos i + n_r \cos \gamma}$$

5. 根据 $T_{\perp}, T_{\parallel}$ ，将其作为光点光强的加权值 $LR(x, y)$ ，计算焦面 f_0 上的光强分布

$LI(x, y)$ 。

$$LI(x, y) = \sum LR(p, T_{\perp}, T_{\parallel}) \cdot P_0$$

其中, P_0 为没有微透镜作用时的平均光强分布。

6. 改变 f_0 大小, 从新计算 1~5 步, 获得光强在整个空间的分布。其中, 在中心区域光强最大时所对应的 f 即为焦距。

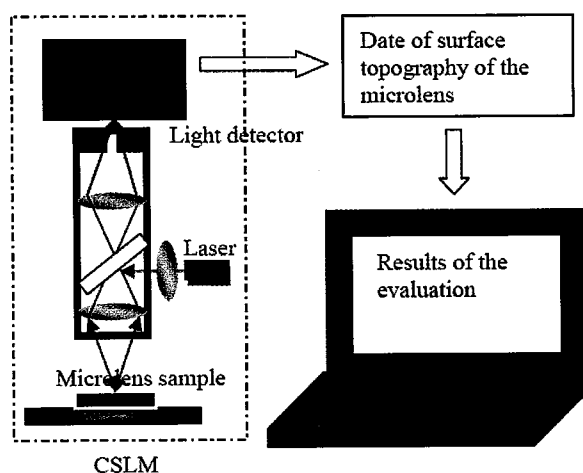


图 6.3 模拟光线追迹法的微透镜评估流程图

6.5 碲锌镉微透镜的制备工艺优化

6.5.1 工艺参数及其对微透镜形貌影响

微透镜阵列的制备核心工艺可以分为 3 部分: 微透镜形貌的光刻胶掩膜的成形 (设计形貌)、碲锌镉微透镜的刻蚀成形 (初始形貌)、碲锌镉微透镜表面的后处理 (最终形貌)。在整个工艺过程中的许多工艺参数都会影响到最后微透镜的形貌 (如图 6.4, 工艺参数对微透镜形貌的影响), 合理选取与控制各个参数就是制备获得高性能的碲锌镉微透镜阵列的关键。

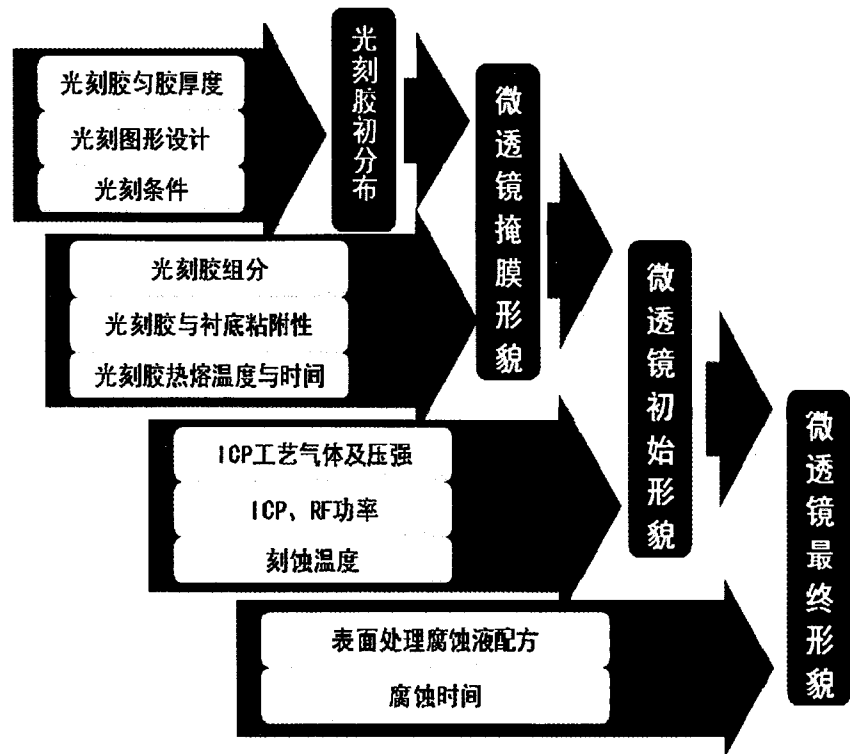


图 6.4 工艺参数对微透镜形貌的影响

微透镜形貌的光刻胶掩膜的成形，需要选择合适的光刻胶、控制匀胶厚度、设计光刻图形、优化光刻条件、以及优化控制好热熔融光刻胶的温度与时间。其最终是要形成高占空比，表面光滑的微透镜形貌的光刻胶掩膜。

碲锌镉微透镜的刻蚀成形，是将具有微透镜形貌的光刻胶掩膜图形通过刻蚀转移到衬底上来的工艺。其最终成形的碲锌镉微透镜形貌受微透镜光刻胶形貌、ICP 刻蚀工艺气体、压强、RF 功率、ICP 功率等工艺参数条件影响。掩膜的形貌与刻蚀的选择比直接决定了刻蚀后的碲锌镉微透镜的剖面曲率，也就决定了微透镜的会聚效果。

