

2.5 小结

本章首先介绍了 p-i-n InGaAs 外延材料, 然后使用高分辨 X 射线衍射技术对外延材料的结晶质量和 InGaAs 组分进行测试, 测试了外延材料的近红外透射谱, 并计算出 InGaAs 的组分, 用电化学 C-V 法对外延层载流子浓度进行了评价。首次用微波反射光电导衰减法(μ -PCD)法通过测量 InGaAs 层的少子寿命, 来评价 InGaAs 吸收层的均匀性。p-InP/InGaAs/n-InP 结构外延片在 300K 和 85K 时平均寿命分别为 168.2ns 和 149.4ns。寿命变温曲线表明, 在低温下 InGaAs 层少子寿命虽然有减小趋势, 但相对非掺杂 InGaAs 相比变化较小, 这主要是因为中等掺杂的少子复合是以辐射复合为主。InGaAs 吸收层的掺杂及缺陷的均匀性决定了寿命分布, 所以寿命的均匀性反映了吸收层的均匀性。微波反射光电导衰减法可以为测试 InP/InGaAs/InP 结构中 InGaAs 层均匀性提供便利快速无损伤的测试方法, 可为研制均匀性良好的 InGaAs 焦平面探测器提供必要的技术支持。但是, 测试仪器也有一定的局限性, 可以通过对测试仪器的改进来解决。

参考文献

- [1] G. H. Olsen, A.M. Joshi, V. S. Bon, et al, Multiplexed 256 element InGaAs detectors for 0.8~1.7 μ m room-temperature operation, SPIE, 1988, 972: 279-285.
- [2] V. Holy, U. Pietsch, T. Baumbach, High resolution X-ray scattering from thin films and multilayers, Springer-Verlag, 1999.
- [3] S. Paul, J. B. Roy, P. K. Basu, Empirical expressions for the alloy composition and temperature dependence of the band gap and intrinsic carrier density in $Ga_xIn_{1-x}As$, J. Appl. Phys., 1991, 69(2): 827-829.
- [4] Hollenhorst J N, Hasnain G, Frequency dependent hole diffusion in InGaAs double heterostructures, Appl. Phys. Lett., 1995, 67(15): 2203-2205.
- [4] Chen M C, Photoconductivity lifetime measurements on HgCdTe using a contactless microwave technique, J. Appl. Phys., 1988, 62(2): 946-947.
- [6] Ichimura M, Hirano M, Tada A, et al, Characterization of Si wafers by μ -PCD with surface electric field, Mat. Sci. Eng. B, 2000, 73: 230-234.
- [7] Sontag D, Hahn G, Geiger P, et al, Two-dimensional resolution of minority carrier diffusion constants in different silicon materials, Sol. Energ. Mat. Sol. C., 2002, 72: 533-539.
- [8] Zemel A, Gallant M, Carrier lifetime in InP/InGaAs/InP by open-circuit voltage and photoluminescence decay, J. Appl. Phys., 1995, 78(2): 1094-1100.

- [9] Ahrenkiel R K, Johnston S W, Webb J D, et al, Recombination lifetimes in undoped, low-band gap $\text{InAs}_y\text{P}_{1-y}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ double heterostructures grown on InP substrates, *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78 (8): 1092-1094.
- [10] Sze S M, *Physics of Semiconductor Devices*, New York: Wiley, 1981.
- [11] Khanh N Q, Tutto P, Buiu O, et al, Change carrier lifetime modification in silicon by high energy H^+ or He^+ ion implantation, *Nucl. Instrum. Meth. B*, 1997, 127/128: 388-392.
- [12] Ahrenkiel R K, Ellingson R, Johnston S, et al, Recombination lifetime of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ as a function of doping density, *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72(26): 3470-3472.
- [13] Gallant M, Zemel A, Long minority hole diffusion length and evidence for bulk radiative recombination limited lifetime in $\text{InP}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ double heterostructures, *Appl. Phys. Lett.*, 1988, 52(20): 1686-1688.

第三章 台面制作及刻蚀损伤研究

3.1 引言

台面制作是台面器件的关键工艺,制作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。目前 n-InP/InGaAs/p-InP PIN 台面制作多采用选择性湿法化学腐蚀,腐蚀 InP 层一般采用 HCl/H₂O 系和 HCl/H₃PO₄ 系腐蚀液,腐蚀 InGaAs 层一般采用 H₂SO₄/H₂O₂/H₂ 系、H₃PO₄/H₂O₂/H₂O 系和酒石酸/H₂O₂/H₂O 系腐蚀液。由于湿法腐蚀一般为各向同性,其缺点是掩蔽层下面有横向钻蚀现象,并且有颗粒污染,就会导致腐蚀图案的分辨率降低,优点是对腐蚀后的表面不产生损伤^[1]。干法刻蚀有图形转移精度高、各向异性、可控性好等优点,但是干法刻蚀会造成材料晶格损伤,使器件性能降低^[2]。本章采用干法刻蚀和湿法腐蚀后处理的办法,制备台面,对 Ar⁺离子干法刻蚀对 InGaAs、n-InP 和 p-InP 表面损伤进行了研究,计算出了损伤层厚度,并用湿法腐蚀损伤层。

3.2 台面制作

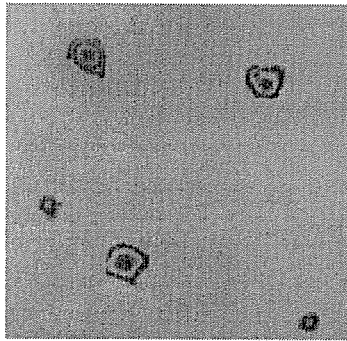


图 3.1 p-InP 层腐蚀后形成的颗粒显微照片 ($\times 400$)
Fig.3. Picture of particles after p-InP etching by microscope ($\times 400$)

台面制作时,如果采用湿法腐蚀,实验表明腐蚀 InP 层时,由于采用强酸,对光刻胶有腐蚀作用,容易发生明显钻蚀,会导致腐蚀图案的分辨率降低,而且由于材料生长不均匀和颗粒沾污等因素,导致 InP 层腐蚀掉后,在 InGaAs 表面留下岛状物(如图 3.1),表面不均匀,进而影响下一步 InGaAs 层的腐蚀。而 InGaAs 层所采用的腐蚀液对光刻胶作用小,并且腐蚀表面光滑,对表面不产生损伤,无明显钻蚀。干法刻蚀的优点是:图形转移精度高,各向异性和可

控性好；但缺点是：干法刻蚀会造成材料晶格损伤，使器件性能降低。通常刻蚀的要求包括四个方面^[3]：图形的保真度、选择比、均匀性和刻蚀的清洁。图形的保真度就是将光刻版图形转移到样品表面的精确度。选择比，即用两种不同材料刻蚀速率比来描述图形转移中各层材料的相互影响，在器件结构中常含有多层不同的材料形成的薄膜需要刻蚀，为严格控制每一层刻蚀图形的转移精度和避免对其他各层的刻蚀影响，需要控制每层的刻蚀速率。

结合材料性质及湿法腐蚀和干法刻蚀的优点，我们改进了台面制作过程，如图 3.2 中台面制作过程，首先常规工艺光刻，然后用 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，这样既可提高光敏面的图形保真度，又可消除因 Ar^+ 离子刻蚀而形成的 InGaAs 吸收层侧面损伤。腐蚀后台面用 Sirion 200 扫描电镜拍摄的正面和侧面照片如图 3.3，长方形的为凸起的台面，图形保真度高，而且 n-InP 上面没有污染物和颗粒，实际上台面的侧面还是有点钻蚀的(如图 3.3)，可以通过增加刻蚀时间，减小腐蚀时间来减小钻蚀，钻蚀可以控制在 $0.5\mu m$ 以内。

