分类号_____ 密级_____

UDC _____ 编号_____

中国科学院研究生院

硕士学位论文

短波红外 InGaAs 探测器的台面成型技术研究

宁锦华

指导教师 龚海梅 研究员 李雪 副研究员

中国科学院上海技术物理研究所

申请学位级别 硕士 学科专业名称 微电子学与固体电子学

论文提交日期_____ 论文答辩日期_____

培养单位 中国科学院上海技术物理研究所

学位授予单位 中国科学院研究生院

答辩委员会主席_____

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

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

论文作者签名：　　年　　月　　日

指导教师签名：　　年　　月　　日

摘　要

由于 InGaAs 短波红外探测器具有可以室温工作、探测率高等优点，InGaAs 线列红外焦平面在国外已经成功用于空间遥感。本论文主要围绕台面结构的 InGaAs 探测器制备的台面成型工艺展开研究，重点研究了感应耦合等离子体刻蚀（ICP）台面成型工艺。同时利用不同的台面成型方式制备了 InGaAs 探测器，通过最终性能的比较，评价得出较好的台面成型方式，为 InGaAs 红外焦平面的研制提供工艺参考。取得结果如下：

ICP 刻蚀中掩膜的材料致密性、侧壁粗糙度和垂直度等对刻蚀效果具有至关重要的影响。为了使刻蚀残留物挥发掉，铟基材料的刻蚀需要对样品加热，在此温度下，光刻胶掩膜会碳化。对于 InGaAs 材料来说，采用 PECVD 生长 SiN_x，选择边缘平整的光刻板，用 SF_6 RIE 刻蚀 SiN_x 后用 HF：NH_4F：H_2O 为 3：6：10 的溶液常温腐蚀 6 秒，可以实现垂直光滑的刻蚀端面。

CH_4/Cl_2 刻蚀铟基材料表面光洁无残留物，但对于制备 2μm 左右台面深度的延伸波长 InGaAs 探测器，平均刻蚀速率过快，同时钻蚀略大了些。Ar 气和 N_2 能加速 Cl_2 的分离，提高刻蚀速率，相比较 Ar 气，N_2 的物理轰击力小，对材料造成的损伤小，同时在刻蚀过程中 N_2 能和材料中的 Si 发生反应生成 SiN_x，在材料表面产生钝化。用 Cl_2/N_2 作为刻蚀气体对 InGaAs 探测器进行台面成型，能得到刻蚀速率稳定可控，刻蚀后的表面光洁无残留物，图形保真度好。

在不同的直流偏压、ICP 功率、气体总流量和气体组分等参数下进行台面成型，并从刻蚀速率、刻蚀垂直度、刻蚀表面粗糙度等几个方面对刻蚀质量做了评估和分析。在摸清铟基材料刻蚀规律的基础上，找到了可用于常规波长和延伸波长 InGaAs 探测器制备的 ICP 刻蚀参数。

ICP 刻蚀与湿法腐蚀台面成型的八元台面器件具有相同的性能。但是在器件性能相当的情况下，ICP 具有图形保真度好，刻蚀速率稳定可控的优点，因而更适用于 InGaAs 探测器的工程制作，特别在小光敏元探测器的制备中，ICP 的优势将更明显。

关键词： 铟镓砷，磷化铟，探测器，感应耦合等离子体刻蚀

Abstract

Because InGaAs short wave infrared (SWIR) detector can work in room temperature with high detectivity, InGaAs linear infrared focal plane arrays (FPAs) have been used in aerospace remote sensing. In this dissertation, the inductively coupled plasma etching (ICP) technologies of the InGaAs mesa detectors have been studied. InGaAs mesa detectors were fabricated by using ICP etch method and wet etch method. Through comparing of the performance, we can better evaluate the mesa formation method.

The process relies on plasma heating of the sample to provide fast etch rates, vertical etch profiles and clean surfaces, therefore photoresist masking is not recommended since the resist will burn due to high sample temperature. Sidewall roughness is usually related either to vertical striations caused by mask edge roughness, or to faceting caused by excessive mask erosion. Faceting can be reduced by choosing etch conditions which have a higher selectivity to the mask. SiN_x mask is recommended. A dielectric layer of 6300 Å SiN_x was deposited by PECVD and patterned by lithography, dry etched using a SF6 reactive ion etching, then wet etched by HF：NH_4F：H_2O equals 3:6:10 for six seconds.

Using CH_4/Cl_2 as etching gas can get smooth surface, but the etch rate is too fast for fabricating InGaAs photodetector with about 2μm mesa depth. N_2 will cause less damage than Ar. Using Cl_2/N_2 as etching gas is recommended.

The effect of gas content, ICP power, dc bias, pressure and temperature on etch rate and surface morphology was discussed. A stable dry etch technique was obtained with stable and controllable etch rate, clean and smooth etch surface, good pattern profile and good uniformity.

8 pixels InGaAs mesa detectors were fabricated with ICP etch method and wet etch method. The detectors are of the same performance. As using ICP etch technique can get stable etch rate and vertical profile, it better than wet etch technique especially in smaill size mesa detectors.

KEY WORDS： InGaAs, InP, Detector, ICP

目录

摘　要.....I
Abstract.....II
1 绪论.....1
1.1 红外辐射和大气窗口.....1
1.2 红外探测器.....2
1.2.1 红外探测器的原理及分类.....2
1.2.1.1 热探测器.....3
1.2.1.2 光子探测器.....4
1.2.2 红外探测器的发展简史.....5
1.3 短波红外铟镓砷探测器.....7
1.3.1 短波红外与铟镓砷材料.....7
1.3.2 短波红外铟镓砷探测器的发展.....9
1.3.2.1 国外研究现状.....9
1.3.2.2 国内研究现状.....12
1.3.2.3 短波红外铟镓砷探测器的发展趋势.....13
1.3.3 短波红外铟镓砷探测器的类型.....14
1.3.3.1 正照和背照结构探测器.....14
1.3.3.2 常规波长和延伸波长探测器.....14
1.3.3.3 平面型和台面型 InGaAs 探测器.....15
1.3.4 台面型 InGaAs 探测器制备的关键技术.....16
1.3.4.1 台面刻蚀.....16
1.3.4.2 器件钝化.....16
1.3.4.3 电极接触.....16
1.4 本论文主要内容.....17
2 感应耦合等离子体刻蚀基础.....18
2.1 湿法刻蚀和干法刻蚀.....18
2.1.1 湿法刻蚀.....18
2.1.2 干法刻蚀.....19
2.2 感应耦合等离子体（ICP）刻蚀技术.....22
2.2.1 感应耦合等离子产生方式.....22
2.2.2 感应耦合等离子刻蚀中的化学过程.....23
2.2.3 刻蚀速率与刻蚀剖面.....24
2.2.4 尘埃颗粒的产生与控制.....26
2.2.5 感应耦合等离子刻蚀设备.....27

2.3 本章小结 27
3 铟镓砷探测器制备的 ICP 刻蚀方法研究..... 28
3.1 III-V 族 ICP 刻蚀气体的选择..... 28
3.2 国产 ICP-98C 型 ICP 刻蚀研究 29
3.2.1 常规波长 ICP 刻蚀研究..... 29
3.2.1.1 刻蚀速率 30
3.2.1.2 AFM、EDX 和 SEM 表征..... 31
3.2.2 延伸波长 ICP 刻蚀研究..... 32
3.2.2.1 刻蚀速率 32
3.2.2.2 刻蚀表面状况 33
3.3 牛津 ICP180 型 ICP 刻蚀研究 34
3.3.1 ICP 刻蚀参数对 In 基材料刻蚀结果的影响 34
3.3.1.1 刻蚀速率 35
3.3.1.2 侧壁垂直度 36
3.3.1.3 表面粗糙度 38
3.3.1.4 小结 38
3.3.2 常规波长 InGaAs 探测器的 ICP 刻蚀研究..... 38
3.3.2.1 掩膜的制备 38
3.3.2.2 Cl_2/N_2对常规波长 InGaAs 探测器的 ICP 刻蚀研究..... 41
3.3.2.3 小结 44
3.3.3 延伸波长 InGaAs 探测器的 ICP 刻蚀研究..... 45
3.3.3.1 CH_4/ Cl_2对延伸波长 InGaAs 探测器的 ICP 刻蚀研究.... 45
3.3.3.2 Cl_2/N_2对延伸波长 InGaAs 探测器的 ICP 刻蚀研究..... 49
3.4 本章小结 52
4 铟镓砷探测器的制备和性能表征..... 53
4.1 InGaAs 探测器制备的典型工艺流程..... 53
4.1.1 外延片清洗..... 54
4.1.2 台面成型..... 54
4.1.2.1 湿法腐蚀 54
4.1.2.2 常规工艺 55
4.1.2.3 ICP 刻蚀结合湿法腐蚀..... 56
4.1.3 钝化..... 57
4.1.4 生长电极和切片..... 57
4.2 InGaAs 探测器的性能表征..... 58
4.2.1 I-V 特性、零偏压电阻及暗电流 58

4.2.2 相对响应光谱.....60
4.2.3 信噪比和探测率.....61
4.3 本章小结.....64
5 全文总结和展望.....65
5.1 全文总结.....65
5.2 展望.....66
参考文献.....67
攻读硕士学位期间发表的论文.....71
致谢.....72

1 绪论

1.1 红外辐射和大气窗口

红外辐射是介于可见光和微波之间的波长为 0.75～1000μm 的电磁波，是一种人眼不可见的辐射。在电磁波谱中，我们把人眼可直接感知的 0.4～0.75μm 波段称为可见光波段，而把波长从 0.75～1000μm 的电磁波称为红外波段，红外波段的短波端与可见光红光相邻，长波端与微波相接，其覆盖光谱区之宽是可见光、X-光等其它有意义的电磁波段不能相比的。根据普朗克辐射定理，所有绝对温度大于零度的物体都能辐射红外线，因而也就包含更多的内容，有更多的应用[1]。

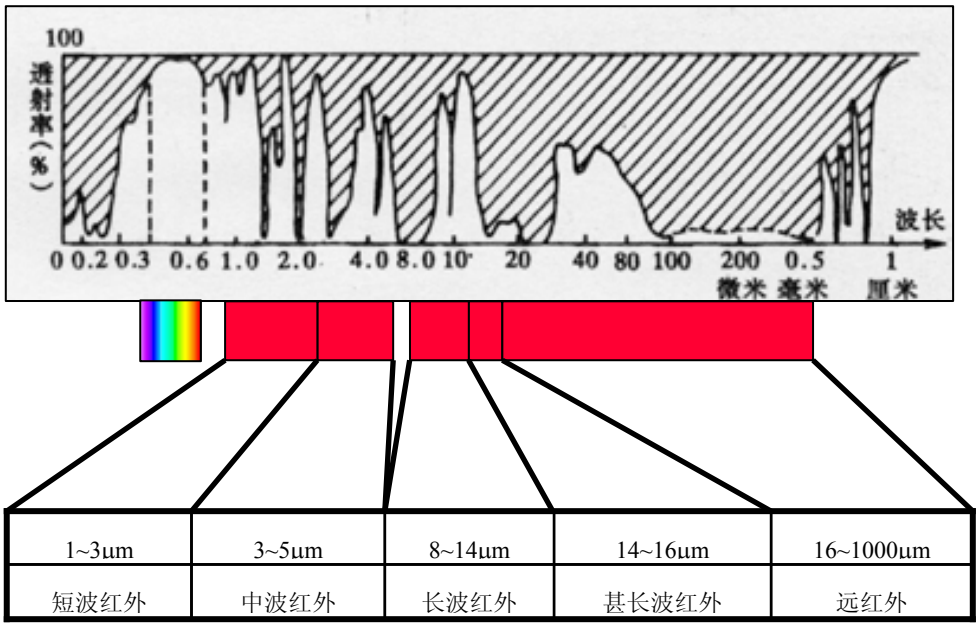

图 1-1 大气对红外光的透射

红外辐射在空气中传播会发生反射、吸收和透射，其中水汽分子是红外辐射的主要吸收体。如图 1-1 所示较强的水汽吸收带位于 0.71～0.735μm，0.81～0.84μm，0.89～0.99 微米，1.07～1.20μm，1.3～1.5μm,1.7～2.0μm，2.4～3.3μm，4.8～8.0μm。在 13.5～17μm 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[2]。其中最宽的红外窗口在 8～13μm 处（9.5μm 附近有臭氧的吸收带）。17～22μm 是半透明窗口。22μm 以后直到 1 毫米波长处，由于水汽的严重吸收，对地面的观测者来说完全不透明。但在海拔较高、

空气干燥的地方，24.5～42μm 的辐射透过率达 30～60％。在海拔 3.5 公里高度处,能观测到 330～380μm、420～490μm、580～670μm （透过率约 30％）的辐射，也能观测到 670～780μm（约 70％）和 800～910μm（约 85％）的辐射。红外辐射有三个主要“大气窗口”，为 1～3μm 波段，3～5μm 波段，8～14μm 波段。大气窗口主要有以下这些：

0.3-1.4μm，可见光到近红外，这是氧气、水汽的吸收区，反射光谱区，可用光学摄影、扫描方式成像。

1.4-1.9μm，近红外，这是水汽吸收区，反射光谱区，可用扫描方式成像。

1.9-2.7μm，这是二氧化碳吸收区，反射光谱区，可用扫描方式成像。

2.7-4.3μm，中红外，这是水汽、二氧化碳吸收区，反射光谱区，可用热探测。

4.3-5.9μm，这是二氧化碳、臭氧吸收区，热辐射区，可用热探测。

8-14μm，远红外，这是二氧化碳、氧气、水汽的吸收区，热辐射区，可用热探测。

16-24μm，这是半透明区，可用雷达探测。

1.2 红外探测器

将入射的红外辐射信号转变成电信号输出的器件叫做红外探测器。红外辐射是波长介于可见光与微波之间的电磁波，人眼察觉不到。要察觉这种辐射的存在并测量其强弱，必须把它转变成可以察觉和测量的其他物理量。一般说来，红外辐射照射物体所引起的任何效应，只要效果可以测量而且足够灵敏，均可用来度量红外辐射的强弱。现代红外探测器所利用的主要是红外热效应和光电效应。这些效应的输出大都是电量，或者可用适当的方法转变成电量。一个红外探测器至少有一个对红外辐射产生敏感效应的物体，称为响应元。此外，还包括响应元的支架、密封外壳和透红外辐射的窗口。有时还包括致冷部件、光学部件和电子部件等。

1.2.1 红外探测器的原理及分类

不同种类的物体发射出的红外光波段是有其特定波段的，该波段的红外光处在可见光波段之外。因此人们可以利用这种特定波段的红外光来实现对物体目标的探测与跟踪。将不可见的红外辐射光探测出并将其转换为可测量的信号的技术就是红外探测技术。从目前应用的情况来看，红外探测有如下几个优点：环境适应性优于可见光，尤其是在夜间和恶劣天候下的工作能力；隐蔽性好，一般都是被动接收目标的信号，比雷达和激光探测安全

且保密性强，不易被干扰；由于是目标和背景之间的温差和发射率差形成的红外辐射特性进行探测，因而识别伪装目标的能力优于可见光；与雷达系统相比，红外系统的体积小，重量轻，功耗低；探测器的光谱响应从短波扩展到长波；探测器从单元发展到多元、从多元发展到焦平面；发展了种类繁多的探测器和系统；从单波段探测向多波段探测发展；从制冷型探测器发展到室温探测器；由于红外探测技术有其独特的优点从而使其在军事国防和民用领域得到了广泛的研究和应用，尤其是在军事需求的牵引和相关技术发展的推动下，作为高新技术的红外探测技术在未来的应用将更加广泛，地位更加重要。红外探测器作为红外整机系统的核心关键部件，红外探测器的研究始终是红外物理与技术发展的中心。自 1800 年 Herschel 发现太阳光谱中的红外线时所用的涂黑水银温度计为最早的红外探测器以来，随着红外实验和理论的发展，新器件不断涌现。红外探测器按其工作原理主要可分为热探测器和光子探测器两大类。

1.2.1.1 热探测器

热探测器接受红外辐射后，先引起温度变化，温度变化由吸收的热辐射能量引起，与红外辐射波长没有关系。温度升高，可以使探测材料产生温差电动势、电阻率变化，自发极化强度变化，或者气体体积与压强变化等，测量这些物理性能的变化就可以测定被吸收的红外辐射能量或功率。分别利用上述不同性能可制成多种热探测器：

1. **液态的水银温度计及气动的高莱池**（Golay cell）

利用了材料的热胀冷缩效应，温度升高，材料体积膨胀，测材料体积变化，来确定红外辐射的强度。在 1947 年经高莱改进以后，用光电管测量容器壁的微小变化，使灵敏度大大提高，这种气动探测器又称为高莱池。

2. **热电偶和热电堆**

利用了温度梯度可使不同材料间产生温差电动势的温差电效应。两种不同的导体相接时，如果两个接头处于不同的温度，电路内就产生一个毛动势，连接外电路就有电信号输出，这就是温差电偶。多个温差电偶连接在一起构成一个响应元件，称为温差电堆。

3. **石英共振器非制冷红外成像列阵**

石英共振器非制冷红外成像列阵利用共振频率对温度敏感的原理来实现红外探测。

4. **测辐射计**

测辐射热计利用材料的电阻或介电常数的热敏效应—辐射引起温升改变材料电阻—用以探测热辐射。因半导体电阻有高的温度系数而应用最多，测温辐射热计常称“热敏电

阻”。另外，由于高温超导材料出现，利用转变温度附近电阻陡变的超导探测器引起重视。如果室温超导成为现实，将是 21 世纪最引人注目的一类探测器。

5. 热释电探测器

有些晶体，如硫酸三甘酞、铌酸锶钡等，当受到红外辐射照射温度升高时，引起自发极化强度变化，结果在垂直于自发极化方向的晶体两个外表面之间产生微小电压，由此能测量红外辐射的功率。

1.2.1.2 光子探测器

光子探测器吸收光子后，本身发生电子状态的改变，从而引起内光电效应和外光电效应等光子效应，从光子效应的大小可以测定被吸收的光子数。按电信号输出的不同原理，光子探测器主要分为如下几种探测器：

1. 光电导探测器

光电导探测器又称光敏电阻。半导体吸收能量足够大的光子后，体内一些载流子从束缚态转变为自由态，从而使半导体电导率增大，这种现象称为光电导效应。利用光电导效应制成的光电导探测器分为多晶薄膜型和单晶型两种。

2. 光伏探测器

光伏探测器主要利用 p-n 结的光生伏特效应。能量大于禁带宽度的红外光子在结区及其附近激发电子空穴对。存在的结电场使空穴进入 p 区，电子进入 n 区，两部分出现电位差，外电路就有电压或电流信号。与光电导探测器比较，光伏探测器背景限探测率大 40%，不需要外加偏置电场和负载电阻，不消耗功率，有高的阻抗。

3. 光发射-Schottky 势垒探测器

金属和半导体接触，形成 Schottky 势垒，红外光子透过 Si 层被 PtSi 吸收，使电子获得能量跃迁至费米能级，留下空穴越过势垒进入 Si 衬底，PtSi 层的电子被收集，完成红外探测。

4. 量子阱探测器

量子阱探测器（QWIP）是将两种半导体材料用人工方法薄层交替生长形成超晶格，在其界面有能带突变，使得电子和空穴被限制在低势能阱内，从而能量量子化形成量子阱。利用量子阱中能级电子跃迁原理可以做红外探测器。因入射辐射中只有垂直于超晶格生长面的电极化矢量起作用，光子利用率低；量子阱中基态电子浓度受掺杂限制，量子效率不高；响应光谱区窄；低温要求苛刻。

1.2.2 红外探测器的发展简史

从 1800 年红外探测器的发展历史来看，伴随着材料与制造工艺的不断进步与发展，各种结构新颖且性能优良的红外探测器件相继问世，器件性能也在逐步提高，如更高的灵敏度，更快的响应速度，更高的工作温度，更低的噪声，更宽的波长覆盖范围等。表 1-1 中列出了红外探测技术发展史上的一些重大事件。

表 1-1 红外探测技术发展简表[3]

1800 年 W. Herschel 发现热红外辐射； 1804 年 J. Leilie 研究了热辐射的物理本质和其在一些物质中的吸收和传播； 1822 年 T. Seeback 发现铜-锑结的热电效应； 1830 年 L. Nobili 采用热偶对热辐射进行了测量； 1833 年 L. Noblli & M. Melloni 将一系列锑-铋热偶串接在一起，制造出第一个热电堆； 1839 年 M. Melloni 研究了大气对太阳光谱的吸收特性，并鉴别出其中的水气吸收； 1840 年 J. Herschel 发现了红外光的三个大气窗口； 1859 年 G. Kirchoff 建立了红外辐射的吸收与发射关系； 1873 年 W. Smith 研究了硒（Se）中的光电导效应； 1879 年 J. Stefan 确立了黑体辐射强度与温度的经验关系； 1884 年 L. Boltzmann 从热动力学角度揭示了 J. Stefan 发现的经验关系； 1894-1990 年 J. Rayleigh & W. Wien 研究了黑体温度与辐射； 1900 年 M. Planck 通过引入量子的概念建立了黑体辐射定律； 1903 年 W. Coblentz 通过红外光谱测量对星体温度进行 了研究； 1905 年 A. Einstein 确立了光电理论； 1914 年 人们开始利用辐射仪进行探测，并开始将其应用于鱼类制导；	1917 年 T. Case 研制出了 TeS 的近红外光电导探测器(内光电效应！)； 1933 年 E. Kutzscher 展示了 PbS 在短波红外波段的光电导特性的研究和应用 红外焦平面技术开始得到人们的广泛关注和发展 红外遥感技术也得到了较快的发展 1935-1945 年 采用铅盐材料的探测器工作波长不断拓展(PbS~4μm; PbTe~6μm; PbSe~8μm)； 1941 年 R. Ohl 发现硅基 p-n 结的光伏效应； 1958 年 M. Lesser 等人研制出了响应波长至 6μm 的 InSb 探测器(第一个 III-V 材料的光电探测器！)； 1959 年 W. Lawson 等人首次报道了 HgTe -CdTe 混晶体系； 1965 年 G.. Weckler 在 Si 探测器阵列和 MOS 管上首次实现了单片集成； 1970 年以后： IR-CID、IR-CCD、IR-CMOS 等红外器件问世 HgCdTe 材料的光电导探测器成为主流红外探测技术 MBE 和 MOCVD 等精确控制的异质外延技术逐渐成熟 1980 年 C. T. Elliott 发明了具有内部信号处理功能的 SPRITE 结构 HgCdTe 探测器； 1980 年以后： 光纤通信的迅猛发展， InGaAs 的高速探测器被广泛射波长的关系； 1985 年以后，Pt-Si 肖特基 FPA、IR-CCD、IR-CMOS 阵列逐渐投入量产并被广泛应用； 1985 年 L. C. West 研制成功了第一个 GaAs/AlGaAs 的 QWIP 探测器； 1991 年 J. L. Johnson 研制出第一个基于 II 型 InAs/GaInSb 超晶格探测器； 1997 年 第一个 QD 探测器诞生；

总结表 1-1 红外探测器的发展经历了三个阶段：

20 世纪 60 年代中期以前为第一阶段。主要是硫化铅(PbS)、锑化铟(InSb)、锗掺汞(Ge:Hg)红外探测器，分别工作在 1~3μm 和 3~5μm、8μm~14μm 的大气窗口。第一个实用的红外探测器是 1940 年前后研制成功的硫化铅(PbS)探测器，这是适用于 1μm~3μm 短波红外辐射的探测器。此后，为扩大波长范围，50~60 年代人们又研制出锑化铟(InSb)、锗掺汞(Ge:Hg)等多种红外探测器，其工作波段分别对应 3~5μm、8~14μm 等大气红外窗口。这时的红外探测器受背景和气象条件的影响较大，抗干扰能力、特别是对于云层反射的阳光的抗干扰能力弱，使其应用受到很大限制。

20 世纪 60 年代中期 70 年代末为第二阶段。这一阶段主要应用的探测材料是 HgCdTe。在 1959 年英国皇家雷达研究所 W.D.Lawson 等[4]首次报道半导体 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 后，科学家们很快就认识到这种材料的几乎各种基本物理性质都适宜于红外器件，用它可能做出任何指定波段的优质红外探测器。这是因为 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 是二元化合物 CdTe 和 HgTe 的连续固熔体，其中 CdTe 是半导体，禁带宽度约 1.6eV(77K)，HgTe 是半金属，禁带宽度约 -0.3eV(77K)，两者均随温度变化，所以 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 的禁带宽度 Eg 依赖于工作温度和组分 x 值。在一定温度下，禁带宽度可由 x 决定，从而通过调节 x 值可得到不同的 Eg，即得到不同波段的探测器。通过连续改变其禁带宽度(从 0~1.6eV)，可以获得几乎覆盖所有重要红外大气窗口的响应波段。此外 HgCdTe 材料还具有许多可贵的性质，例如电子有效质量小而本征载流子浓度低，故反向饱和电流小，探测器噪声低，探测率高；介电常数小，减小了器件电容，提高了频率响应；电子迁移率高；载流子寿命长；本征跃迁，吸收系数大，量子效率高；表面生长的氧化物化学稳定，可得到表面态密度低的半导体—氧化物界面；热膨胀系数比较接近硅，易于制造与硅 CCD 混成的阵列器件。因此 HgCdTe 晶体的出现，改变了红外探测器的发展面貌。在 60 年代初，许多科学发达的国家先后对 HgCdTe 这一材料[5]开展了研究六十年代中期，实用的 HgCdTe 红外探测器研制成功，使 8~14μm 的探测器的工作温度提高到了液氮温度，同时将中短波的工作温度提高到了室温或近室温。在 70 年代内，对 $Hg_{1-x}Cd_xTe$ 材料及器件的研究有了更飞速的进展。从熔体生长晶体技术的提高，到外延生长薄膜晶体的广泛应用，研制成对应三个大气窗口的红外探测器[6]。器件的规模也从单元发展到线列，与用其它材料做的同波段探测器相比，它们的工作性能更好。

20 世纪 80 年代初至今为第三阶段。进入八十年代，随着红外系统的不断发展和使用人们研制出第三代红外探测器—红外焦平面列阵器件[7]。焦平面列阵器件包括了探测器和处理电路两个部分，使得从焦平面引出杜瓦瓶的引线数目降低，杜瓦瓶结构大大简化，同时也简化了后续的信号处理。焦平面器件与原有器件相比具有无可比拟的优越性。首先，

由于它的探测元数目大，密度高，因而使系统具有高灵敏度和高分辨率，可用它制作凝视型红外系统；其次，由于与信号处理电路直接相连，不再需要许多分离的处理电路，使系统设计时增加了灵活性。正是由于焦平面器件具有如此多的优点，各技术发达国家投入大量的人力和资金进行研究，而且发展方向已从单色向双色或者多色发展[8]，从致冷成像向非致冷成像发展。目前 HgCdTe 红外焦平面已发展到了 4096×4096 元的规模。

虽然 HgCdTe 材料相对于以往的红外探测器材料来说有着许多优势，但 HgCdTe 材料制作的探测器同样存在着很大的局限性，主要表现为：HgCdTe 的晶体制备困难，材料具有较高的本征缺陷密度且在较高温度或辐射作用下性能不稳定；HgCdTe 要求有极为精确的组分控制，精确的确定其禁带宽度，以控制材料的光响应截止波长，这就要求整个晶片有很高的组分均匀性，这使得制备探测器阵列难度增大；HgCdTe 材料本身存在着严重的隧道效应，用这种材料制作的器件在 77K 工作时隧道电流大，为了使其能够灵敏的探测出红外辐射量的微弱变化，必须在低温制冷条件下工作，以抑制热噪声的影响，因而装置复杂，价格昂贵，使用不方便，在应用方面受到诸多限制。焦平面阵列的发展方向之一是阵列元数逐渐增大，像元间距逐渐减小，因此需要在最小的间距内获得最高的信号处理能力和最多的可存电荷。这就要求材料的质量要好，量子效率高，且探测器的光敏面积要控制精确。随着红外焦平面阵列尺寸的增大和像元间距的减小，HgCdTe 探测器阵列与硅读出电路之间热失配问题逐渐突出起来。

1.3 短波红外铟镓砷探测器

1.3.1 短波红外与铟镓砷材料

在三个红外大气窗口中，1~3μm 波段属于短波，由于很多物质在该波段具有独特的光谱特性，可为光谱分析、红外成像等提供低成本、高可靠和实用性强的成像技术支持，所以在航空航天、医学成像、产业测温、安全防范等民用领域和精确武器制导、红外报警与识别、侦察与监视等军事领域有广泛的应用前景。制备该波段红外探测器的材料主要有 InGaAs 基 III-V 族化合物半导体和 HgCdTe 等。

与 HgCdTe 相比，III-V 族的 InGaAs 材料具有直接带隙，高电子迁移率，可与 InP 晶格匹配生长等优点，由它制作的探测器量子效率高，灵敏度高，结构简单，成本低，重量轻，使用方便，此外，InGaAs 探测器可室温工作，且具有很高的性能，使红外探测系统摆

脱制冷的制约，从而在仪器的小型化、降低红外系统的成本等方面具有很大的竞争力。在不同的波段及温度时，InGaAs 探测器比 HgCdTe 探测器有更好的性能[9]。这些优势使 InGaAs 探测器受到广泛关注。

直接带隙的三元化合物 $In_{1-x}Ga_xAs$ 是 III-V 族的赝二元系半导体材料[10, 11]。$In_{1-x}Ga_xAs$ 具有高迁移率、良好的抗辐照特性等优点，可由 InAs 与 GaAs 以任何配比形成，其晶格常数随组分的变化近似为线性，从 GaAs 的 5.6533 Å 变化到 InAs 的 6.0583 Å；其禁带宽度可在 InAs 的 0.35eV 与 GaAs 的 1.43eV 之间变化，对应的截止波长分别为 3.5μm 和 0.87μm，很好的覆盖了 1~3μm 的大气窗口，是制备短波红外探测器的合适材料。$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 和 InP 材料可以做到完全晶格匹配，因此可以在 InP 衬底上生长出高质量的外延层，制备出性能优越的器件。调节 $In_{1-x}Ga_xAs$ 中铟的含量[12]，可使得 $In_{1-x}Ga_xAs$ 的探测波段向长波方向移动，达到为特定应用服务的目的。表 1-2 给出了 InP、$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 和 $In_{1-x}Ga_xAs$ 在 300 K 时的材料参数。与 InP 材料完全晶格匹配 InGaAs 焦平面器件可在室温下工作，而扩展波长的 InGaAs 焦平面也可在热电制冷温度下取得良好的性能[13]。目前，InGaAs 材料可以利用多种先进的材料制备技术，如气相外延(VPE)[14]、液相外延(LPE)[15]、金属有机化合物化学气相淀积(MOCVD)、分子束外延(MBE)技术制备，均能生长出高质量的外延材料。