碲锌镉微透镜表面的后处理，其主要是通过湿法腐蚀去除刻蚀过程中由于微掩膜效应所引起的表面的微小凸起，从而使微透镜表面更光洁。同时，由于腐蚀的微负载效应，微透镜顶部和底部腐蚀速率不同，该步工艺还可以起到修饰微透镜表面形貌的作用。通过合理的测试反馈技术，可以实时修正微透镜表面形貌，从而实现微透镜形会聚效果的设计。

6.5.2 微透镜掩膜的制备工艺研究

填充因子(占空比)是红外焦平面器件中的重要指标之一,如果填充因子太低,则会使入射

到红外焦平面器件的光能不能得到充分的利用。另外，在同一个像元中，光敏面中心响应率远高于边缘，并且像元之间的光串音主要是由像元的边缘部分的入射光引起的，所以将微透镜集成耦合到探测器光入射面上，可使入射到探测器上的辐射有效地会聚到光敏面中心，从而起到增加光能利用率、提高器件响应率以及减小光串音的作用。所以在设计微透镜时，必须尽可能地增大其填充因子和尽可能地将光会聚于光敏面中心。而高填充因子的微透镜的获得，需要首先获得高填充因子的光刻胶微透镜掩膜。

为提高微透镜掩膜占空比，本实验采用制取正方形微透镜的方案，其理论上的占空比可达 100%。为此本实验采取不完全曝光结合不完全熔融的方式，制备正方形微透镜掩膜。所谓不完全曝光就是控制曝光时间，使光刻胶曝光深度恰好达到衬底时终止，这可以最大限度地获得相互既隔离又具有高占空比的光刻胶图形（如图 6.5）。而不完全熔融是指控制好熔融光刻胶的温度和时间，使光刻胶像元图形的底部未发生移动，而顶部由于液面张力作用而形成了微透镜形状，从而保持了掩膜图形的高占空比特性。而这种技术的实施必须在衬底与掩膜具有极好的粘附特性的情况下才能实施，幸运的是，碲锌镉与光刻胶正好具有极好的粘附特性。

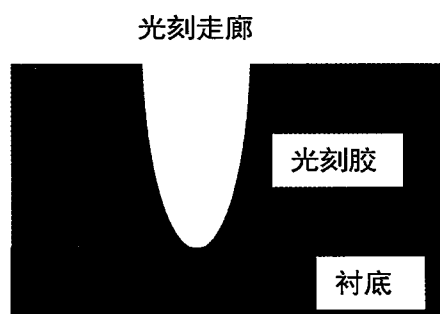


图 6.5 不完全曝光工艺原理图

通过设计光刻走廊宽度渐变的图形并对其进行光刻（如图 6.6）预实验，可以寻找到了不完全曝光条件。本实验针对面阵规模为 128×128 的像元中心距为 $50\mu\text{m}$ 的正方形微透镜阵列，对于厚度为 $7.8\mu\text{m}$ 的 AZ4620 光刻胶，可以通过前烘 30min，曝光 12s，显影 40s 获得了占空比接近 100% 的不完全曝光光刻胶掩膜阵列。

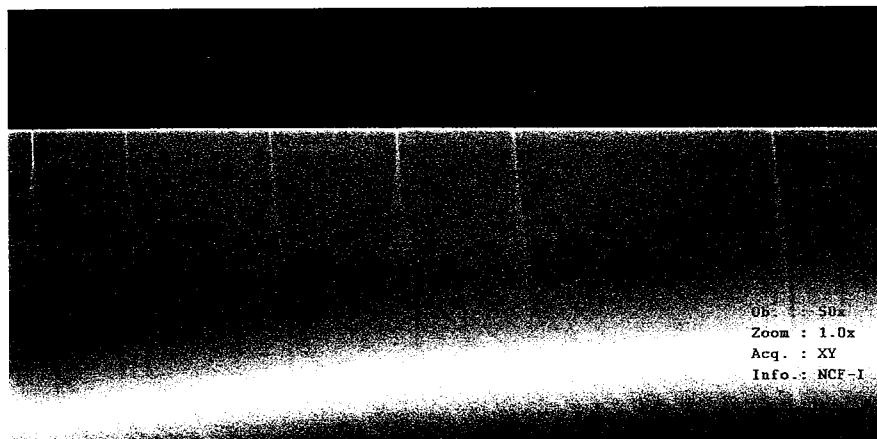


图 6.6 开口尺寸渐变图形辅助光刻条件获取的原理图

对于不完全熔融条件也可以通过不同的热熔时间和温度的预实验来获得。图 6.7 即是在不完全曝光条件下，通过不完全熔融（120℃热熔融光刻胶 10min）获得的高占空比微透镜掩膜阵列。

