文章编号:1001-5078(2009)09-0948-04 ·红外材料与器件·

InSb 阵列探测芯片的感应耦合等离子反应刻蚀研究

张国栋,徐淑丽,赵鸿燕,朱炳金,李小宏
(中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009)

摘 要:利用感应耦合等离子(ICP)反应刻蚀(RIE)进行了 InSb 阵列芯片台面刻蚀,并利用轮廓仪、SEM 及 XRD 对台面形貌以及刻蚀损伤进行分析。采用优化的 ICP 刻蚀参数,实现的刻蚀速率为 70~90 nm/min,刻蚀台阶垂直度~80°,刻蚀表面平整光滑、损伤低。与常规的湿法腐蚀相比,明显降低了侧向钻蚀。台面采用此反应刻蚀工艺,制备了具有理想 $I-V$ 特性的 320×256 InSb 探测阵列芯片,在 -500 mV 到零偏压范围内,光敏元(面积 23 μm×23 μm)的动态阻抗(R_d)大于 100 MΩ。

关键词: InSb;感应耦合等离子;反应刻蚀;台面形貌;$I-V$ 曲线
中图分类号:TN364 **文献标识码:**A

Inductively coupled plasma reactive ion etching of InSb photovoltaic detector arrays

ZHANG Guo-dong, XU Shu-li, ZHAO Hong-yan, ZHU Bing-jin, LI Xiao-hong
(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: This work presents the study results of using inductively coupled plasma (ICP)-reactive ion etching (RIE) for fabricating InSb mesa with $CH_4/H_2/Ar$ plasma. With optimized ICP etching parameters, good etching results have been obtained. Etch rates is about 70 to 90 nanometers per minute, sidewall angles of etched mesa is about 80°, and the etched surface is as smooth as that before the RIE process and with low damage. The lateral etching effect commonly encountered in wet etching has been reduced distinctly. 320×256 InSb detective array with the mesa fabricated with the ICP-RIE have been developed also. The current-voltage characteristic of this detector measured at 77 K is as good as that of the devices fabricated by wet etching.

Key words: InSb; inductively coupled plasma (ICP); reactive ion etching (RIE); etching profile; current-voltage characteristic

1 引 言

红外焦平面探测器作为红外成像制导技术的核心部件,以其结构灵活、响应快、空间分辨率高等优点,成为红外探测器发展的趋势。在中红外波段的探测方面,InSb 具有灵敏度高、材料工艺成熟等优点,其焦平面探测器已广泛应用于 3~5 μm 波段的高性能红外成像系统。红外焦平面阵列光敏元数的增加可以有效提高红外成像系统的分辨力和灵敏度。美国琥珀公司于 1992 年研制成功 512×512 规模的混成式 InSb 焦平面探测器,1994 年美国休斯公司研制成功的规模已达到 1024×1024。因此,大规模、高性能的光伏型 InSb 阵列芯片的研制具有重要意义。

传统光伏型 InSb 探测器芯片台面是在扩散成结后采用乳酸/硝酸溶液腐蚀的方法加工的[1-2]。采用化学腐蚀时腐蚀速率的重复性及一致性不好控制,而且腐蚀速率对图形的尺寸、密度等参数的变化

作者简介:张国栋(1972-),男,高级工程师,主要从事红外探测器的研究。E-mail:zhanggd01@sohu.com
收稿日期:2009-03-27;**修订日期:**2009-05-23

非常敏感。利用柠檬酸/双氧水溶液的腐蚀工艺一定程度上改善了腐蚀台面形貌,从而改善了 InSb 二极管的 $I-V$ 曲线[1]。但是,湿法腐蚀制备 InSb 台面的工艺中,侧向钻蚀必然影响台面的有效面积。特别是在大阵列、小面元的光敏阵列芯片的制备中,侧向钻蚀必然使加工的光敏元尺寸小于其设计尺寸,从而显著降低器件的填充因子。为了制备高集成度阵列图形,同时精确控制刻蚀速率,有研究采用离子束刻蚀[2]方法加工台面阵列,但离子束刻蚀会对刻蚀晶体引入较严重损伤。