表 1-2 InP、$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 和 $In_{1-x}Ga_xAs$ 在 300K 时的材料参数

参数	InP	$In_{0.53}Ga_{0.47}As$	$In_{1-x}Ga_xAs$
晶格结构	闪锌矿	闪锌矿	闪锌矿
晶格常数(Å)	5.8687	5.8687	6.0583-0.405x
禁带宽度(eV)	1.344	0.75	$0.324+0.7x+0.4x^2$
低频介电常数	12.5	13.9	$15.1-2.87x+0.67x^2$
高频介电常数	9.61	11.6	12.3-1.4x
本征载流子浓度（cm^{-3}）	1.3×10^7	6.1×10^{11}	
电子迁移率($cm^2V^{-1}s^{-1}$)	≤5400	≤12000	$40-80.7x+49.2x^2\times10^3$
空穴迁移率($cm^2V^{-1}s^{-1}$)	≤200	≤300	
有效导带态密度（cm^{-3}）	5.7×10^{17}	2.1×10^{17}	$2.5\times10^{19}[0.023+0.037x+0.003x^2]^{3/2}$
有效价带态密度（cm^{-3}）	1.1×10^{19}	7.7×10^{18}	$2.5\times10^{19}[0.41+0.1x]^{3/2}$
电子的有效质量(m_0)	0.08	0.041	$0.023+0.037x+0.003x^2$
轻空穴有效质量(m_0)	0.089	0.052	0.026＋0.056x
重空穴有效质量(m_0)	0.6	0.45	0.41＋0.1x

1.3.2 短波红外铟镓砷探测器的发展

1.3.2.1 国外研究现状

1μm~2.5μm 红外探测技术在空间遥感领域有着重要的应用，如岩石中的含水或氢氧根的矿物（主要为层状硅酸盐和粘土类）以及硫酸盐和碳酸盐矿物在该波段具有特征吸收，另外许多高温物体（如飞机和火箭发动机喷口、导弹尾焰等）红外辐射能量也集中在该波段。所以在了解资源分布、土壤水分监测、大气成分分析、农作物估产、预警等方面有着重要的作用。在红外仪器中，焦平面一般需要制冷以保证仪器的高性能，尤其对于光谱仪来说，高探测率是必不可少的。由于一台仪器的大部分质量和功率都被焦平面制冷占据，只需普通制冷技术或者不需制冷的探测器技术可实现红外仪器的微型化，同时也减轻了发射火箭的负载。高探测率的 1.7μm InGaAs 焦平面可在室温下工作[16]，而 2.5μm 的 InGaAs 焦平面只需使用热电制冷器。InGaAs 探测器具有高探测率，低的暗电流以及不仅响应 1μm~2.5μm 短波红外波段，同时也可拓展响应可见光波段的特征。“轻便、灵敏、廉价”是未来空间使用的要求，InGaAs 短波焦平面探测器具有小型化、低功耗、高探测率的优点，在机载成像光谱仪、机载超光谱成像仪和卫星有效载荷上成像光谱仪（对地观察、国土资源调查、环境监测、导弹预警、海洋监测等）、近红外相机、卷云探测仪、月球和深空探测等光电遥感仪器有重要又迫切的需求。

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

国际上首先进行空间遥感用 InGaAs 短波红外探测器研究的是法国的 THOMSON[17]，从上世纪八十年代中期开始，他们研制了 3000 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面，应用在 SPOT4 卫星上。该焦平面器件工作波长为 1.55~1.70μm，室温工作，是由 10 个 300 元 InGaAs 小线列拼接而成，主要应用于农业和湿度的监测。SPOT4 上 VEGETATION 短波红外探测器的主要性能：像元面积为 30μm×30μm，探测率为 $6\times10^{11}cmHz^{1/2}W^{-1}$，平均噪声为 0.3mV，非均匀性小于 10%，平均量子效率为 65%，噪声等效功率为 $10^{-13}W$，探测器的动态范围超过 4000，非线性度小于 1%。

美国的 EPITAXX 公司在 InGaAs 探测器阵列的研究上也取得了很大的进展。他们从上

世纪八十年代后期开始进行研究，先后研究了不同响应波长的 InGaAs 线列和面阵，欧洲空间局（ESA）在新一代的环境卫星（ENVISAT）上采用的 1024 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面就是应用了他们的产品。

1988 年 G.H.Olsen 用氢化物汽相外延制作了响应波长为 0.8~1.7μm 的 256 元 InGaAs 探测器阵列[18]。通过平面工艺处理，包括 SiN 钝化，Zn 扩散制作 p-n 结，Au-Zn 合金作 p 型电极，Au-Sn 合金作 n 型电极。单元探测器有源面积 30μm×30μm，电极面积 30μm×55μm，像元间隔距离 50μm。该探测器主要性能：室温条件下，在 1.3μm 响应率为 0.9A/W，平均量子效率为 86％，－1V 时，暗电流小于 100pA，－5 V 时，暗电流小于 1nA。同年，他们还制备了响应波长达 2.6μm 的 InGaAs 探测器[19]。为了使响应波长达到 2.6μm，$In_{1-x}Ga_xAs$ 中 In 的组分 x 为 0.82，此时 InGaAs 与衬底 InP 晶格并不匹配，因此需要在 InP 上生长缓冲层。他们选用 InAsP 作为缓冲层，原因是因为晶格常数相同时 InAsP 的禁带宽度比 InGaAs 的禁带宽度大，由此造出的器件可具有更小的暗电流，更好的性能。其它工艺基本相同。器件的基本性能：－1V 时，平均暗电流为 0.9μA，电容为 1.9pF，2.5μm 时响应率为 1.0A/W，最高量子效率 70％，平均量子效率为 50％。

1990 年，G.H.Olsen 研制了响应波长为 1.0~1.7μm 的 128×128 InGaAs 焦平面[20]，主要应用于室温近红外光谱和空间成像。采用的工艺和单元结构与 1988 年制备的 256 元 InGaAs 探测器阵列相同，每一像素大小为 30μm×30μm，相隔 60μm。器件主要性能：－5V 时，暗电流为 100pA，电容为 0.1pF，1.3μm 时响应率为 0.8A/W，平均量子效率达 80％。1991 年，G.H.Olsen 对他们的工作进行了总结，认为 InGaAs 探测器在 1-3μm 波段可以达到极好的性能，具有极其重要的应用[21]。

1992 年，EPITAXX 公司开始为欧洲空间局（ESA）研制 1024 元 InGaAs 短波红外扫描焦平面。K.P.Linga 沿用了 G.H.Olsen 在 1989 年研制响应波长为 2.6μm InGaAs 探测器的工艺[22]，采用氢化物汽相外延制方法在 InP 上生长 InAsP 缓冲层，不同的是为了减小晶格失配位错，K.P.Linga 生长了 15 层缓冲层，使相邻两层的晶格失配小于 0.13％。单元器件吸收层厚 4μm，保护层厚 1.5μm，每一像素大小为 25μm×500μm。

1996 年 L.J.Kozlowski 测试了美国传感无限公司研制的 128×128 焦平面器件[23]，响应波长 1.68μm，在 230K，优值因子 R_0A 为 $2\times10^8\Omega cm^2$，平均探测率达 $3.5\times10^{14}cmHz^{1/2}W^{-1}$，量子效率 63％；在 290K，优值因子 R_0A 约为 $10^6\Omega cm^2$，平均探测率达 $1.35\times10^{13}cmHz^{1/2}W^{-1}$。

1999 年美国的传感无限公司的 M.J.Cohen 等报导了他们采用改进工艺研制的 320×240 焦平面，响应波长 0.9-1.7μm，器件达到了更高的性能。在 290K，暗电流密度小于 $10^{-8}A/cm^2$,

优值因子 R_0A 大于 $10^6\Omega cm^2$，平均探测率达到了 $10^{14}cmHz^{1/2}W^{-1}$。他们在研制过程中，采用了几种措施，首先是通过 p-n 结的小型化来提高探测率。其次，他们提高了吸收层和保护层的掺杂浓度。InGaAs 吸收层的掺杂浓度从 $1\sim5\times10^{14}$ cm^{-3} 提高到 $5\times10^{15}cm^{-3}$，InP 保护层的掺杂浓度从 5×10^{16} cm^{-3} 提高到 $5\times10^{17}cm^{-3}$。这与 K.P.Linga 采用的方法类似，M.J.Cohen 认为高掺杂能补偿缺陷态，特别是在接口的情况；同时可以在进行 Zn 掺杂时，阻止 InGaAs/InP 接口的 InGaAs 吸收层出现 n 型到 p 型的转变，因为研究证明 Zn 在扩散时会在界面积累并沿着界面运动，导致 p-n 结的面积和暗电流的增大。他们采用新工艺研制的 320×240 焦平面[24]在 290K 时平均探测率为 $10^{14}cmHz^{1/2}W^{-1}$，在 250K 时为 $1.4\times10^{15}cmHz^{1/2}W^{-1}$。目前，传感无限公司已研制成功 640×512[33]焦平面，响应波长为 0.9-1.7μm，平均探测率达 $6\times10^{12}cmHz^{1/2}W^{-1}$，量子效率大于 70%，是已有报导的最高水平。

2004 年美国传感无限公司制备了 320×256 元铟镓砷焦平面[25]，用于夜间成像，其单元尺寸为 25μm×25μm，在 22℃，－500mV 下暗电流仅为 120fA。

2005 年美国传感无限公司制备了规模为 1280×1024 和 1024×1024 元的 InGaAs 短波红外焦平面[26]，响应波长为 0.9-1.7μm，光敏元尺寸为 20×20μm^2, 优值因子 R_0A 为 $1.5\times10^7\Omega\cdot cm^2$（256K）和 $8\times10^6\Omega\cdot cm^2$（280K）。同年，DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)为该公司投资 4500 万美元，用于研制超低噪声(室温下暗电流密度<2 nA/cm^2)的 1280×1024 元的 InGaAs 双色成像焦平面，可在无月光照射的情况下识别 100 米外的目标[27]。2007 年，DARPA 又与该公司续约，资助其继续研究用于成像夜视系统的 InGaAs 焦平面[28]。

2008 年，美国传感无限公司的 M. D. Enriquez 等报道了可响应 0.4~1.7 μm 波段的低噪声 1280×1024 元焦平面[29]，光敏元为 15×15 μm^2，有效像元大于 99%，在-100 mV 下，0 °C 时的暗电流为 3.51 fA，5 °C 时为 5.96 fA，15 °C 时为 17.7 fA，25 °C 时为 52.5 fA，在 35 °C 时的暗电流也仅为 142 fA，这表明焦平面具有很高的性能。

2008 年，美国 Judson 公司 Herry Yuan 等报道了该公司红外探测器的研究进展[30]，其中包括常规、向短波方向延伸和向长波方向延伸的 320×256 元 InGaAs 焦平面，像元大小为 30×30 μm^2。常规 InGaAs 焦平面的响应波段为 0.9~1.7 μm，采用的是 MOCVD 方法生长的外延材料、平面扩散工艺制备的。器件在 1.35~1.6μm 波段的量子效率在 80%~85%之间，有效像元为 99.8%。向短波方向延伸 InGaAs 焦平面的响应波段为 0.4~1.7μm，在 -65 °C~+40 °C 温度范围内，器件在 0.5~1.6μm 响应波段内的量子效率最低为 40%。向长波方向延伸 InGaAs 焦平面的响应波段为 1.4~2.6μm，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 1.5~2.5μm。同年，Herry Yuan 等报道了大面积高速 InGaAs 单元器件[31]，光敏元直径为 3.5mm，器件采用双耗尽层。器件在-40V 下的电容为 100pF，-15V 下的暗电流为 10nA(室温)，室温下 1.0~1.6μm 波段的量子效率在 75%~80%之间，并且器件有很好的线性度和空间均匀性，可以满足高速应用的要求。

2008 年，美国波音 Spectrolab 公司的 J. Boisvert 等报道了高量子效率、低电流的 1280×1024 元 InGaAs 焦平面[32]，光敏元大小为 15×15μm^2。这项工作是在 DARPA 的 PCAR(Photon Counting Array)项目下完成的。材料是在 2 英寸的 InP(100)上、采用金属有机气相沉积(MOVPE)方法生长的。器件在 280 K 温度下的暗电流密度低于 1nA/cm^2，1.55μm 波长处的响应率为 1.1A/W，在-100mV 偏压下器件的电容为 50fF。

1.3.2.2 国内研究现状

国内 InGaAs 探测器主要研究机构有中科院上海微系统与信息技术研究所、中科院长春光学精密机械与物理研究所、中科院上海技术物理研究所、中科院半导体研究所、武汉邮电科学院、中国电子科技集团第 13 所和第 44 所等。中电 44 所研制用于激光探测的 2.2μm 多元器件以及响应波长 1.0~1.7μm 的中规模 InGaAs 面阵焦平面样件；其他单位研究的 InGaAs 探测器主要应用于光纤通讯，重点方向是提高器件的响应速度。

中科院上海微系统与信息技术研究所的刘家洲等采用气态分子束外延(GSMBE)方法研制的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ PIN 光电探测器[33]，通过在器件结构中引入宽禁带 InP 窗口层和聚酰亚胺钝化工艺，减小了暗电流，提高了器件性能，室温下，在-5 V 时，暗电流为 640 pA，黑体探测率为 10^9 cmHz$^{1/2}$W^{-1}。莫才平等采用 InP/InGaAs/InP 双异质结结构研制了对人眼安全的 1.54~1.57μm InGaAs 四象限探测器[34]，器件响应度达到 0. 90A/W，响应时间为 2ns，暗电流低于 5nA，象限串扰达到 1%(象限间隔 20μm)，象限均匀性 4%。中科院上海微系统与信息技术研究所采用 GSMBE 方法研制的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ PIN 光电探测器，响应率在 1.3μm 时大于 0.80A/W。 2004 年起他们还采用线性缓冲层技术对波长扩展 InGaAs 单元探测器进行了探索性研究，将 InGaAs 探测器的截止波长由约 1.7μm 分别扩展至 1.9μm、2.2μm 和 2.5μm，并获得了较好的器件性能，器件室温探测率分别为 2×10^{11}cmHz$^{1/2}$W^{-1}、3×10^{10}cmHz$^{1/2}$W^{-1} 和 3×10^{10}cmHz$^{1/2}$W^{-1}。中科院长春光学精密机械与物理所对晶格匹配的 InGaAs 红外探测材料进行了深入研究，并开展了高 In 组分的 InGaAs 材料的研究。中科院上海技物所针对航天遥感应用的特点，对原位掺杂成结和扩散成结的 InGaAs 器件进行了

低频噪声和抗辐照特性的研究，并且于 2006 年报道了台面结构的 128×1 线列 InGaAs 短波红外焦平面的制备，在 278K 时平均峰值探测率为 $1.03\times10^{12}cmHz^{1/2}W^{-1}$，不均匀性为 18.3％，此后又制备了 256 元正照射台面 InGaAs 线列探测器，278K 时平均峰值探测率为 1.20×10^{12} $cmHz^{1/2}W^{-1}$，焦平面响应率不均匀性为 3.87%[35]。在正照射器件的研制基础上，研究了背面抛光和背面增透膜技术，研制小光敏元背照射 InGaAs 线列探测器，探测器芯片的峰值响应率为 0.95 A/W，256×1 元背照射 InGaAs 焦平面组件的峰值探测率为 $4.5\sim6\times10^{11}$ $cmHz^{1/2}W^{-1}$，响应非均匀性 3.5%~5%，盲元率 0.4%~2%；512×1 元背照射 InGaAs 探测器组件的平均峰值探测率为 $6.13\times10^{11}cmHz^{1/2}W^{-1}$，响应不均匀性为 3.71%，盲元率为 0.39%[36]。国内其他单位，例如半导体所下属的海特公司和武汉电信器件公司主要研制用于高速（10Gb/s）光通信系统的 InGaAs/InP 结构光电探测器，响应率在 1.3μm 时大于 0.80A/W。虽然国内在 InGaAs 红外焦平面的研究方面取得了一些进展，但与国外尚有一定的差距。

1.3.2.3 短波红外铟镓砷探测器的发展趋势

30多年来，红外探测器技术已从第一代的单元和线阵列演变到了第二代的二维时间延迟与积分（TDI）8～12μm 的扫描和3～5μm 的640×480像元InSb凝视阵列。目前先进的红外焦平面阵列技术正处在从第二代向第三代的转折时期。国内外各有关公司厂家研究机构正着眼于2010 年的市场需求，并加紧确定第三代红外焦平面阵列技术的概念，现已把注意力转向第三代红外焦平面阵列传感器的发展上。

第三代红外焦平面阵列技术要满足以下几种要求：一是焦平面上探测器像元集成度为≥10^6像元，阵列格式≥1K×1K，至少双色工作；二是工作温度高，以便实现低功耗和小型轻量化的系统应用；三是非致冷工作红外焦平面阵列传感器的性能达到或接近目前第二代致冷工作红外焦平面阵列传感器的水平；最后必须是极低成本的微型传感器，甚至是一次性应用的传感器。

第三代红外焦平面阵列传感器有以下三种：（1）大型多色高温工作的红外焦平面阵列，探测器像元集成度≥10^6像元；（2）非致冷红外焦平面阵列无须温度稳定或致冷，可用于分布孔径设计；（3）非致冷工作的微型传感器。

受到同样的驱动力，近年来，铟镓砷探测器在多色、量子阱及量子点探测器方面的研究十分活跃，由于InGaAs的量子阱量子点器件其响应波长以中波和长波红外为主，其实现方式主要有InP帽层减薄[37-40]、二维电子气电压调制[41]、吸收层In组分调整[42]等。

1.3.3 短波红外铟镓砷探测器的类型

1.3.3.1 正照和背照结构探测器

按照光入射方式的不同，InGaAs 阵列可采用正面照射和背面照射两种方式。G.. Olsen 等人采用如图 1-2 正面照射结构[43]，制作出 256×1 的线列焦平面探测器，探测波长 1.0μm~1.7μm。光敏面为边长 30μm 的正方形，相临元间距为 30μm，暗电流小于 100pA，量子效率大于 80%。首先在 100μm 厚的 InP 的衬底上生长 3μm 的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$，然后生长 1μm 的 InP，再生长一层 Si_3N_4 钝化层。在 Si_3N_4 层上开 30×30μm^2 小孔，通过 Zn 扩散形成 p 型结。p 型电极为 Au/Zn, n 型电极 Au/Sn，Si_3N_4 为抗反射层。

采用背照结构，适于制备大规模面阵器件。背照射器件是采用倒装焊工艺将探测器芯片与读出电路互连，工作时光由探测器芯片的衬底端入射。图 1-3 中是美国传感器无限公司报道的 640×512 元背面照射 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 阵列探测器的制备过程[44]，探测器总面积约 2 cm^2，光敏元面积是 25×25 μm^2，探测波段为 0.9~1.7 μm，室温下 $D^*>5\times10^{12}$ cmHz$^{1/2}$W^{-1}，盲元率小于 2%。外延结构是通过 MOCVD 或 VPE 方法生长，表面覆盖一层 Si_3N_4 作为钝化层和保护层，通过光刻和等离子体刻蚀在 Si_3N_4 层上开孔，以 ZnAs 作为 Zn 源通过 InP 层扩散到 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 层形成 p-n 结，再用 Si_3N_4 盖住开孔处。P 型电极为 Au/Zn，n 电极为 Au/Ge，然后通过铟柱与读出电路相连。

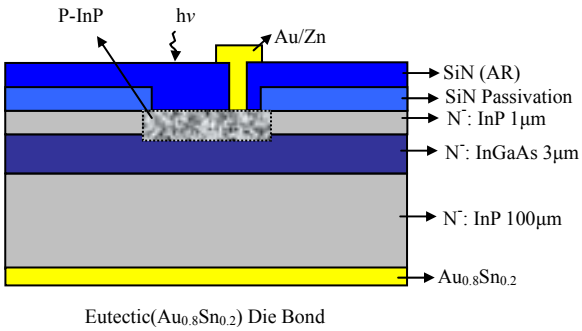

图 1-2 正照射 InGaAs 探测器结构

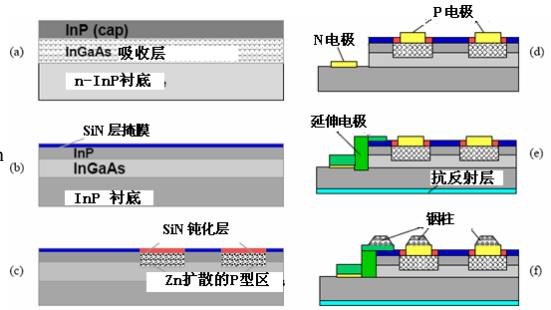

图 1-3 背面照射 InGaAs 阵列探测器的制备工艺

1.3.3.2 常规波长和延伸波长探测器

$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 的晶格常数与 InP 相同，因此在 InP 衬底上可生长无应变的 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$，称为标准 InGaAs。其响应波段为 0.9~1.7μm，可实现非制冷工作的高性能红外焦平面阵列。其外延结构是通过 MOCVD 或 VPE 方法生长。

外延的 InGaAs 层与衬底的晶格不匹配，导致的应变会产生缺陷和位错，其作用会使暗电流增加[19]。只有当 InGaAs 层薄于一个临界厚度时，人们才可以生长低位错密度的

InGaAs。根据应变的量级，这一厚度为 100Å。为了制造截止波长大于 1.7μm 的探测器，铟的克分子数要增加到 53%以上，但是这需要采取缓解或释放应变的措施。图 1-4 是被成功用来缓解或释放应变的一种方法，在衬底与 InGaAs 有效区之间生长厚度约 1μm 超晶格缓冲层来缓冲。薄层的晶格常数与衬底相同或者略微不同，在缓冲层以上生长的每个薄层都具有与 InGaAs 有效区比较接近的晶格常数，这样可使应变的位错产生于缓冲层，被超晶格之间突变的异质结捕获，从而降低有效区的缺陷密度。利用超晶格缓冲层技术人们在 InP 衬底上生长了铟分子数高达 82%的 InGaAs 有效层，可制备截止波长大于 1.7μm 的红外焦平面探测器。图 1-5 中展示了不同组分 InGaAs 量子效率，随着铟含量的增加，InGaAs 的探测波段向长波方向移动。

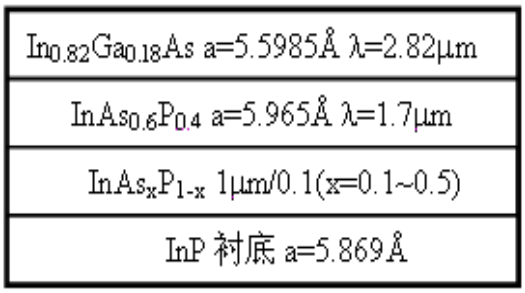

图 1-4 InGaAs 层与 InP 衬底间的缓冲层

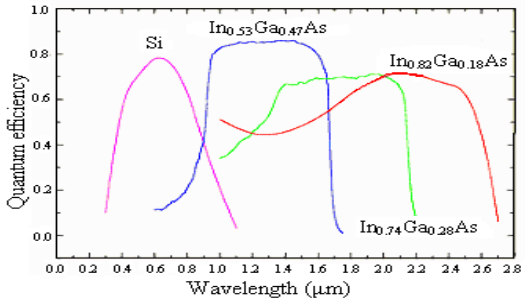

图 1-5 不同组分 InGaAs 的量子效率

1.3.3.3 平面型和台面型 InGaAs 探测器

InGaAs p-i-n 探测器从结构上分为两类：平面型和台面型，其主要区别在于 p-n 结的制备工艺。平面型器件（如图 1-6 所示）是在 n-i-n^+结构材料中，采用离子注入或扩散的方法[45, 46]，对 n 型 InP 层进行 Be、Mg、Zn 或 Cd 的 p 掺杂得到，这种方法的优点是器件的 p-n 结埋于 InP 层中，这样减小了器件钝化的困难，使得器件的暗电流和噪声也相对较小，而缺点是工艺较为复杂，光敏元之间可能会存在较大的串音，光敏面扩大等问题。

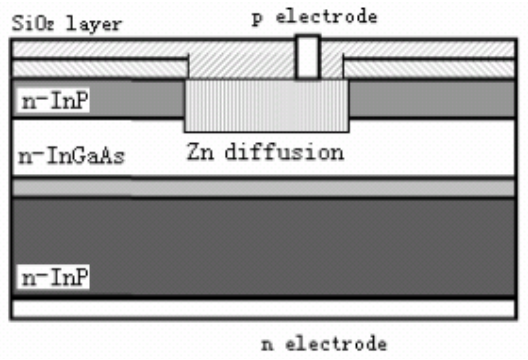

图 1-6 平面型 InGaAs 探测器结构示意图

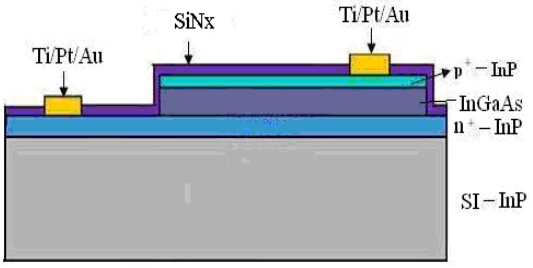

图 1-7 台面型 InGaAs 探测器结构示意图

台面型器件（如图 1-7 所示）是在原位掺杂的 p^+-i-n^+结构材料上通过刻蚀隔离槽来隔离相邻的器件，这种方式的优点是重复性比较好，工艺简单，相邻单元器件之间的串扰比较小；缺点是隔离槽的刻蚀使得器件侧面失去保护，器件的暗电流和噪声特性变差，因而需要有效的台面成型和钝化技术。M. R. Ravi 等采用金属有机化学气相沉积方法生长的 p+-InGaAs/i-InGaAs/n+-InP 材料，利用硫化加聚酰亚胺的钝化方法，制备了台面结构的 InGaAs 探测器，光敏元直径为 100μm，发现硫化后用去离子水清洗，可有效降低暴露的台面表面复合，提高器件的长期稳定性，在-5 V 偏压下的暗电流为 0.5 nA，并且在放置一个月后器件的暗电流几乎不变[47]。

1.3.4 台面型 InGaAs 探测器制备的关键技术

台面型探测器制备的关键工艺主要包括台面刻蚀、器件钝化和欧姆电极的制备。

1.3.4.1 台面刻蚀

台面成型是台面结构的 InGaAs 器件工艺的关键一步。台面刻蚀的目标是既要有较高的图形保真度又要减小横向钻蚀。主要有两种类型的刻蚀方法：湿法腐蚀和干法刻蚀。湿法腐蚀便于实验，当使用湿法腐蚀剂时，腐蚀速率一般为各向同性，其主要缺点是，掩蔽层下面的横向钻蚀现象，这个结果会使腐蚀图案的分辨率降低。为了从抗蚀剂图案上得到高准确度的图案转移，应采用干法刻蚀。因此，近几年来，对干法刻蚀研究的较多。曾经使用过很多干法刻蚀方式，如离子束刻蚀，溅射刻蚀、等离子体刻蚀、反应离子刻蚀和感应耦合等离子体刻蚀（ICP）等。

1.3.4.2 器件钝化

因为台面结构的 InGaAs 红外探测器 PN 结是暴露在空气当中的，加上表面复合系数较大，因此表面漏电流和刻蚀后耗尽区侧面漏电流都比较大，在器件光敏元的表面和耗尽区的侧面进行钝化可以有效的提高器件的电学性能，并在一定程度上提高器件的量子效率和信噪比。目前的 InGaAs 异质结器件一般采用 Si_3N_4 介质膜来做钝化膜。

1.3.4.3 电极接触

欧姆接触是半导体器件制备中很重要的工艺之一，对器件的性能、可靠性和稳定性都有重要的影响。对于 n 型的 InP，欧姆接触比较容易形成。P 型欧姆接触要比 n 型难做得多[48]，其原因一部分是由材料本身特性决定的，空穴的有效质量要比电子的有效质量大的多，

势垒高度也比 n 型材料高（n-InP 的势垒高度 Φ_{Bn} 为 0.4eV，而 p-InP 的 Φ_{Bp} 为 0.97eV）。另一部分原因是制备欧姆接触工艺本身的问题。现在比较常见的 Au-Zn、Au-Be 合金膜系，Zn 不仅与 InP 粘附性差，而且由于 Zn 具有较高的蒸汽压，在 Au-Zn 蒸发过程中很难控制 Zn 的比例。Be 的蒸汽压与 Au 差不多，是很好的掺杂剂，但它的缺点是具有毒性，对人体有毒。另外 Au 是快扩散杂质，合金退火时，Au 很容易扩散到 PN 结内，使结特性变坏。Ti-Pt-Au 非合金膜系能较好的解决上述问题，但是它要求 p 型材料表面浓度大于 $10^{19}cm^{-3}$ 时，才具有比接触电阻为 $6\times10^{-6}\Omega\cdot cm^2$，一般只有 $10^{-4}\Omega\cdot cm^2$ 数量级。但是这些 Au 系接触有金属到 InP 衬底的深扩散，而且退火温度相应的很高（~450°C）。为了改善这些特性，有两种方法可以应用。一种是控制 InP 表面的氧化物来减少退火温度。另一种方法就是用不发生反应的金属例如 Ni、Pd 和 Pt 作为接触金属，因为他们在低温下和 InP 有化学反应。

1.4 本论文主要内容

本论文采用国产感应耦合等离子体刻蚀设备 ICP-98C 和英国牛津公司的 ICP180 对 InGaAs 探测器制备的 ICP 刻蚀工艺进行了详细的研究。研究目的是进一步优化 InGaAs 探测器的台面成型方法，获得合适的刻蚀参数。在此基础上，将 ICP 刻蚀工艺应用到 InGaAs 探测器的制备中，并对器件性能进行测试和分析。