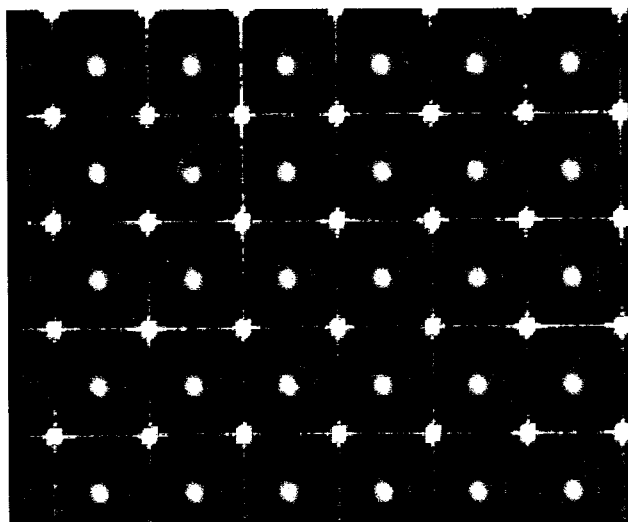


图 6.7 优化工艺获得的高占空比光刻胶微透镜掩膜

6.5.3 工艺稳定性研究

微透镜工艺稳定性直接决定了热熔融光刻胶与ICP组合刻蚀技术制备碲锌镉微透镜的成品率与可行性。而该工艺的稳定性主要受光刻胶热熔融这步工艺的影响。因为光刻胶热熔后极易流动，其形状直接影响转移到衬底上的微透镜形貌，从而影响到制备获得的微透镜的质量。

通过采用热板熔融光刻胶（或ICP等离子体加温熔融）的方式，改变熔融光刻胶温度（或

ICP等离子体加温热熔光刻胶时间），观察光刻胶微透镜掩膜形貌变化（如图6.8所示），发现在 $100^{\circ}\text{C}\sim 130^{\circ}\text{C}$ （ICP加温 $3\sim 4\text{min}$ ）均可得到上节所述的光刻胶底部未移动而顶部形成微透镜形状的掩膜形貌。而随着温度继续升高（或ICP加热时间增加），保持其它各种状态的温度区间或时间区间（态宽容度）较小，甚至没有明显界限。由此可见，为了制作获得这种高占空比的底部未移动而顶部形成微透镜形状的光刻胶微透镜阵列掩膜，光刻胶熔融温度应该控制到 100°C

$\sim 130^{\circ}\text{C}$ （ICP加温 $3\sim 4\text{min}$ ），才能较好地实现工艺上的稳定性和重复性。

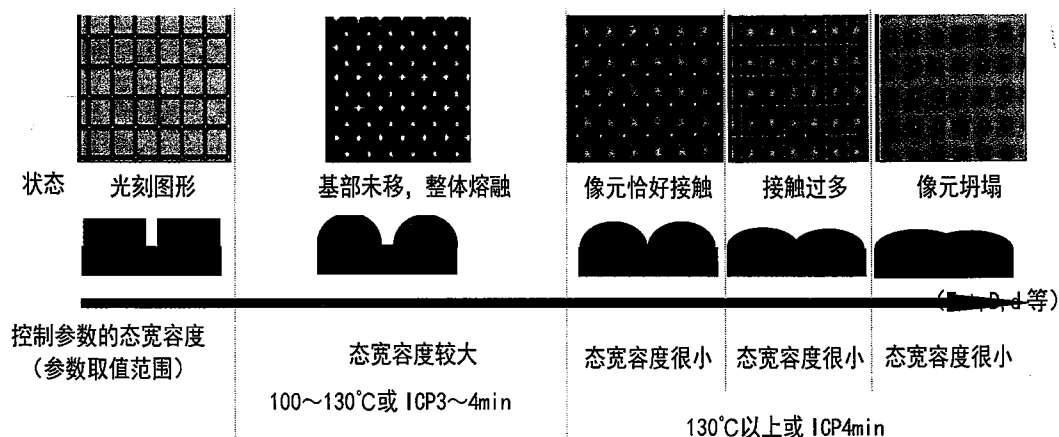


图6.8 光刻胶热熔温度与工艺稳定性关系

6.5.4 微透镜焦距的设计与控制方法

碲锌镉微透镜的焦距主要受光刻胶微透镜掩膜形貌、ICP刻蚀选择比、微透镜后处理腐蚀强度影响。微透镜掩膜形貌在采用上两节所述的工艺基础上，其形貌主要由光刻胶匀胶厚度的决定，而光刻胶的厚度可以通过匀胶条件来控制。ICP刻蚀选择比直接关系到掩膜形貌与刻蚀图形形貌的对应，而刻蚀选择比通过刻蚀工艺条件而得到较好的控制。对于微透镜后处理的腐蚀，由于腐蚀的微负载效应，微透镜顶部和底部腐蚀速率不同，该步工艺还可以起到修饰微透镜表面形貌的作用，采用合适的腐蚀液通过合理的控制腐蚀时间，可以实时修正微透镜表面形貌，改变微透镜的焦距。

由于对于碲锌镉微透镜的刻蚀，不仅要考虑选择比的问题，还要兼顾刻蚀表面的粗糙度、光洁度等问题，所以对微透镜焦距进行设计时，需要先确定ICP刻蚀工艺条件以及选择比。而微透镜表面的后处理是采用湿法腐蚀的方式，其对微透镜形貌只能进行微调，腐蚀太多则会破坏微透镜的会聚效果，所以其自能作为微透镜焦距的微调手段。所以，微透镜的焦距的