反应离子刻蚀(RIE)能够获得各向异性的形貌,而且容易通过调整工艺参数来进行控制,在大规模成像器件制备中具备巨大优势[3-6]。感应耦合等离子(ICP)刻蚀是等离子刻蚀的一种,它采用感应耦合的方式产生高密度等离子体,利用其中具有化学活性的离子团或自由基与材料的化学反应,实现对材料的反应刻蚀,具有刻蚀速率高、损伤低的优点。对于 III-V 族化合物半导体材料的刻蚀,常用的反应气体有 CH_4/H_2[5-6] 及 Cl_2[7]。利用 CH_4/H_2 进行的反应刻蚀,可以实现更低的刻蚀损伤,而且反应产物中 In 的有机化合物比其氯化物具有更高的饱和蒸气压、更容易挥发,从而获得更好的刻蚀形貌及表面状态。同时,为了避免含碳聚合物膜沉积带来的不利影响,CH_4 与 H_2 的比例一般不高于 1/3[5]。

本研究利用 ICP 反应刻蚀制备 InSb 台面,反应气体包括 CH_4,H_2 及 Ar 气。对刻蚀速率、台面形貌以及刻蚀损伤进行了分析研究。刻蚀后结合钝化、金属化以及光刻腐蚀等工艺,制备了性能较好的面阵 InSb 二极管阵列芯片。

2 实 验

采用的刻蚀样品包括 N 型 <111> 晶向 InSb 单晶片以及经 Cd 源扩散成结的 InSb 晶片。利用光化学汽相沉积(PCVD)方法在 InSb 晶片表面沉积 SiO_2,利用光刻腐蚀工艺制备 SiO_2 掩模图形,然后进行反应离子刻蚀。反应离子刻蚀采用 SENTECH 公司研制的 ICP-RIE 设备,其结构示意图如图 1 所示。设备采用两个独立射频电源,一个射频源称为 ICP 源,它通过感应耦合对反应气体进行电离,产生高密度等离子体。另一射频源成为偏压射频源,它通过对下基板及晶片施加射频功率产生偏压,从而控制离子的能量。反应气体通过质量流量计控制按比例通入反应室,经电离产生等离子体,对 InSb 晶片进行反应刻蚀。

采用的 CH_4 与 H_2 流量比为 3:10,Ar 气流量与 CH_4 相近。实验参数范围:反应室压力(0.35 ~ 4.0 Pa)、ICP 源功率(500 ~ 600 W),偏压射频源功率(50 ~ 300 W)。ICP 反应刻蚀后,利用 HF 酸(HF)溶液去除 InSb 样品表面的 SiO_2 掩模层,在轮廓仪及扫描电镜上进行扫描分析,对比了不同刻蚀条件下获得的刻蚀速率、台面形貌以及刻蚀表面情况。利用优化后的 ICP 刻蚀参数进行刻蚀,通过 XRD 分析考察了刻蚀可能引入的损伤,另外对刻蚀台面形貌进行了分析。为便于对比,实验中同时采用 10:1 乳酸/硝酸溶液[2]进行湿法腐蚀加工台面。对通过 ICP 刻蚀以及湿法腐蚀制备的 InSb 台面二极管电流-电压($I-V$)曲线进行了测试对比分析。