2 感应耦合等离子体刻蚀基础

为获得器件的结构必须把光刻胶的图形转移到光刻胶下面的各层材料上面去。刻蚀的主要内容就是把经曝光、显影后光刻胶微图形中下层材料的裸露部分去掉，即在下层材料上重现与光刻胶相同的图像。随着超大规模集成技术的发展，图形加工的线条宽度越来越细，因此对刻蚀转移图形的重现精度和尺寸控制要求越来越高。这就吸引了人们从事刻蚀技术的研究和开发，发展了液态的湿法和气态的干法刻蚀，刻蚀的质量和水平有了飞跃的进展和提高。

理想的刻蚀工艺必须具有以下特点：（1）各向异性刻蚀，即只有垂直刻蚀，没有横向钻蚀。这样才能保证精确地在被刻蚀的薄膜上复制出与抗蚀剂上完全一致的几何图形；（2）良好的刻蚀选择性，即对作为掩模的抗蚀剂和处于其下的另一层薄膜或材料的刻蚀速率都比被刻蚀薄膜的刻蚀速率小得多，以保证刻蚀过程中抗蚀剂掩蔽的有效性，不致发生因为过刻蚀而损坏薄膜下面的其他材料；（3）均匀性好，样品各个部位刻蚀的不均匀会导致刻蚀图形转移的不均匀性，为获得完美的刻蚀，控制刻蚀均匀性，减少过刻蚀是非常重要的；（4）刻蚀清洁度好，刻蚀过程中引入的沾污，既影响图形转移的精度，又增加刻蚀后清洗的复杂度和难度；（5）加工批量大，可重复性好、控制容易，成本低，对环境污染少，适用于批量生产。

2.1 湿法刻蚀和干法刻蚀

2.1.1 湿法刻蚀

湿法刻蚀，这是一种接触型腐蚀，其反应过程与一般化学反应相同，可以唯象地用以下几个步骤描述：首先腐蚀剂通过扩散作用到达材料表面，与表面材料发生化学反应后，生成物离开材料表面，从而实现化学反应过程的持续进行[49]。腐蚀速率R可用阿伦尼斯方程描述，即

$$\mathrm{R} = \mathrm{R}_0 \exp(-E_a / kT) \tag{2-1}$$

其中 R_0 是常数，E_a 为化学反应的激活能，K 为波尔兹曼常数，T 是温度。从式 2-1 看出，对于给定的材料 E_a 一定，在这种情况下影响反应速率的主要因素是温度（温度高反应速率大）。通常为控制刻蚀过程的反应速率，主要是使反应在恒温下进行，并选用合适的刻蚀溶液。湿法刻蚀的主要特点有：

1. 湿法刻蚀的反应产物必须是气体或能溶于刻蚀液的物质，否则会造成反应产物的沉淀从而影响刻蚀过程的正常进行。

2. 一般说来湿法是各向同性的刻蚀，刻蚀过程中刻蚀液不但浸蚀溶掉深度方向的材料，而且同时刻蚀侧壁的材料，产生钻蚀现象。湿法刻蚀在特定溶液和材料的条件下可显现为沿一定晶面的选择性刻蚀[50]。

3. 湿法化学刻蚀反应过程常伴有放热和放气。放热造成刻蚀区局部温度升高，引起反应速率增加，反过来温度再增高，使刻蚀处于不受控制的恶性循环中，结果是刻蚀质量很差。在实际工艺中采用搅拌等方法免除局部温度增高。放气造成刻蚀区域的局部地方因气泡停留，使刻蚀液交换中断，刻蚀停止进行，形成局部缺陷。通常采用的措施也是搅拌赶走气泡。当线条细或刻蚀的图形密度高时放热放气对刻蚀效果影响很大。

由于湿法刻蚀的方法和设备比较简单，而且长期以来已积累了丰富的经验，所以至今仍在许多图形精度要求不高的场合下应用。但在加工器件尺寸变小后，湿法刻蚀的缺陷变得越来越明显，甚至完全不能胜任。湿法刻蚀的主要缺点，首先是不能满足图形微细化的要求，由于湿法刻蚀通常都是各向同性的，有严重的钻蚀效应，刻蚀后的图形边缘比较粗糙。其次是湿法腐蚀产生大量的废液，会污染环境，且不利于实现自动化。在工业生产中一般以 3 微米线宽为界限，小于它普遍采用干法刻蚀技术。

2.1.2 干法刻蚀

所谓干法刻蚀，就是以等离子体进行刻蚀的一种技术，因为反应不涉及溶液，所以称之为干法刻蚀。而其它一些技术，如气相刻蚀、激光诱导刻蚀，以及无掩膜的聚焦离子束刻蚀等，虽然亦有别于湿法刻蚀，但已自成体系，一般不列入干法刻蚀中。

干法刻蚀最主要的优点就是可以进行所谓的各向异性刻蚀。因此干法刻蚀的首要任务，是如何在垂直方向上的刻蚀速率远大于横向上的，以使刻蚀后所转移的图案与掩膜上的原图案相同。不过因为干法刻蚀的各向异性主要是利用粒子轰击的物理现象来进行的，这种粒子轰击现象，不但可以在被刻蚀样品上进行，也可以在掩膜上发生，所以其选择性（选择性是指对被刻蚀样品和掩膜的刻蚀率之比，选择性越高，表示刻蚀大都在

被刻蚀材质上进行）。换句话说，使用干法刻蚀进行薄膜刻蚀时，虽然可以获得相当准确的图形转移，但是必须牺牲部分刻蚀的选择性。除了各向异性与选择性之外，衡量干法刻蚀好坏的主要依据，还有刻蚀速率（Etching Rate）及均匀性（Uniformity）等。干法刻蚀的刻蚀速率越高，表示产量越大；刻蚀的均匀性越高，则代表晶片质量的控制越完善，晶片的合格率也就越高。

干法刻蚀借等离子体中产生的粒子轰击实现各向异性刻蚀。当我们对一个处于适当低压状态下的容器内施以电压，这些原本中性的气体分子将被激发或解离成各种不同的带电离子、原子团（Radicals）、分子及电子。这些粒子的组成便称为等离子体。等离子体是气体分子处于电离状态下的一种现象，因此等离子体本身是一个导体，可以传送电流。当对等离子体施以电压的电极为阴极时，带正电荷的离子将被等离子体与电极板间的电位差所加速，而轰击电极板的表面即等“离子轰击（Ion Bombardment）”。假如进行离子轰击的离子质量够重，电极板表面的原子将被入射的离子所击出，而形成溅射现象。接受离子轰击的电极将放置晶片。因此，利用等离子体里所产生的离子，借着离子对晶片表面的轰击，可以对样品进行刻蚀。这种纯粹以动量转移的物理现象来执行刻蚀的技术，又称为“溅射刻蚀（Sputtering Etch）”。这种干法刻蚀的优点是具备极佳的各向异性。样品经刻蚀后的轮廓将十分接近 90 度，缺点是刻蚀的选择性较差。

另一种称为等离子体刻蚀的刻蚀方式[51]，则与溅射刻蚀相反。它是利用等离子体，将反应气体的分子解离，然后借着离子与样品间的化学反应，把暴露在等离子下的样品，反应成挥发性的生成物，然后被真空系统抽离来进行刻蚀的。因为这种干法刻蚀主要是依靠化学反应来刻蚀，因此与湿法刻蚀方式极其类似，所以具备选择性较佳的优点，但是各向异性就比较差。为了使干法刻蚀能同时具备有高选择性与各向异性刻蚀的双重优点，一种称为“反应离子刻蚀法（Reactive Ion Etch）”的干法技术[52]，被研究出来。

反应离子刻蚀法，以下简称 RIE，是一种介于溅射刻蚀与等离子体刻蚀之间的干法刻蚀技术，其等离子体发生器结构如图 2-1 所示。RIE 同时用物理与化学两种反应进行刻蚀，腔室内反应过程如图 2-2 所示，我们可以得到一种兼具各向异性刻蚀优点，及可以接受的选择性的刻蚀技术。刻蚀后的轮廓可以达到 80 度以上甚至 90 度[53]。选择性依不同的材料，约在 2：1 到 40：1 之间。

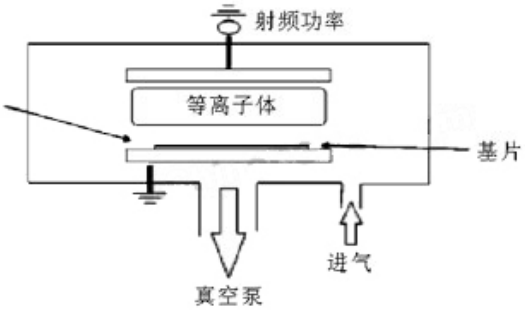

图 1-1 RIE 等离子体发生器

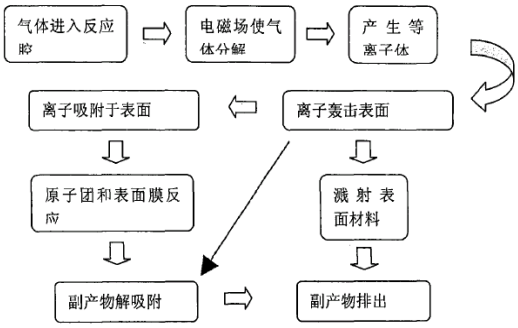

图 2-2 干法刻蚀过程示意图

自从最初的平行电极型等离子体反应室(图 2-1)被用于芯片制造以来，随着芯片尺寸的不断扩大和图形尺寸的不断减小，平行电极板在过去的 20 年中已经取得了很大的改进，虽然其原理一样，但最大的改进是在反应腔室周围加上磁场（Magnetic Enhanced RIE）。由于电子在磁场和电场的共同作用下将作圆柱状回旋运动而不是电场下的直线运动，磁场的存在直接导致反应气体电离截面的增加，增加了离子密度，使得等离子刻蚀技术可以在更低的气压下得以运行（<10mT）。由于离子密度增加，撞击表面的离子能量也可以在不降低刻蚀速率的情况下被降低，从而提高刻蚀选择比。

在大规模集成电路制造中 MERIE 对于加工 200 毫米以上直径的片子和 0.25 微米的线宽及孔洞其能力已达到极限，于是以电子回旋共振（Electron Cyclotron Resonance – ECR）和电感耦合等离子刻蚀（Inductive Coupled Plasma-ICP）为代表的高密度等离子刻蚀便应运而生。而 ICP 刻蚀技术与 ECR 相比，具有结构简单、性价比高、装置的环径比更大且装置更小型化及操作简便等特点，而受到人们的高度重视，发展迅速。ICP 反应室是在 RIE 反应室的上方加置线圈状的电极，通过电感耦合能高效率地离化和大量激活分子，生成丰富的游离基团，离化效率是普通 RIE 的十倍甚至百倍，在很低的气压下稳定地产生高密度的等离子体，也能产生非常高的刻蚀速率。目前在高端芯片生产中的导电体刻蚀基本上都采用 ICP 反应腔体技术，其优点是可以用上下两组电极分别控制离子的密度和能量以达到最优化的组合，这也是 MERIE 系统所无法比拟的。

随着集成电路最小尺寸不断减小、集成度的不断提高以及硅单晶衬底尺寸的扩大,对刻蚀设备的要求也越来越高。除了能提供高质量的刻蚀性能外，还要求刻蚀设备在大规模量产中能保证极高的稳定性、极低的缺陷率。

刻蚀设备制造商也在不断地优化其产品以满足前端研发的要求。就现有的理论研究及生产需要，新一代刻蚀设备将会具有以下几项特点，以满足芯片生产技术进一步发展

的需要。

- 精确的工艺参数调节及控制系统;
- 反应腔内部材料进一步改善或新型材料的运用及自动清洁系统;
- 先进的探测系统及容易操作的控制软件平台;
- 在线检测及随时控制调节系统运用。

2.2 感应耦合等离子体（ICP）刻蚀技术

2.2.1 感应耦合等离子产生方式

在实验室中, 有很多方法和途径可以产生等离子体, 如气体放电、激光压缩、射线辐照及热电离等, 但最常见和最主要的还是气体放电法。在气体放电实验中, 根据放电条件(如气压、电流等) 的不同, 可以将气体放电分为电晕放电、辉光放电和电弧放电[54]。辉光放电产生的等离子体是一种冷等离子体, 有时也称为低温等离子体, 其电子温度远大于离子的温度。辉光放电又可以分为直流辉光放电、射频辉光放电和微波放电。根据电源的耦合方式不同, 射频放电可以分为电容耦合型和电感耦合型; 根据电极放置的位置, 又可以分为外电极式和内电极式。对于内电极式放电来说, 大多采用平行板型。由于平行板型放电稳定性好, 效率高, 且易获得大面积的均匀等离子体, 因此这种形式的放电装置也特别适用于等离子体化学气相沉积制备薄膜工艺。ICP 采用射频激发的内电极式模式。

ICP 设备在 RIE 反应室的上方加置线圈状的电极, 并通过电感耦合增加电子的运动路径, 达到增强等离子密度和能量的效果。电源打开和产生辉光之前, 电子需要的能量从高频电场中获得[55], 它使电子撞击反应室内的气体原子和分子。当电子的能量大于分子的键能时, 被撞的分子变成自由基; 当电子的能量大于分子的电离能时, 被撞分子离化同时发射二次电子和光子，产生更多的自由基和离子, 开始雪崩, 形成等离子体。继而由于部分电子和离子被电极和腔体吸收，整个辉光放电过程趋于平衡状态。如果射频频率太低, 辉光会闪烁, 当达到 1MHz 以上时, 对于间距 10cm 的平板电极, 离子来不及从一个极板到达另一个极板时, 极性就改变方向, 辉光就不会熄灭。

本文使用的 ICP 设备采用圆筒形等离子发生器(如图 2-3 所示)，其采用连有线圈的 RF 源来代替 ECR 的微波源和磁场, 由 RF 电流线圈产生的 RF 磁场在腔体内诱导出了

一个 RF 电场(如图 2-4 所示), 它能使电子被加速, 从而产生高密度的 ICP 等离子体[56]。与 ECR 源相比，ICP 源的结构要简单, 工作要稳定，等离子体的均匀性也更好。与只采用一个 RF 源的传统 RIE 设备不同，ICP 增强型 RIE 设备采用两个独立的 RF 源, 其中一个用以控制产生等离子体的密度, 另一个用以控制等离子体能量。所以 ICP 刻蚀技术可避免传统 RIE 技术存在刻蚀速率与刻蚀损伤这一矛盾, 能满足 InP/InGaAs 等材料干法刻蚀的高等离子体密度、低刻蚀能量、高均匀性和低工作压力等特殊要求。

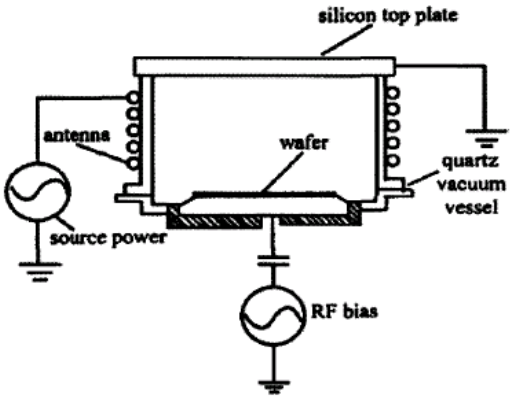

图 2-3 圆筒形 ICP 源的剖面图

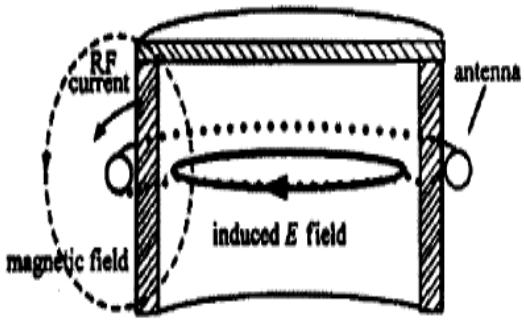

图 2-4 ICP 原理图

2.2.2 感应耦合等离子刻蚀中的化学过程

感应耦合等离子体发生腔在气体辉光放电时，气相中出现的基本过程有下列几种重要的形式：

1. 激发

$x+e \rightarrow x^{*}+e$ （电子碰撞激发）

$x+hv \rightarrow x^{*}$ （光致激发）

2. 电离

$x+e^{*} \rightarrow x+2e$ （电子碰撞电离）

$x+y^{+} \rightarrow x^{+}+y^{+}+e$ （离子碰撞电离）

$x+y \rightarrow x^{+}+y+e$ （中性粒子碰撞电离）

$x+hv \rightarrow x^{*}+hv'^{+e}$ （辐射电离）

3. 复合

复合是电离产生的荷电粒子，在空间、器壁或基片表面与电子重新结合变为原来的

中性原理或分子的过程，前者为空间复合，后者为表面复合。

$$A^{+}+e\rightarrow A+hv$$ （辐射复合）

$$A^{+}+2e\rightarrow A^{*}+e$$ （碰撞复合）

4. **电子附着和离脱**

$$\left.\begin{array}{l} x+e\rightarrow x^{-}+hv \\ \\ x+y+e\rightarrow xy^{-}+hv \end{array}\right\}$$ （辐射附着）

$$x+y^{-}\rightarrow x^{-}+y$$ （电子交换附着）

$$\left.\begin{array}{l} xy^{-}+m\rightarrow xy+m+e \\ x^{-}+e\rightarrow x+2e \\ x^{-}+y^{-}\rightarrow x+y^{-}+e \end{array}\right\}$$ （碰撞离脱）

5. **离子－分子反应**

$$x^{+}+y+m\rightarrow xy^{+}+m$$ （积聚反应）

$$x^{+}+yz\rightarrow xy^{+}+y$$ （离子－原子交换反应）

$$xy^{+}+z\rightarrow xz^{+}+y$$ （置换反应）

放电过程中产生的这些化学活性物质对基片表面的刻蚀是一种气相和固相界面上的化学反应过程。该反应过程一般可分为三步：首先是固相表面对这些化学活性物质产生的化学吸附；然后被吸附的活性物质与固相表面进一步发生化学反应，反应生成物一般具有挥发性；最后是固相表面上反应化合物的脱附[57, 58]。

2.2.3 刻蚀速率与刻蚀剖面

等离子体刻蚀的最终目的是获得能够控制的刻蚀速率和刻蚀剖面。刻蚀速率是指在刻蚀过程中去除样品表面材料的速度,常用的单位 nm/min。它主要由刻蚀气体种类及配比、刻蚀等离子体浓度与刻蚀能量、腔体工作压力和样品温度等具体的工艺参数，以及刻蚀设备的具体配置决定。

一般来说，总刻蚀速率 ER_{tot} 由三部分组成[59]：物理溅射导致的刻蚀率 ER_s，化学刻蚀导致的刻蚀率 ER_c 和离子增强刻蚀导致的刻蚀率 ER_i ，即

$$ER_{tot}=ER_s+ER_c+ER_i \tag{2- 2}$$

这三种刻蚀过程是同时发生的。决定总刻蚀速率的是物质系统(晶片和气体)，中性粒子对离子流的比率以及离子能量。在刻蚀过程中，离子能量是个非常重要的物理量，因为离子能量能够影响等离子体刻蚀的表面反应过程。离子轰击可以导致晶格的断裂而产生活性空位，并用它来吸附原子团。离子也可以促进被吸附物质与表面的反应，加速刻蚀剂与基片的反应。离子还可以通过溅射清除被吸附的反应产物，使表面清洁有利于后续的刻蚀剂和表面的反应。

对于特定的刻蚀工艺和刻蚀设备，刻蚀速率还会受到下列三个因素的影响：

1. **负载效应**

因为刻蚀速率通常正比于刻蚀剂的浓度，所以如果样品需刻蚀的区域面积大，则会消耗刻蚀剂，使刻蚀机浓度降低，使刻蚀速率慢下来，而刻蚀的面积比较小，则刻蚀就会快些。这就是反应离子刻蚀的负载效应(loading effect)，它将影响不同数目的或刻蚀区域面积不同的样品刻蚀速率。因为反应离子刻蚀负载效应导致的刻蚀速率的差别，与样品的刻蚀区域面积有如下关系[60]：

$$ER = \frac{ER_0}{1 + k \cdot A} \tag{2- 3}$$

式中, ER 是实际样品的刻蚀速率; ER_0 是空腔刻蚀速率; A 是样品实际需刻蚀区域的面积；k 是一个常数，并与特定的刻蚀工艺和设备有关。所以本文只通过刻蚀区域面积非常小的样品刻蚀来获得 ER_0，并直接称为刻蚀速率。而有关 k 值获取的实验, 需要进行不同刻蚀面积的样品刻蚀来获得。

2. **微负载效应**

在同一样品上，其窄的刻蚀窗口会因为较大的图形深宽比，致使刻蚀剂不能及时进入，反应生成物又不能及时出来，从而刻蚀速率会变慢。这一现象被称为与深宽比相关的刻蚀效应(ARDE) ，也被称为微负载效应[61]。所以当刻蚀样品表面的掩膜图形分辨率相差很大时，不同区域的刻蚀速率会有很大差别，从而导致较差的刻蚀均匀性。

3. **反应离子刻蚀随时间的刻蚀非线性**

在固定刻蚀参数时，对固定宽度槽的刻蚀速率将随时间变小，这是由于在开放空间，离子与中性粒子刻蚀剂的输运不受结构几何的遮敝等影响，而且刻蚀反应的生成产物也近似为零，从而其对离子与中性粒子输运到达结构表面的阻碍作用也可忽略不计，则初始的刻蚀速率原则上比后继的任一时刻都要大。随着刻蚀的不断进行，会因为刻蚀窗口的深宽比的不断增加而引起微负载效应的影响越来越严重，也会因为刻蚀表面 polymer

沉积的不断增多进而阻挡后续的刻蚀，它们从而导致刻蚀速率在不同的刻蚀阶段会有很大的差别。这种刻蚀速率变小的积累在直观上的一种集中表现就是著名的 Lag 效应[62-64]。窄槽中 Lag 效应的引发，几何遮蔽效应引起反应物与生成物输运受阻是一个很重要的因素，这种刻蚀的非线性给样品刻蚀深度不固定的刻蚀工艺带来很大难度。实际上不管掩膜开口的宽度如何，刚开始刻蚀时近似为开放空间，刻蚀速率都是最大的，并接近一致。

同时当纵横比增加时，离子和电子轰击晶片的充电效应会引起损伤。因为离子具有比电子好的方向性，刻蚀槽的边缘会积累负电荷而底部会积累正电荷，形成一个局域的微区电场，导致离子轨迹偏转引起槽壁的刻蚀，即旁刻现象(notching)。这样，由于达到槽底部的离子流减小了，因而刻蚀速率也会减小。

ICP 刻蚀过程中的刻蚀速率可由鞘层模型和蒙特卡洛模拟方法相结合而得到[65, 66]；形貌演化过程可以采用特征线方法[66, 67]来模拟。

2.2.4 尘埃颗粒的产生与控制

在等离子体加工中，放电室中的反应性气体聚合物会吸附周围的电子而带一定量的负电荷，形成尘埃颗粒(～10^{-8} m)，这些尘埃颗粒在被加工芯片上方悬浮、聚集和运动，当放电结束时，这些尘埃颗粒会掉落在芯片表面，导致半导体芯片的损伤。尘埃颗粒与等离子体中的离子和电子相比，具有较大的体积、质量、带电量和较小的荷质比。带负电的尘埃颗粒在射频鞘层中会受到电场力、离子拖曳力、中性气体摩擦力以及与其他尘埃颗粒的相互作用力。

尘埃颗粒在鞘层中会表现出如下特性：尘埃颗粒会在外界周期扰动作用下发生共振，当这些共振在幅值较大时将会出现强烈的非线性现象。尤其是在外界探针扰动下，单个尘埃颗粒可以在射频等离子体鞘层中作大振幅的非线性振荡，并出现多频共振和迟滞现象。实验中发现，大量的尘埃颗粒(～10^{12})会形成空间有序的尘埃晶格，它们是鞘层电场约束和尘埃颗粒之间的库仑排斥力以及尾流效应共同作用的结果。此外，尘埃等离子体在磁场作用下还会产生旋转，在快速干扰下会在尘埃等离子体中激发出马赫锥。

目前，尘埃颗粒在等离子体刻蚀加工中所造成的污染问题还无法得到控制或完全去除，只能想办法尽量减少污染。比如在极板上刻一凹槽，以实现对尘埃颗粒的径向约束，然后再在壁上加以正偏压,将尘埃颗粒团吸引过来后抽走。因此，目前尘埃颗粒对芯片的污染问题也是一个刻蚀工艺中未解决的问题之一。

2.2.5 感应耦合等离子刻蚀设备

本论文中所用感应耦合等离子刻蚀设备一是中国科学院微电子研究所研制的 ICP-98C 型高密度等离子体刻蚀机。它由腔体、射频系统、真空系统、气路系统等四大部分组成。国产 ICP - 98C 型等离子刻蚀机，其反应室<300mm；射频 ICP 功率源和射频偏压(rf chuck)功率源均为 13.6MHz，额定最大功率分别为 1500W 和 500W；背景真空度为 3×10^{-3} Pa，真空系统抽速固定；刻蚀时承片台采用 20℃水冷却。

本论文中所用感应耦合等离子刻蚀设备二是英国牛津公司的 ICP180（图 2-5），它由腔体、射频系统、真空系统、气路系统，PC2000 软件控制系统等五打部分组成。射频 ICP 功率源和射频偏压(rf chuck)功率源也均为 13.56MHz，额定最大功率分别为 3000W 和 600W，压力范围 1-100mT。其采用锁定式加载，最大可刻蚀 125mm 晶片。

相对于国产 ICP98C，ICP180 通过 PC2000 软件控制系统能精确控制 ICP 各刻蚀参数，稳定性好，可重复性高。

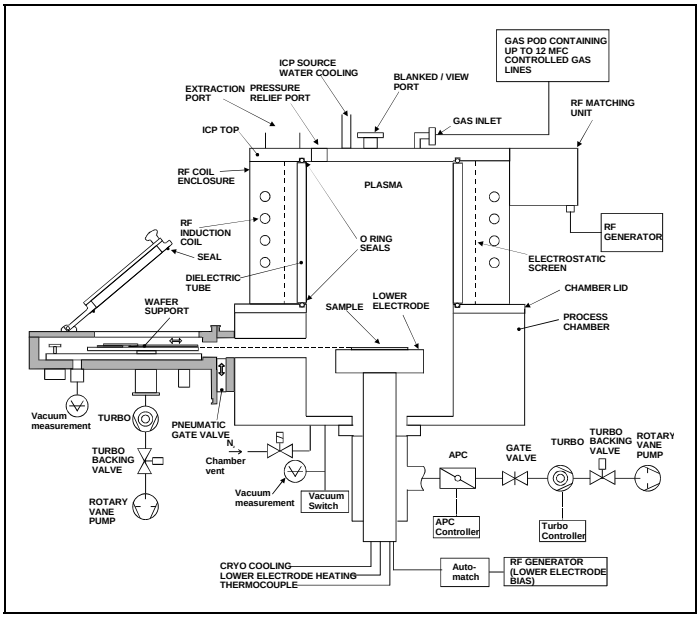

图 2-5 牛津 ICP180 系统结构图

2.3 本章小结

本章叙述了器件台面成型的湿法刻蚀和干法刻蚀的工作原理及两种刻蚀方法的优缺点。详细介绍了感应耦合等离子体的产生原理、刻蚀中的化学过程、刻蚀速率和刻蚀剖面的影响因素以及台面成型工艺平台的 ICP 刻蚀设备，为后续试验做好理论铺垫。

3 铟镓砷探测器制备的 ICP 刻蚀方法研究

对台面型 InGaAs 探测器尤其是阵列制备，平整清洁的表面和良好的钝化质量，是制作的关键。制造这些器件的刻蚀工艺时常需要具备刻蚀速率稳定可控，刻蚀轮廓高各向异性和刻蚀表面光滑等特点。本章将使用国产 ICP-98C 和英国牛津公司的 ICP180 刻蚀机，分别采用 $Cl_2/BCl_3/Ar$ 和 Cl_2/N_2 对常规波长 InGaAs 探测器，采用 $Cl_2/BCl_3/Ar$ 和 CH_4/Cl_2、Cl_2/N_2 对延伸波长 InGaAs 探测器，在不同的直流偏压、ICP 功率、气体总流量和气体组分等参数下进行台面成型，并从刻蚀速率、刻蚀垂直度、刻蚀表面粗糙度等几个方面对刻蚀质量做了评估和分析。最终确定了制作 InGaAs 探测器较好的工艺条件。

3.1 III-V 族 ICP 刻蚀气体的选择

在刻蚀等离子体的选择中，刻蚀气体与刻蚀材料反应所生成产物的沸点是需要考虑的重点，对于 In、Ga、Al 来说它们的卤化物和甲基化合物是较好的选择，表 3-1 给出了这几种刻蚀产物的沸点[68, 69]。从表中可以看到对于 In 基材料来说甲烷基等离子体的刻蚀产物具有最好的挥发性。因此在刻蚀 In 材料中 CH_4 是很有帮助的。但是中性甲基原子团与 In、Ga、Al 原子反应的化学活性比中性卤素原子要差很多，容易形成聚合物，这些聚合物常常沉积在表面和侧面从而影响刻蚀的质量。当然这个侧壁效应可以加以利用，获得较好的各向异性控制。但这些聚合物在表面的沉积会使刻蚀速率难以达到要求。甲烷基等离子体存在的另外一个问题就是 H^+离子的存在，它在 In 基材料中的穿透深度较大，特别对 p 型材料产生 H 钝化[70, 71]，影响材料或器件的性能。

表 3-1 III-V 基材料在卤素基或 CH_4/H_2 基等离子体刻蚀中可能刻蚀产物的沸点

刻蚀产物	沸点（℃）	刻蚀产物	沸点（℃）	刻蚀产物	沸点（℃）	刻蚀产物	沸点（℃）
$AlCl_3$	183	$InCl_3$	600	$GaCl_3$	201	NCl_3	<71
AlI_3	360	InI_3	NA	GaI_3	345（升华）	NBr_3	NA
$AlBr_3$	263	$InBr_3$	升华	$GaBr_3$	279	NI_3	爆炸
$(CH_3)_3Al$	126	$(CH_3)_3In$	134	$(CH_3)_3Ga$	55.7	NH_3	-33