设计在采用上两节所述的光刻和热熔融条件下，最主要的是靠采用合理的匀胶条件得到合适的光刻胶厚度来控制。

6.5.4.1 ICP 刻蚀选择比的选择

ICP 刻蚀选择比直接关系到掩膜与刻蚀图形的对应。选择比太大，经刻蚀后，微透镜曲率变小，焦距变大；反之，曲率变大，焦距变小。理论上，我们可以通过控制选择比的大小控制微透镜的形貌。但是，考虑到热熔后的光刻胶微透镜具有较好的表面形貌，可以将入射光以较高的效率会聚到像元中心的事实（由激光共聚焦辅助测试评估表明），我们希望能够将光刻胶微透镜较好地转移到衬底材料上，所以 ICP 刻蚀选择比需要被控制在 0.5~2 以内。而刻蚀选择比可以通过改变刻蚀工艺条件而得到较好的控制。下表是一些典型的刻蚀选择比与刻蚀条件对应关系。

表 6.1 工艺条件与刻蚀选择比

序号	工艺气体组分				ICP 功率 (w)	RF 功率 (w)	气压 (mtorr)	选择比
	Ar	CH ₄	H ₂	N ₂				
1	20	1.2	0	5	600	8	5	0.8
2	20	1.2	0	5	600	15	5	1.3
3	20	1.2	1	5	600	15	5	1
4	20	0	0	0	600	15	5	3

有上表可见，增大物理刻蚀气体组分（Ar），提高 RF 功率可以提高刻蚀选择比，这是因为碲镉汞晶格本身特性，相对于光刻胶具有较高的物理刻蚀产率；在一定的范围内增大 H₂ 组分，会减小刻蚀选择比，这可能是因为 H₂ 与光刻胶的反应更快。

在对 ICP 刻蚀碲镉汞微透镜的刻蚀工艺条件进行选择时，不仅要考虑刻蚀选择比的问题，同时还要兼顾刻蚀表面的粗糙度、光洁度等问题。经过综合考虑，我们认为工艺气体采用 20/1.2/5 的 Ar/ CH₄/ N₂，600w 的 ICP 功率，8w 的 RF 功率，5mtorr 的气压的工艺条件就具备这样的工艺效果。

6.5.4.2 微透镜表面后处理条件

微透镜表面的后处理的工艺，主要是为了实现光洁微透镜表面，微调微透镜焦距的功效。

对于该工艺，需要仔细控制的工艺参数是：1.腐蚀液选取及其配比；2.腐蚀时间。

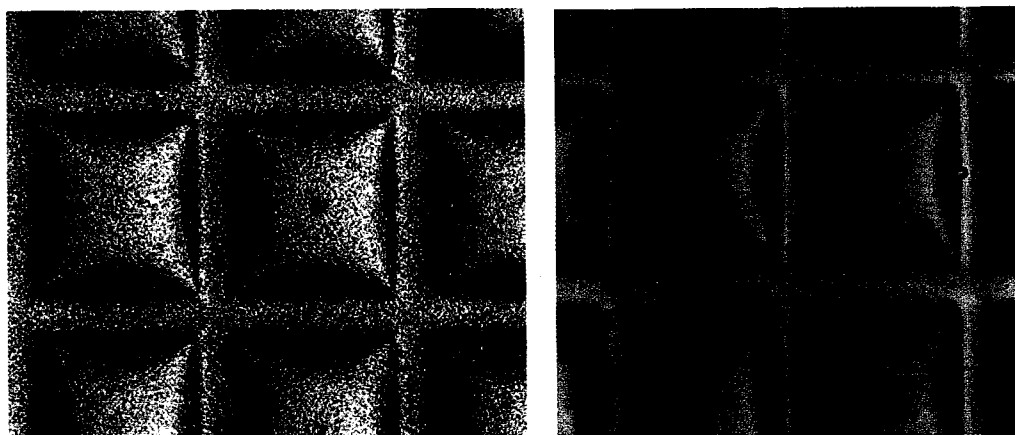


图 6.9 采用不同配比的 Br/乙醇腐蚀液所得到的微透镜表面形貌

图 1 是采用不同配比的 Br/乙醇腐蚀液所得到的微透镜表面形貌，前者由于选择性腐蚀较强，腐蚀后的表面比较粗糙。

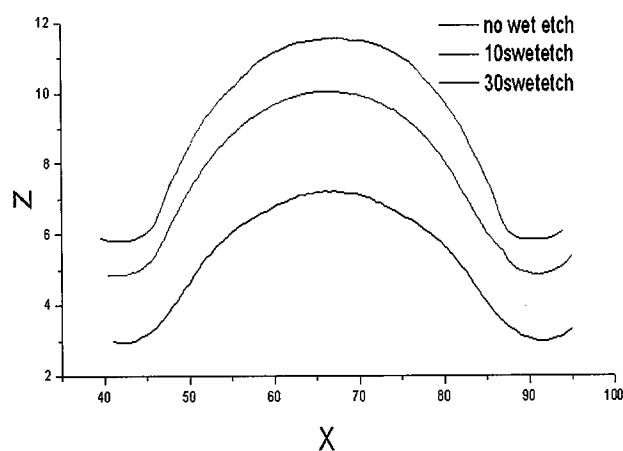


图 6.10 经过不同时间腐蚀后的微透镜剖面形貌变化

湿法腐蚀时间可以控制腐蚀强度，修饰微透镜表面形貌，微调微透镜的焦距。图 6.10 是经过不同腐蚀时间后的微透镜剖面变化。由图可知，微透镜的顶部和底部的腐蚀速度不同，随着腐蚀时间的增加，微透镜剖面曲率减小，焦距增大，同时微透镜的有效聚光区也略微缩小。由激光共聚焦辅助测试评估表明，湿法腐蚀后处理微透镜表面的腐蚀厚度不宜超过 $5\mu\text{m}$ ，否则微透镜的会聚效果变差。