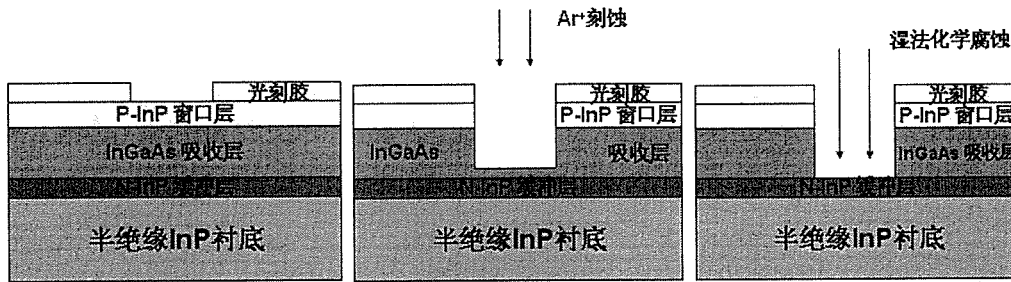


图 3.2 台面制作过程
Fig.3.2 Process of the mesa making

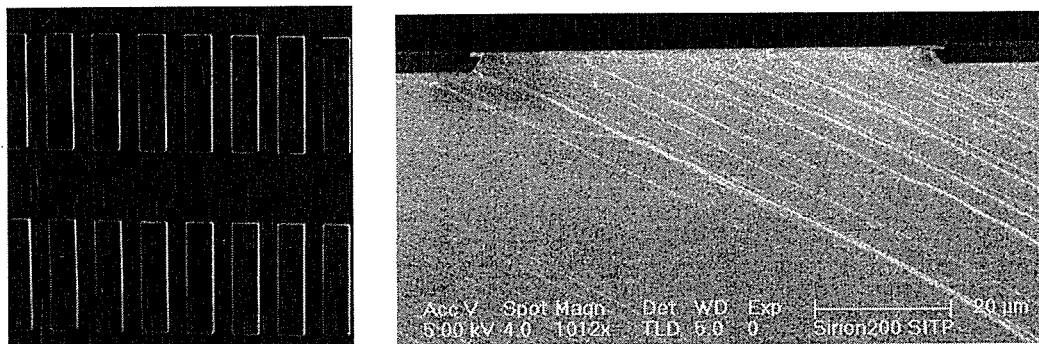


图 3.3 腐蚀后台面的扫描电镜照片
Fig.3.3 Figure of the mesa by SEM after etching

腐蚀台面的高度可以用 AMBIOS TECHNOLOGY 生产的 XP-2 型台阶仪来测

量, 图 3.4 为 Ar^+ 刻蚀和湿法腐蚀后测试结果, 高度约为 $3\mu\text{m}$, 和材料设计生长的厚度吻合。 Ar^+ 刻蚀条件为: 离子能量为 350eV , 束流为 80mA 。我们分别对 MBE 和 MOCVD 两种方式生长的外延片, 在 $0\text{min}\sim 45\text{min}$ 范围内, 测试了刻蚀深度与刻蚀时间的关系, 如图 3.5 所示, 通过拟合得出: MBE 的生长的 p-InP 层和 InGaAs 层刻蚀速率分别为 $64\text{nm}/\text{min}$ 和 $44\text{nm}/\text{min}$; MOCVD 的生长的 p-InP 层和 InGaAs 层刻蚀速率分别为 $28\text{nm}/\text{min}$ 和 $53\text{nm}/\text{min}$ 。湿法腐蚀溶液为选择性腐蚀溶液: 酒石酸溶液(重量比酒石酸: $\text{H}_2\text{O}=1: 1$): $\text{H}_2\text{O}_2=5: 1$ (体积比), 分析纯酒石酸由中国医药集团上海化学试剂厂生产。在 35°C 时, MOCVD 生长的 InGaAs 腐蚀速率为 $0.57\mu\text{m}/\text{min}$, MBE 生长的 InGaAs 腐蚀速率为 $0.5\mu\text{m}/\text{min}$, 根据 p-InP 层和 InGaAs 层厚度确定刻蚀和腐蚀时间。

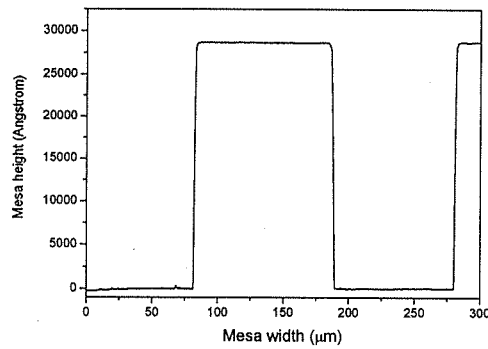


图 3.4 腐蚀后台阶仪测试的台面图
Fig.3.4 Figure of the mesa by Stylus Profiler after etching

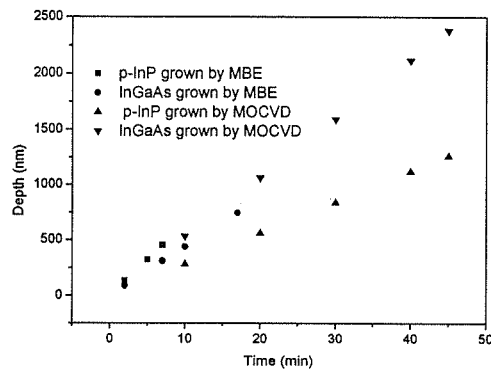


图 3.5 Ar^+ 刻蚀 InP 和 InGaAs 深度和时间的关系
Fig.3.5 Relationship of depth and time when Ar^+ etching InP and InGaAs

3.3 刻蚀损伤研究

干法刻蚀技术是 70 年代发展起来的一种干法刻蚀工艺, 已广泛进入现代微

电子器件制造工艺流程中。研究表明干法刻蚀 III-V 族化合物半导体损伤较为明显, 刻蚀会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。对 InP 和 InGaAs 的刻蚀多用反应离子刻蚀(RIE), 因为该方法刻蚀损伤较小, 但是在刻蚀前, 必须制备刻蚀掩膜, 如 SiO_2 、 SiN_x 等^[4]。为了简化工艺和湿法腐蚀后处理的兼容性, 我们选择 Ar^+ 离子干法刻蚀的办法刻蚀 InP 层和 InGaAs 层, 然后想通过湿法后处理消除刻蚀损伤, 但怎样理想的把干法和湿法有机的结合起来, 既提高图形保真度, 又可以有效地减小侧面的刻蚀损伤, 进而减小侧面复合和暗电流, 必须对 Ar^+ 离子刻蚀对 InP 和 InGaAs 的刻蚀损伤及其消除办法进行研究。

3.3.1 实验

分别对 InGaAs、n-InP 和 p-InP 三种材料进行了 Ar^+ 离子干法刻蚀和湿法腐蚀实验。InGaAs 材料是在液封直拉法生长(LEC)的半绝缘(100)InP 衬底上 MBE 生长了 $3\mu\text{m}$ 的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 外延片, n-InP 样品材料是液封直拉法生长晶向为 (100)InP 单晶, 厚度为 $500\mu\text{m}$, S 掺杂, 载流子浓度为 $1\sim 3\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, p-InP 样品是液封直拉法生长的(100)InP 单晶, 厚度为 $500\mu\text{m}$, Zn 掺杂, 载流子浓度为 $2\sim 3\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 。把以上三种材料各取两片, 面积为 $10\times 10\text{mm}^2$, 表面依次用三氯甲烷、乙醚、丙酮、乙醇有机溶剂清洗, 氮气吹干, 然后用 $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O}=3:6:10$ 的溶液处理 10s 去除表面氧化层。接着, 把处理后的样品各取一片, Ar^+ 离子刻蚀 5min, 刻蚀条件为离子能量为 300eV, 真空度低于 6.8×10^{-6} Torr, 氩气工作气压 1.5×10^{-4} Torr, 刻蚀温度为 10°C 。InGaAs 刻蚀速率为 64nm/min, InP 刻蚀速率为 44nm/min。把刻蚀后三个样品和未刻蚀三个样品进行扫描电镜(SEM), 原子力显微镜(AFM), 光致发光谱(PL), X 射线光电能谱(XPS)测试, 分析了刻蚀后表面状况及成分变化。刻蚀后 InGaAs 样品在 $50\%\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6:\text{H}_2\text{O}_2=5:1$ 的溶液(35°C)中腐蚀 36s, 腐蚀速率为 $0.5\mu\text{m}/\text{min}$ 。刻蚀后 InP 样品在 $\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4=1:1$ 的溶液(0°C)中腐蚀 3s, 腐蚀速率为 $0.1\mu\text{m}/\text{s}$ 。分别对湿法腐蚀后的 InGaAs 和 InP 样品进行 XPS 测试。

测试采用的是 Sirion 200 扫描电镜和 DI Nanoscope IIIa 原子力显微镜。PL 谱测试是在室温下, 采用 514.5nm 的氩离子激光作为激发源, 功率为 100mW。反

射谱测试是利用傅立叶短波变换红外光谱仪(FTIR), X 射线光电能谱仪为美国 PHI 公司 PHI5300 系统, 激发源为 MgK α , 功率 250W, 电荷校正用 C1s (284.8.eV) 谱线作为定标标准。

3.3.2 结果与分析

3.3.2.1 表面形貌分析

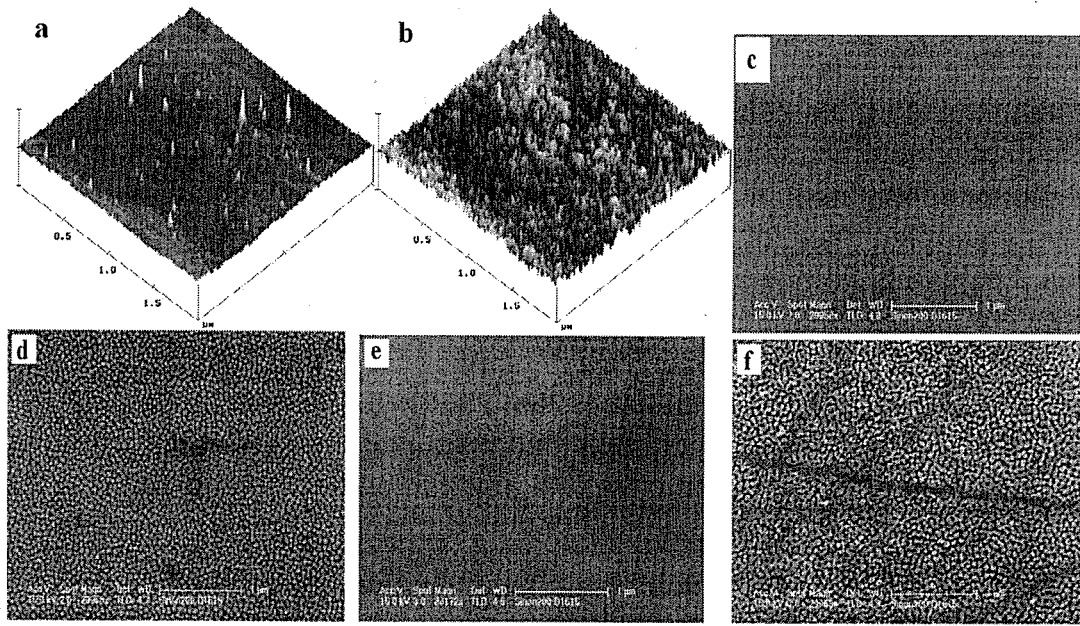


图 3.6 Ar⁺离子刻蚀前后 InGaAs AFM 和 InP SEM 图像 (a) InGaAs; (b) 刻蚀后 InGaAs; (c) n-InP; (d) 刻蚀后 n-InP; (e) p-InP; (f) 刻蚀后 p-InP