在传统的反应离子刻蚀(RIE)中，氯化物(如 $C1_2$，$BC1_3$，$SiC1_4$ 等)是刻蚀III-V族半

导体材料常采用的反应气体。但是用它们来刻蚀含 In 化合物时，因为反应生成物 $InC1_3$ 具有较高的气化温度(600℃)，$InCl_x$ 的解吸附速率成为限制刻蚀速率的因素，导致刻蚀速率缓慢和表面非化学计量。可以采用刻蚀同时加热样品>(200℃)的方法避免 $InCl_x$ 层形成，但加热样品的做法在很多器件工艺中并不可行。上世纪 90 年代高密度等离子体刻蚀出现后，人们发现电子回旋共振(ECR)等离子体或感应祸合等离子(ICP) 所具有的高密度离子流，可以在室温下避免 Cl 基气体在刻蚀中形成 $InCl_x$ 层，于是采用高密度 Cl 基等离子体刻蚀 In 基材料的方法得到广泛应用。

常用的 Cl 基化学刻蚀气体有 Cl_2、$SiCl_4$、BCl_3 等。在 ICP 刻蚀中常常加入 N_2 或 Ar 气，这些气体的加入一方面可以稀释化学刻蚀气体，另一方面可以增强 ICP 刻蚀中的物理刻蚀。此外对于含 Al 材料的刻蚀，加入适量的 BCl_3 是很有必要的[68]。由于 Al 原子比较活泼，容易与真空腔体中吸附或供气管道中残存的 O 原子发生反应，在材料的表面形成很难刻蚀的 Al_2O_3，从而产生“微掩膜”效应，使刻蚀表面产生“针状”的形貌。在真空控制系统不佳的 ICP 刻蚀系统中，BCl_3 可以比较有效地去除气体中的 O。

3.2 国产 ICP-98C 型 ICP 刻蚀研究

3.2.1 常规波长 ICP 刻蚀研究

图 3-1 所示刻蚀样品 $InP/In_{0.55}Ga_{0.45}As/InP$ 材料是采用 MBE 技术在 InP 半绝缘衬底上依次生长厚度为 1.5μm 掺 Si 的 n^-InP 缓冲层，$n>2\times10^{18}\,cm^{-3}$；厚度为 2.5μm 并且与 InP 晶格匹配掺 Si 的 n^- $In_{0.55}Ga_{0.45}As$ 吸收层，$n\approx3\times10^{16}\,cm^{-3}$；厚度为 1.5μm 掺 Be 的 p^-InP 窗口层，$p>2\times10^{18}\,cm^{-3}$。刻蚀掩膜为 PECVD 淀积的 SiN_x。采用 Taylor - Hopson 型台阶仪测定刻蚀深度,原子力显微镜（AFM）测量刻蚀表面粗糙度，X 射线电子能谱（EDX）测量刻蚀后表面残留物，并用扫描电子显微镜（SEM）获得刻蚀形貌照片。

InP	P+	Be	0.6um	>2*10^18cm^-3
In0.53Ga0.47As	n-	Si	2.5um	~3*10^16
InP Buffer	N+	Si	1.5um	>3*10^18
InP substrate S.I Fe 350um+-20um				
外延层总厚度 4.6um				

图 3-1 常规波长刻蚀样品材料结构

3.2.1.1 刻蚀速率

$Cl_2/BCl_3/Ar$ 刻蚀 $InP/In_{0.55}Ga_{0.45}As/InP$(PIN)反应腔内化学反应过程[72]：

$$BCl_3 \xrightarrow{e^-} BCl_2^+ + Cl^- \vee BCl_3 \xrightarrow{e^-} BCl_2^- + Cl^+$$

$$BCl_3 \xrightarrow{e^-} BCl_2\cdot + Cl\cdot \quad Cl_2 \xrightarrow{e^-} 2Cl\cdot$$

$$InP + xCl\cdot \xrightarrow{e^-} InCl_x + \frac{1}{4}P_4$$

$$InGaAs + xCl\cdot \xrightarrow{e^-} InCl_y + GaCl_z + \frac{1}{4}As_4$$

从公式中可以看出，化学反应的速度主要取决于腔体中 Cl 基自由基的浓度，而同流量的 Cl_2 比 BCl_3 能分离出更多的 Cl 基自由基。

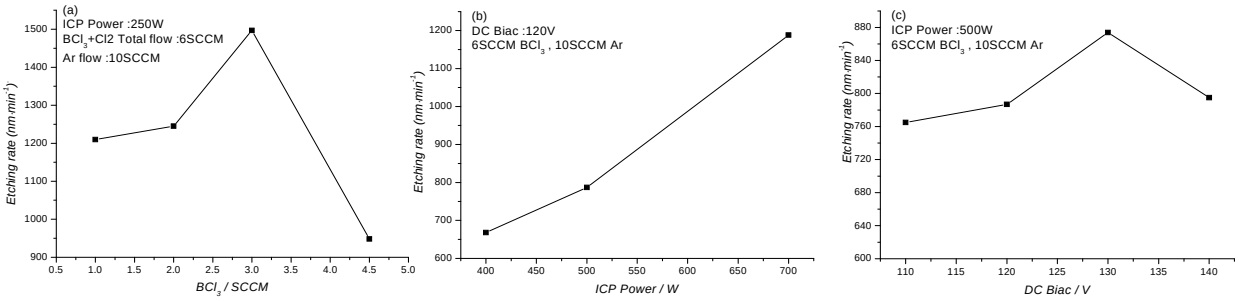

图 3-2 InP/InGaAs/InP(PIN)刻蚀速率与(a)BCl_3 流量,(b)ICP 功率,(c)dc-Bias 的关系

如图 3-2(a)BCl_3+Cl_2 总流量为 6SCCM，其它刻蚀条件如图所示。当 BCl_3 流量从 1SCCM 到 3SCCM,刻蚀速率随 BCl_3 流量的增加而增大。这是因为在这个范围内刻蚀速率主要取决于氯基刻蚀产物的去除速度。由于氯基刻蚀产物的挥发性较差，阻滞了未反应的 InP 或 InGaAs 表面与刻蚀气体的充分接触，使得气-固相界面上的化学吸附过程受阻，从而限制了刻蚀速率。当 BCl_3 流量增加即 Cl_2 含量减少时，化学刻蚀产物 $InCl_x$ 产生速率降低，物理解吸附过程增强，刻蚀速率也随之增大。但当 BCl_3 流量从 3SCCM 增加到 4.5SCCM 即 Cl_2 从 3SCCM 减少到 1.5SCCM 时，刻蚀速率迅速下降，则是由于反应腔内没有足够多的氯基自由基，化学反应减弱，从而使得刻蚀速率下降。

如图 3-2(b)In 基材料刻蚀速率随着 ICP 功率的增加而增快，这是因为 ICP 功率的增加使得等离子体中离子（主要是 Ar^+）和 Cl 基自由基的密度增加很快，增强了离子物理溅射和刻蚀表面的化学反应速率，从而使刻蚀速率加快。

如图 3-2(c)所示，刻蚀速率随 dc-Bias 的增大先增大，后减小。当偏置功率从 110 V 变到 130V 时，偏置功率的增加产生了更多定向加速的高能离子，从而增强了表面离子的物理溅射及化学反应速率。当偏置电压从 130V 继续增大时，由于高能粒子的能量过

大，使得样品表面的活性基来不及反应就被解吸附掉，所以刻蚀速率反而减小。不过总体而言，dc-Bias 对刻蚀速率的影响较小。

3.2.1.2 AFM、EDX 和 SEM 表征

平滑的被刻蚀面与精确的尺寸和侧壁控制对于大多数器件制备来说是比较重要的。ICP 刻蚀参数除了影响刻蚀速率外，对刻蚀后的样品表面形貌与侧壁也具有重要影响。如图 3-3 所示，在 BCl_3+Cl_2 总流量 6SCCM，Ar 气流量 10SCCM，ICP 功率 250W，dc-Bias120V，压强 0.7 Pa 的条件下，AFM 测量发现，刻蚀后样品表面粗糙度随 BCl_3 流量增大而增大。这是因为随着 BCl_3 流量的增加，反应腔体内电离出更多的 Cl 离子，与样品中的 In 反应，生成了更多难以挥发的 $InCl_x$ 刻蚀产物，使刻蚀后表面变粗糙。如图 3-4 所示，EDX 测量发现，刻蚀后样品表面 Cl 含量随刻蚀气体中 BCl_3 流量的增加而增加，这和 AFM 测量的结果一致。

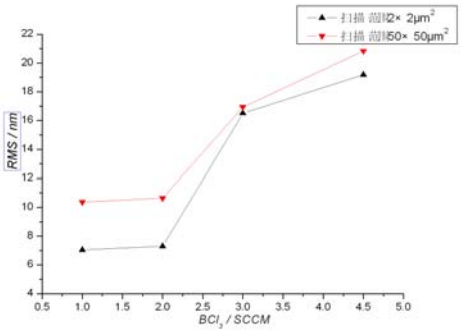

图 3-3 刻蚀表面粗糙度与 BCl_3 流量的关系

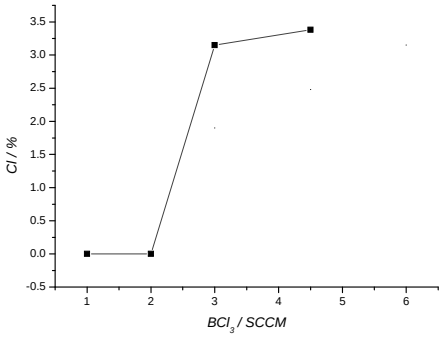

图 3-4 刻蚀表面 Cl 含量与 BCl_3 流量的关系

图3-5示出了6SCCM BCl_3，10SCCM Ar，500W ICP power，120V dc-Bias的条件下，InP/$In_{0.55}Ga_{0.45}As$/InP (PIN)样品ICP刻蚀后的SEM相貌照片，在该条件下刻蚀速率约800 nm/min，被刻蚀面均匀光洁无残留物，刻蚀侧壁陡直，图形边缘保持平整。

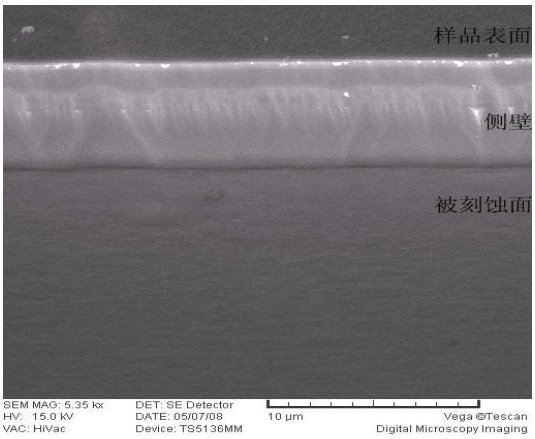

图 3-5 InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP(PIN)样品刻蚀后 SEM 图片

3.2.2 延伸波长 ICP 刻蚀研究

$BCl_3/Cl_2/Ar$感应耦合等离子体刻蚀$In_{0.8}Al_{0.2}As$ / $In_{0.8}Ga_{0.2}As$/ $In_{1-x}Al_xAs$, 材料结构如图3-6所示。首先在S.I.(100)正晶InP衬底上生长一层1.35μm厚的N^+ $In_{1-x}Al_xAs$缓冲层(x从0.53 渐变到0.8, 掺杂浓度为3E18cm^{-3})，然后是2.0μm厚的n型轻掺$In_{0.8}Ga_{0.2}As$ 吸收层，最后是一层厚度为0.6μm 的高掺杂(Be 2E18cm-3) $In_{0.8}Al_{0.2}As$帽层(即欧姆接触层)。

$In_{0.8}Al_{0.2}As$	P^+	Be	0.6μm	>2*10E18
$In_{0.8}Ga_{0.2}As$	n^-	Si	~2.0μm	
$In_xAl_{1-x}As$		N^+	Si	
InP substrate	S.I	Fe	350μm±20μm	

图 3-6 延伸波长刻蚀样品材料结构

3.2.2.1 刻蚀速率

如图 3-7(a)所示在其它条件相同时，刻蚀速率随 BCl_3 含量的增加而减慢。这是因为同流量的 BCl_3 比 Cl_2 分离出的 Cl 基自由基要少。所以当 BCl_3 比例增加时，腔室中 Cl 基自由基浓度减少，化学刻蚀作用减弱，导致整体刻蚀速率变慢。

如图 3-7(b)所示,In 基材料刻蚀速率随着 ICP 功率的增加而增快，这是因为 ICP 功率的增加使得腔体中等离子体（主要是 Ar+）和 Cl 基自由基的密度增加，增强了离子物理溅射和刻蚀表面的化学反应速率，从而使刻蚀速率加快。

如图 3-7(C)所示，刻蚀速率随 DC-Bias 的增加而加快，这是因为随着 DC-Bias 的增加，离子能量增加，刻蚀残留物的物理解吸附能力增强，从而刻蚀速率增加。总体而言，DC-Bias 对刻蚀速率的影响相对于刻蚀气体组分、ICP 功率影响较小。

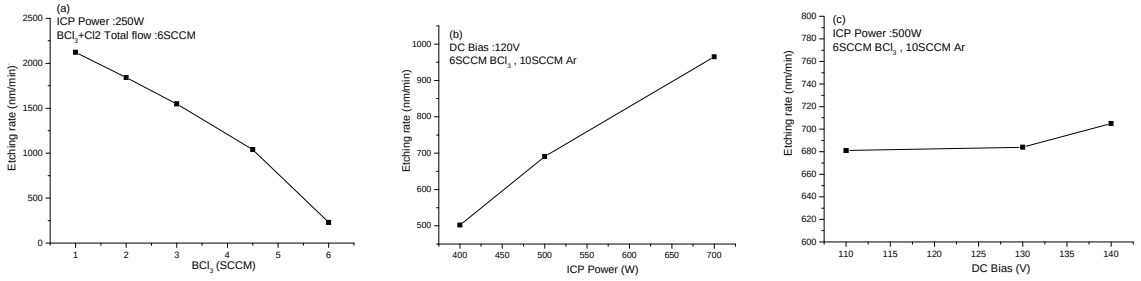

图 3-7 延伸波长样品刻蚀速率与(a)BCl_3 流量,(b)ICP 功率,(c)DC-Bias 气体组分的关系

3.2.2.2 刻蚀表面状况

刻蚀表面状况主要指刻蚀后表面是否有残留物和聚合物，粗糙度如何，刻蚀轮廓是否完好光滑等。

我们采用 SEM 观察了刻蚀后的表面，图 3-8 显示了样品在不同条件下 ICP 刻蚀形貌。

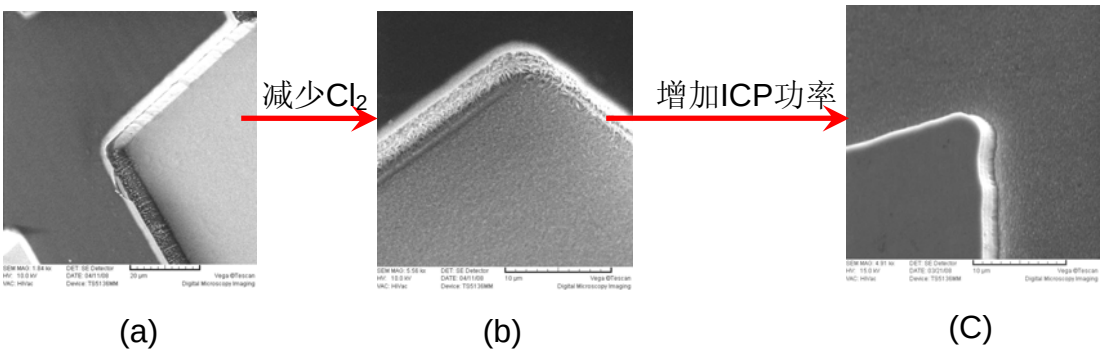

图3-8 (a) Cl_2: BCl_3=5 SCCM:1 SCCM, Ar流量10SCCM, ICP功率250w，DC-Bias120V
(b) Cl_2: BCl_3 =0 SCCM:6 SCCM, Ar流量10SCCM, ICP功率250w，DC-Bias120V
(c) Cl_2: BCl_3 =0 SCCM:6 SCCM, Ar流量10SCCM, ICP功率500w，DC-Bias120V

如图 3-8(a)所示，在 Cl_2:BCl_3=5SCCM:1 SCCM，Ar 流量 10SCCM，ICP 功率 250W，DC-Bias120V 的刻蚀条件中，刻蚀表面光滑平整没有发现明显的刻蚀残留物和聚合物，图形保真度好，缺点是刻蚀速率高达 2124nm/min，刻蚀深度不可控。

如图 3-8(b)所示，其它条件保持不变，增加 BCl_3 的比重到 100%，即 Cl_2: BCl_3 =0 SCCM:6 SCCM，Ar 流量 10SCCM，ICP 功率 250W，DC-Bias120V 的刻蚀条件中，刻蚀后的表面和侧面很毛糙，有大量的刻蚀残留物。

如图3-8(c)所示，增加ICP功率到500W，即Cl_2: BCl_3 =0 SCCM:6 SCCM，Ar流量10SCCM，ICP功率500W，DC-Bias为120V的条件下，刻蚀速率691nm/min，刻蚀表面平整，无明显的的刻蚀残留物，台面陡直，图形保持完好。

刻蚀表面粗糙度是衡量刻蚀的一个重要质量指标，我们采用 AFM 测量了不同刻蚀气体组分条件下的刻蚀表面均方根(RMS)粗糙度。图 3-9 示出了在 Cl_2 和 BCl_3 总流量 6SCCM，Ar 流量 10SCCM，ICP 功率 250W，DC-Bias120V，压强为 0.7Pa 时，表面粗糙度随 BCl_3 含量的变化。从图中可以看出，扫面范围为 $2\times2\mu m^2$ 时表面粗糙度随 BCl_3 比例的增大而增大。这是因为 BCl_3 比重越大，刻蚀表面残留物越多。扫描范围为 $50\times50\mu m^2$ 时，表面粗糙度随 BCl_3 含量的增加先增大，这和微观测量的结果一致，当 BCl_3 流量增加到 4.5SCCM 时，RMS 急剧下降，则是由于此时大量的刻蚀残留物均匀分布，导致了宏观测量上 RMS 的降低。

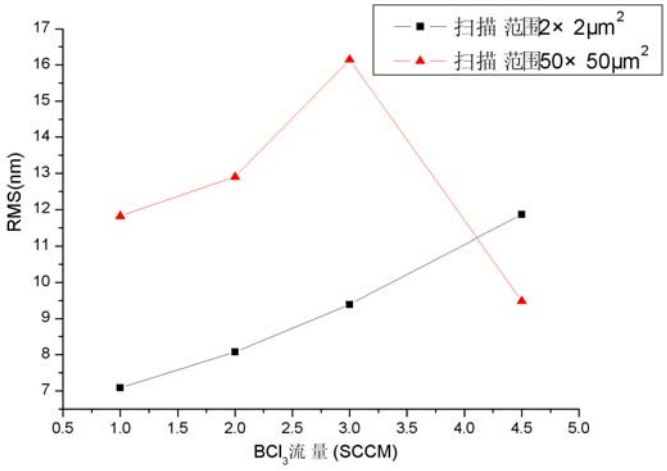

图 3-9 表面粗糙度随 BCl_3 含量的变化

如图 3-10 所示，用 EDX 对刻蚀后的表面成分进行分析发现，在 Cl_2 和 BCl_3 总流量固定在 6SCCM 时，BCl_3 所占比重越大，表面残留的 Cl 元素越多，即 $InCl_x$ 刻蚀残留物越多，这和前面 SEM、AFM 测量的结果相符。

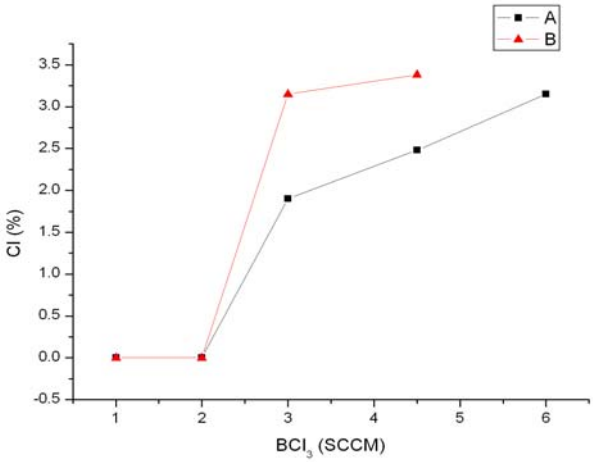

图 3-10 表面 Cl 成分随 BCl_3 流量的变化

3.3 牛津 ICP180 型 ICP 刻蚀研究

3.3.1 ICP 刻蚀参数对 In 基材料刻蚀结果的影响

对于 In 基材料如 InP、InGaAs 来说，In 组分是影响刻蚀的主要因素，因此 In 基材料的刻蚀具有相同的刻蚀规律，本小结将以 InP 衬底材料为刻蚀样品来研究 ICP 刻蚀参数对 In 基材料刻蚀结果的影响。

3.3.1.1 刻蚀速率

表 3-2（该数据由英国牛津公司提供）示出了 ICP180 各刻蚀参数对 InP 材料刻蚀速率的影响，刻蚀时间均为 5 秒。影响刻蚀速率的主要因素有 ICP 功率、RF 功率、腔体压强、样品台温度、样品和样品台导热情况等。

表 3-2 ICP180 各刻蚀参数对 InP 材料刻蚀速率的影响（U 表示样品未用硅脂粘贴在样品台上）

Run No.	Cl_2 (SCCM)	N_2 (SCCM)	ICP (W)	RF (W)	P. (mTorr)	T. (^oC)	ER (Å/min)
1(U)	15		500	60	10	60	432
1	15		500	60	10	60	417
2(U)	15		1000	80	10	60	3300
2	15		1000	80	10	60	1080
3(U)	15		500	60	10	120	484
3	15		500	60	10	120	610
4(U)	15		500	60	10	183	526
4	15		500	60	10	183	2800
5(U)	15		500	90	10	183	826
5	15		500	90	10	183	4400
6(U)	15		500	90	5	183	11400
6	15		500	90	5	183	23000
7(U)	15		500	60	10	183	550
7	15		500	60	10	183	2660
8(U)	15	10	500	60	10	183	764
8	15	10	500	60	10	183	4100
9(U)	15		500	60	5	60	878
9	15		500	60	5	60	1212
10(U)	15		500	60	5	90	1060
10	15		500	60	5	90	1216
11(U)	15		500	60	5	162	2260
11	15		500	60	5	162	6300
12(U)	15		500	60	2	138	2740
12	15		500	60	2	138	2760
13(U)	15		500	60	2	163	4200
13	15		500	60	2	163	14200
14(U)	15		500	60	2	163	6200
14	15		500	60	2	163	14400
15(U)	15		1000	60	2	162	17220
15	15		1000	60	2	162	19080

ICP 功率增加，刻蚀速率加快，这是因为功率增加，增加了样品上的等离子浓度，同时增加了样品表面的温度，加快表面 $InCl_x$ 残留物的挥发，如#14 和#15，#14(U)和#15(U)所示。

RF 功率增加，刻蚀速率加快，这是因为 RF 功率增加使得等离子体的电离加快，等离子体的轰击能量加大。使得样品表面的反应离子浓度，同时物理轰击对表面残留物的去除速度加快，如#4 和#5，#4(U)和#5(U)所示。

压强减小，刻蚀速率加快，这是因为压强减小，粒子的平均自由程增加，使得样品表面的等离子体浓度和能量增加，从而增加了刻蚀速率，如#11 和#13，#11(U)和#13(U)所示。

当温度升高时，刻蚀速率加快，如#1、#3 和#4，#1(U)、#3(U)和#4(U)，#9 和#10，#9(u)和#10(U)，#12 和#13，#12(U)和#13(U)所示。当温度升高时，钻蚀增加，这是因为温度升高有利于残留物的挥发，但是温度太高，台阶侧面残留物也挥发掉了，侧向保护丢失，产生钻蚀。

当样品台温度较低（如 60℃）时，样品直接放在样品台刻蚀速率比用硅脂将样粘贴在样品台上时要快，这是因为硅脂具有良导热性，粘贴时样品的温度与样品台能保持良好的一致性；不粘贴时，样品和样品台的传热性差，样品受高密度等离子体的轰击，温度往往高于样品台的温度。

3.3.1.2 侧壁垂直度

影响侧壁垂直度的因素主要有掩膜状况、ICP 功率、RF 功率、腔体压强、样品台温度等，下面分别加以说明：

掩膜的角度也会直接影响到侧面垂直度，一般来说，掩膜边缘垂直度越高，刻蚀后样品侧面垂直度也越高。可以通过调节掩膜的角度来选择合适的台面倾角。

在一定范围内 ICP 功率增加，侧面垂直度增加，这是因为功率增加，增加了样品表面的等离子浓度，同时增加了样品表面的温度，加快表面 $InCl_x$ 残留物的挥发。比较 3-11 和 3-12，除了 ICP 功率，其它条件均相同（Cl_2 流量 15SCCM，RIE 功率 60，压强 2mTorr，刻蚀时间 5 分钟），可以看出当 ICP 功率使得温度增加太明显，将产生较严重的侧向钻蚀。

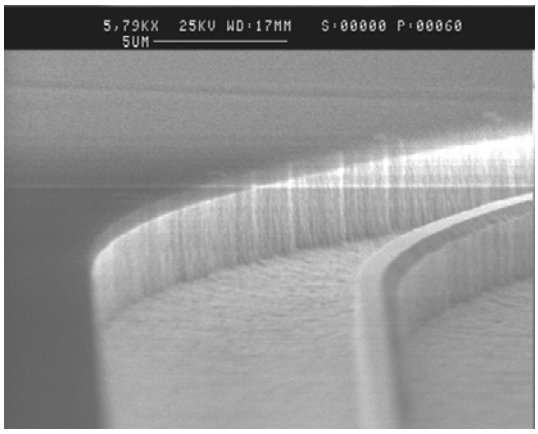

图 3-11 ICP 功率 500W

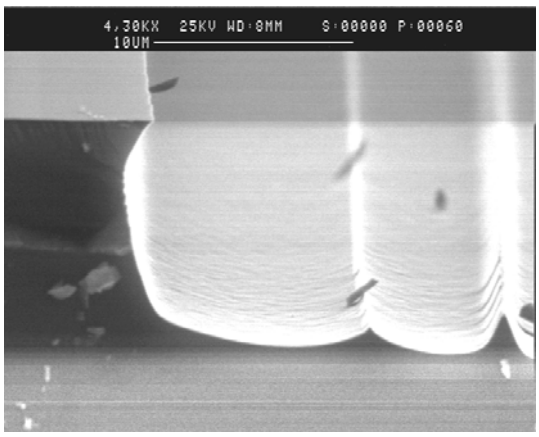

图 3-12 ICP 功率 1000W

在一定范围内 RF 功率增加，侧面垂直度增加，这是因为 DC-bias 的增加加速了等离子体对样品的轰击。但是 DC-bias 的增加同时也增加了对掩膜的轰击，当变成非选择性刻蚀时，掩膜蚀刻将使得侧面垂直度减小。

压强减小，钻蚀增加，这是因为压强减小，离子自由程增加，导致样品台加热容易，温度升高，钻蚀增加。

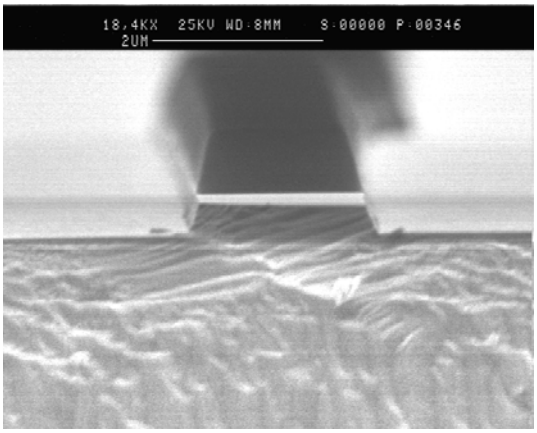

图 3-13 样品温度 120℃

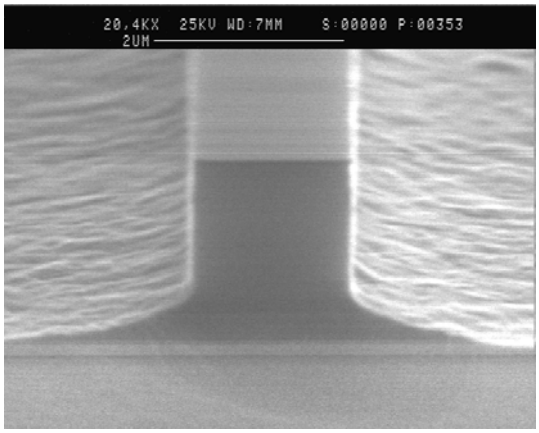

图 3-14 样品温度 183℃

如图 3-13 和图 3-14，除了刻蚀温度，其它条件均相同（即 ICP 功率 500W， Cl_2 流量 15SCCM，RIE 功率 60，压强 10mTorr，刻蚀时间 5 分钟），当温度较低时，温度升高，侧面垂直度增加，温度到一定值再继续升高，会产生钻蚀。这是因为在温度较低时，侧壁和表面都有大量的残留，刻蚀速率都很慢，随着刻蚀时间的增加，台阶越深，侧壁残留物越多，侧向刻蚀越慢，所以侧壁会产生倾角。当温度升高，表面的 $InCl_x$ 刻蚀残留物挥发掉，但侧壁的残留物还在，阻止了各相同性刻蚀，所以侧壁陡直。但是温度继续升高，侧壁的残留物也会挥发掉，产生钻蚀。

3.3.1.3 表面粗糙度

影响侧壁垂直度的因素主要有 ICP 功率、RF 功率、腔体压强、样品台温度等，下面分别加以说明：

ICP 功率增加，表面平滑，这是因为功率增加导致样品温度的增加，$InCl_x$ 残留物更易去除。RF 功率对表面粗糙度的影响不大。

压强减小，表面变平滑，这是因为，压强减小，粒子自由程增加，样品表面的所受轰击和温度都有所增加，所以表面平整。

温度越高，表面越平滑，这是因为温度越高，残留物 $InCl_x$ 挥发的越快。残留物在表面形成二次掩膜，会使表面刻蚀不均匀，增加粗糙度。

3.3.1.4 小结

为了获得垂直度高和钻蚀小的侧壁，需要在侧壁保留 $InCl_x$ 残留物，但是残留物的增加会使得刻蚀后的表面变粗糙。同时由于 Cl 基刻蚀气体对 P 不产生化学刻蚀，从而导致 In 和 P 刻蚀的不均匀性，这也会使得表面变粗糙，所以要增加物理刻蚀来去除磷。