6.5.4.3 微透镜焦距的控制工艺参数的提取

在确定了微透镜阵列图形参数、ICP 刻蚀条件、化学腐蚀参数后，在采用 8.4.2 和 8.4.3

节所述的不完全曝光和不完全热熔融条件下，微透镜的焦距的设计的核心是合理地计算光刻胶匀胶厚度，而微透镜焦距的控制的核心就是获取获得该厚度的光刻胶的工艺参数。光刻胶的匀胶厚度可以通过实验经验模型理论计算获得。

匀胶厚度 h 可由下列公式估算获得：

$$V_{g1} = V_{g2}$$

$$V_{g1} = D^2 * h$$

$$V_s / V_{g2} = S_r$$

$$V_s = \left(\iint_s Z_0(x, y, f) \cdot dx dy \right);$$

其中， V_{g1} ， V_{g2} ， V_s 分别为光刻后光刻胶体积、光刻胶微透镜体积和微透镜体积； D 为光刻图形边长； S_r 为衬底对光刻胶的选择比， $Z_0(x, y, f)$ 是根据预实验结果建模生成的微透镜经验模型的表面形貌高度函数，其主要由微透镜的设计焦距 f 决定，图 6.11 是实验制得的微透镜表面形貌和建模生成的经验模型表面形貌。由以上几式可算得：

$$h = \frac{\iint_s Z_0(x, y, f) \cdot dx dy}{S_r * D^2}$$

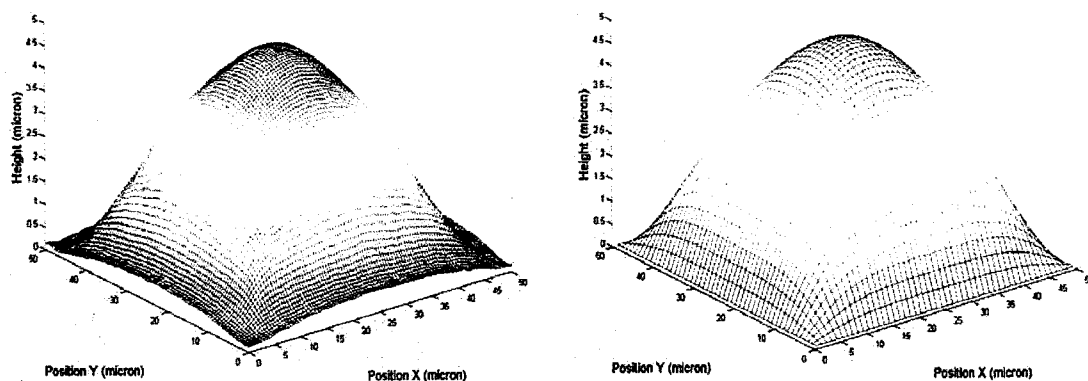


图 6.11(a)实验制得的微透镜表面形貌；(b)建模生成的经验模型表面形貌

本文针对规模为 128×128 的像元中心距为 $50\mu\text{m}$ 的设计焦距为 $200\mu\text{m}$ 的正方形微透镜阵列，选用 AZ4620 光刻胶作为掩膜材料、 $48\mu\text{m} \times 48\mu\text{m}$ 的矩形作为光刻图形，另由实验确定出 S_r 为 0.8，通过计算可得匀胶厚度 h 为 $7.8\mu\text{m}$ 。

确定好匀胶厚度后，可以通过预实验获得匀胶条件与匀胶厚度的关系曲线（如图 6.12）。从图上可以读出特定厚度光刻胶的匀胶条件。对于光刻胶厚度为 $7.8\mu\text{m}$ 的匀胶条

件为：在匀胶时间为 30s 情况下，匀胶转速 3000rpm。

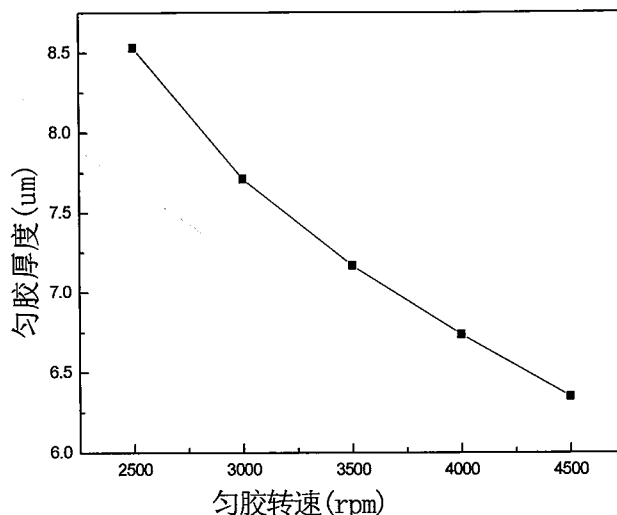


图 6.12 匀胶转速与匀胶厚度关系图

最后的实验结果表明，采用该方法制备的微透镜焦距与设计值的误差约为 10% 左右。

6.6 微透镜阵列的评估结果

针对规模为 128×128 的像元中心距为 $50\mu\text{m}$ 的设计焦距为 $200\mu\text{m}$ 的正方形微透镜阵列，本文采用 AZ4620 光刻胶，匀胶 30s 转速 3000rpm，前烘 30min，曝光 12s，显影 40s 后，在 120°C 热熔融光刻胶 10min 获得高占空比的微透镜掩膜，选取工艺气体为 20/1.2/5 的 Ar/CH₄/N₂，600w 的 ICP 功率，8w 的 RF 功率，5mtorr 的气压的 ICP 刻蚀工艺条件，最后通过 1% Br₂/HBr 腐蚀 30s 处理后，获得了表面光洁，形貌良好的微透镜阵列（如图 6.13）。