Fig.3.6 AFM pictures of InGaAs and SEM pictures of InP before and after Ar⁺ etching (a) InGaAs; (b) Etched InGaAs; (c) n-InP; (d) Etched n-InP; (e) p-InP; (f) Etched p-InP

由于 Ar⁺离子刻蚀后 InGaAs 表面形貌差异较小, 用扫描电镜难以区分, 所以对 InGaAs 样品采用原子力显微镜测试, 对 InP 样品进行扫描电镜测试。如图 3.6 所示, 图 3.6(a)和图 3.6(b)分别为刻蚀前后 InGaAs 原子力显微镜图像, 扫描范围 2 μ m, 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 3.6(c)和图 3.6(d)分别是 n-InP 刻蚀前后扫描电镜图像,图 3.6(e)和图 3.6(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 p-InP 突起直径约为 65nm。

3.3.2.2 PL 谱分析

为了研究 Ar^+ 离子刻蚀对 InGaAs 和 InP 表面 PL 强度的影响，图 3.7 给出了 InGaAs 和 InP 本征峰 PL 强度的变化。刻蚀后本征峰位置几乎没有变化，室温下，InGaAs 和 InP 本征峰对应的光学波长分别为 $1.67\mu\text{m}$ 和 $0.93\mu\text{m}$ 。刻蚀后 InGaAs PL 强度增加，而刻蚀后 n-InP 和 p-InP PL 强度都减小。分析认为主要是因为刻蚀前后表面粗糙度的变化，表面粗糙度大，则对激发光的散射作用增大，所以发光强度减小，结果与前面 AFM 和 SEM 测试结果一致，但是我们也不排除表面成分的影响^[5]，成分变化将在 3.3.2.4 节以 XPS 成分分析，结果如表 3.1 所示。

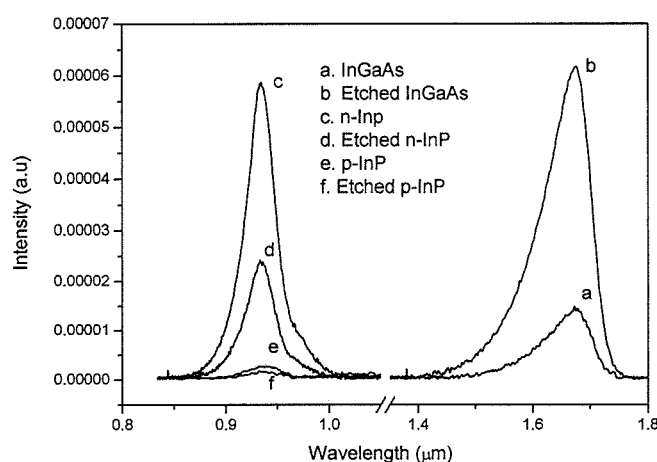


图 3.7 Ar^+ 离子刻蚀前后 InGaAs 和 InP 的室温 PL 光谱图

Fig.3.7 PL spectra of InGaAs and InP before and after Ar^+ etching at room temperature

3.3.2.3 反射谱测试

红外反射光谱对于研究材料的表面是一种有力的工具，可以分析材料表面的均方根粗糙度 σ 和成分的变化^[6]。当一束单色光入射到一个表面时，反射光可以分成为两部分，一部分是镜面反射，一部分则来自扩散反射(散射)。当波长足够长时，散射就可以忽略，此时测得反射率主要是镜面反射部分，仅与均方根粗糙度有关，Davies 得出的对于完全导电表面的镜面反射部分正入射的情况可以用以下公式表示：

$$R_s = R_0 \exp[-(4\pi\sigma)^2 / \lambda^2] \quad (3.1)$$

R_s 为粗糙表面的镜面反射率， R_0 同一种材料光滑表面的反射率， λ 是入射光波

长。根据我们前面的表面形貌分析,采用短波 $0.9\mu\text{m}\sim 1.6\mu\text{m}$ 测试时,可以用公式 3.1 来分析。图 3.8、图 3.9 和图 3.10 分别是 Ar^+ 离子刻蚀前后 InGaAs、n-InP 和 p-InP 反射光谱图,从图中可以看出,刻蚀后 InGaAs 反射率增大,刻蚀后 p-InP 和 n-InP 反射率减小,这是因为刻蚀后 InGaAs 均方根粗糙度减小,而 InP 均方根粗糙度增加。另外反射光谱峰位的移动可以反映材料组分的变化,从图 3.9 和图 3.10 中还可以看出,刻蚀后 p-InP 和 n-InP 峰位都向波数小(波长长)的方向移动,表明离子刻蚀使材料表面各组分元素的含量发生了变化。与 PL 谱相比,反射谱可以更多的反映材料表面信息,由于 PL 谱的光源为激光,分析的深度较深,没有测试到峰位的移动。

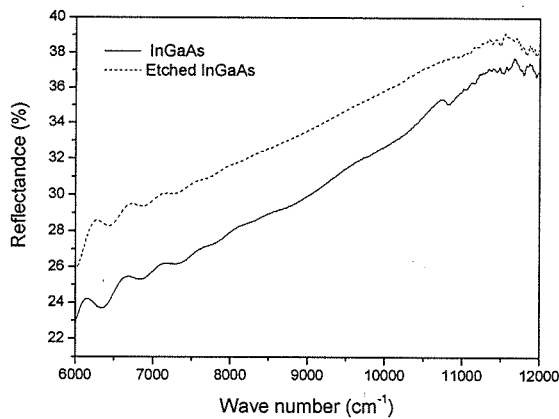


图 3.8 Ar^+ 离子刻蚀前后 InGaAs 反射光谱图

Fig.3.8 Reflectance spectra of InGaAs before and after Ar^+ etching at room temperature

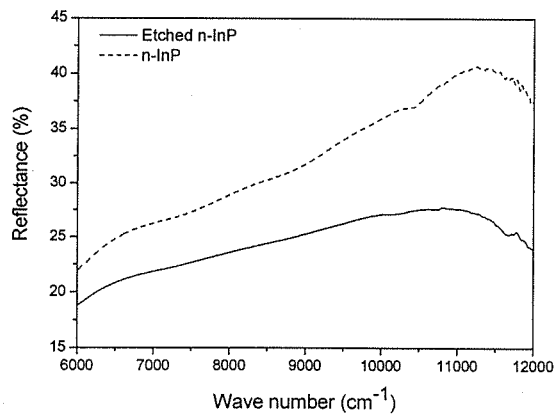


图 3.9 Ar^+ 离子刻蚀前后 n-InP 反射光谱图

Fig.3.9 Reflectance spectra of n-InP before and after Ar^+ etching at room temperature

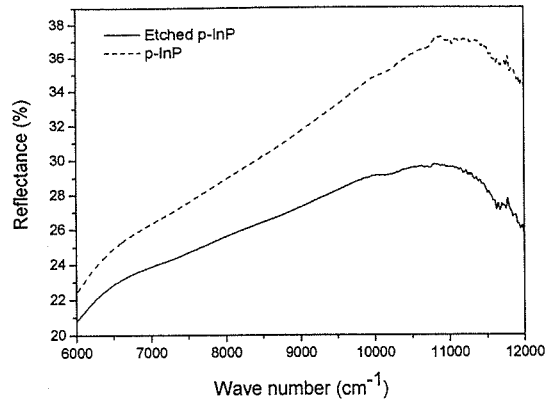


图 3.10 Ar⁺离子刻蚀前后 p-InP 反射光谱图
Fig.3.10 Reflectance spectra of p-InP before and after Ar⁺ etching at room temperature

3.3.2.4 XPS 表面成分分析

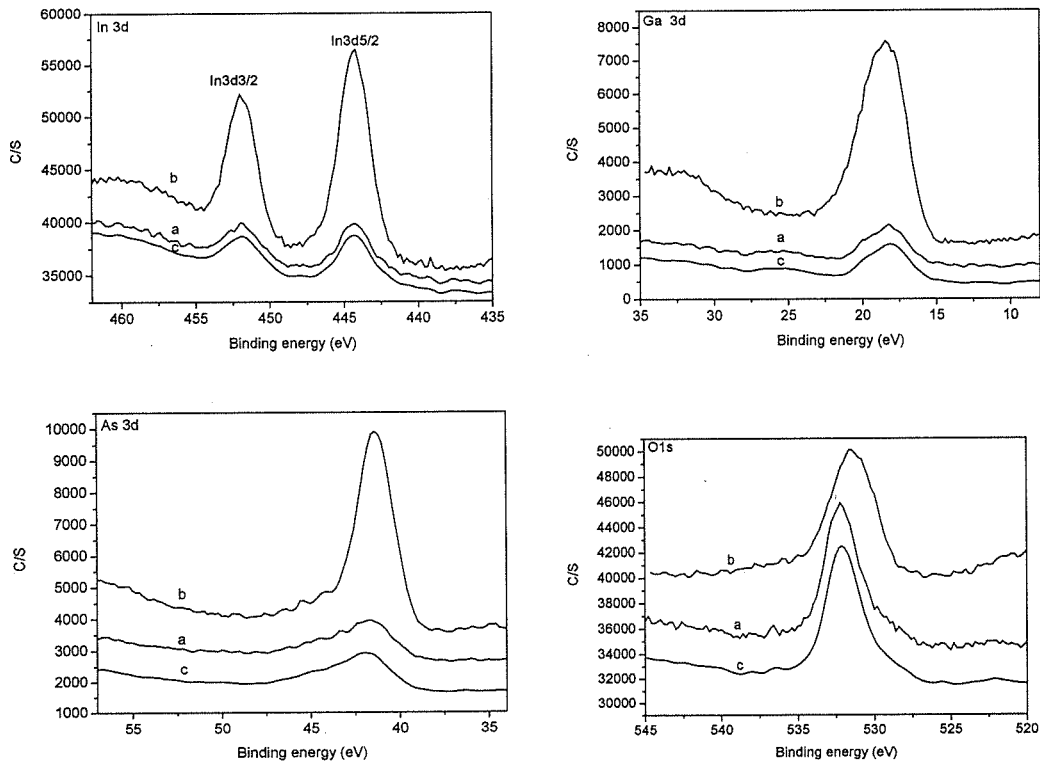


图 3.11 InGaAs 的窄扫描 XPS 图(a) InGaAs (b) Ar⁺ etched InGaAs (c) Ar⁺ & wet etched InGaAs
Fig.3.11 High resolution spectra of InGaAs (a) InGaAs (b) Ar⁺ etched InGaAs (c) Ar⁺ & wet etched InGaAs