3.3.2 常规波长 InGaAs 探测器的 ICP 刻蚀研究

3.3.2.1 掩膜的制备

1. 光刻胶掩膜

直接利用光刻的方法形成光刻胶图形作为掩膜是最简单的掩膜制作工艺。然而，采用这样的掩膜无法获得理想的刻蚀结果。刻蚀结果表明，不但刻蚀端面的平整度很差，而且存在光刻胶掩膜被碳化和击穿的现象，如图 3-15 所示。这主要是由于 In 基材料的刻蚀，刻蚀样品台的温度较高，加上 ICP 刻蚀系统中等离子体密度较高，刻蚀过程会导致样品表面温度升高，造成光刻胶碳化。同时由于光刻胶的致密性较差，部分能量较高的离子能穿透光刻胶，在掩膜覆盖的区域内形成刻蚀损伤。

为了消除这种刻蚀损伤，可以采用加厚光刻胶的方法，但加厚光刻胶，在刻蚀过程中容易造成光刻胶的崩裂。采用高温烘烤的方法可以改善光刻胶掩膜的致密性，但同时会造成掩膜严重变形。高温烘烤后，不但掩膜厚度大大减小，而且掩膜侧壁也因收缩而变得倾斜，如图 3-16 所示。而采用这样侧壁倾斜的掩膜进行干法刻蚀，将难以得到垂直的端面。

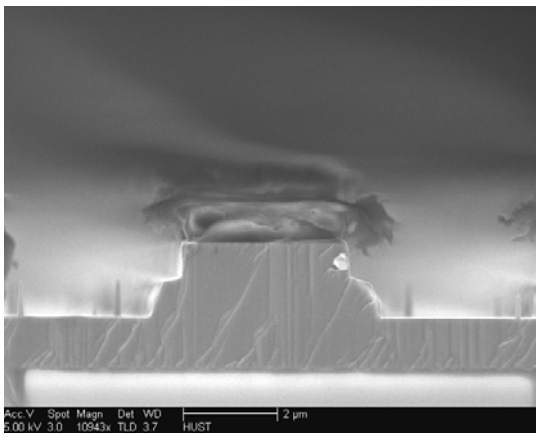

图 3-15 光刻胶掩膜

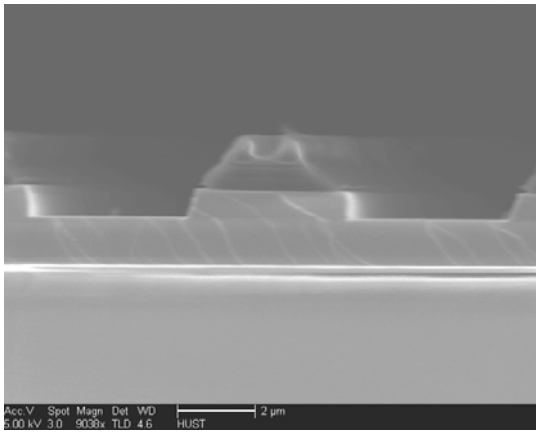

图 3-16 光刻胶掩膜

2. SiN_x 掩膜

利用 PECVD 沉积的 SiO_2 或 SiN_x 薄膜致密均匀，不容易被高能等离子体损伤，是比较理想的掩膜材料。试验采用 PECVD 在样品外延层上生长 6300 埃 SiN_x 后光刻，采用 SF_6 作为反应气体进行 RIE 刻蚀，将光刻胶图形转移到 SiN_x 掩膜上，工艺流程如图 3-17 所示。

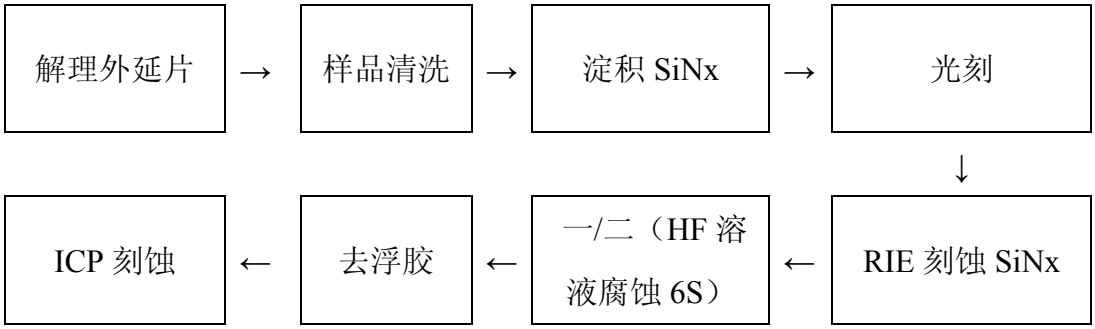

图 3-17 SiN_x 掩膜 ICP 刻蚀工艺流程

RIE 刻蚀后样品一为直接去浮胶进行 ICP 刻蚀，样品二在 RIE 刻蚀后用 HF：NH_4F：H_2O 为 3：6：10 的溶液常温漂洗 6 秒后进行 ICP 刻蚀。SEM 扫描结果如图 3-18 所示，左上为 RIE 刻蚀后样品一表面，右上为 RIE 刻蚀后 HF 溶液漂洗 6S 后样品二表面，左下为 ICP 刻蚀后样品一表面，右下为 ICP 刻蚀后样品二表面。由图可以看出，掩膜的不平整直接影响 ICP 刻蚀后样品表面的粗糙度。

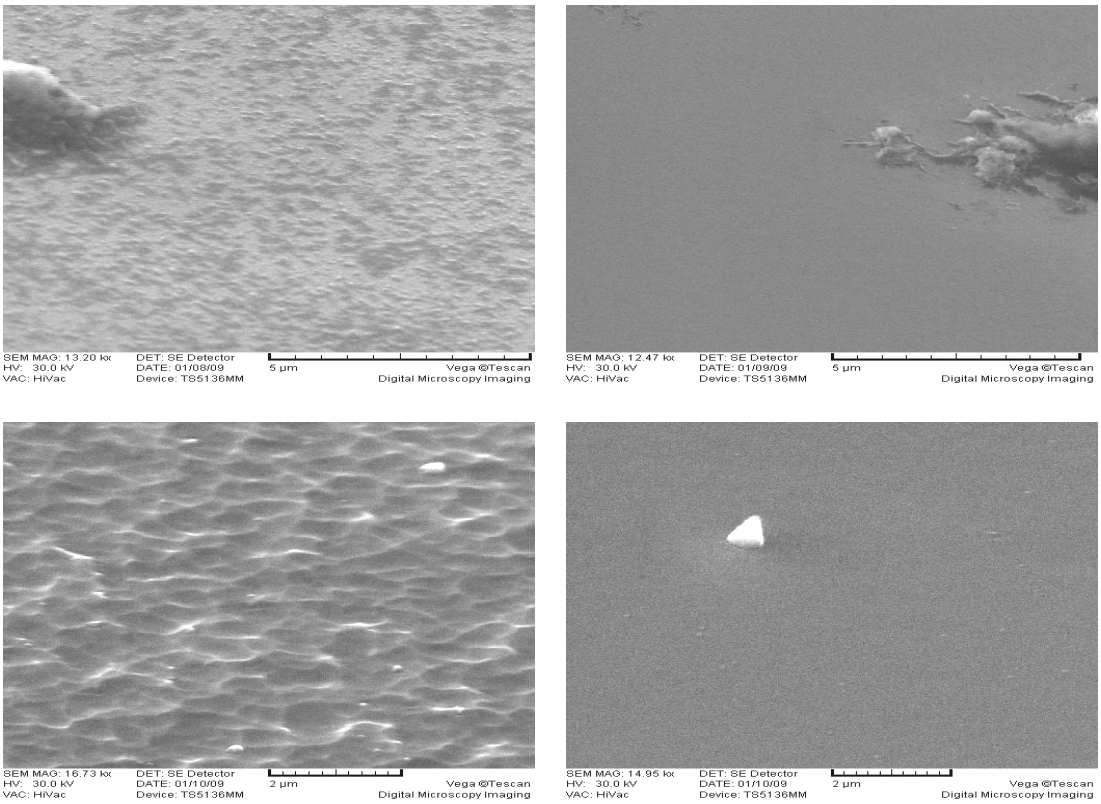

图 3-18 SF6 干法刻蚀的 SiN 掩膜和以其为掩膜的 ICP 刻蚀 InGaAs 表面

光刻版边缘的平整度直接影响到 SiN_x 掩膜边缘的平整度，进而影响 ICP 刻蚀后样品台阶边缘的平整度。如图 3-19 显示了采用不同光刻板光刻后 ICP 刻蚀的 InGaAs 端面。

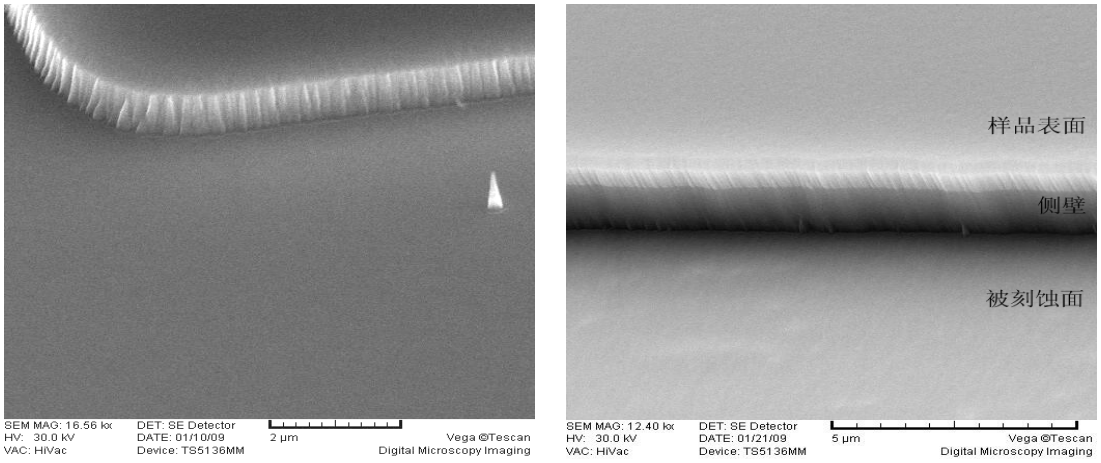

图 3-19 不同光刻板光刻后 ICP 刻蚀的 InGaAs 端面

3. 小结

掩膜的材料致密性、侧壁粗糙度和垂直度等对刻蚀效果具有至关重要的影响。对于 InGaAs 材料来说，采用 PECVD 生长 SiN_x，选择边缘平整的光刻板，用 SF_6 RIE 刻蚀 SiN_x 后用 HF：NH_4F：H_2O 为 3：6：10 的溶液常温腐蚀 6 秒，可以实现垂直光滑的刻蚀端面。

3.3.2.2 Cl_2/N_2 对常规波长 InGaAs 探测器的 ICP 刻蚀研究

Ar 气和 N_2 能加速 Cl_2 的分离，提高刻蚀速率，相比较 Ar 气，N_2 的物理轰击力小，对材料造成的损伤小，同时在刻蚀过程中 N_2 能和材料中的 Si 发生反应生成 SiN_x，在材料表面产生钝化。基于以上优点，本小结将利用 Cl_2/N_2 对常规波长 InGaAs 探测器进行 ICP 刻蚀研究。材料结构如图 3-1 所示。

1. N_2/Cl_2 对常规波长 InGaAs 台面成型的影响

如图 3-20 所示，其它条件固定，随着 N_2 流量的增加，即 N_2/Cl_2 比增加，刻蚀速率减慢，这是因为在 N_2/Cl_2 为 1.2 到 2.5 的区间里，Cl 基的化学刻蚀占主导，N_2 对 Cl_2 的稀释，减少了化学刻蚀。如图 3-21 所示，随着 N_2 流量的增加，即 N_2/Cl_2 比增加，侧壁垂直度减小，这可能是因为物理刻蚀增加，化学刻蚀减少，侧壁残留物减小，残留物对侧壁的保护减小，导致侧壁垂直度的减小。如图 3-22 所示，N_2/Cl_2 比增加，刻蚀表面光滑度增加，这是由于 N_2 的增加，物理轰击作用增强，对残留物的去除能力增强。

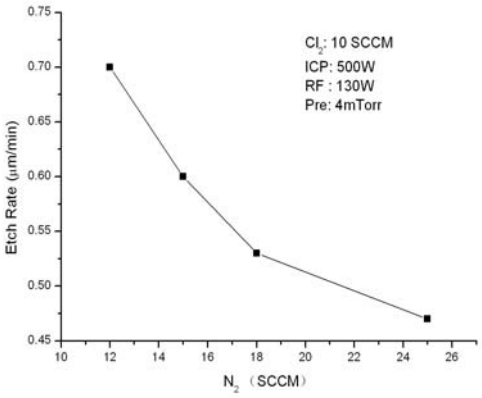

图 3-20 N2 流量对刻蚀速率的影响

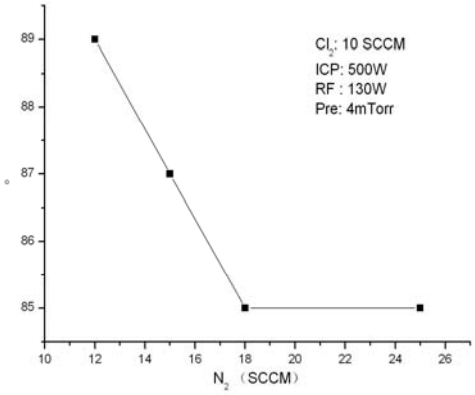

图 3-21 N2 流量对侧壁垂直度的影响

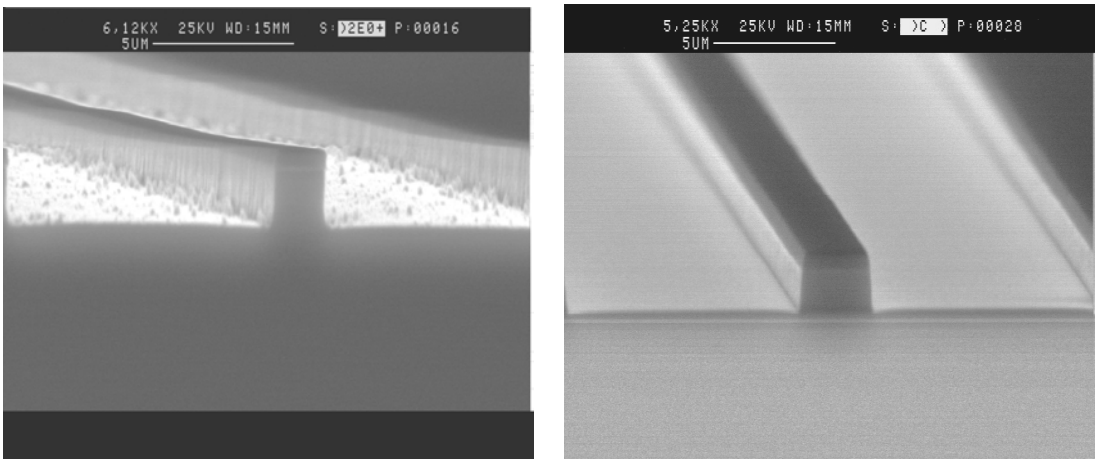

图 3-22 不同 N_2 流量 ICP 刻蚀端面左图为 12SCCM，右图为 25SCCM，其它条件相同

图 3-23 显示了不同 Cl_2 流量下的 ICP 刻蚀端面，其中左图为 10SCCM，右图为 15SCCM，其它条件相同（N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 500W，RF 功率 80W，压强 8mTorr，温度 150℃，刻蚀时间 4min）。Cl_2 流量为 15SCCM，即 N_2/Cl_2 为 4：1 时，刻蚀速率为 0.13μm/min，侧壁垂直度为 65°21′；Cl_2 流量为 10SCCM，即 N_2/Cl_2 为 6：1 时，刻蚀速率为 0.93μm/min，侧壁垂直度为 65°13′，且刻蚀后表面较 N_2/Cl_2 为 4：1 时光滑。刻蚀规律和前面的试验一致。

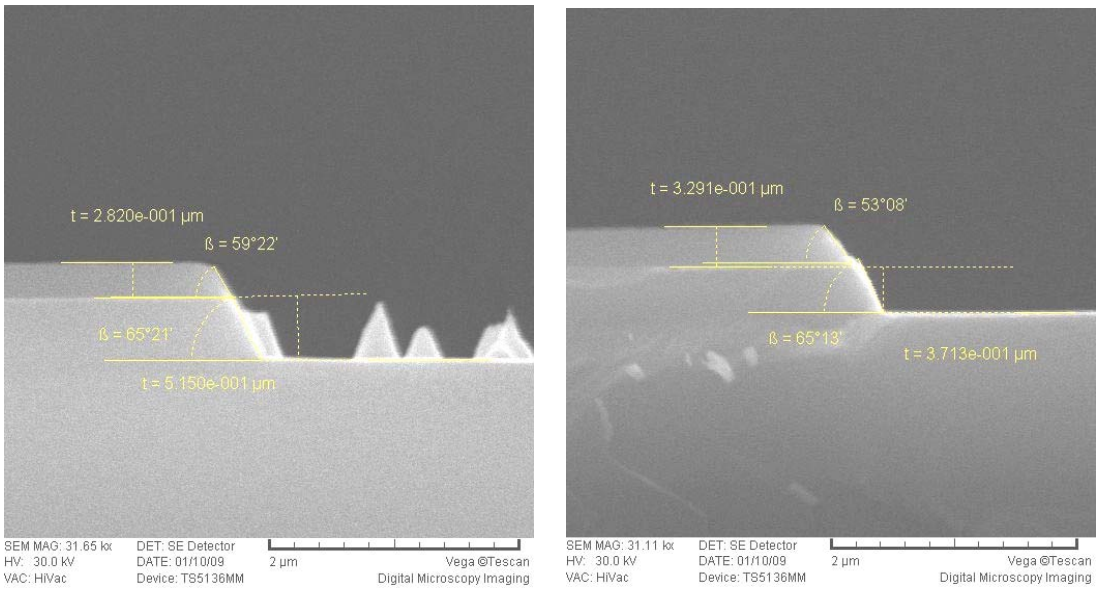

图 3-23 不同 Cl_2 流量刻蚀下 ICP 刻蚀端面其中左图为 15SCCM，右图为 10SCCM，其它条件相同

2. RF 功率对常规波长 InGaAs 台面成型的影响

从表 3-3 可以看出，在其它条件保持不变的的情况下，随着 RF 功率的增加，刻蚀速率变快，侧壁垂直度增加，但同时刻蚀选择比减小。这是因为 RF 功率增加，等离子的能量增大，物理刻蚀增加，从而刻蚀速率加快，侧壁垂直度增加，同时由于物理刻蚀是一种非选择性刻蚀，导致刻蚀选择比减小。

表 3-3 RF 功率对刻蚀的影响

Cl_2 Flow SCCM	N_2 Flow SCCM	ICP Power W	RF Power W	Pressure mTorr	Temp. °C	Etch Rate μm/min	Selectivity Sample:SiNx
10	60	350	120	4	150	0.25	17:1
10	60	350	150	4	150	0.3	13:1
10	12	1000	160	4	150	0.91	19:1
10	12	1000	200	4	150	1.15	11:1

图 3-25 显示了不同 RF 功率下的 ICP 刻蚀端面，其中左图为 80W，右图为 120W，其它条件相同，即 Cl_2 流量为 10SCCM 的，N_2 流量为 60SCCM，压强 8mTorr，温度 150℃，

刻蚀时间 4min。RF 功率为 80W 时，刻蚀速率为 0.93μm/min，侧壁垂直度为 65°13′；120W 时刻蚀速率为 0.18μm/min 侧壁垂直度为 65°26′。

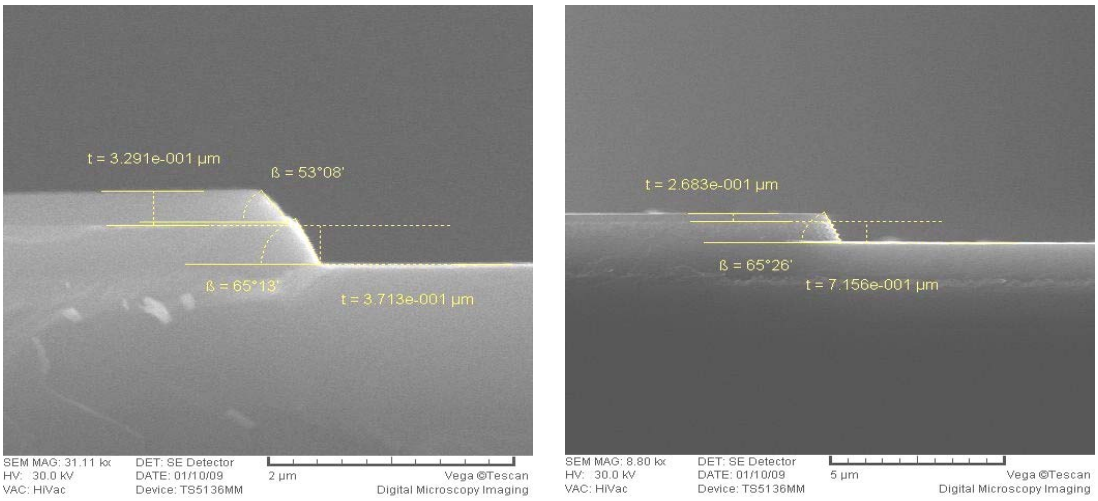

图 3-25 不同 RF 功率下 ICP 刻蚀端面其中左图为 80W，右图为 120W，其它条件相同

3. 腔体压强对常规波长 InGaAs 台面成型的影响

压强越小，刻蚀速率越大，刻蚀端面垂直度越大，这是因为压强减小，粒子的平均自由程增加，使得样品表面的等离子体浓度和能量增加，从而增加了刻蚀速率。如图 3-26 显示了不同压强下的 ICP 刻蚀端面，其中左图为 8mTorr，右图为 4mTorr，其它条件相同，即 Cl_2 流量为 10SCCM 的，N_2 流量为 60SCCM，RF 功率 120W，温度 150℃，刻蚀时间 4min。压强为 4 mTorr 时平均刻蚀速率为 0.25μm/min，侧壁垂直度为 80°12′；压强为 8mTorr 时平均刻蚀速率为 0.18μm/min，侧壁垂直度为 65°26′。

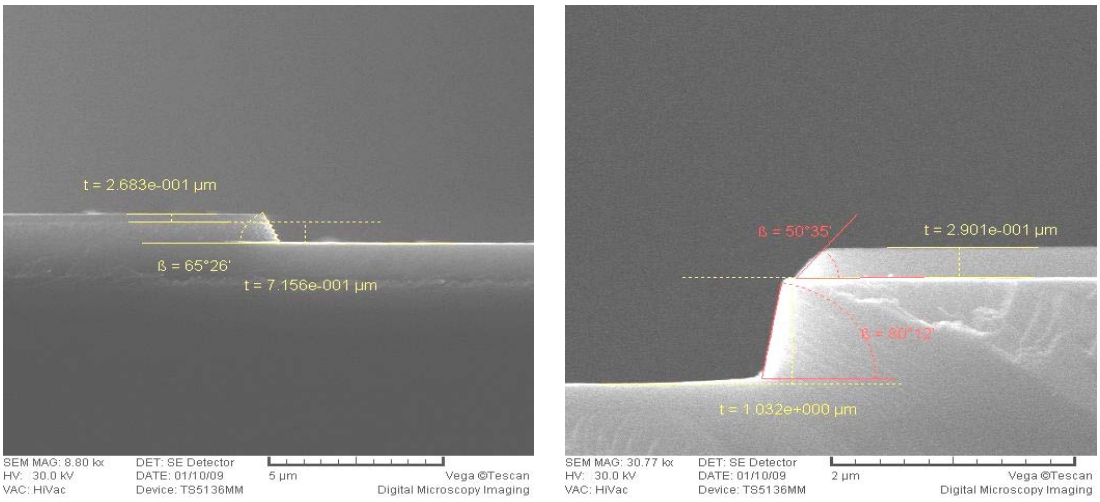

图 3-26 不同压强下 ICP 刻蚀端面其中左图为 8mTorr，右图为 4mTorr，其它条件相同

4. ICP 功率对常规波长 InGaAs 台面成型的影响

和 InP 的刻蚀一样，ICP 功率增加，刻蚀速率加快，这是因为功率增加，增加了样

品上的等离子浓度，同时增加了样品表面的温度，加快表面 $InCl_x$ 残留物的挥发。但是当 ICP 功率增加到一定的值再继续增加时，刻蚀速率反而会减小，同时刻蚀后的表面变粗糙。图 3-27 显示了不同 ICP 功率的 ICP 刻蚀端面其中左图为 1000W，右图为 1500W，其它条件相同，即 Cl_2 流量为 10SCCM 的，N_2 流量为 12SCCM，RF 功率 160W，温度 150℃。左图刻蚀速率为 0.91μm/min，右图刻蚀速率为 0.76μm/min，且表面较左图粗糙。可能原因为随着 ICP 功率的增大，化学刻蚀增强，但 ICP 功率增加会导致系统的 DC-Bias 减小，离子能量降低，物理刻蚀减弱，物理刻蚀对刻蚀残留物的解吸附能力减弱，使得刻蚀速率变慢，刻蚀表面变粗糙。

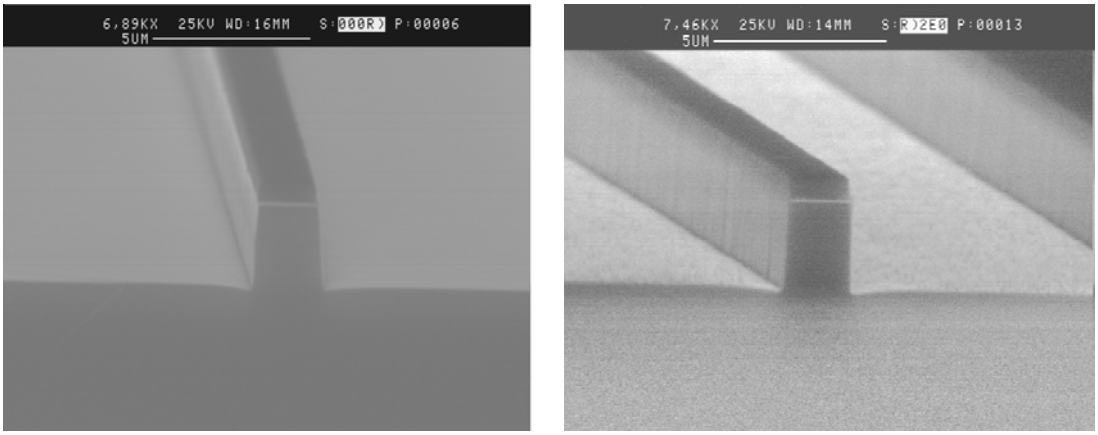

图 3-27 不同 ICP 功率的 ICP 刻蚀端面其中左图为 1000W，右图为 1500W，其它条件相同

3.3.2.3 小结

（1）为了获得较快的刻蚀速率，垂直的刻蚀端面，清洁干净的刻蚀表面，In 基材料的 ICP 刻蚀需要将样品加热到较高的温度，光刻胶在这个温度下会碳化，因此需要用硬掩膜，推荐使用 SiN_x 和 SiO_2；（2）N_2/Cl_2 对刻蚀具有重要的影响，N_2/Cl_2 的比例越高，刻蚀后的表面越光滑，但同时刻蚀端面垂直度越低，刻蚀速率越慢；（3）在样品台温度大于等于 150℃时，且 ICP 功率较高时，样品是否用硅脂粘贴在样品台上对刻蚀结果影响不大。样品台温度大于等于 150℃，但 ICP 功率较小时，为了获得光滑的刻蚀表面，则需要用硅胶将样品粘贴在样品台上；（4）RF 功率增加，刻蚀速率变快，侧壁垂直度增加，刻蚀选择比减小；（5）在 ICP 功率小于等于 1000W 的范围内，当减小 ICP 功率时，为了得到垂直而光滑的刻蚀表面，往往需要增加 N_2/Cl_2 的比例。比较好的选择为当 ICP 功率为 1000W 时，N_2/Cl_2 比例为 1.2：1；当 ICP 功率为 350W 时，N_2/Cl_2 比例为 6：1。

当 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 120W，压

强 4mTorr，样品台温度 150℃时，刻蚀时间 4min，ICP 刻蚀 InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP（PIN）外延材料形貌如图 3-28 所示。在此条件下样品 InP 层的刻蚀速率为 0.28μm /min，$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 层的刻蚀速率为 0.22μm/min，且刻蚀速率稳定，刻蚀后的侧壁垂直度为 80°12′，无钻蚀，刻蚀后的表面光洁无残留物，此条件适合 2μm 左右台阶深度的常规波长 InGaAs 探测器的制备。