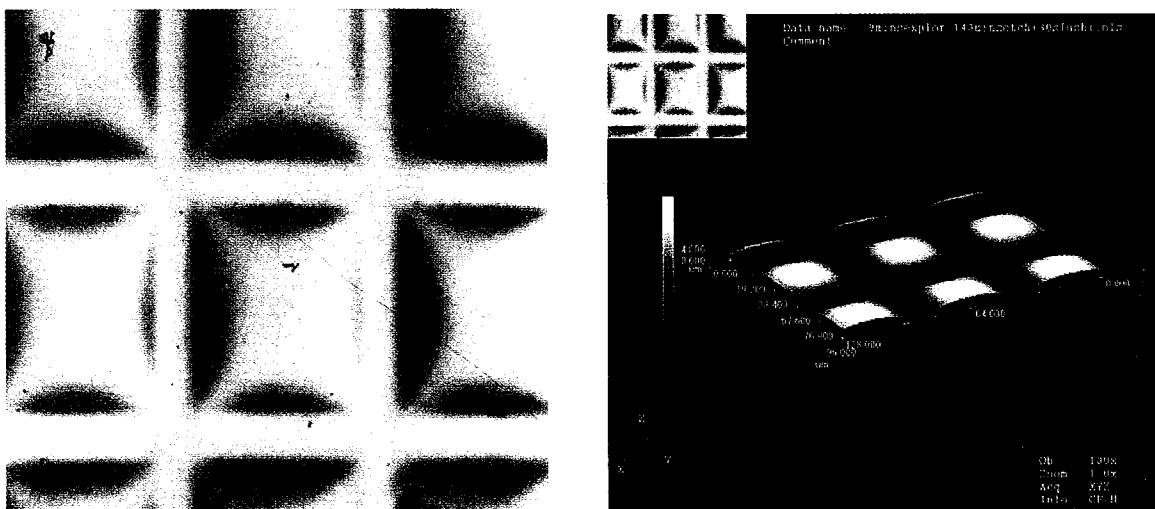
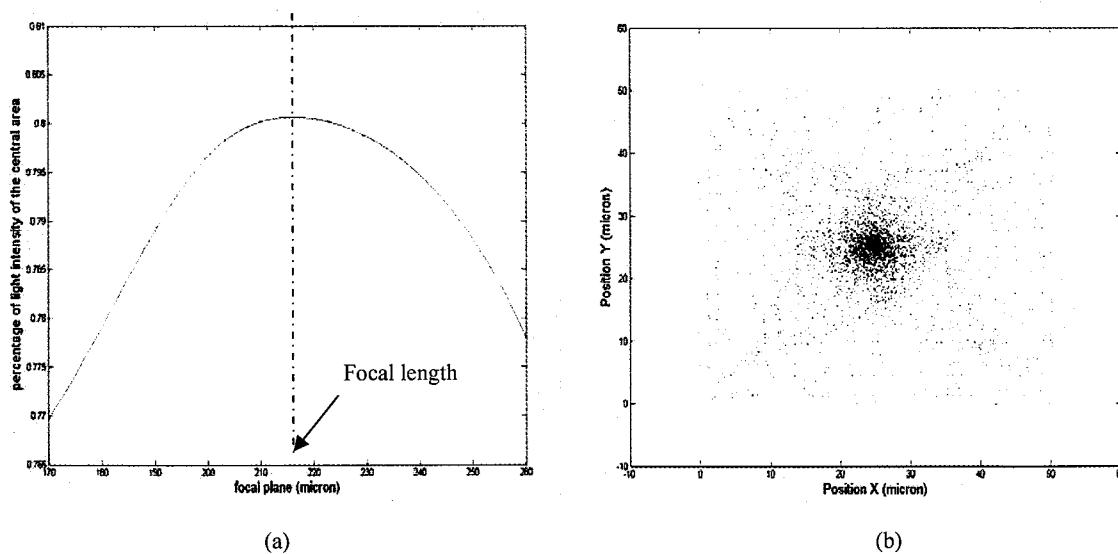


图 6.13 (a) 制备获得的微透镜阵列的表面图; (b) 制备获得的微透镜阵列的三维激光共聚焦显微图

采用激光共聚焦显微镜辅助模拟光线追迹法评估制得的微透镜性能，图 6.14 分别是微透镜中心 30%区域光强纵向分布图、微透镜焦面上光点的点列图、焦面上光强分布等高线图、微透镜焦面上光强分布图。由图可知微透镜的焦距为 $217\mu\text{m}$ ，与设计焦距相当；微透镜能把 80%的入射光都会聚到像元中心 30%的区域，同时，由于微透镜表面的瑕疵仅仅产生 1.6 % 的光串音。