针对刻蚀气体中物理刻蚀气体的选择问题，K. L. Seaward 和 N. J. Mol 在研究惰性气体等离子体刻蚀 GaAs 时发现，惰性气体等离子体(He、Ar、Xe)损伤层厚度与直流偏压以及原子量 m 的关系符合下式^[7,8]：

$$\frac{\text{损伤层厚度}(\text{\AA})}{\text{等离子体直流偏压}(\text{V})} = 3.9 \left(\frac{1}{\sqrt{m}} \right) \quad (3.2)$$

刻蚀损伤饱和时间一般为 60s, 这同时适用于 Si, SiO₂ 和 GaAs, 根据上式, 我们计算出刻蚀 5min 后 InP 和 InGaAs 损伤层厚度约为 186Å。Ar⁺离子干法刻蚀会增加 InP 和 InGaAs 的表面或侧面的表面复合, 进而增加暗电流, 影响器件的性能。所以我们对刻蚀后的样品进行了湿法腐蚀, 各腐蚀 0.3μm, 以消除表面损伤, 并依次测试了未刻蚀, 刻蚀和湿法腐蚀的样品的窄扫描 XPS 图。

图 3.11 为 InGaAs 的窄扫描 XPS 图, a 为未刻蚀 InGaAs, b 为 Ar⁺离子刻蚀后 InGaAs, c 为 Ar⁺离子刻蚀和湿法腐蚀后 InGaAs。我们对 InGaAs 进行 In3d, Ga3d, As3d, O1s 窄扫描, 横坐标代表键能, 纵坐标代表强度, 峰值强度扣除背景后得到该化学键的真实强度。通过拟合各个峰的面积(I_x), 根据公式:

$$C_x = \frac{I_x / S_x}{\sum_i I_x / S_x} \quad (3.3)$$

可以计算出样品中各原子的相对含量(C_x), 其中 S_x 为原子灵敏度因子, 计算后各原子的相对含量列于表 3.1。Ar⁺离子刻蚀改变了 InGaAs 样品表面的各原子的相对含量, O 含量减少, In, Ga 和 As 含量都增加, 但 In 和 Ga 含量增加的更明显。湿法腐蚀 0.3μm 后, In, Ga, As 和 O 含量, 基本上和未刻蚀 InGaAs 样品一致, 我们认为, 刻蚀损伤层已经消除。

图 3.12 为 n-InP 和 p-InP 的窄扫描 XPS 图, a 为未刻蚀 n-InP, b 为 Ar⁺离子刻蚀后 n-InP, c 为 Ar⁺离子刻蚀和湿法腐蚀后 n-InP, d 为未刻蚀 p-InP, e 为 Ar⁺离子刻蚀后 p-InP, f 为 Ar⁺离子刻蚀和湿法腐蚀后 p-InP。根据公式(3.3)计算后各原子的相对含量列于表 3.1。n-InP 和 p-InP 的表面原子的相对含量是一致的, 刻蚀后 O 含量增大, P 含量减小, 湿法腐蚀后成分又和未刻蚀样品一致, 刻蚀损伤层已经消除。刻蚀后 O 含量增大是因为样品表面变粗糙, 表面吸附的 O 增加。P 含量减小是因为刻蚀过程中, P 更容易从 InP 表面脱离。用反应离子刻蚀(RIE)方法, 以 CH₄/H₂/Ar 等离子体刻蚀 InP 时, 也出现 P 缺失的现象^[9]。结果表明, 湿法后处理可以消除干法刻蚀带来的损伤, 可以减小 InGaAs 和 InP 的表面复合, 进而减小暗电流^[10], 对制作基于 InGaAs/InP 结构的器件非常有意义。

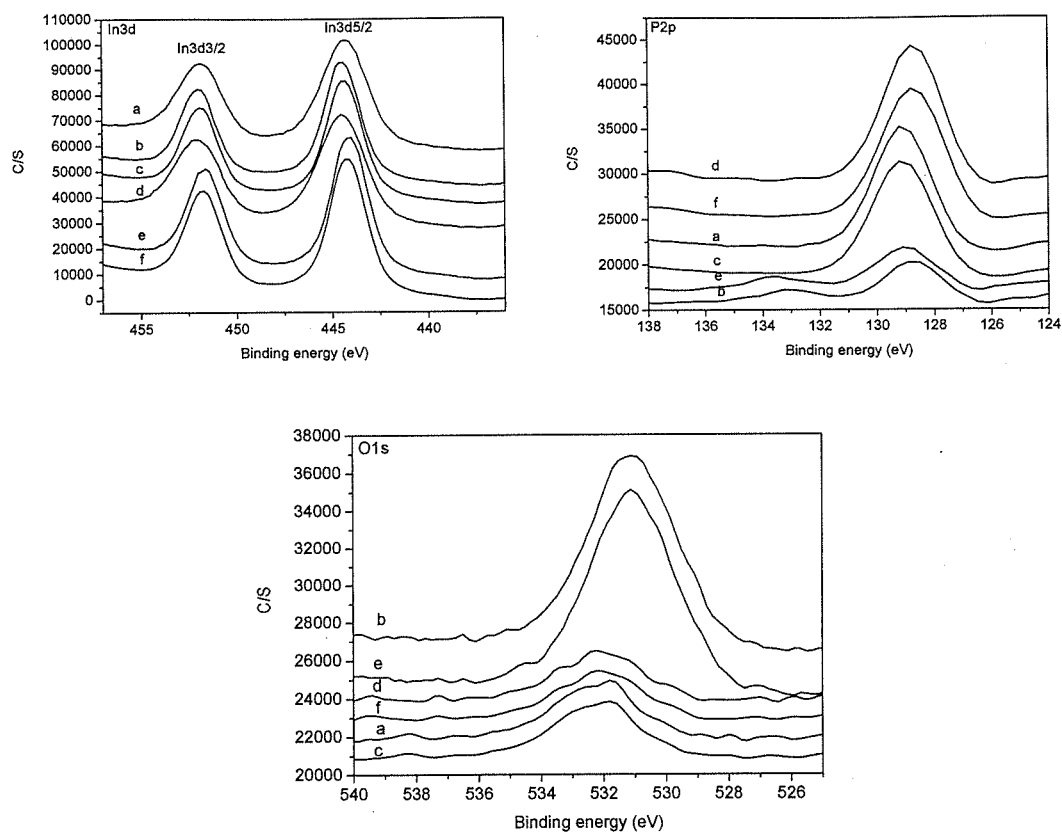


图 3.12 n-InP 和 p-InP 的窄扫描 XPS 图 (a)n-InP (b) Ar⁺ etched n-InP (c) Ar⁺ & wet etched n-InP (d) p-InP (e) Ar⁺ etched p-InP (f) Ar⁺ & wet etched p-InP
 Fig.3.12 High resolution spectra of n-InP and p-InP (a)n-InP (b) Ar⁺ etched n-InP (c) Ar⁺ & wet etched n-InP (d) p-InP (e) Ar⁺ etched p-InP (f) Ar⁺ & wet etched p-InP

表 3.1 Ga、As、In、P、O 的原子含量表
 Table 3.1 Atomic concentration of Ga, As, In, P and O

Atomic concentration table					
Samples	Ga3d	As3d	In3d5/2	P2p	O1s
InGaAs	14.29	12.31	3.71		69.69
Dry etched InGaAs	41.78	17.81	9.11		31.30
Dry & wet etched InGaAs	14.23	12.50	4.15		69.12
n-InP			21.85	66.27	11.88
Dry etched n-InP			27.65	22.76	49.59
Dry & wet etched n-InP			21.11	66.52	12.37
p-InP			22.57	68.78	8.65
Dry etched p-InP			26.87	22.95	50.18
Dry & wet etched p-InP			22.84	68.11	9.05

3.4 小结

台面制作是台面器件的关键工艺,本章结合材料性质及湿法腐蚀和干法刻蚀的优点,改进了台面制作工艺,首先用 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,这样既可提高光敏面的图形保真度,又可消除因 Ar^+ 离子刻蚀而形成的 InGaAs 吸收层侧面损伤。并对 InGaAs、n-InP 和 p-InP 进行了 Ar^+ 离子干法刻蚀和湿法腐蚀后处理实验。原子力显微镜和扫描电镜测试表明,刻蚀后 InGaAs 均方根粗糙度较小, n-InP 和 p-InP 表面变粗糙。PL 谱测试表明,刻蚀后 InGaAs PL 强度增加,而 n-InP 和 p-InP PL 强度都减小。反射光谱图测试表明,刻蚀后 InGaAs 反射率增大,刻蚀后 p-InP 和 n-InP 反射率减小,峰位向波数小(波长长)的方向移动。XPS 分析表明,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,湿法腐蚀后表面成分和未刻蚀前基本一致。湿法后处理可以消除干法刻蚀带来的损伤。干法和湿法相结合对制作基于 p-InP/InGaAs/n-InP 结构的台面器件非常有意义。

参考文献

- [1] 李拂晓, 杨乃彬, Post G, 等, 一种实用的磷化铟 MM IC 背面工艺技术, 半导体学报, 2001, 22(12): 1497-1450.
- [2] van der Drift E, Cheung R, Zijlstra T, Dry etching and induced damage, Microelectron. Eng., 1996, 32: 241-246.
- [3] 李萍, 航天用 InGaAs 探测器的台面工艺和 M-S 接触研究, 中国科学院上海技术物理研究所硕士学位论文, 2005.
- [4] 亢勇, GaN 基 p-i-n 紫外阵列探测器的制备与光电特性的研究, 中国科学院上海技术物理研究所博士学位论文, 2006.
- [5] 庄春全, 汤英文, 黄杨程, 等, $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 硫化后 ZnS/InP 界面的电学特性, 半导体学报, 2005, 26(10): 1945-1949.
- [6] 陆慧庆, 低能粒子束与碲镉汞的相互作用, 中国科学院上海技术物理研究所博士学位论文, 1998.
- [7] Seaward K L, Moll N J, Semiconductor damage from inert and molecular gas plasmas, J. Vac. Sci. Technol. B, 1992, 10(1): 46-53.
- [8] Seaward K L, Moll N S, Surface contamination and damage from CF_4 and SF_6 reactive ion

- etching of silicon oxide on gallium arsenide, *J Electron Mater*, 1990, 19(4): 385-391.
- [9] Pearton S J, High ion density dry etching of compound semiconductors, *Mat. Sci. Eng. B*, 1996, 40: 101-111.
- [10] Yahong Y H Q, Serguei A, Lan B, et al, Techniques for achieving low leakage current in etched InGaAs waveguide PIN detectors, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2004, 22(3): 1062-1068.