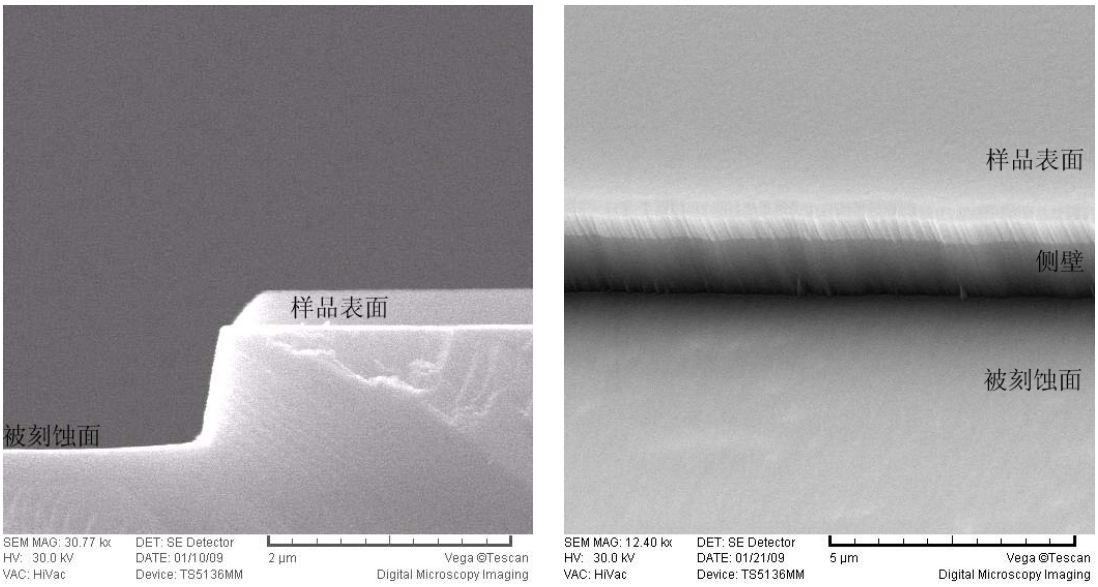

图 3-28 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 120W，压强 4mTorr，样品台温度 150℃时，刻蚀时间 4min，ICP 刻蚀 InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP（PIN）外延材料形貌

3.3.3 延伸波长 InGaAs 探测器的 ICP 刻蚀研究

3.3.3.1 CH_4/ Cl_2 对延伸波长 InGaAs 探测器的 ICP 刻蚀研究

氯基气体刻蚀 In 基材料的刻蚀速率快，虽然可以通过改进刻蚀参数改善刻蚀结果，但是侧壁垂直度低，钻蚀大，刻蚀表面仍然较粗糙。烷基气体刻蚀 In 基材料能得垂直的侧壁，光滑的表面，但是刻蚀速率较低，刻蚀 InP 材料还会造成 P 元素的缺失。在含 H_2 的刻蚀气体中，氢自由基会和样品中的受主物质如 Zn 发生反应，产生氢钝化，使得样品表面附近的载流子浓度减小。用 Cl 基和烷基的混合气体来刻蚀 In 基材料，刻蚀速率比烷基气体要快，比 Cl 基气体刻蚀出来的侧壁垂直度好，表面光滑度好。

本小结将用 CH_4 和 Cl_2 的混合气体来对延伸波长 InGaAs 探测器的台面成型进行研究。样品结构如图 3-6 所示。

1. CH_4/Cl_2 对延伸波长 InGaAs 台面成型的影响

在 ICP 刻蚀过程中，CH_4 气体会分解，并形成聚合物，这些聚合物沉积在样品表面

和侧壁，表面的沉积物在垂直等离子体的轰击下会分解，侧壁的聚合物则形成保护层，阻止侧向刻蚀，从而得到钻蚀小、垂直度高的侧壁。图 3-29 示出了 CH_4/Cl_2 比对侧壁垂直度的影响。低比例的 CH_4/Cl_2 由于缺小侧向保护，容易侧向钻蚀，形成如图 3-29 左图的侧壁，调节 CH_4/Cl_2 到合适的值可以得到垂直的刻蚀端面，继续增到 CH_4/Cl_2 的比例，会得到如图 3-29 右图所示的斜坡。

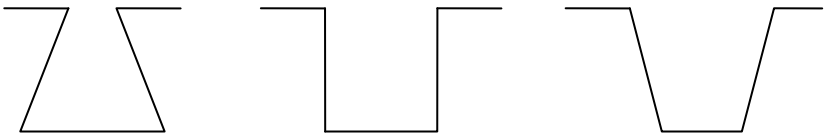

图 3-29 CH_4/Cl_2 对刻蚀端面的影响示意图

图 3-30 示出了不同 CH_4/Cl_2 的 ICP 刻蚀端面其中左图为 9SCCM：18SCCM，右图为 10SCCM：9SCCM，其它条件相同，即 ICP 功率为 1800W，RF 功率为 130W，腔体压强为 5mTorr，样品台温度为 60℃。CH_4/Cl_2 为 9：18（1：2）时侧壁为 98°04′，刻蚀速率为 1.88μm /min；CH_4/Cl_2 为 10：9（~1：1）时，侧壁为 99°48′，刻蚀速率为 1.32μm /min。可以看出当 CH_4/Cl_2 比例增大到一定值再继续增大，会得到更倾斜的侧壁，通过调整 CH_4/Cl_2 的比例，选择合适的倾角。同时随着 CH_4/Cl_2 比例增大，刻蚀速率变慢，钻蚀变小。

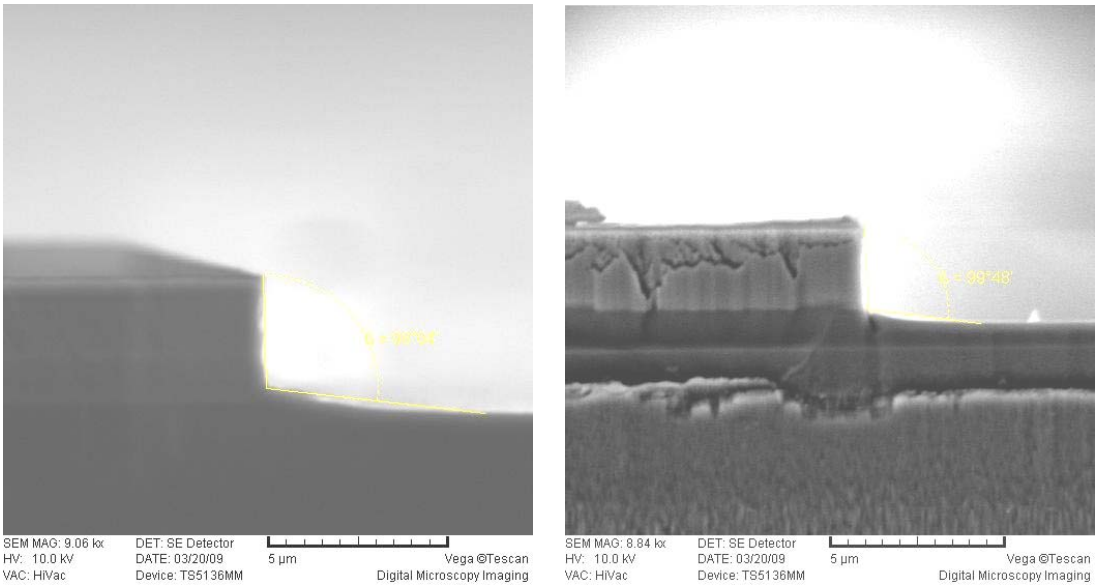

图 3-30 不同 CH_4/Cl_2 的 ICP 刻蚀端面其中左图为 10：9，右图为 9：18，其它条件相同

2. ICP 功率和样品台温度对延伸波长 InGaAs 台面成型的影响

ICP 功率越大，刻蚀速率越快。当样品台温度较低时（例如 60℃），样品不宜用硅

胶等导热性强的物质粘贴在样品台上，为了得到光滑的刻蚀表面，需要加大 ICP 功率，即加大腔体中等离子体的密度，通过高密度等离子体的轰击，提高样品表面的温度，加快 $InCl_x$ 残留物的挥发。图 3-31 示出了 CH_4/Cl_2 比为 10SCCM：9SCCM，ICP 功率为 1800W，RF 功率为 130W，腔体压强为 3mTorr，样品台温度为 60℃时的 ICP 刻蚀形貌，在此条件下侧壁垂直度为 85°20′，刻蚀表面光滑无残留物。将 ICP 功率降低为 1400W，或将样品台温度调整为 40℃，刻蚀后的表面发黄，在 50 倍的光学显微镜下就能看到明显的刻蚀残留物。

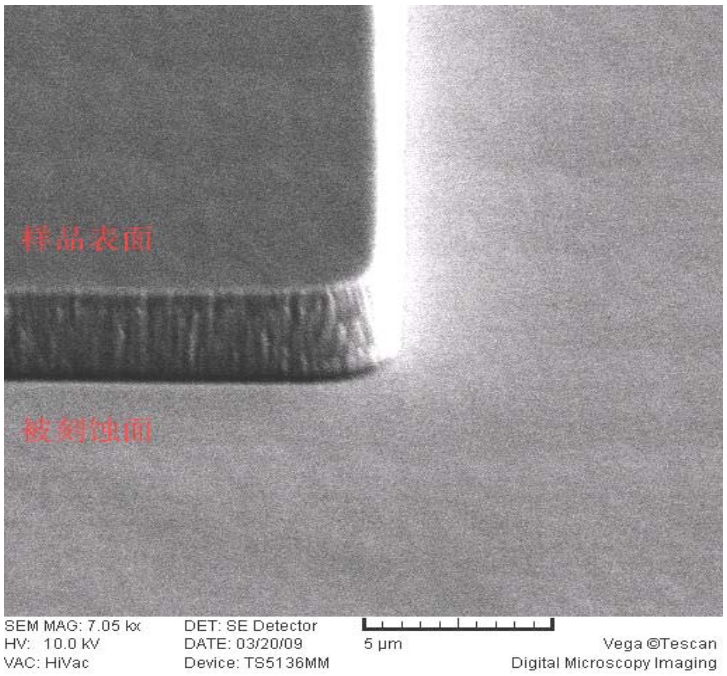

图 3-31 CH_4/Cl_2 比为 10SCCM：9SCCM ，ICP 功率 1800W，RF 功率 130W，腔体压强为 3mTorr，样品台温度为 60℃时的 ICP 刻蚀形貌

3. RF 功率对延伸波长 InGaAs 台面成型的影响

RF 功率增大，刻蚀速率变快，侧壁垂直度增加，钻蚀变小。

4. 腔体压强对延伸波长 InGaAs 台面成型的影响

图 3-32 示出了不同压强下 ICP 刻蚀端面，由图可以看出在高真空环境下，真空度越高，刻蚀端面越垂直，这和前面 InP 及常规波长的刻蚀规律一致。

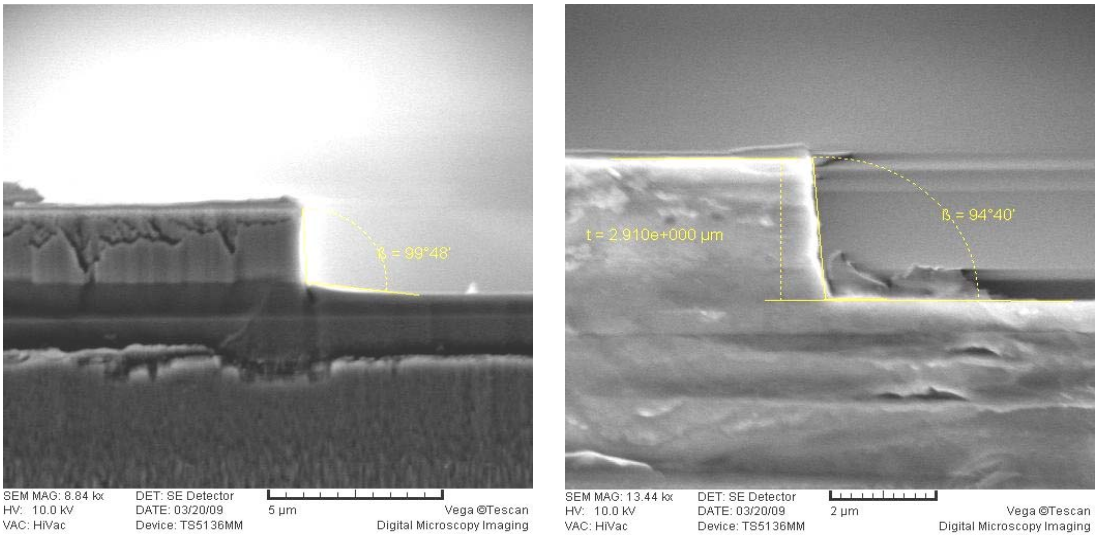

图 3-32 不同腔体压强下 ICP 刻蚀端面其中左图为 5mTorr，右图为 3mTorr，其它条件相同

5. 结论

当 CH_4/Cl_2 比为 10SCCM：9SCCM ，ICP 功率为 1800W，RF 功率为 130W，腔体压强为 5mTorr，样品台温度为 60℃时，ICP 刻蚀 $In_{0.8}Al_{0.2}As/In_{0.8}Ga_{0.2}As/In_xAl_{1-x}As$（PIN）外延材料形貌如图 3-33 所示。在此条件下刻蚀后的侧壁坡度为 99°12′，刻蚀后的表面光洁无残留物。但外延层平均刻蚀速率为 1.26μm /min，对于制备 2μm 左右台面深度的延伸波长 InGaAs 探测器，刻蚀速率过快，同时钻蚀略大了些。

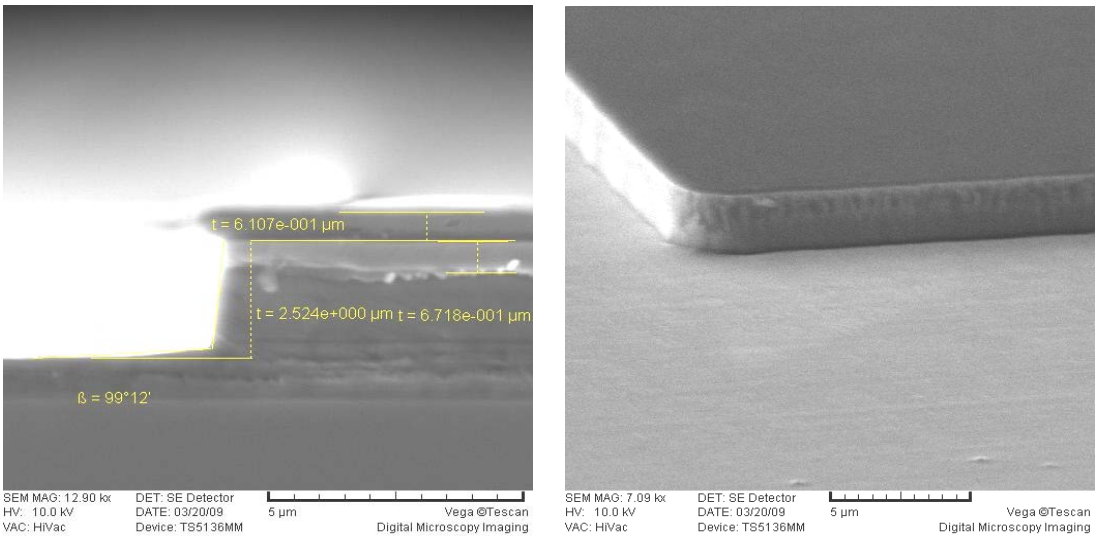

图 3-33 CH_4/Cl_2 比为 10SCCM：9SCCM ，ICP 功率 1800W，RF 功率 130W，腔体压强 5mTorr，样品台温度为 60℃时，ICP 刻蚀 $In_{0.8}Al_{0.2}As/In_{0.8}Ga_{0.2}As/In_xAl_{1-x}As$(PIN)外延材料形貌

减小 RF 功率（130W-50W）可以减小刻蚀速率；减小腔体的压强（5mTorr – 3mTorr）和 CH_4/Cl_2 比（10：9 - 9：9）可以减小钻蚀，增加侧壁垂直度。在进一步优化的条件，即 CH_4/Cl_2 比为 9SCCM：9SCCM，ICP 功率为 2000W，RF 功率为 50W，腔体压强为 3mTorr，

样品台温度为 60℃时，样品形貌如图 3-34 所示。此时刻蚀速率为 0.9μm/min，刻蚀速率仍然偏快，钻蚀偏大。

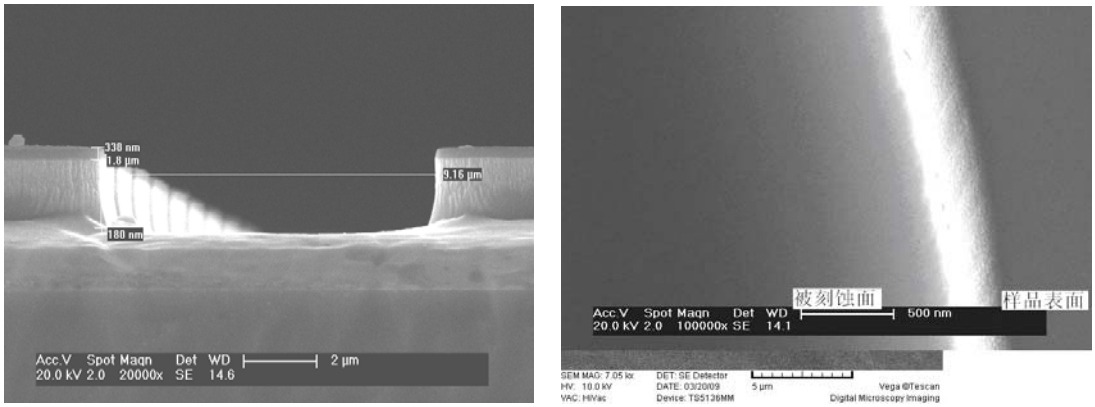

图 3-34 CH_4/Cl_2 比为 9SCCM：9SCCM ，ICP 功率 2000W，RF 功率 50W，腔体压强 5mTorr，样品台温度为 60℃时，ICP 刻蚀 $In_{0.8}Al_{0.2}As/In_{0.8}Ga_{0.2}As/In_xAl_{1-x}As$(PIN)外延材料形貌

3.3.3.2 Cl_2/N_2 对延伸波长 InGaAs 探测器的 ICP 刻蚀研究

由于 CH_4/Cl_2 刻蚀延伸波长 InGaAs 材料具有速度过快，钻蚀偏大的缺点，本小结将用 Cl_2/N_2 作为刻蚀气体，在常规波长 InGaAs 刻蚀研究的基础上，对延伸波长 InGaAs 探测器的外延层进行 ICP 刻蚀研究。

1. **样品台温度对延伸波长 InGaAs 台面成型的影响**

图 3-35 显示了 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 120W，压强 4mTorr，样品台温度 150℃时，刻蚀时间 4min，ICP 刻蚀常规波长和延伸波长外延层的形貌。从图中可以看出，在该条件下，常规波长刻蚀后的表面和侧壁均光滑无残留物，而延伸波长则覆盖了厚厚一层刻蚀残留物。这是因为在同样的刻蚀条件下，延伸波长的 In 组分为 0.8，常规波长的 0.53，而样品中 In 组分越高，刻蚀产物（$InCl_x$）的产生速率越快。同时由于晶格不匹配的延伸波长外延层比晶格匹配的常规波长的外延层缺陷多，这也加速了延伸波长 $InCl_x$ 刻蚀产物的生成速率。当 $InCl_x$ 的生成速率高于其挥发速率时，便沉积在样品表面，便产生了如图 3-35 右图所示的刻蚀形貌。

增加样品台温度（150℃-170℃），增加 RF 功率（即增加物理解吸附能力）（120W-130W）可以加快 $InCl_x$ 挥发速度。图 3-36 示出了 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 130W，压强 4mTorr，样品台温度 170℃（170℃为设置温度，实际刻蚀过程中腔体温度约为 184℃），刻蚀时间 4min，ICP 刻延伸波长外延层的形貌。在此条件下得到延伸波长 ICP 刻蚀速率为 0.32μm /min，侧壁和表面均光滑

无残留物。

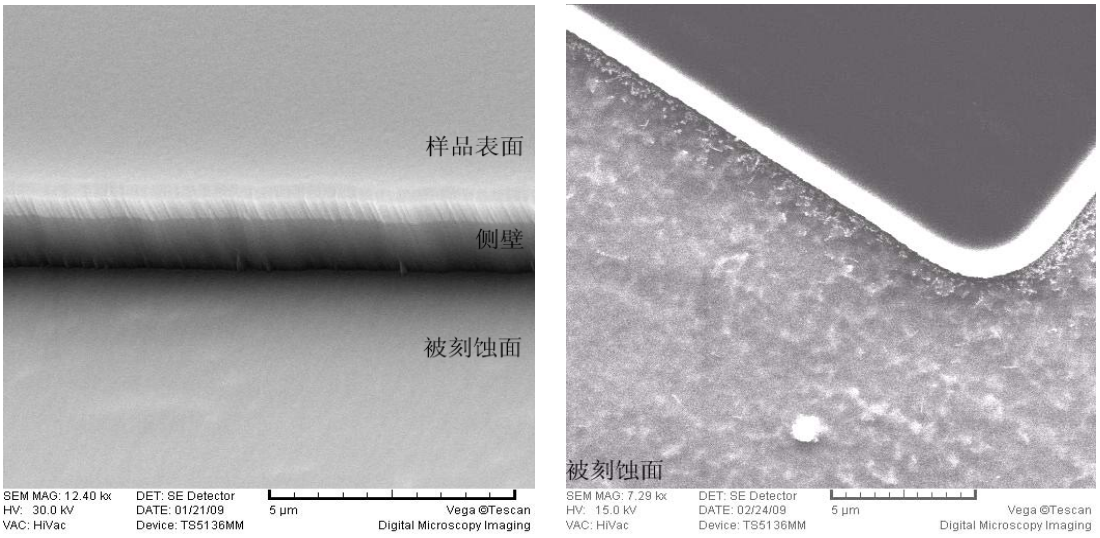

图 3-35 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 120W，压强 4mTorr，样品台温度 150℃时，刻蚀时间 4min，ICP 刻蚀外延材料形貌。其中左图为常规波长（InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP），右图为延伸波长（$In_{0.8}Al_{0.2}As/In_{0.8}Ga_{0.2}As/In_xAl_{1-x}As$）

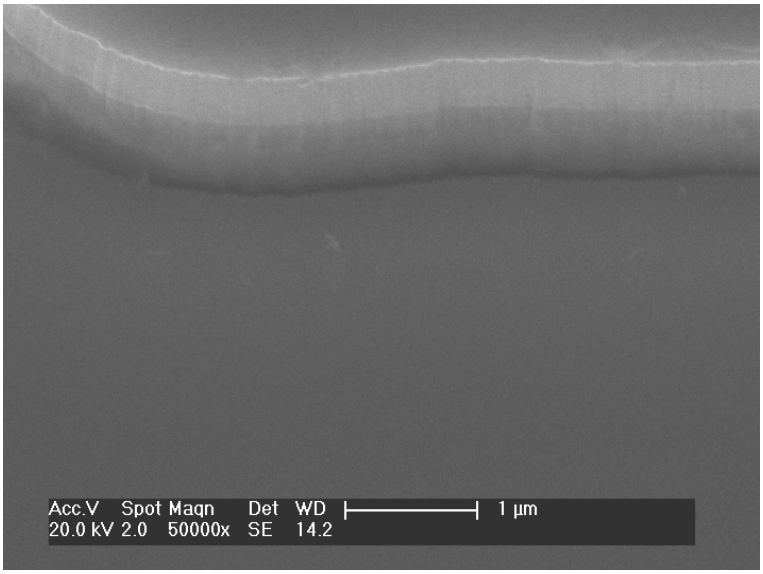

图 3-36 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 130W，压强 4mTorr，样品台温度 170℃时，背景 He 气压强 10Torr，刻蚀时间 4min，ICP 刻蚀延伸波长外延材料形貌

2. 腔体压强对延伸波长 InGaAs 台面成型的影响

在图 3-36 刻蚀条件的基础上增加腔体压强（4mTorr-8mTorr），刻蚀结果如图 3-37 所示，侧壁和台阶附近的刻蚀表面有残留物。这是因为腔体压强增加时，离子平均自由程减小，平均能量减小，对样品的物理轰击减弱，对残留物的物理解吸附能力减弱，导致残留物的堆积。

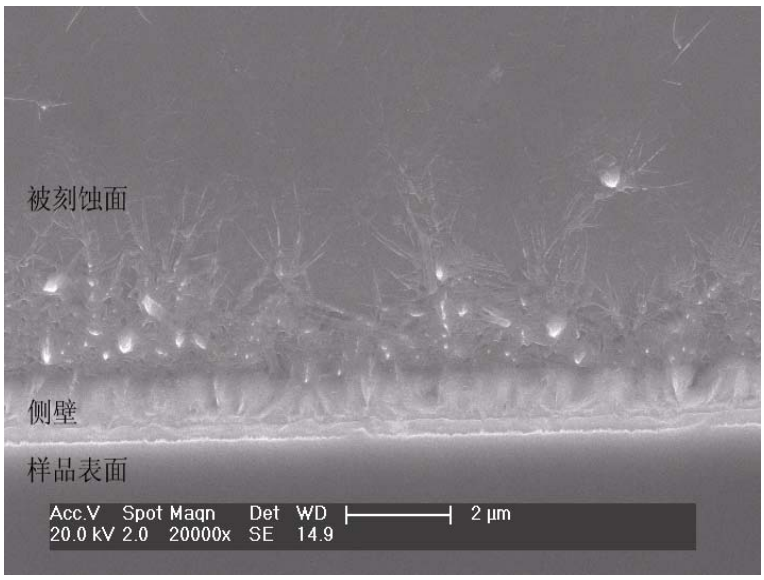

图 3-37 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 130W，压强 8 mTorr，样品台温度 170℃时，背景 He 气压强 10Torr，刻蚀时间 4min，ICP 刻蚀延伸波长外延材料形貌

3. 背景 He 气对延伸波长 InGaAs 台面成型的影响

在图 3-36 的基础上将背景 He 气压强减小（10Torr－0Torr），刻蚀结果如图 3-38 所示，侧壁有微量的刻蚀残留物。这是因为，背景 He 气能增加样品台和样品的导热性，增加刻蚀时样品的温度，促进表面和侧壁刻蚀残留物的挥发。

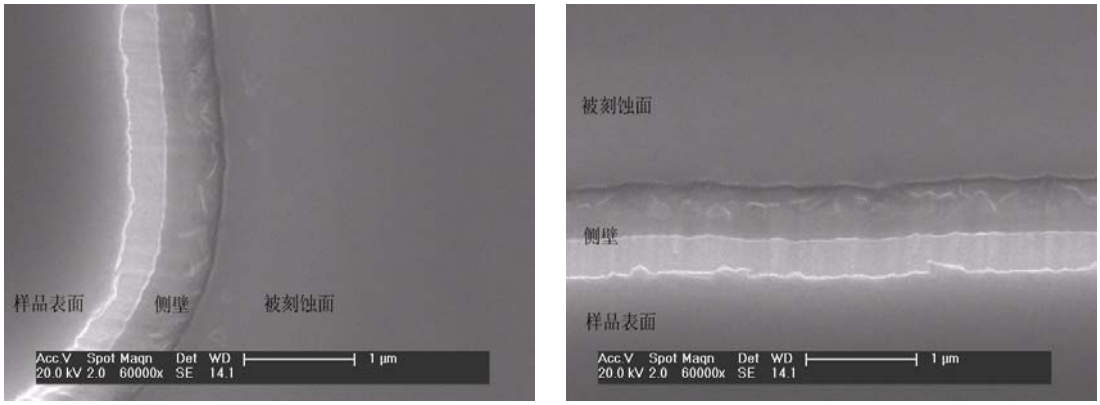

图 3-38 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 130W，压强 8 mTorr，样品台温度 170℃时，背景 He 气压强 0 Torr，刻蚀时间 4min，ICP 刻蚀延伸波长外延材料形貌

4. 结论

图 3-36 和图 3-39 示出了 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 130W，压强 4mTorr，样品台温度 170℃时，用硅脂将样品粘贴在 AlN 载片上刻蚀 4min 分钟的 SEM 图。在此条件下得到延伸波长外延层平均刻蚀速率约为 0.32μm /min，速度稳定可控，侧壁和表面均光滑无残留物，钻蚀小，可用于台阶高度为 2μm 左右的台面延伸波长 InGaAs 探测器的制备。

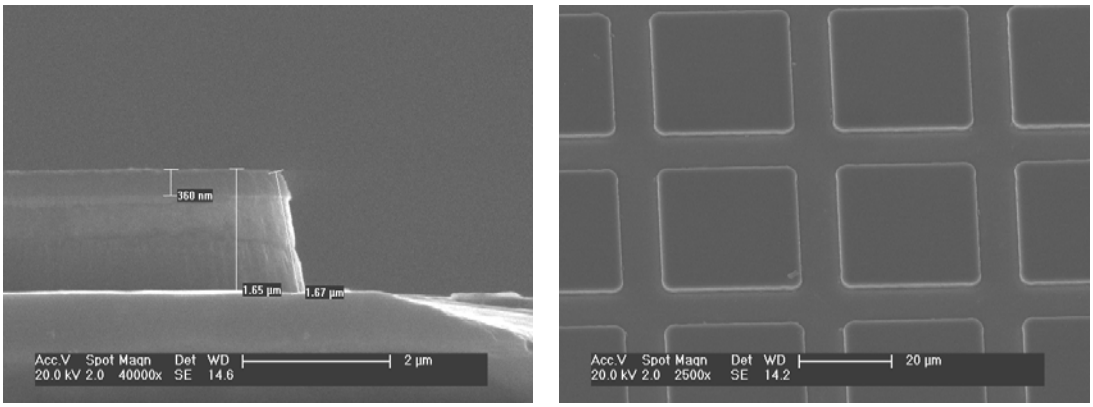

图 3-39 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 130W，压强 8 mTorr，样品台温度 170℃时，背景 He 气压强 0Torr，刻蚀时间 4min，ICP 刻蚀延伸波长外延材料形貌

3.4 本章小结

本章在国产 ICP-98C 型高密度等离子体刻蚀机和英国牛津公司的 ICP180 刻蚀机平台上，分别采用 $Cl_2/BCl_3/Ar$ 和 Cl_2/N_2 对常规波长 InGaAs 探测器，采用 $Cl_2/BCl_3/Ar$ 和 CH_4/Cl_2、Cl_2/N_2 对延伸波长 InGaAs 探测器在不同的直流偏压、ICP 功率、气体总流量和气体组分等参数下，进行台面成型。从刻蚀速率、刻蚀垂直度、刻蚀表面粗糙度等几个方面对刻蚀质量做了评估和分析。

结果表明利用 ICP180，在 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 120W，压强 4mTorr，样品台温度 150℃时，常规波长 InP 帽层的刻蚀速率为 0.28μm /min，$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 层的刻蚀速率为 0.22μm /min，且刻蚀速率稳定，刻蚀后的侧壁垂直度为 80°12′，无钻蚀，刻蚀后的表面光洁无残留物，此条件适合 2μm 左右台阶深度的常规波长 InGaAs 探测器的制备。

Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 130W，压强 4mTorr，样品台温度 170℃时，用硅脂将样品粘贴在 AlN 载片上刻蚀延伸波长 InGaAs 外延层，平均刻蚀速率约为 0.32μm /min，速度稳定可控，侧壁和表面均光滑无残留物，钻蚀小，可用于台阶高度为 2μm 左右的台面延伸波长 InGaAs 探测器的制备。

4 铟镓砷探测器的制备和性能表征

台面成型的效果需要通过测试器件的最终性能来评价。上一章中我们详细研究了 ICP 刻蚀 InGaAs 外延材料工艺,，本章将详细介绍常规波长和延伸波长 InGaAs 探测器的制备工艺，将 ICP 刻蚀工艺具体应用到 InGaAs 探测器的制作中来，并与湿法腐蚀工艺制备的探测器进行了性能对比。

4.1 InGaAs 探测器制备的典型工艺流程

本论文中所采用的台面型 InGaAs 探测器制备的基本工艺流程如图 4-1 所示。下文对不同材料和结构的 InGaAs 探测器的工艺流程进行简要说明。

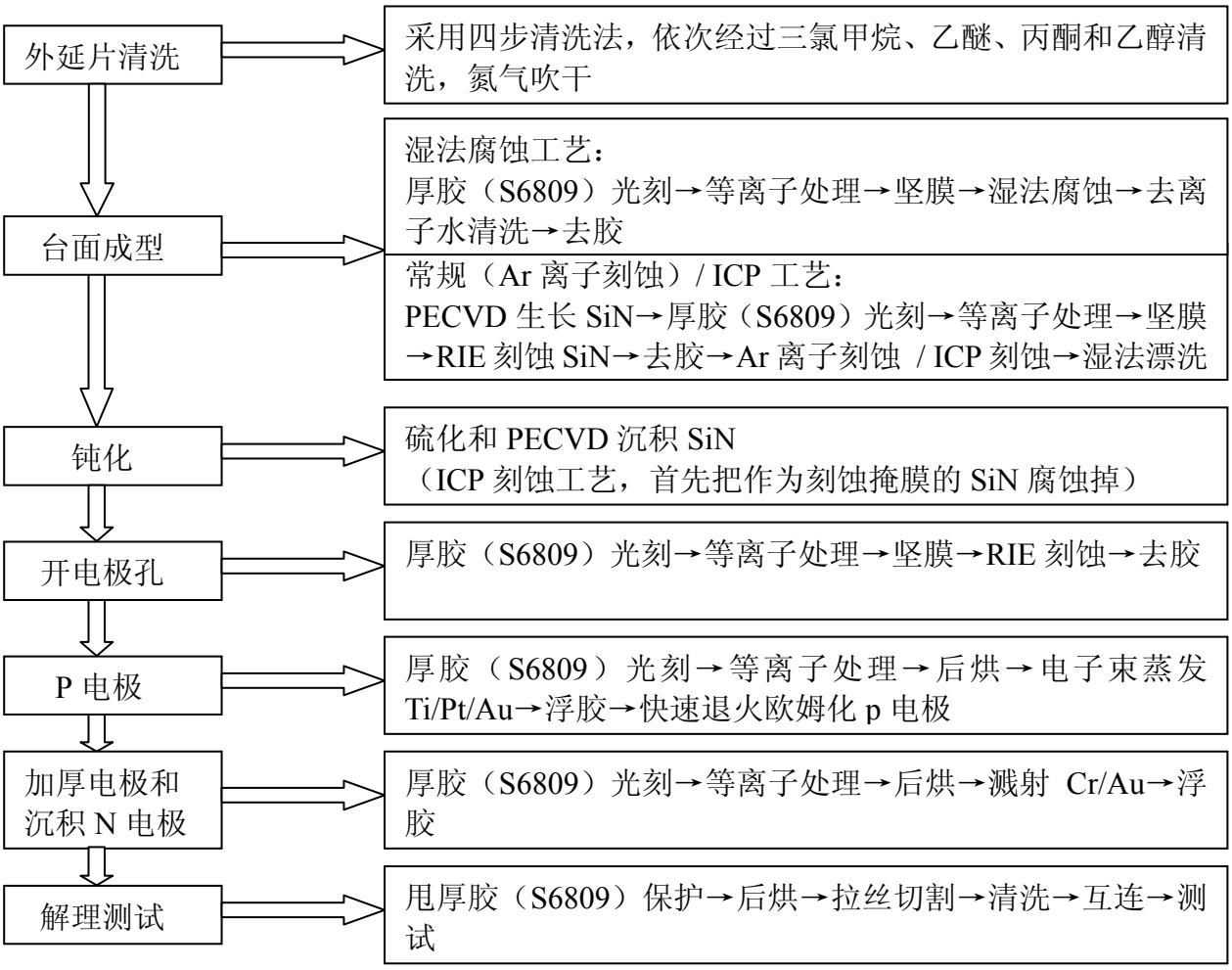

图 4-1 台面型 InGaAs 探测器制备的基本工艺流程

4.1.1 外延片清洗

试验用的常规波长外延材料结构如图 3-1 所示，延伸波长外延材料结构如图 3-6 所示。由于外延片上存在各种形式的表面沾污，会严重危害器件的性能和成品率，首先需要对外延片进行清洗。这里采用常规的有机溶剂超声波清洗法，分别依次在三氯甲烷、乙醚、丙酮和乙醇清洗中进行超声清洗，然后氮气吹干并进行干燥。有机溶剂在超声作用下产生声流并鼓泡成穴，有效的输运颗粒并溶解相应的有机物沾污，从而实现对外延片清洗。

4.1.2 台面成型

采用常规的光刻技术结合湿法腐蚀或 ICP 工艺进行探测器的台面定义，详细工艺步骤如图 4-1 中所示。在台面型 InGaAs 探测器及其阵列的制备中，台面制作的目标是获得图形保真度高、选择比高、均匀性好、侧面损伤小和清洁的台面结构。

4.1.2.1 湿法腐蚀

目前 InGaAs/InP 系材料常用的非选择湿法腐蚀液体系主要有：$HCl/HNO_3(H_2O_2)$[73, 74]，Br_2/methanol[75]，$HBr/H_3PO_4(CH_3COOH)/K_2Cr_2O_7$, HBr/H_2O_2[76]，HBr/HNO_3 和 Br_2/HBr[77] 等。其中 Br_2/HBr 系由于具有抛光性，腐蚀后表面平整度极好，因而在 III-V 族器件的制备中被广泛应用。本节主要用 Br_2:HBr: H_2O=1:25:50 的腐蚀液对 InGaAs 探测器进行台面成型。需要注意的是搅拌对 Br_2/HBr 系腐蚀液的腐蚀特性影响明显，为了较为精确的控制腐蚀速率，通常腐蚀时不加搅拌[78]。此外需考虑环境温度的变化，所以需要进行水浴加热。

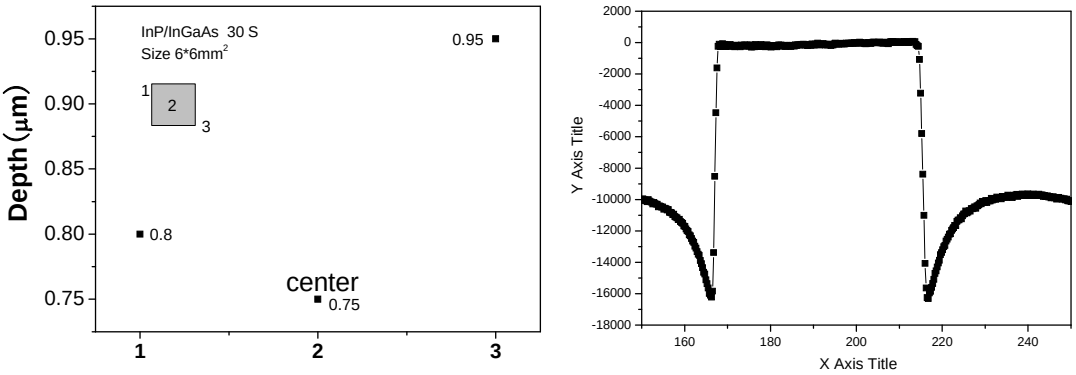

图 4-2 湿法腐蚀台面台阶仪

湿法腐蚀的缺点：一是腐蚀不均匀，片子的中间腐蚀慢，两边快，图 4-2 显示了在 6mm×6mm 片子上湿法腐蚀 30S 台阶仪测量情况；二是由于湿法腐蚀一般为各向同性，掩蔽层

下面有横向钻蚀现象，这会导致腐蚀图案的分辨率降低（如图 4-3）；三是由于材料生长不均匀和颗粒玷污等因素，导致 InP 层腐蚀掉后，在 InGaAs 表面留下岛状物(如图 4-4)。湿法腐蚀的优点是对腐蚀后的表面不产生损伤[79]。

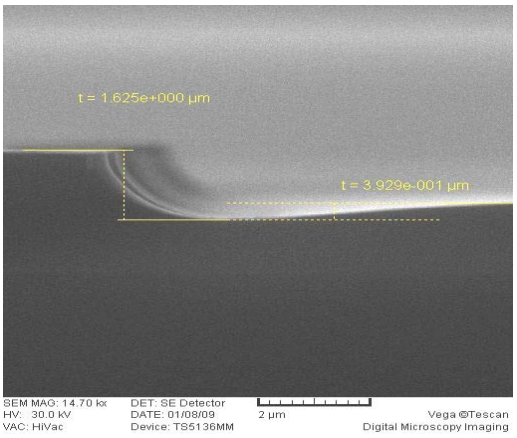

图 4-3 湿法腐蚀台面 SEM 图

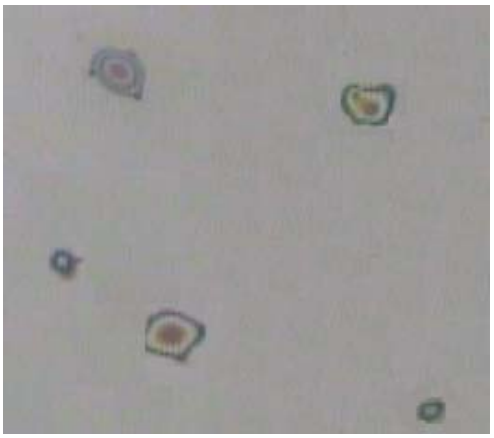

图 4-4 p-InP 层腐蚀后显微照片 (×400)

4.1.2.2 常规工艺

由于湿法腐蚀，容易发生明显钻蚀，导致腐蚀图案的分辨率降低，而且容易在 InGaAs 表面留下岛状物的缺点，实验室的台面成型的常规工艺为用 Ar^+离子干法刻蚀掉 p-InP 层和部分 InGaAs 层，接着湿法化学腐蚀掉其余 InGaAs 层[80]。

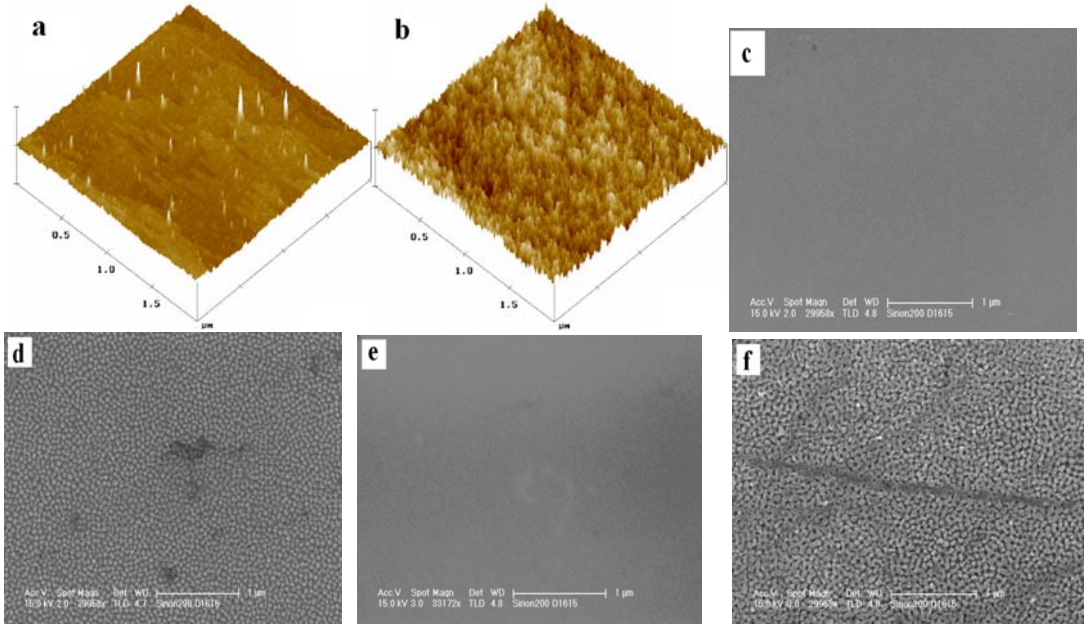

图 4-5 Ar+离子刻蚀前后 InGaAs AFM 和 InP SEM 图像 (a) InGaAs；(b) 刻蚀后 InGaAs；(c) n-InP；(d) 刻蚀后 n-InP；(e) p-InP；(f) 刻蚀后 p-InP

图 4-5(a)和图 4-5(b)分别为刻蚀前后 InGaAs 原子力显微镜图像，扫描范围 2μm，均方根粗糙度分别为 0.203nm 和 0.172nm，刻蚀后均方根粗糙度较小，图中可以看出刻蚀后表面起伏较多但均匀，刻蚀前与刻蚀后相比，起伏较大，所以刻蚀后均方根粗糙度较小。图 4-5(c)和图 4-5(d)分别是 n-InP 刻蚀前后扫描电镜图像，图 4-5(e)和图 4-5(f)分别是 p-InP 刻蚀前后扫描电镜图像，放大倍数为 3 万倍，图中可以看出刻蚀后 InP 表面非常粗糙，表面形成均匀突起，刻蚀后 n-InP 突起直径约为 40nm，刻蚀后 n-InP 突起直径约为 65nm。

研究表明 Ar^+刻蚀 III-V 族化合物半导体损伤较为明显，刻蚀后样品表面成分都发生明显变化，InGaAs 表面 In 和 Ga 含量增加明显，n-InP 和 p-InP 表面有严重 P 缺失。由于粒子的钝化作用、晶格损伤、成分的改变(V 族元素的缺失)，进而改变半导体表面的电学和光学性质。

4.1.2.3 ICP 刻蚀结合湿法腐蚀

ICP 刻蚀的优点是图形转移精度高，各向异性和可控性好；缺点是由于等离子体中高能粒子的碰撞和物理溅射作用，会在半导体材料表面形成晶格缺陷，使器件性能降低[81]，但 ICP 的刻蚀损伤较纯物理刻蚀的 Ar+刻蚀要小。结合湿法腐蚀和干法刻蚀的优点，我们改进了台面制作方法，如图 4-1 利用第三章中优化的 ICP 工艺进行台面制作，首先用 PECVD 生长一层 SiN_x，常规工艺光刻，再用 RIE 刻蚀将光刻胶掩膜图形转移到 SiN_x 上。然后用 Cl_2/N_2 在 ICP180 平台上干法刻蚀掉帽层和部分 InGaAs 吸收层，接着湿法化学腐蚀掉其余 InGaAs 层，这样既可提高光敏面的图形保真度，又可消除因等离子刻蚀而形成的 InGaAs 吸收层侧面损伤。图 4-6 显示了 ICP 刻蚀 6min 加湿法漂洗 3S 后台阶仪测量图，由图可知刻蚀均匀度明显高于湿法腐蚀，且钻蚀明显减小。

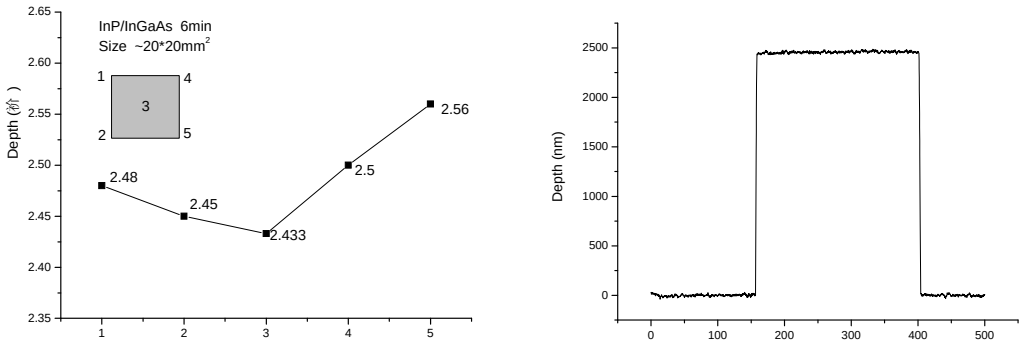

图 4-6 ICP 刻蚀加湿法漂洗后台面台阶仪测量图

4.1.3 钝化

由于晶格周期性结构的终止，半导体表面上的原子通常会偏离理想晶格的位置，从而使表面出现很多不饱和键(悬挂键，容易失去电子而出现正电荷)。这些局域化的表面/界面电子能态会对器件产生影响，甚至会对器件性能起到决定性作用[82]。因此通常台面成型后需要对台面进行硫化和钝化保护，在表面和台阶侧壁生长或涂覆一层介质膜，以实现电学隔离、钝化和保护等作用[83]。其中 ICP 台面成型后需先去掉 SiN_x 再进行硫化和钝化。

清洁干燥的表面对器件的钝化效果有着重要的影响，因此在对台面进行硫化保护前，需要在酒石酸/双氧水溶液中对外延片进行漂洗。然后将样品放在 NH_4S 溶液中硫化，以去掉样品表面和侧面的氧化层。最后用 PECVD 生长 SiN_x 钝化层。

4.1.4 生长电极和切片

光刻结合缓冲氢氟酸溶液刻蚀出窗口，随后采用剥离工艺结合电子束蒸发制作 Ti/Pt/Au (20/30/20 nm) P 电极，乙醇去光刻胶，光刻 pn 电极孔，溅射加厚电极 Cr/Au (20/400 nm)，去浮胶，光刻胶保护，拉丝切割划片，取片，依次用三氯乙烯两次、丙酮、乙醇清洗，每次>2min，氮气吹干。

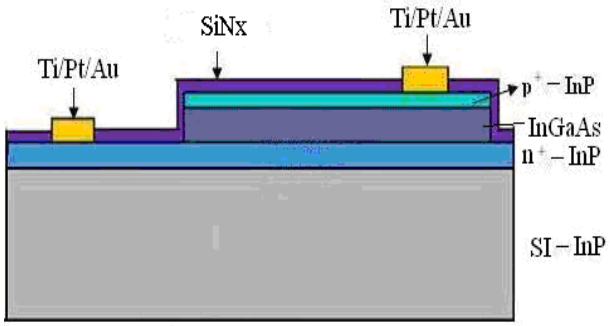

图 4-7 InGaAs 探测器的结构示意图

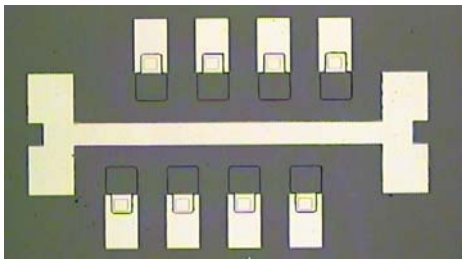

图 4-88 元 InGaAs 探测器芯片照片

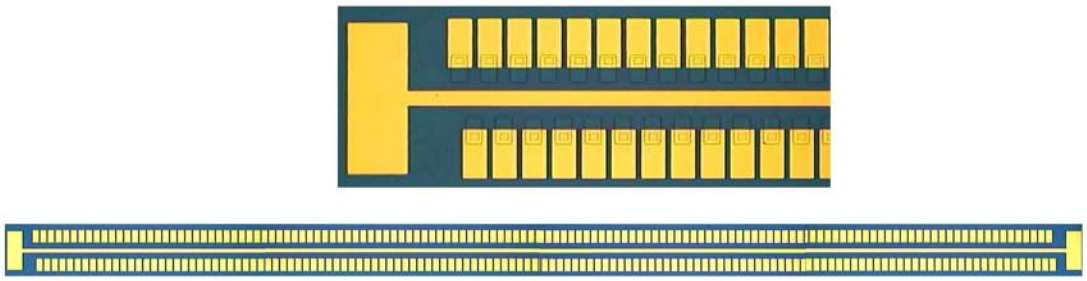

图 4-9 256 元探测器的俯视照片图

本章中制得的台面结构如图 4-7 所示，表面和侧面有 SiN_x 钝化层，p 型和 n 型接触电极都为 Ti/Pt/Au。采用图 4-1 的工艺制作了 8 元和 256 元器件。八元器件的光敏面为 100×100 μm^2，256 元器件的光敏面面积为 56×56 μm^2。八元器件和 256 元器件的俯视照片分别如图 4-8 和图 4-9 所示，中间为共用电极。外延片进行解理成管芯后，封装在杜瓦中进行器件性能的最终测试。

4.2 InGaAs 探测器的性能表征

InGaAs 探测器的主要性能的测量表征主要包括器件 I-V 特性、响应光谱测试以及响应信号测试。本小节利用 Keithley236 电流－电压测试仪测试器件的 I-V 曲线；NICOLET 红外光谱仪测试探测器的短波响应光谱；器件信号响应测试系统的红外光源由 900 K 黑体提供。下面分别做以介绍和说明。

4.2.1 I-V 特性、零偏压电阻及暗电流

在光伏型光电二极管中，从电学上可以将一个实际的光伏二极管器件分为空间电荷区和串联电阻区两个相对独立的部分，二极管所加电压也分别降落在这两个区域，两个区域的电学性质对器件最终的性能产生重要的影响。InGaAs 探测器的 I-V 特性是器件电学性能最为重要表征手段之一。通过 I-V 测试获取的暗电流特性能够反映器件的噪声特性，而光电流特性也可对器件的物理特性进行研究。

在背景和信号光强为零的情况下，一般来说，当流过二极管的电流较小时，空间电荷区的电阻远大于串联电阻区的电阻，也就是说串联电阻的分压作用不明显，这时器件的电流电压关系可以采用公式[84]：

$$I = I_0[\exp(\frac{qV}{nKT}) - 1] \tag{4- 1}$$

其中，n 为理想因子，I_0 为反向饱和电流，K 为 Boltzman 常数，T 为器件温度。理想因子的数值是由电流机制决定的，对于由扩散电流支配的器件，n 取 1，对于由产生复合电流决定的器件，n 取 2，如果 n 介于 1 和 2 之间则为两种电流的共同作用。此时，log(I)与 V 之间存在线性关系，其比例系数为 q/nKT，通过对 log(I)－V 曲线的线性部分进行拟合可以得到理想因子 n[85]。

当流过二极管的电流较大时，由于器件串联电阻 R_s 的分压作用，器件电流电压曲线会偏离式 4-1，串联电阻分压 $\Delta V = IR_S$，通过线性拟合 $\Delta V = V - V_d$ 与 I 可以得到串联电阻[85]，

其中，V 为 log(I)－V 曲线非线性部分的电压，V_d为空间电荷区电压。通过器件的 IV 曲线还可以得到器件的零偏电阻 R_0：$R_0 = (\frac{dI}{dV})^{-1}|_{V=0}$ (4- 2)

受热噪声限制的光伏型探测器的探测率可表示为[1]：

$$D_\lambda^* = \frac{q\eta\lambda}{hc}\sqrt{\frac{R_0 A}{4kT}} \tag{4- 3}$$

式中 D_λ^* 为在波长(λ)处探测率；q 为电子电量；η 为量子效率；h 为 Planck 常数；c 为光束；κ 为 Boltzmann 常数；T 为结的温度；A 为光敏面面积，R_0 为零偏压电阻。一般来讲 R_0A 值越大，探测率越高，如果光敏面面积是相同的，理论上来讲，R_0 值越高，台面成型越好，探测器的探测率越高。另外，反偏压暗电流也可以反映光伏探测器二极管性能，反偏压暗电流越小，探测器稳定性越好，台面成型效果越好[86]。

将相同的材料用不同的的台面成型技术，其它工艺相同制备好的两组常规波长 InGaAs 探测器封装在杜瓦中。探测器结构如图 4-7 所示。用 Keithley236 电流-电压测试仪测试器件的 I-V 特性，电压测试范围为-0.5V～0.5V，测试温度为室温。图 4-10 显示了常规工艺和 ICP 台面成型 256 元 InGaAs 探测器典型 I-V 曲线和 R_0 值的柱状图。从图中可以看出用 ICP 刻蚀结合湿法漂洗进行台面成型的器件性能明显优于常规工艺台面成型的器件。

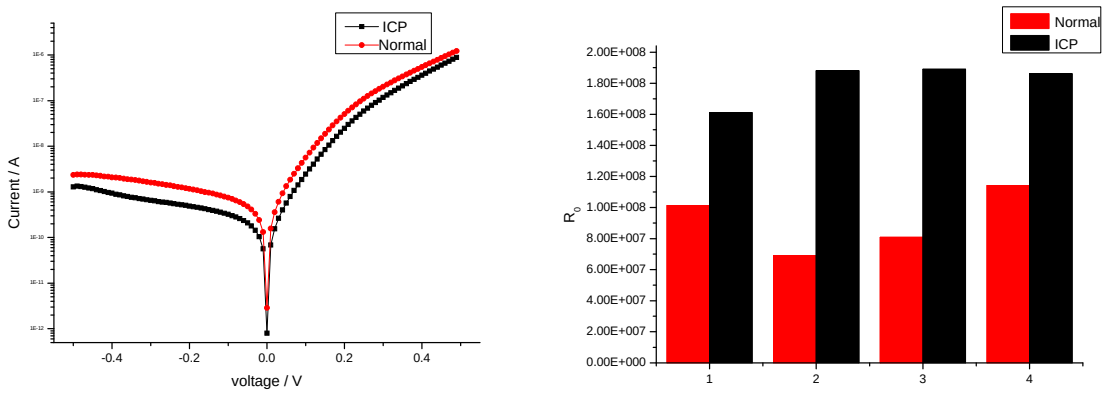

图 4-10 常规工艺和 ICP 台面成型 256 元 InGaAs 探测器:左图为 I-V 曲线，右图为 R_0 值

图 4-11 显示了湿法腐蚀和 ICP 台面成型 8 元 InGaAs 探测器典型 I-V 曲线测试的典型 I-V 曲线。表 4-1 列出了两种不同台面成型方式 InGaAs 探测器零偏压电阻。从图和表中可以看出，对八元探测器来说，ICP 刻蚀加湿法漂洗和湿法腐蚀台面成型工艺对器件的 R_0 影响不大，两种工艺制作的器件性能相当。这是因为对于台面型 InGaAs 探测器，由于器件台面尺寸通常较大(>10μm)，在腐蚀深度不是很深的情况下(约为 3μm)，通过选择合适的腐

蚀液体系并优化腐蚀条件，也可取得较为理想的侧向尺寸控制，可以较好地满足器件制备的要求[3]。但是在器件性能相当的情况下，ICP 具有图形保真度好，刻蚀速率稳定可控的优点，因而适用于 InGaAs 探测器的工程制作中，特别在小光敏元探测器的制备中，ICP 的优势将体现出来。

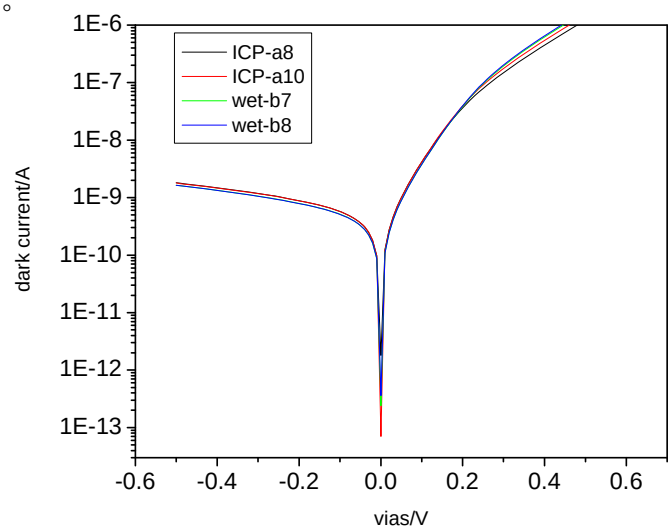

图 4-11 不同台面成型 8 元 InGaAs 探测器典型 I-V 曲线

表 4-1 不同台面成型 InGaAs 探测器的 R_0 值和暗电流

成型工艺	编号	R0(2mV)	I（-10mV）	成型工艺	编号	R0(2mV)	I（-10mV）
ICP	1	1.176E+10	4.230E-12	湿法腐蚀	1	1.115E+08	-8.540E-11
	2	1.000E+08	-9.724E-11		2	8.889E+07	-1.024E-10
	3	9.973E+07	-9.720E-11		3	1.088E+08	-8.823E-11
	4	1.006E+08	-9.738E-11		4	1.107E+08	-7.465E-11
	5	1.056E+08	-9.358E-11		5	1.134E+08	-7.685E-11
	6	9.855E+07	-1.010E-10		6	1.122E+08	-7.863E-11
	7	9.756E+07	-1.022E-10		7	1.124E+08	-8.697E-11
	8				8	1.129E+08	-8.700E-11

4.2.2 相对响应光谱

InGaAs 探测器的光谱响应采用 Nicolet Magna IR 760 傅立叶变换红外光谱仪进行测量。实验中用仪器所带的 Ever-Glo 作为红外光源，迈克尔逊干涉仪中的分束器采用短波红外的GaF_2分束镜。用待测的探测器代替光谱仪中的探测器，这样测量时被测探测器为零偏工作，输出的电学信号经过前置放大输入到光谱仪中。利用迈克尔逊干涉仪中动镜位置的机械扫描结合傅立叶变换实现对探测器光响应的频率扫描，从而可测定出探测器的相对响应光谱。

G因子表示的是峰值响应率和黑体响应率的比值，可由相对响应光谱与黑体辐射谱进

行叉乘得到，定义为[87]：

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

其中 $G(\lambda_p)$ 为峰值响应，第一辐射系数 $C_1=3.742\times10^4$ $W\cdot\mu m^4\cdot cm^{-2}$，第二辐射系数 $C_2=1.439\times10^4$ $\mu m\cdot K$。由式 4-4 可知根据器件的相对响应光谱可以计算出器件的 G 因子。