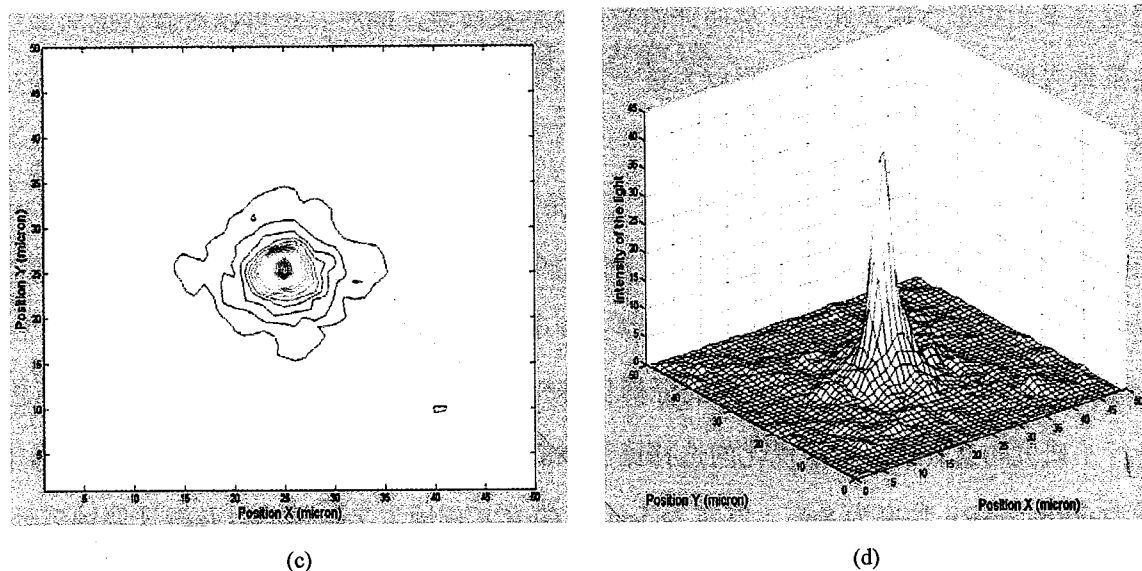


图 6.14 模拟光线追迹法评估微透镜性能的结果：(a)微透镜中心 30%区域光强纵向分布图；(b)微透镜焦面上光点的点列图；(c)焦面上光强分布等高线图；(d)微透镜焦面上光强分布图

采用图 6.14 的光强分布，代入第二章 2.4 节所述模型对该微透镜的串音抑制效果进行模拟计算有：如果添加该微透镜抑制串音后，器件串音将会由未添加前的 5.6%降为添加后的 2.3%。其中模拟计算所采用的器件参数如表 6.2 所示。

表 6.2 串音模拟计算采用的器件参数

材料 Cd 组分	0.300
像元尺寸	50 μm ×50 μm
PN 结尺寸	30 μm ×30 μm
外延层厚度	8 μm
少子寿命	100ns
温度	77k

6.7 小结

本章对碲锌镉微透镜的制备工艺及其性能评估方法进行了研究。

介绍了光刻胶熔融与 ICP 组合刻蚀的方法制备碲锌镉微透镜的原理及其工艺参数对微透镜形貌的影响。

发明了激光共聚焦显微镜辅助模拟光线追迹评估微透镜形貌性能的方法。其不但可以对

微透镜会聚光线进行模拟跟踪，从而评估微透镜形貌质量，同时其还可以对微透镜局部形貌对会聚效果影响进行直接监测，可以为进一步修饰微透镜形貌提供数据，结合腐蚀修饰技术可以实现对微透镜会聚焦距的微调与控制。

通过对微透镜高占空比工艺、高稳定性工艺条件的研究，在对 AZ4620 光刻胶前烘 30min，曝光 12s，显影 40s 后，在 120℃ 热熔融光刻胶 10min 后，获得了占空比接近 100% 的光刻胶微透镜掩膜。

通过对微透镜聚光性能影响因素的分析和研究，对 ICP 刻蚀条件、微透镜后处理工艺条件进行了研究与优化。获得了优化的选择比为 0.8 的工艺气体为 20/1.2/5 的 Ar/CH₄/N₂，ICP 功率为 600w，RF 功率为 8w，气压为 5mtorr 的 ICP 刻蚀工艺条件，以及湿法腐蚀后处理微透镜表面的腐蚀厚度不宜超过 5μm 的经验结论。

通过预实验结果理论建模，获得了决定碲锌镉微透镜焦距的匀胶条件参数的提取方法。通过对制备获得的碲锌镉微透镜的实验评估证明，由该方法提取的工艺条件参数制备的微透镜实际焦距与设计焦距相当。

针对规模为 128×128 的像元中心距为 50μm 的设计焦距为 200μm 的正方形微透镜阵列，通过采用优化的工艺参数，获得了表面光洁，形貌良好的微透镜阵列。通过激光共聚焦显微镜辅助光线追迹的方法对微透镜形貌性能进行评估有：制备获得的碲锌镉微透镜能把 80% 的入射光都会聚到像元中心 30% 的区域，该微透镜能够将器件串音减小到未添加透镜前的一半的水平，初步验证了微透镜的串音抑制效果。