第四章 InGaAs 台面探测器的钝化研究

4.1 引言

钝化是制备 InGaAs 台面探测器最关键工艺之一,就像平面 InGaAs 探测器的扩散工艺一样重要,因为钝化效果的好坏,尤其是台面的侧面钝化,直接影响表面复合,进而影响探测器的暗电流、探测率和长期稳定性。表面钝化问题一直是 III-V 族半导体工艺的难题之一,高的表面态密度和表面复合速率一直制约着 III-V 族半导体的发展,是一个迫切需要解决的问题;与 Si 工艺不同的是,III-V 族半导体的各组成元素的氧化物化学稳定性差,且与半导体界面态密度很大,这都使得用其自身氧化层作为钝化层性能差^[1]。钝化的目的主要是保护表面不被外界污染和损伤,同时减少表面态密度、表面复合速率和侧面漏电流。文献中已报道的平面结构钝化介质膜和抗反射层多为 SiN_x 、 SiO_2 、 Si/SiO_2 、 CdS/SiO_2 等,台面结构钝化膜多为聚酰亚胺^[2]、 SiO_2 、 SiN_x 等^[3]。由于 SiN_x 、 SiO_2 薄膜与 InP 和 InGaAs 晶格不匹配,在环境温度发生变化时,容易产生应力,且由于生长条件等因素,往往台面表面生长层较厚,侧面生长层较薄,另外由于腐蚀时,侧表面不光滑,所以侧面生长的钝化膜效果较差,不能有效的减小暗电流,也不能保证器件的长时间的稳定性;聚酰亚胺有耐腐蚀、抗辐照、耐高温、黏附性好等优点^[4],但钝化效果及抗反射效果差,这种器件可用于光纤通讯中,但相对于探测率和响应率要求较高的空间遥感探测器还相差甚远。

本章试图通过有机和无机钝化膜相结合来解决台面的钝化问题,因为钝化主要取决于第一层钝化膜,第二层主要起到加固作用。文献中报道 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 能够有效的去除 InP 和 InGaAs 表面的自然氧化层,降低表面缺陷态密度^[5-8]。因此在台面形成后,利用 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 对其进行湿法硫化,然后覆盖钝化层,这样能够较好的降低表面复合速度,提高量子效率和探测率。为此我们系统的研究了单层 SiN_x 、单层聚酰亚胺、硫化+单层聚酰亚胺、硫化+ ZnS /聚酰亚胺双层钝化、硫化+ In_2S_3 /聚酰亚胺双层钝化和 SiN_x /聚酰亚胺双层钝化。介绍了钝化层的性质,特别是聚酰亚胺和 In_2S_3 ,用原子力显微镜、扫描电镜、XRD 和 XPS 对生长 In_2S_3 薄膜进行了研究。对不同钝化方式的器件进行 I-V、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钝化效果。

4.2 实验

用 MBE 方法生长的相同结构的外延材料，通过六种不同的钝化方式制作 InGaAs 台面短波探测器，图 4.1 展示了不同的台面钝化结构示意图。台面制作完后：(1) 单层聚酰亚胺：以 5000 转/min 的转速旋涂聚酰亚胺，125°C 预固化 30min，正胶光刻开电极孔，300°C 固化 1 小时；(2) 硫化+聚酰亚胺：在 $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ 溶液中 60°C 硫化 30min，然后聚酰亚胺钝化；(3) 硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化：硫化后，先热蒸发生长 ZnS 1500Å 钝化层，再聚酰亚胺加固；(4) 硫化+ In_2S_3 /聚酰亚胺双层钝化：硫化后，先热蒸发生长 In_2S_3 1500Å 钝化层，再聚酰亚胺加固；(5) 单层 SiN_x 钝化：PECVD 生长厚度为 1500Å 的 SiN_x ，开电极孔时，在 50°C 水浴的 $\text{HF}:\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_2\text{O}=3:6:9$ 溶液中腐蚀 5s；(6) SiN_x /聚酰亚胺双层钝化：先热蒸发生长 SiN_x 1500Å 钝化层，再聚酰亚胺加固。p 型和 n 型电极是 Ti/Pt/Au(厚度分别为 200/300/5000Å)作为接触电极。然后通过原子力显微镜和扫描电镜对生长的钝化层，进行形貌分析，对器件的 I-V、响应信号及噪声测试来表征暗电流和探测率。

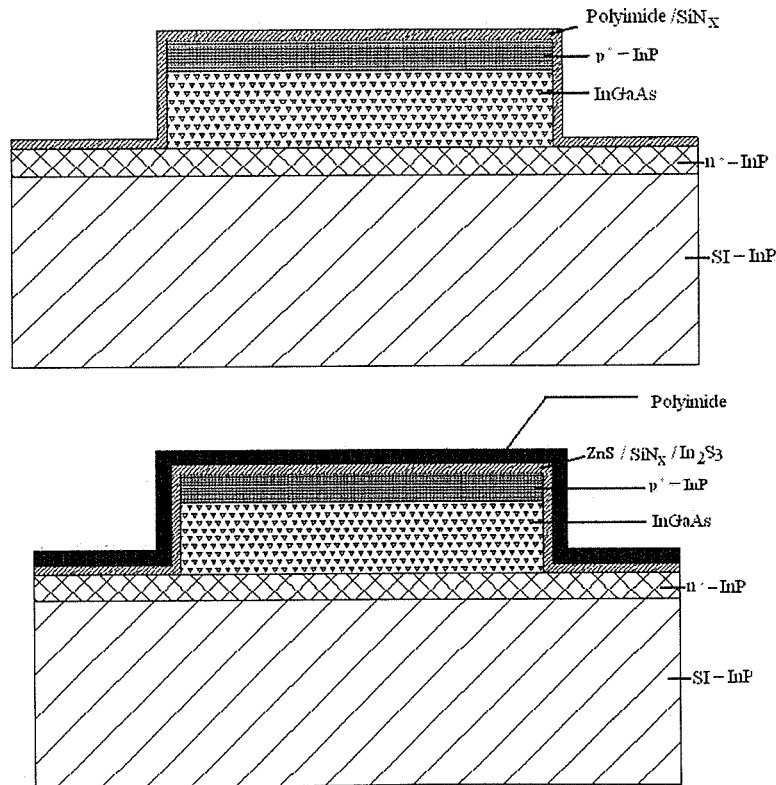


图 4.1 InGaAs 台面探测器钝化结构
Fig.4.1 Passivation structures of InGaAs mesa detectors

4.3 结果和讨论

4.3.1 钝化层基本性质

SiN_x 和 ZnS 钝化膜使用较为普遍, 由于 SiN_x 在短波红外透射率高, 可用 PECVD 法在较低温度(100°C)下生长出致密的薄膜, 并且容易腐蚀, 常用作平面结 InGaAs 的钝化层和抗反射层。ZnS 作为钝化层已经成为 HgCdTe 探测器常规钝化工艺^[9], 在短波红外吸收较小, 采用热蒸发法容易生长, 且薄膜致密度高(如图 4.2)。

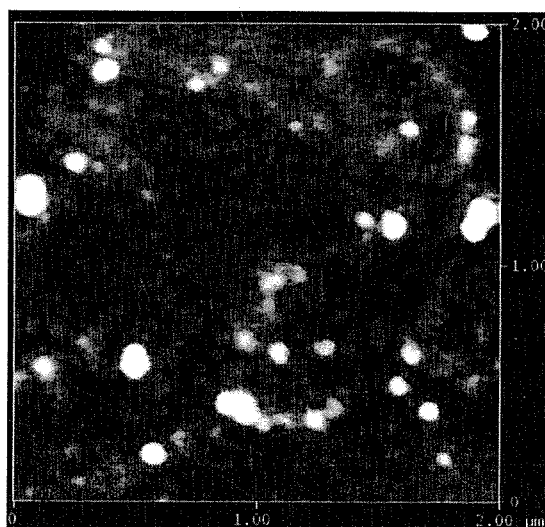


图 4.2 热蒸发 ZnS 薄膜 AFM 照片
Fig.4.2 AFM photograph of the thermal evaporated ZnS film