用 NICOLET 红外光谱仪测试八元常规波长 InGaAs 探测器探测元的短波响应光谱归一化后如图 4-12 所示，其中左图为 ICP 刻蚀，右图为湿法腐蚀。由图中曲线可知，两种台面成型器件峰值响应波长在 1.62μm 左右，室温截止波长(λc)在 1.70μm 左右，与材料设计一致。根据公式 4-4 计算得到 G 因子约为 70。

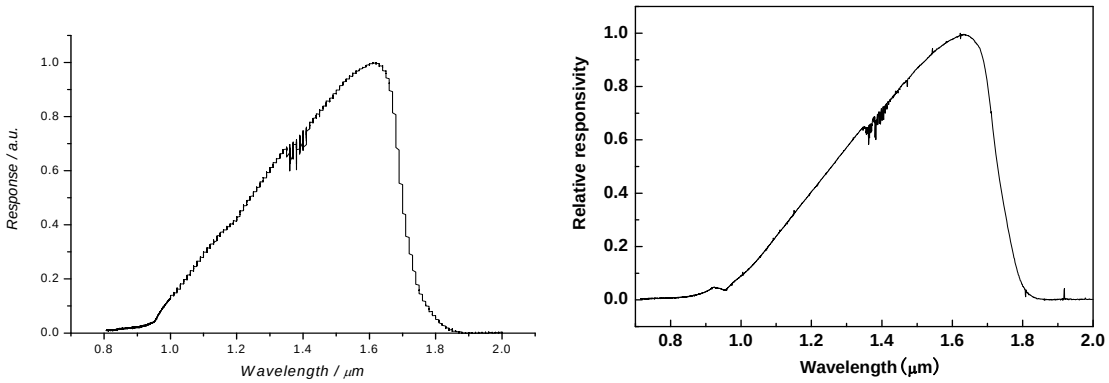

图 4-12 InGaAs 探测器的室温归一化响应光谱曲线，其中左图为 ICP 刻蚀，右图为湿法腐蚀

4.2.3 信噪比和探测率

当器件的探测率受到热噪声限制时，R_0A_D 被用于评价器件的探测率，但在实际应用过程中，器件的响应率和噪声会受到诸多因素的影响，因此探测器的信噪比和探测率是器件性能的重要评价参数。响应率 R 是描述器件特性的重要物理量，器件的最终性能是对外界信号的响应，因此要对器件信号进行测试。

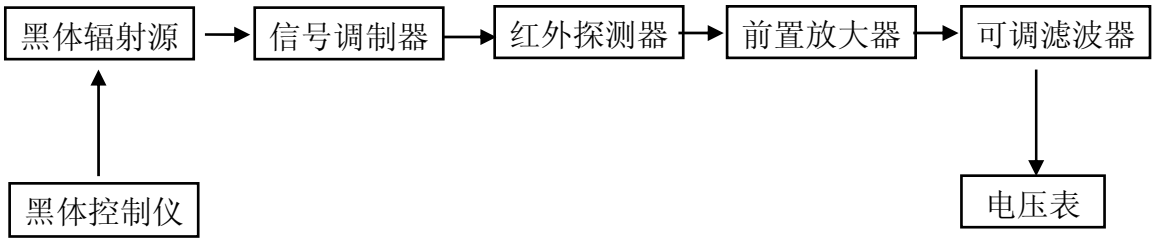

图 4-13 黑体响应率测试系统示意图

由于实际应用中连续可调的单色光源及其功率标定的困难，通常采用较易实现的黑体辐射源来对探测器的响应率进行测量表征。由于黑体辐射的能谱分布与黑体温度满足普朗克定律，结合黑体辐射的特性可比较容易地计算出探测器峰值响应率和探测率，因此黑体测试成为标定红外探测器响应特性的重要手段。所用的黑体测试系统如图 4-13 所示。采用小信号调制技术，通过选频和选相位消除环境辐射引入的测量误差。黑体源发出的红外辐射经过调制盘上的小孔照射在待测探测器上，调制盘与锁相放大器同步，测得的电流信号经跨阻放大器放大成电压信号，通过数字电压表读出，整个过程由示波器监控。假设探测器的光敏元面积为 A_D，则照射在探测器上的功率为：

$$P=\frac{\sigma(T_2^{\ 4}-T_1^4)}{2\sqrt{2}\pi L^2}\bullet\frac{\pi d^2}{4}\bullet A_D \tag{4-5}$$

其中 T_2、T_1 分别为黑体和环境的温度，σ 为斯忒藩常数，d 为黑体孔径，L 为探测器与黑体之间的距离。

但是单用响应还不能完全描述一个器件的性能，还要看器件的噪声大小。如果一个器件接受很小的信号功率 $P_{N\lambda}$，产生的信号电压 V_s 就能与单位频率带宽内的噪声电压相等，则此器件就很灵敏。$P_{N\lambda}$ 是所谓的噪声等效功率。由于信噪比为 1 时的功率测量不太方便，可以在高信号电平下测量，再根据下式计算：

$$NEP=\frac{HA_D}{V_s/V_n}=\frac{P}{V_s/V_n} \tag{4-6}$$

其中 H 为辐照度，单位为 W/cm^2；A_D 为探测器光敏面面积，单位为 cm^2；V_s 为信号电压基波的均方跟值，单位为 V；V_n 为噪声电压均方根值，单位为 V。

等效噪声功率被用来度量探测器的探测能力，但是等效噪声功率最小的探测器的探测能力却是最好的，很多人不习惯这样的表示方法。Jones 建议用等效噪声功率的倒数表示探测能力，称为探测率，这样较好的探测器有较高的探测率。因此，探测率可表达为：

$$D\propto\frac{1}{NEP} \tag{4-7}$$

广泛的理论和试验研究表明，有理由假定探测率与探测器面积的平方根成反比。探测器输出噪声包含各种频率成分，显然，噪声电压是测量电路带宽的函数。由于探测器总噪声功率谱在中频段较为平坦，可认为测得的噪声电压只与测量电路带宽的平方根成正比。即探测率与测量电路带宽的平方根成正比。以此可以定义：

$$D^* = D(A_D \Delta f)^{1/2} = \frac{(A_D \Delta f)^{1/2}}{NEP} \tag{4-8}$$

以单色光为辐射源测得的D^*称为单色探测率，表示为$D^*_{\lambda_p}$，其中λ为单色光波长。在响应峰值波长λ_p条件下测得的探测率成为峰值波长探测率，峰值波长探测率$D^*_{\lambda_p}$由以下公式得出：

$$D^*_{\lambda_p} = GD^*_{bb} = \frac{2\sqrt{2} g \pi L^2 V_s \sqrt{\Delta f}}{V_n \sigma \varepsilon (T_B^4 - T_0^4) A_B \sqrt{A_D}} \tag{4-9}$$

式中D^*_{bb}为黑体探测率，$2\sqrt{2}$为调制因子，L 为黑体和探测器距离，Δf为频率带宽，σ 为斯忒藩常数，ε 为黑体比辐射率，T_B为黑体温度，T_0为调制盘温度，A_B为黑体出射孔面积，A_D为光敏面面积。通过测量器件的信号和噪声，利用公式 4-7 得出器件的峰值探测率。

探测器芯片的信号和噪声测试中设定黑体温度为 900 K，黑体孔径 *d* 为 8 mm，孔径到待测探测器芯片的距离 *L* 为 30 cm，电流放大器的档位置于 10^{-7} A/V，测得 ICP 和湿法腐蚀台面成型的八元常规波长 InGaAs 探测器芯片的信号和噪声如表 4-2 所示。芯片结构如图 4-5 和图 4-6 所示。根据测得器件的信号和噪声，利用公式 4-9 得出器件的黑体探测率，乘上对应的 G 因子即为峰值探测率。G 因子为峰值探测率和波段探测率的比值，4.2.2 节中通过测试响应光谱，计算得出常规波长 InGaAs 探测器的 G 因子约为 70。计算得到 ICP 成型的峰值探测率约为 9.45×10^{11} $cmHz^{1/2}W^{-1}$，湿法腐蚀台面成型的峰值探测率约为 9.1×10^{11} $cmHz^{1/2}W^{-1}$。ICP 成型的峰值探测率略高于湿法腐蚀的峰值探测率。

表 4-2 不同台面成型的 8 元 InGaAs 探测器的信号和噪声

成型工艺	编号	Vs(mV)	Vn（μV）	成型工艺	编号	Vs(mV)	Vn（μV）
ICP	1	5.1	20	湿法腐蚀	1	4.8	19
	2	5.1	20		2	4.8	19.5
	3	5.1	19		3	4.8	19.5
	4	5	19		4	4.75	20.5
	5	5	19		5	4.95	19
	6	5	20		6	4.95	19.5
	7	5	19		7	4.9	19
	8				8	4.9	19

4.3 本章小结

台面成型是制备 InGaAs 台面探测器关键工艺，利用 ICP 刻蚀和湿法腐蚀的方式制备了 InGaAs 台面探测器。对台面成型方式的器件进行 I-V、响应光谱测试、响应信号及噪声测试，用零偏压电阻、暗电流和探测率来表征器件性能。结果表明，ICP 刻蚀加湿法漂洗的台面成型工艺明显优于 Ar^+刻蚀加湿法漂洗的常规成型工艺；用 ICP 刻蚀加湿法漂洗或湿法腐蚀工艺进行台面成型的八元台面器件具有相同的性能。但是在器件性能相当的情况下，ICP 具有图形保真度好，刻蚀速率稳定可控的优点，因而更适用于 InGaAs 探测器的工程制作中，特别在小光敏元探测器的制备中，ICP 的优势将更明显。

5 全文总结和展望

5.1 全文总结

本学位论文重点研究了常规波长 InGaAs 探测器外延层(InP/$In_{0.53}Ga_{0.47}As$/InP)和延伸波长 InGaAs 探测器外延层($In_{0.8}Al_{0.2}As/In_{0.8}Ga_{0.2}As/In_{1-x}Al_xAs$)的感应耦合等离子体(ICP)刻蚀工艺，在不同的直流偏压、ICP 功率、气体总流量和气体组分等参数下进行台面成型，并从刻蚀速率、刻蚀垂直度、刻蚀表面粗糙度等几个方面对刻蚀质量做了评估和分析。在总结 ICP 各刻蚀参数对刻蚀结果影响规律的情况下，找到了常规波长和延伸波长 InGaAs 探测器制备的合适参数。并将该工艺应用到 InGaAs 探测器的制作中，与湿法腐蚀工艺对比研究了器件的 I-V 曲线、响应光谱、探测率特性。现将有关研究结果总结如下：

（1） 利用 ICP180，在 Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 120W，压强 4mTorr，样品台温度 150℃时，常规波长 InP 帽层的刻蚀速率为 0.28μm /min，$In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 层的刻蚀速率为 0.22μm /min，且刻蚀速率稳定，刻蚀后的侧壁垂直度为 80°12′，无钻蚀，刻蚀后的表面光洁无残留物，此条件适合 2μm 左右台阶深度的常规波长 InGaAs 探测器的制备。

（2） Cl_2 流量为 10SCCM，N_2 流量为 60SCCM，ICP 功率 350W，RF 功率 130W，压强 4mTorr，样品台温度 170℃时，用硅脂将样品粘贴在 AlN 载片上刻蚀延伸波长 InGaAs 外延层，平均刻蚀速率约为 0.32μm /min，速度稳定可控，侧壁和表面均光滑无残留物，钻蚀小，可用于台阶高度为 2μm 左右的台面延伸波长 InGaAs 探测器的制备。

（3） ICP 刻蚀加湿法漂洗的台面成型工艺明显优于 Ar^+刻蚀加湿法漂洗的常规成型工艺；ICP 刻蚀与湿法腐蚀台面成型的八元台面器件具有相同的性能。但是在器件性能相当的情况下，ICP 具有图形保真度好，刻蚀速率稳定可控的优点，因而更适用于 InGaAs 探测器的工程制作中，特别在小光敏元探测器的制备中，ICP 的优势将体现出来。

本论文详细研究了 In 基材料的 ICP 刻蚀规律，具有一定的普遍性，为化合物半导体器件工艺平台开展其它半导体材料的 ICP 刻蚀工艺打下了基础，为工艺平台完善了探测器器

件制备工艺流程。

5.2 展望

虽然本论文取得了上述的研究成果，但仍然还有很多的问题没有得到充分的研究，有待今后的工作中进一步开展：

（1） 负载效应的研究，确定刻蚀速率与刻蚀面积的关系，即确定公式 2-3 中的参数 k。

（2） 刻蚀损伤研究， 通过电化学 CV 测量、低温荧光光谱(photolumineseenee，PL)等测试手段，对 ICP 刻蚀引起材料的损伤进行评估，并研究不同工艺参数对损伤程度的影响。

（3） ICP 刻蚀结合湿法腐蚀工艺，确定器件制作中 ICP 刻蚀深度，湿法腐蚀深度，获得低损伤，高图形保真度的台面成型，提高器件性能。

参考文献

1. 汤定元，糜正瑜等, *光电器件概论*. 第一版 ed. 1989: 上海:上海科学技术文献出版社.
2. 周书铨等, *红外辐射测量基础[M]*. 1991: 上海：上海交通大学.
3. 田招兵, *InP 基短波红外 InGaAs 探测器及其物理研究*. 中国科学院上海微系统所博士学位论文, 2008.
4. 陈衡, *红外物理*. 第一版 ed. 1985, 北京: 国防工业出版社.
5. 王守武主编, *半导体器件研究与进展*. 第二版 ed. 1991, 北京: 科学出版社.
6. A.Rogaslski, M.R., *Narrow gap semiconductor photodiodes.* SPIE, 1998. **3287**: p. 2-13.
7. D .A. Scribner, M.R.K., J. M. Killiany, et al., *Infrared focal plane array technology.* Proc. IEEE, 1991. **79**: p. 66-85.
8. J. Piotrowski, A.R., *New generation of infrared photo-detectors, Sensors and Actuat.* 1998. **67**: p. 146-152.
9. M.J.Cohen, G.H.O., *Room temperature InGaAs camera for NIR imaging* SPIE, 1993. **1946**: p. 436-443.
10. 郝国强, *InGaAs 红外探测器器件与物理研究[D]*, in *学位论文*. 2006, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所: 上海.
11. W. Porod, D.K.F., *Modification of the virtual-crystal approximation for ternary III-V compounds [J]*. Phys. Rev., 1983. **B**(27(4)).
12. G. H. Olsen, A.M.J., V. S. Bon, at al., *Multiplexed 256 element InGaAs detectors for 0.8”1.7 ❍m room-temperature operation [J]*. Proc. SPIE, 1988(972): p. 279-285.
13. M. J. Cohen, G.H.O., *Near-IR imaging cameras operate at room temperature* Laser Focus World, 1993. **29(**(6): p. 109-113.
14. P. P. Webb, G.H.O., *Large-area and visible response VPE InGaAs photodiodes.* IEEE Transactions on Electron Devices, 1983. **30**(4): p. 395-400.
15. K. J. Bachmann, J.L.S., *An InGaAs detector for the 1.0-1.7um wavelength range* Appl. Phys. Lett., 1978. **32**(7): p. 446-448.
16. Marshall J. Cohen, G.H.O., *Near-IR imaging cameras operate at room temperature.* Laser Focus Word, 1993(6): p. 109-113.
17. W.D Lawson, S.N., E.H.Putley, et al., J.Phys.Chem.Solids, 1959. **9**: p. 325.
18. G.H.Olsen, A.M.J., V.S.Ban, et al., *Multiplexed 256 element InGaAs detector array for 0.8-1.7um room temperature operation.* SPIE, 1988. **972**: p. 279-285.
19. G. H. Olsen, A.M.J., S. M. Mason, etal., *Room-temperature InGaAs detector arrays for 2.5 ❍m.* SPIE, 1989. **1157**: p. 276-282.
20. G.Olsen, A.J., M.Lange, et al., *A 128×128 InGaAs detector array for 1.0-1.7 microns.* SPIE, 1990. **1341**: p. 432-437.
21. G.H.Olsen, A.M.J., V.S. Ban, *Current status of InGaAs detector arrays for 1-3um.* SPIE, 1991. **1540**: p. 596-605.
22. K.R.Linga, A.M.J., V.S.Ban, et al., *1024 element linera InxGa1-xAs/InAsyP1-y detector arrays for environmental sensing from 1um to 2.6um.* SPIE, 1993. **2021**: p. 90-97.
23. L.J.Kozlowski, W.E.T., M.Zandian et al., *SWIR Staring FPA performent at room temperature.* SPIE, 1996. **2746**: p. 93-100.

24. M.H.Ettenberg, M.J.C., G.H.Olsen, et al., *InGaAs Focal Plane Arrays and Cameras for Man-Portable Near Infrared Imaging.* SPIE, 1999. **3701**: p. 225-232.
25. Martin H. E., M.B., Mathew O G., *High Resolution SWIR Arrays for Imaging at Night.* SPIE, 2004. **5406**: p. 46-55.
26. Alan H., T.S., Joseph R., et al., *Megapixel InGaAs Arrays for Low Background Applications.* SPIE, 2005. **5783**: p. 32-38.
27. http://sbir.gsfc.nasa.gov/SBIR/successes/ss/5-040text.html. [cited.
28. http://www.sensorsinc.com/downloads/PR_082007.pdf. [cited.
29. M. D. Enriquez, M.A.B., J. V. Groppe, T. M. Sudol, et al, *Performance of High Resolution Visible-InGaAs Imager for Day/Night Vision.* Proc. SPIE, 2008. **6940**: p. 69400O.
30. Henry Yuan, G.A., Jongwoo Kim, et al, *FPA development: from InGaAs, InSb, to HgCdTe.* 2008. **6940**: p. 69403C.
31. Henry Yuan, J.K., Gary Apgar, et al, *Large-area high-speed InGaAs photodetectors.* Proc. SPIE, 2008. **6950**: p. 69500O.
32. J. Boisvert, T.I., R.Sudharsanan, Ping Yuan, Paul McDonald, *Performance of very low dark current SWIR PIN arrays* Proc. SPIE, 2008. **6940**: p. 69400L.
33. 刘家洲, *高性能In0.53Ga0.47As PIN 光电探测器的研制.* 功能材料与器件学报, 2002. **8**(1): p. 45-48.
34. 莫才平，高新江，王., *InGaAs 四象限探测器.* 半导体光电, 2004. **25**(1): p. 119-213.
35. 吕衍秋，徐运华，韩冰等, *128×1 线列 InGaAs 短波红外焦平面的研究.* 红外与毫米波学报, 2006. **25**(5): p. 333-337.
36. 唐恒敬, *InGaAs 短波红外线列探测器技术研究*, in *微电子学与固体电子学.* 2008, 中国科学院: 北京. p. 96.
37. PAUL P. W., G.H.O., *Large-Area and Visible Response VPE InGaAs Photodiodes.* IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, 1983. **30**(4): p. 395-400.
38. Theodore R. H., J.B.B., *Extended short wavelength spectral response from InGaAs focal plane arrays.* SPIE, 2003(5074): p. 481-490.
39. Tara M., P.D., Mari-Anne G., *320x240 pixel InGaAs / InP focal plane array for short-wave infrared and visible light imaging.* SPIE 2005(5726): p. 85-91.
40. James E., T.J.M., Bora M., *Develop Multipurpose InGaAs Focal Plane Array Visible/SWIR Camera for Staring and Range-Gated Applications.* SPIE 2007(6572): p. 6572I-1:11
41. M.Marso, M.W., P.Kordos, *A Novel Two-Color Photodetector Based on an InAlAs-InGaAs HEMT Layer Structure.* IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 2004. **16**(11): p. 2541-2543
42. Dong-Su Kim, S.R.F., et al. , *A three wavelength infrared focal plane array detector element.* IEEE Photonics technology letters, 1994. **6**(2): p. 235-238
43. Martin H. Ettenberg, M.J.L., et al. , *A room temperature 640◇512 pixel near-infrared InGaAs focal plane array* Proc. SPIE, 2000. **4028**: p. 201-207.
44. J. Kaniewski, Z.O., J. Piotrowski, K. Reginski, et al. , *Advanced InGaAs detectors on GaAs substrate* Proc. SPIE, 2000. **4130**: p. 749-759.
45. 赵爱英，叶玉堂，吴云峰等, *杂质 Zn 在 InP 中的扩散机制.* 激光与光电子学进展, 2005. **42**(9): p. 39-42.
46. Kin Man Yu, M.C.R., Zinc, *Element co-implantation in indium phosphide.* Nuclear

Instruments and Methods in Physics Research B,, 2000. **168**: p. 65-71.
47. M. R. Ravi, A.D., Nandita DasGupta, *Effect of Sulfur passivation and polyimide capping on InGaAs-InP PIN photodetectors* IEEE Transactions on Electron Devices, , 1993. **40**(2): p. 303-308.
48. A. Katz, P.M.T., S. N. G. Chu, et al., *Pt/Ti Ohmic contact to p++-InGaAsP(1.3 μm) formed by rapid thermal processing.* J. Appl. Phys, 1990. **67**(2): p. 884-889.
49. Ghandi, S.K., *VLSI fabrication principles, Si and GaAs*. 1983, New York: Wiley.
50. 孙宝萤, 半导体研究所内部技术报告, 1983.
51. D. L. Flamm, V.M.D., D. E. Ibbotson, J. Vacuum Science and Technology B, 1983. **1**: p. 23.
52. P. J. Revell, G.F.G., Vacuum, 1984. **34**: p. 455.
53. Burggraf, P., Semiconductor International, 1994. **Aug.**: p. 46.
54. ARSENAULT A, B.S.F., HATTON B, et al. , *Towards the synthetic all-optical computer : science fiction or reality.* J. Mater Chem 2004. **14**: p. 7812794.
55. BLANCO A, C.E., GRABTCHAK S, et al., *Large scale synthesis of a silicon photonic crystal with a complete three dimensional bandgap near 1. 5 micrometres.* Nature, 2000. **405**(25): p. 4372439.
56. VLASOV Y A, B.X.Z., STURM J C, et al., *On-chip natural assembly of silicon photonic bandgap crystals.* Nature, 2001. **414**(15): p. 2892293.
57. Christopher Cardinaud, M.-C.P., Pierre-Yves Tessier, Applied Surface Science., 2000. **164**: p. 72-83.
58. Yoshio Nishi, R.D., *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology*. 2000, New York: Marcel Dekker. 660-669.
59. J., E.D., Thin Solid Films, 2000. **365**: p. 348.
60. Mogab, C.J., *The loading effect in p lasma etching* Electrochem. Soc., 1977. **124**(1262).
61. A J Stoltz, J.D.B., P R Boyd, et al., *The effect of electron cyclotron resonance p lasma parameters on the aspect ratio of trenches in HgCdTe.* Journal of ElectronicMaterials,, 2003. **32**(7): p. 692 - 697.
62. Thuy Tran-Quinn, J.S., Lindquist R. *Contact etch in the LAM 4520XL using standard CF_4 /CHF_3 chemistry*. in *Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*. 1996: IEEE/SEMI
63. Jansen H, d.B.M., Elwenspoek M. *The black silicon method.VI.High aspect ratio trench etching for MEMS applications*. in *Micro Electro Mechanical Systems,1996,MEMS'96, Proceedings*. 1996: IEEE.
64. Chou T-K A, N.K. *Fabrication of out-of-plane curved surfaces in Si by utilizing RIE lag*. in *Micro Electro Mechanical Systems*. 2002.
65. Nishikawa K, O.H., Tomohisa, et al. , Thin Solid Films, 2000. **374**(190).
66. 张鉴, *MEMS 加工中电感耦合等离子体（ICP）刻蚀硅片的模型与模拟*, in *微电子学与固体电子学*. 2006, 东南大学: 南京.
67. Scheckler EW, N.A.R., *Computer-Ai-ded Design.* IEEE Transactions on Electron Devices, 1994. **13**: p. 219.
68. Singh, R., *High-density plasma etching of III-Nitrides: process development*. 1997, Boston University.
69. S. J. Pearton, R.J.S., Fan Ren *A review of dry etching of GaN and related materials,*. Nitride Semicond, 2000. **5**: p. 11.

70. Kreissl J., M.M., Sigmund A., Bochnia R., Harde P., Ulrici W. *Hydrogen passivation in InP:Zn resulting from reactive ion etchingduring laser stripe formation*. in *Indium Phosphide and Related Materials*. 2000.
71. T. R. Hayes, W.C.D.-S., H. S. Luftman, J. W. Lee, *Passivation of acceptors in InP resulting from CH_4/H_2 reactive ion etching.* Appl. Phys. Lett., 1989 **55**(1).
72. Gerhard Franz, C.H., *Reactive ion etching GaAs and AlAs: Kinetics and process monitoring* J.Vac.Sci.Technol.B, 1996. **14**(1): p. 126-131.
73. L. A. Coldren, K.F., B. I. Miller, *On the formation of planar-etched facets in GaInAsP/InP double-heterosturctures.* J. Electrochem. Soc., 1983. **130**(9): p. 1918-1926.
74. I. Maximov, Q.W., M. Graczyk, P. Qmling, L. Samuelson, W. Seifert, I. Shorubalko, K. Hieke, S.Lourdudoss, E. R. Messmer, *Fabrication and characterization of 0.2 to 6μm GaInAs/InP electron waveguides.* Proc. 11th Int'l Conf. on Indium Phosphide and Related Materials, 1999: p. 237-240.
75. T. Brenner, H.M., *Local etch-rate control of masked InP/InGaAsP by diffusion limited etching.* J. Electrochem. Soc., 1994. **141**(7): p. 1954-1956.
76. J. Wallin, K.L., K. Streubel, S. Nilssson, M. Oberg, *Selective area regrowth of Butt-joint coupled waveguide in Multi-section DBR lasers.* J. Cryst. Growth, 1992. **124**: p. 741-746.
77. R. Y. Fang, D.B., G. Morello, M. Meliga, *Eaves structures on (100) InP and InP/InGaAsP/InP heterostuctures.* J. Electrochem. Soc., 1997. **144**(11): p. 3940-3945.
78. 田招兵, *InGaAs 探测器及其物理研究*, in *微电子学与固体电子学*. 2008, 中国科学院: 北京.
79. 李拂晓, 杨., Post G., *一种实用的磷化铟MM IC 背面工艺技术*. 半导体学报, 2001. **22**(12): p. 1497-1450.
80. 吕衍秋, *航天遥感用 InGaAs 线列红外焦平面的研究*, in *微电子学与固体电子学*. 2006, 中国科学院: 北京. p. 33-37.
81. Van der Drift E, C.R., Zijlstra T, *Dry etching and induced damage.* Microelectron. Eng., 1996. **32**: p. 241-246.
82. 梁鹿亭, *半导体器件表面钝化技术*. 1979, 北京: 科学出版社.
83. D.J. 科利弗著, 李., *化合物半导体工艺*. 1980, 北京: 冶金工业出版社.
84. S.M., S., *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd Ed. ed. 1981: John Wiley&Sons.
85. F.Pierret, R., *Semiconductor Device Fundamentals*. 1996: Addison-Wesley.
86. 李保根，徐之韬，赵先明, *具有高量子效率、低暗电流、高可靠性的平面InGaAs PIN 光电二极管*. 光通讯研究, 1994. **1**(2): p. 124-129.
87. 陈新禹，龚海梅，章莲妹，方家熊, *用傅立叶红外光谱仪测量器件响应光谱*. 中国科学院上海技术物理研究所 1958-1998 四十年庆文集, 1998.

攻读硕士学位期间发表的论文

1. NING Jinhua, Z.K., TANG Hengjing , WANG Yang, LI Xue, GONG Haimei *Inductively coupled plasma etching of* $In_{1-x-y}Al_xGa_yAs$ *in* $BCl_3/Cl_2/Ar$. in 、*PIE*. 2008. Hangzhou.
2. 宁锦华，唐恒敬，张可锋，李雪，龚海梅, *InGaAs 探测器制备的 ICP 刻蚀方法研究*. 激光与红外, 2009. **39**(4): p. 411-414.

致谢

首先我要衷心感谢我的导师龚海梅研究员和李雪副研究员，本论文是在两位老师的悉心指导下完成的。龚老师严谨的治学态度、执着的学术追求以及强烈的创新意识给我树立了科研工作者的榜样。龚老师对学术动态有敏锐的洞察力，理论基础扎实，实验经验丰富，提出宝贵意见和建议，帮助我在课题中克服了许多困难，在论文完成过程中给予我很多的帮助和关怀。感谢李老师在整个硕士期间悉心的指导，李老师创新的精神和忘我的工作态度也深深地激励着我。感谢李老师对我生活、学习等各个方面的照顾和点播。

感谢方家熊院士、李言谨研究员和李向阳研究员对我的教诲和耐心指导，三位老师拥有渊博的知识、严谨的治学态度和敏锐的洞察力，与他们的每一次谈话都使我受益匪浅。另外还要感谢中国科学院上海微系统与信息技术研究所张永刚研究员和李晓良高级工程师，张老师为我们提供外延材料和工艺的帮助，李老师为我提供了 ICP 刻蚀方面的指导。

特别感谢在工艺实验和测试中给予我帮助和支持的各位老师：朱龙源、洪斯敏、刘诗嘉、王妮丽、乔辉、徐国庆、储开慧、刘向阳、蓝天翼、赵水平、姜佩路、孔令才、龚玮、曾智江、贺香荣、俞君、家荣、于月华、张燕、叶丽萍老师、廖清君、林春、陈昱、刘丹、天信老师和孙艳老师。

真诚的感谢陈新禹研究员、刘大福博士、范广宇高工、邵秀梅博士、胡晓宁研究员、汪洋等在技术方面对我指导。

非常感谢与我一起生活和学习的诸位同学的帮助，他们是：唐恒敬、张可锋、李永富、李淘、吴小利、李超、徐勤飞、包西昌、张文静、王玲、黄松垒、黄张成、张伟、朱慧、谭俊、胡其欣、陈杰、刘洪洋、文静、李尧桥、朱耀明、王伟、张燕、王荣阳、陈亮、葛美英、张婷等。

还要感谢段竹莹在工作中的支持。

感谢研究生部各位老师在学习和生活方面的关怀和帮助。

感谢我的家人和朋友王浩，感谢他们对我的关心、理解和鼓励。

宁锦华

2009 年 4 月 21 于上海