第7章 结束语

7.1 主要结论

在远距离探测和高分辨率应用需求的推动下,碲镉汞红外焦平面探测器因面阵规模被不断增大和像元尺寸被不断减小,其像元间串音也随之越来越大,严重影响了碲镉汞红外焦平面探测器的成像质量的进一步提高。为此,本文展开了具有抑制器件串音作用的碲镉汞探测芯片微结构的理论和工艺技术研究。其主要结论有:

1. 进行了具有抑制器件串音作用的碲镉汞探测芯片微结构的理论设计。理论计算了常规碲镉汞焦平面器件、微台面隔离结构碲镉汞焦平面器件以及背集成微透镜结构的碲镉汞焦平面器件的材料和器件参数与像元串音的关系,分析了微台面隔离结构和背集成微透镜结构的器件的串音抑制效果,获得了抑制串音的探测器结构和优化设计方法。

2. 研究了碲镉汞高占空比微台面探测芯片的 ICP 干法刻蚀工艺。基于光刻胶的预刻蚀改性获得了一种掩膜硬化技术,将光刻胶掩膜的刻蚀选择比提高了约 6 倍。通过对刻蚀工艺气体组分、气压、刻蚀温度等 ICP 刻蚀工艺参数对刻蚀台面占空比的影响的研究,获得了使刻深宽比提高了约 30%、刻蚀速率提高了约 3 倍的碲镉汞 V 形微台面隔离的优化工艺参数,验证了其在像元中心距大于 $15\mu\text{m}$ 的高密度碲镉汞微台面隔离应用中的可行性。

3. 研究了碲镉汞 ICP 干法刻蚀损伤的产生机理以及损伤修复工艺。基于碲镉汞损伤的电学特性,获得了一种简单方便的图形芯片损伤测试技术,并结合剥层霍尔测试方法,获得了材料组分、工艺气体组分、刻蚀温度、直流偏压、刻蚀气压等材料和刻蚀工艺参数与刻蚀损伤的对应关系,较深入认识了碲镉汞的 ICP 刻蚀损伤产生机理。采用热处理方法,研究了材料的载流子输运特性和少子寿命与损伤修复工艺条件的关系,确定了 210°C 左右热处理是修复刻蚀损伤的最佳条件,采用该工艺制备获得的器件的性能接近未经刻蚀材料制备的器件的性能。

4. 进行了碲镉汞微台面芯片的干法刻蚀技术的集成与验证。通过对台面成形工艺对器件 PN 结性能影响的研究,建立了制备台面器件的优化工艺流程。通过优化台面形貌,提高了台面钝化质量。获得了像元规模为 320×256 、像元中心距为 $30\mu\text{m}$ 、结构为 $\text{n}^+\text{-on-p}$ 的焦平面

台面器件，该器件具有一定的性能，完成了技术验证和实验室演示成像。

5. 研究了碲锌镉微透镜列阵的制备工艺及其性能评估方法。采用光刻胶熔融与 ICP 组合刻蚀的方法，分析了工艺参数对微透镜形貌的影响，建立了制备工艺参数提取方法，获得了优化的碲锌镉微透镜阵列的制备工艺。建立了激光共聚焦显微镜辅助光线追迹评估微透镜性能的方法，并基于辅助监测实现了微透镜焦距的微调。获得了面阵规模为 128×128 、像元中心距为 $50 \mu\text{m}$ 的碲锌镉微透镜阵列，能够将 80% 的入射光会聚到像元中心 30% 的区域，并初步验证了微透镜的串音抑制效果。

7.2 存在的问题

在对具有抑制器件串音作用的碲镉汞探测芯片微结构的理论和工艺技术研究过程中，还存在尚待解决的问题。具体如下：

1. 串音的计算模型还比较简单，串音产生机理的理解还需深化。
2. 刻蚀损伤产生机理的大多基于理论假设的间接验证，需要寻找更多直接证据进一步加深认识。
3. 纯干法刻蚀制备的器件与常规平面结器件和湿法腐蚀台面结器件性能还有一定差距，器件噪声还比较大，其产生机理也还不是很清楚，所以需要对于干法刻蚀的台面结器件工艺进行进一步的优化。
4. 背集成微透镜焦平面还未实现器件工艺与微透镜制备工艺的集成，高精度双面光刻与芯片的低应力下的操作仍是一个难题。

7.3 未来展望

在对具有抑制器件串音作用的碲镉汞探测芯片微结构的理论和工艺技术研究过程中，还有很多不足，希望后续的研究能进一步加强和优化，具体如下：

1. 更精确的计算串音的三维理论模型的建立，深化串音产生机理理解。
2. 通过对于干法刻蚀损伤及其修复后的载流子的定量迁移率谱的研究与分析，进一步加深对诱导损伤机理和损伤修复效果的认识。

-
3. 进一步优化优化刻蚀损伤的修复工艺，提高诱导电学损伤的修复效果和工艺稳定性。
 4. 开发与现有 IRFPAs 器件工艺兼容的可释放的芯片贴片技术，实现碲镉汞芯片的低应力加工。
 5. 实现微透镜阵列与红外焦平面器件的工艺集成。