我们主要研究了聚酰亚胺和 In_2S_3 薄膜的性质。聚酰亚胺的优点在于耐腐蚀、抗辐照、耐高温、黏附性好等, 预固化后聚酰亚胺可以溶于显影液, 便于开电极孔。对于台面结构探测器来说, 由于聚酰亚胺可以像光刻胶一样旋涂, 在台面的侧面堆积较多, 能够更好的对侧面进行钝化和保护, 这是其他方法生长的无机钝化膜所不能比的。文献中已报道的聚酰亚胺钝化方式主要保护侧面, 光敏面上表面未覆盖, 我们想通过表面覆盖来钝化或起到保护作用, 所以首先研究了聚酰亚胺的短波红吸收谱。在双面抛光的蓝宝石片上旋涂聚酰亚胺膜, 首先 125°C 预固化 1 小时, 然后 300°C 固化 1 小时, 以相同的蓝宝石片作为背景扣除, 测试的吸收谱如图 4.3。预固化后, 聚酰亚胺膜有 10%左右的吸收, 但固化后, 几乎没有吸收, 可以用作表面钝化膜。

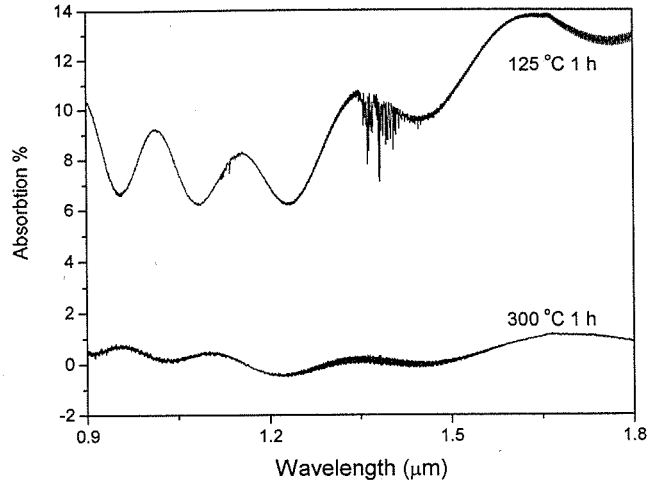


图 4.3 蓝宝石片上聚酰亚胺膜预固化和固化后吸收谱
Fig.4.3 Absorption spectra of pre-solidified and solidified of polyimide on sapphire wafer

以纯度为 99.99%的 In_2S_3 粉末为蒸发源，在两片面积为 $10 \times 10 \text{mm}^2$ 的 p-InP 体材料上热蒸发 1500\AA 钝化层，其中一片样品在 300°C 退火 1 小时。图 4.4(a) 和图 4.4(b)为热蒸发后 In_2S_3 薄膜 SEM 和 AFM 照片，从图中可以看出热蒸发生长 In_2S_3 薄膜比较致密，图 4.4(c)是 300°C 退火 1 小时的 AFM 照片，测试结果表明表面凸起长大，薄膜变的更加致密。图 4.5 是 In_2S_3 钝化层退火前后 XRD 图，图中可以看出，主要以 $\beta - In_2S_3$ 结构存在，这可以从峰的位置可以看出^[10-15]，图中中间最高的峰是 InP 衬底的衍射峰，退火后薄膜内部发生反应， $\beta - In_2S_3$ 含量进一步增加，所以特征峰更明显。

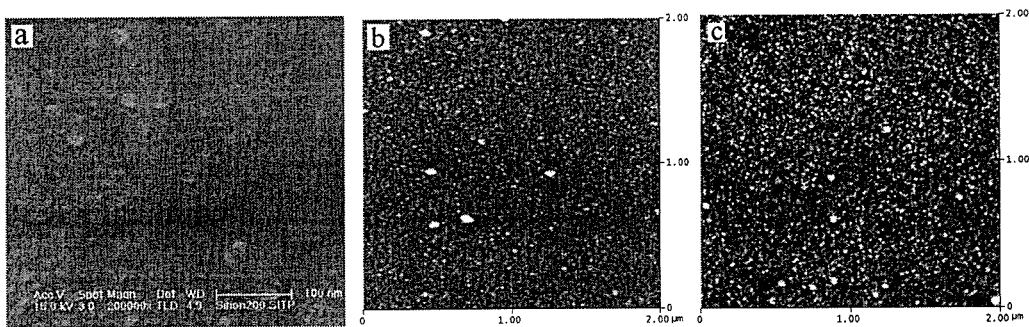


图 4.4 热蒸发 In_2S_3 钝化层 SEM 和 AFM 照片(a) 蒸发后 SEM (b) 蒸发后 AFM (c) 300°C 退火 1 小时 AFM

Fig.4.4 SEM and AFM photos of In_2S_3 passivation layer after thermal evaporation (a) as deposited SEM (b) as deposited AFM (c) annealed at 300°C for 1h AFM

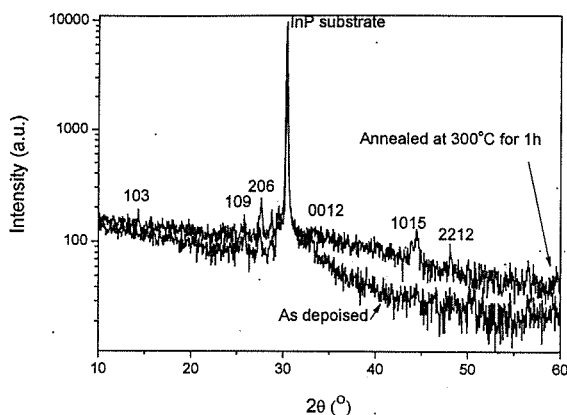
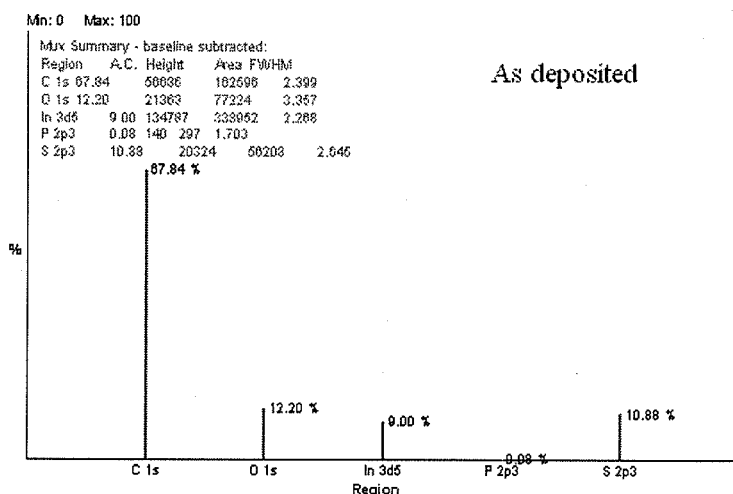


图 4.5 InP 衬底上 In_2S_3 钝化层退火前后 XRD 图
Fig.4.5 X-ray diffraction of patterns of In_2S_3 passivation layer on InP substrate before and after annealing

我们用 XPS 方法分析了 InP 衬底上 In_2S_3 钝化层退火前后 XPS 测试表面元素含量(如图 4.6)，测试结果表明，S 与 In 的含量比由退火前的 1.21 变到退火后的 1.44，接近理论值 3: 2，说明刚生长完后，薄膜中有部分并不是以 In_2S_3 化合物状态存在，在高温退火时，经过反应生成 $\beta-In_2S_3$ 。热蒸发 In_2S_3 钝化层对于台面的钝化的问题在于台面的侧面钝化层生长较薄，图 4.7 是热蒸发 In_2S_3 台面钝化后侧面 SEM 照片，图中明显看出，台面的侧面钝化层厚度比台面上下表面薄，所以需要第二层钝化层起到加固作用，如聚酰亚胺。由于腐蚀引起的钻蚀，使 p 电极过渡到下表面变得困难，这是我们后来采用双层钝化的主要原因。



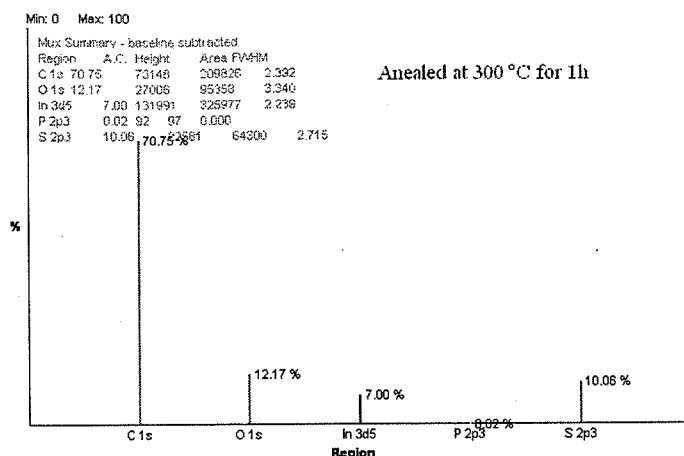


图 4.6 InP 衬底上 In₂S₃ 钝化层退火前后 XPS 测试表面元素含量
Fig.4.6 Surface element content of In₂S₃ passivation layer on InP substrate before and after annealing

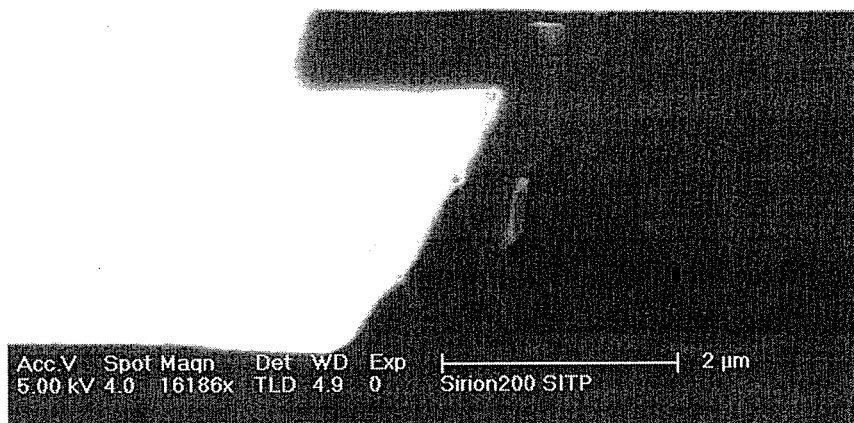


图 4.7 热蒸发 In₂S₃ 台面钝化后侧面 SEM 照片
Fig.4.7 Cross-section SEM photos of In₂S₃ mesa passivation after thermal evaporation

4.3.2 零偏压电阻及暗电流

受热噪声限制的光伏型探测器的探测率可表示为^[16]:

$$D_{\lambda}^* = \frac{q\eta\lambda}{hc} \sqrt{\frac{R_0 A}{4kT}} \quad (4.1)$$

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; k 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 $R_0 A$ 值越大, 探测率越高, 如果光敏面面积是相同的, 理论上讲, R_0 值越高, 钝化效果越好, 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, 证明表面和侧面的漏电流越小, 钝化效果越好^[17]。

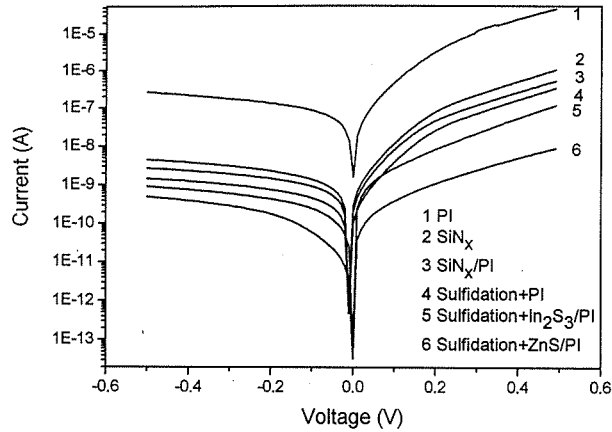


图 4.8 不同钝化 InGaAs 探测器典型 I-V 曲线
Fig.4.8 Typical I-V curves of InGaAs detectors with different passivation

将制备好的六组器件封装在杜瓦中，分别抽测 15 个器件。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 278K(5°C)，因为目前用于空间遥感用的 InGaAs 探测器，一般工作在该温度，测试的典型 I-V 曲线如图 4.8 所示。图 4.9 列出了六种不同钝化方式 InGaAs 探测器零偏压电阻，具体数据列于表 4.1。从图中可以看出，聚酰亚胺单层钝化探测器 R_0 值最小，平均值为 $7.5 \times 10^7 \Omega$ ；硫化+聚酰亚胺钝化后， R_0 值增大，平均值为 $2.3 \times 10^8 \Omega$ ；硫化+ In_2S_3 /聚酰亚胺双层钝化的 R_0 平均值为 $7.5 \times 10^8 \Omega$ ；硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化探测器 R_0 值最大，平均值为 $9.4 \times 10^8 \Omega$ 。单层 SiN_x 钝化和 SiN_x /聚酰亚胺双层钝化， R_0 平均值分别为 $1.05 \times 10^8 \Omega$ 和 $1.28 \times 10^8 \Omega$ ， SiN_x /聚酰亚胺双层钝化 R_0 值略大。

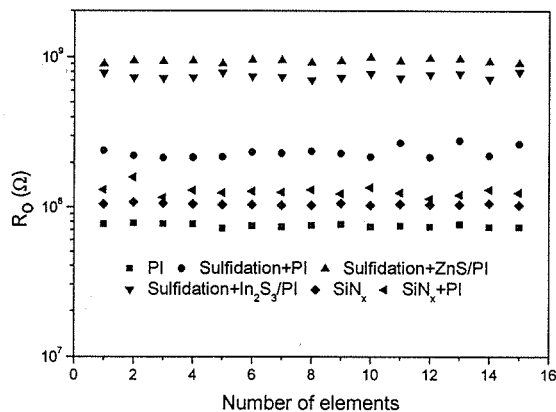


图 4.9 不同钝化 InGaAs 探测器零偏压电阻
Fig.4.9 Zero bias resistance of InGaAs detectors with different passivation

表 4.1 不同钝化 InGaAs 探测器零偏压电阻 (单位: Ω)
Table 4.1 Zero bias resistance of InGaAs detectors with different passivation

样品号	PI	Sul.+PI	Sul.+Zn/PI	Sul.+In ₂ S ₃ /PI	SiN _x	SiN _x +PI
1	7.67E7	2.4E8	9E8	7.88E8	1.05E8	1.31E8
2	7.78E7	2.22E8	9.44E8	7.32E8	1.08E8	1.59E8
3	7.69E7	2.14E8	9.37E8	7.25E8	1.06E8	1.16E8
4	7.68E7	2.16E8	9.46E8	7.34E8	1.05E8	1.3E8
5	7.18E7	2.18E8	9.03E8	7.91E8	1.04E8	1.25E8
6	7.45E7	2.34E8	9.59E8	7.47E8	1.04E8	1.28E8
7	7.36E7	2.3E8	9.53E8	7.41E8	1.03E8	1.26E8
8	7.51E7	2.37E8	9.18E8	7.06E8	1.03E8	1.31E8
9	7.65E7	2.29E8	9.43E8	7.31E8	1.06E8	1.23E8
10	7.35E7	2.18E8	9.9E8	7.78E8	1.03E8	1.36E8
11	7.46E7	2.69E8	9.41E8	7.29E8	1.05E8	1.25E8
12	7.34E7	2.17E8	9.8E8	7.68E8	1.04E8	1.14E8
13	7.65E7	2.79E8	9.7E8	7.78E8	1.04E8	1.21E8
14	7.32E7	2.22E8	9.3E8	7.18E8	1.06E8	1.31E8
15	7.31E7	2.65E8	9.1E8	7.98E8	1.03E8	1.25E8

图 4.10 是不同钝化方式的 InGaAs 探测器在 -0.5V 的暗电流, 具体数据列于表 4.2。与 R_0 正好相反, 反偏压暗电流从大到小的顺序依次是: 聚酰亚胺单层钝化, 平均值为 20.1nA; 单层 SiN_x 钝化, 平均值为 4.41nA; SiN_x/聚酰亚胺双层钝化, 平均值为 2.12nA; 硫化+聚酰亚胺钝化, 平均值为 1.37nA; 硫化+In₂S₃/聚酰亚胺双层钝化, 平均值为 0.96nA; 硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化, 平均值为 0.76nA。

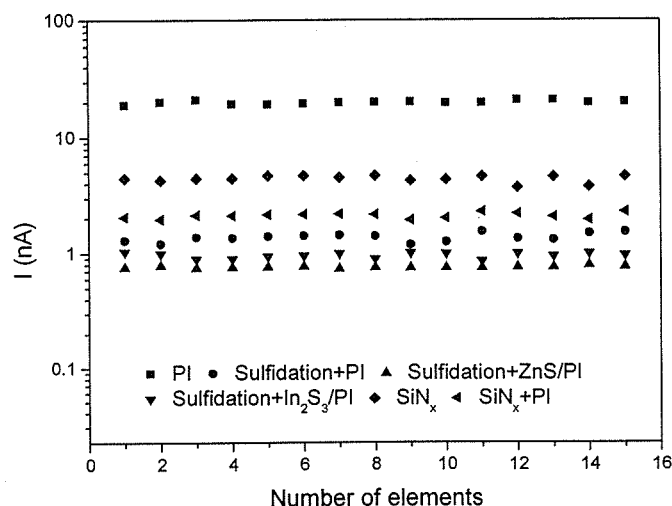


图 4.10 不同钝化 InGaAs 探测器在 -0.5V 的暗电流
Fig.4.10 Dark current of InGaAs detectors with different passivation at -0.5V

台面制作后, 表面难免被氧化生成 In_2O_3 , 由于 In_2O_3 具有导电性, 会增加表面复合。硫化可以去掉 InP 和 InGaAs 表面氧化层, 即表面的 In-O 键转变成 In-S 键, 还有 Ga-S-Ga, Ga-S-In 等键合物, 所以硫化可以减小侧面漏电流, 减小表面态。并且硫化使台面结构的表面和侧面产生 S 键, 可以更好的与 ZnS 或 In_2S_3 结合, 减小表面复合和接触面间应力, 所以硫化后, 再生长 ZnS 或 In_2S_3 , 钝化效果更好。钝化效果的好坏主要取决于第一钝化层, 聚酰亚胺直接钝化效果最差, 硫化+聚酰亚胺钝化效果进一步提高, 硫化+ZnS/聚酰亚胺或硫化+ In_2S_3 /聚酰亚胺钝化效果更好。理论上讲, 由于硫化表面有 In_2S_3 存在, In_2S_3 层钝化效果会更好, 但测试结果 ZnS 钝化效果最好, 还有待于进一步研究。相比之下, In_2S_3 比 ZnS 更容易腐蚀处理, In_2S_3 采用稀盐酸腐蚀, 对下边的 p-InP 影响很小, 而 ZnS 采用浓盐酸腐蚀, 容易对下边 p-InP 腐蚀, 而引起钻蚀。单层 SiN_x 钝化和 SiN_x /聚酰亚胺双层钝化效果差不多, 由于 SiN_x 层较薄, 超声键压法互连电极后, 容易破坏钝化层, I-V 测试发现有些器件容易导通, SiN_x /聚酰亚胺双层钝化的器件很少发现这种情况, 说明该钝化方法的器件稳定性更好。

表 4.2 不同钝化 InGaAs 探测器在 -0.5V 的暗电流 (单位: nA)
Table 4.2 Dark current of InGaAs detectors with different passivation at -0.5V

样品号	PI	Sul.+PI	Sul.+Zn/PI	Sul.+ In_2S_3 /PI	SiN_x	SiN_x +PI
1	19.23	1.29	0.75	1.03	4.48	2.05
2	20.35	1.21	0.78	0.99	4.29	1.97
3	21.2	1.37	0.75	0.89	4.46	2.13
4	19.56	1.36	0.75	0.89	4.44	2.11
5	19.35	1.40	0.76	0.93	4.68	2.15
6	19.65	1.41	0.77	0.95	4.69	2.17
7	20.04	1.43	0.74	0.99	4.51	2.19
8	20.13	1.41	0.75	0.89	4.69	2.17
9	20.32	1.18	0.75	1.01	4.26	1.94
10	19.96	1.26	0.75	0.99	4.34	2.01
11	19.98	1.54	0.75	0.85	4.62	2.29
12	21.11	1.34	0.75	0.99	3.72	2.19
13	20.98	1.30	0.75	0.93	4.59	2.06
14	19.89	1.48	0.78	0.99	3.77	1.94
15	20.13	1.52	0.76	0.95	4.60	2.27

4.3.3 探测率

R_0 不能决定器件的最后性能, 器件的最终性能会受到诸多因素的影响, 所

以不能单纯的以 R_0 评价钝化效果。下面我们通过对比测试两组器件的探测率来评价钝化效果。峰值波长探测率 $D_{\lambda_p}^*$ 由以下公式得出：

$$D_{\lambda_p}^* = gD_{bb}^* = \frac{2\sqrt{2}g\pi L^2 V_s \sqrt{\Delta f}}{V_n \sigma \varepsilon (T_B^4 - T_0^4) A_B \sqrt{A}} \quad (4.2)$$

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 为光敏面面积。

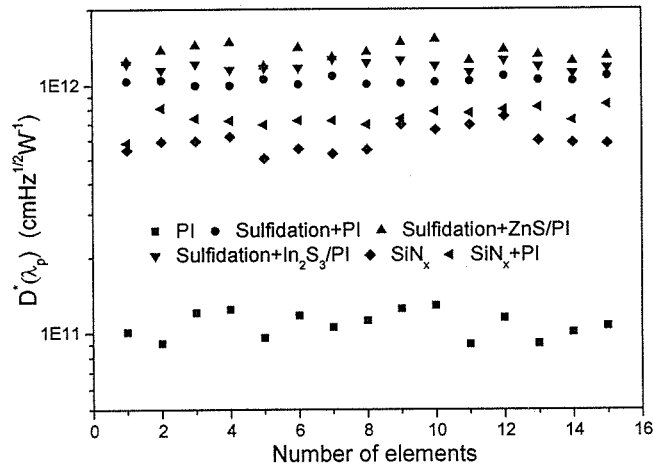


图 4.11 不同钝化 InGaAs 探测器峰值探测率

Fig.4.11 Peak detectivity of InGaAs detectors with different passivation

表 4.3 不同钝化 InGaAs 探测器峰值探测率 (单位: $\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$)

Table 4.3 Peak detectivity of InGaAs detectors with different passivation

样品号	PI	Sul.+PI	Sul.+Zn/PI	Sul.+In ₂ S ₃ /PI	SiN _x	SiN _x +PI
1	1.01E11	1.04E12	1.24E12	1.22E12	5.48E11	5.85E11
2	9.14E10	1.05E12	1.37E12	1.15E12	5.93E11	8.10E11
3	1.20E11	1.00E12	1.44E12	1.22E12	5.95E11	7.36E11
4	1.24E11	1.00E12	1.48E12	1.15E12	6.21E11	7.21E11
5	9.607E10	1.06E12	1.19E12	1.17E12	5.05E11	6.95E11
6	1.17E11	1.01E12	1.41E12	1.17E12	5.53E11	7.21E11
7	1.05E11	1.09E12	1.29E12	1.27E12	5.27E11	7.22E11
8	1.12E11	1.01E12	1.35E12	1.23E12	5.49E11	6.95E11
9	1.24E11	1.02E12	1.48E12	1.26E12	6.95E11	7.34E11
10	1.281E11	1.03E12	1.52E12	1.20E12	6.62E11	7.84E11
11	9.01E10	1.04E12	1.25E12	1.13E12	6.92E11	7.73E11
12	1.14E11	1.09E12	1.38E12	1.26E12	7.51E11	7.98E11
13	9.08E10	1.05E12	1.31E12	1.19E12	5.97E11	8.17E11
14	1.00E11	1.04E12	1.24E12	1.12E12	5.85E11	7.23E11
15	1.06E11	1.09E12	1.30E12	1.17E12	5.80E11	8.35E11

测量不同钝化方式器件的信号和噪声, 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, 可以通过测试响应光谱, 计算得出。测试条件: $T_B=900\text{K}$, $T_0=291\text{K}$, 出射孔直径为 8mm , $L=35\text{cm}$, $\Delta f=100\text{Hz}$, 测试器件温度为 278K , $\sigma=5.67\times 10^{-12}\text{WK}^4/\text{cm}^2$, $\varepsilon=0.99$, $A=56\times 56\mu\text{m}^2$ 。根据公式 4.2 计算结果如图 4.11, 具体数据列于表 4.3。峰值探测率由高到低分别为: 硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化, 平均值为 $1.36\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$; 硫化+ In_2S_3 /聚酰亚胺双层钝化, 平均值为 $1.20\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$; 硫化+聚酰亚胺钝化, 平均值为 $1.03\times 10^{12}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$; SiN_x /聚酰亚胺双层钝化, 平均值为 $7.44\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$; 单层 SiN_x 钝化, 平均值为 $6.04\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$; 聚酰亚胺单层钝化, 平均值为 $1.08\times 10^{11}\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。探测率越高的器件, 钝化效果越好, 和前面得出的结论相吻合。

4.4 小结

钝化是制备 InGaAs 台面探测器最关键工艺, 为此我们系统的研究了六种不同钝化方式的钝化效果。介绍了钝化层的性质, 特别是聚酰亚胺和 In_2S_3 , 用原子力显微镜、扫描电镜、XRD 和 XPS 对生长 In_2S_3 薄膜性质进行了研究。热蒸发可生长致密的 In_2S_3 薄膜, 主要以 $\beta-\text{In}_2\text{S}_3$ 结构存在, 在高温退火后, $\beta-\text{In}_2\text{S}_3$ 含量进一步增加。对不同钝化方式的器件进行 I-V、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钝化效果。研究表明硫化可以改进钝化效果, 钝化效果从高到低依次是: 硫化+ZnS/聚酰亚胺双层钝化、硫化+ In_2S_3 /聚酰亚胺双层钝化、硫化+聚酰亚胺钝化、 SiN_x /聚酰亚胺双层钝化、单层 SiN_x 钝化和单层聚酰亚胺钝化。 In_2S_3 比 ZnS 更易于腐蚀处理, SiN_x /聚酰亚胺双层钝化比 SiN_x 单层钝化稳定性好。

参考文献

- [1] G. Eftekhari, Electrical properties of sulfur-passivated III-V compound devices, Vacuum, 2002, 67: 81-90.
- [2] Y. Kuhara, H. Terauchi, H. Nishizawa, Reliability of InGaAs/InP long-wavelength p-i-n photodiodes passivated with polyimide thin film, Journal of Lightwave Technology, 1986,

- LT-4(7): 933-937.
- [3] Huang Rong-Ting, Renner D, Improvement in dark current characteristics and long-term stability of mesa InGaAs/InP p-i-n photodiodes with two-step SiN_x surface passivation, IEEE Photonics Technology letters, 1991, 3: 934-939.
- [4] G. Danev, E. Spassova, J. Assa, et al, Properties of vacuum-deposited polyimide films, Vacuum, 2003, 70: 37-45.
- [5] 庄春泉, 汤英文, 黄杨程, (NH₄)₂S 硫化后 ZnS/InP 界面的电学特性, 半导体学报, 2005, 26(10): 1945-1949.
- [6] R. Lyer, R. R. Chang, D. L. Lile, Sulfur as a surface passivation for InP, Appl. Phys. Lett. 1988, 53(2): 134-136.
- [7] D. N. Gnoth, D. Wolfframm, A. Patchett, et al, A comparison of S-passivation of III-V(001) surfaces using (NH₄)₂S_x and S₂Cl₂, Applied Surface Science, 1998, 123/124: 120-125.
- [8] W. D. Chen, X. Q. Li, L. H. Duan, et al, Photoluminescence enhancement of (NH₄)₂S_x passivated InP surface by rapid thermal annealing, Applied Surface Science, 1996, 100/101: 592-595.
- [9] 周咏东, HgCdTe 探测器芯片钝化介质的生长及其特性研究, 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 1997: 4-6.
- [10] R. S. Mane, C. D. Lokhande, Studies on structural, optical and electrical properties of indium sulfide thin films, Materials Chemistry and Physics, 2002, 78: 15-17.
- [11] C. Guillen, T. Garcia, J. Herrero, et al, Tailoring growth conditions for modulated flux deposition of In₂S₃ thin films, Thin Solid Films, 2004, 451/452: 12-15.
- [12] N. Naghavi, R. Henriquez, V. Laptev, et al, Growth studies and characterization of In₂S₃ thin films deposited by atomic layer deposition (ALD), Applied Surface Science, 2004, 222: 65-73.
- [13] A. Timoumi, H. Bouzoutia, M. Kanzari, et al, Fabrication and characterization of In₂S₃ thin films deposited by thermal evaporation technique, Thin Solid Films, 2005, 480/481: 124-128.
- [14] N. Barreau, J. C. Bernede, H. El Maliki, et al, Recent studies on In₂S₃ containing oxygen thin films, Solid State Communications, 2002, 122: 445-450.
- [15] M. G. Sandoval-Paz, M. Sotelo-Lerma, et al, Structural and optical studies on thermal-annealed In₂S₃ films prepared by the chemical bath deposition technique, Thin Solid Films, 2005, 472: 5-10.
- [16] 汤定元, 糜正瑜, 等, 光电器件概论, 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
- [17] 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: 124-129.