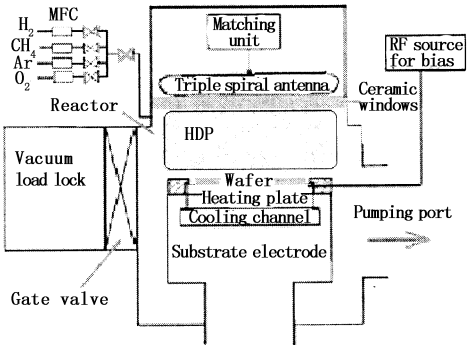


图 1 SENTECH 公司 ICP-RIE 设备结构示意图

3 实验结果及分析

实验中发现,在所选择的实验参数范围内刻蚀速率随 ICP 源功率及偏压射频源功率的增加而增加。但是,当偏压射频源功率的增加到一定值(>250 W)后,ICP 刻蚀 InSb 表面明显变粗糙,怀疑在此偏压射频源功率对应产生的偏压下,离子所获得的能量超出了引起晶格损伤的阈值能量。因而为了避免刻蚀引起表面粗糙度变坏,偏压射频源功率选择应不高于 250 W。另外,当反应室压力低于 0.5 Pa 时,刻蚀表面出现亮点,怀疑为刻蚀损伤或表面成分变化的表现。而当反应压力选择高于 2.0 Pa 时在刻蚀区底部产生了不同程度的钻蚀现象,分析为在此压力下电离产生的离子相互碰撞加剧,导致离子运动无序,增加了对刻蚀侧壁碰撞的机会,进而引起底部钻蚀。由此,优化的反应室压力范围选择在 0.5 ~ 2.0 Pa。

采用优化的 ICP 刻蚀参数进行 InSb 样品后,利用 HF 酸(HF)溶液去除 InSb 样品表面的 SiO_2 掩模层,在轮廓仪及扫描电镜上进行扫描分析。图 2 为刻蚀样品的轮廓仪扫描结果,图形阵列内单元间中心距 30 μm,单元尺寸设计 24 μm,刻蚀后加工后单

元尺寸23 μm。在优化的实验参数范围内,实现的平均刻蚀速率为70~90 nm/min。InSb刻蚀样品的SEM扫描结果如图3所示。刻蚀台阶的垂直度~80°,刻蚀区表面较平整光滑。而采用同样的设计尺寸,经湿法腐蚀加工后测量单元尺寸通常为18~20 μm,占空比明显降低。因此,与湿法腐蚀相比,反应刻蚀显著降低了台阶的侧向钻蚀,从而保证了阵列芯片上的高占空比,对保证器件高的量子效率、降低光敏元间串扰有利[8]。

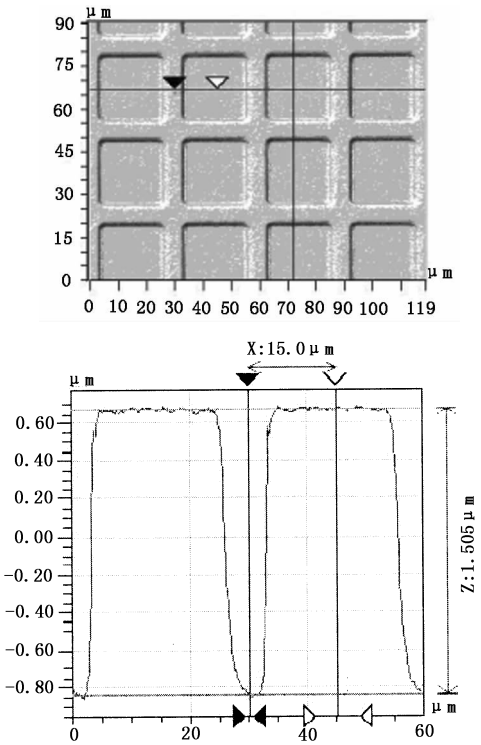


图2 InSb反应刻蚀样品的轮廓仪扫描结果

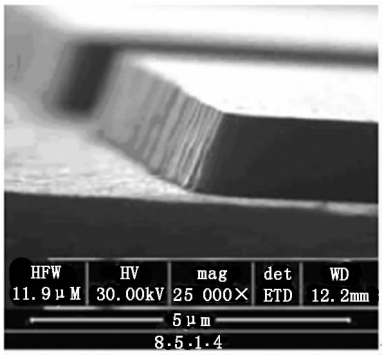


图3 InSb刻蚀台面的SEM照片

对表面无图形的InSb晶片在刻蚀前后进行XRD分析,发现X射线在InSb的<111>、<333>及<044>晶向对应的Bragg角位置处呈现明显的衍射峰。图4描述了ICP刻蚀前后InSb晶片在这三个方向的XRD分析结果。可以发现,利用$CH_4/H_2/Ar$等离子实现的ICP反应刻蚀,使InSb晶片在<111>晶向的XRD半峰宽略有展宽,而对<333><044>XRD半峰宽的影响不大。由此可以推断,采用此优化工艺实现的ICP反应刻蚀对InSb引入的晶格损伤轻微,本文后边对ICP刻蚀InSb二极管测得的较优良的$I-V$曲线也证实了这一点。

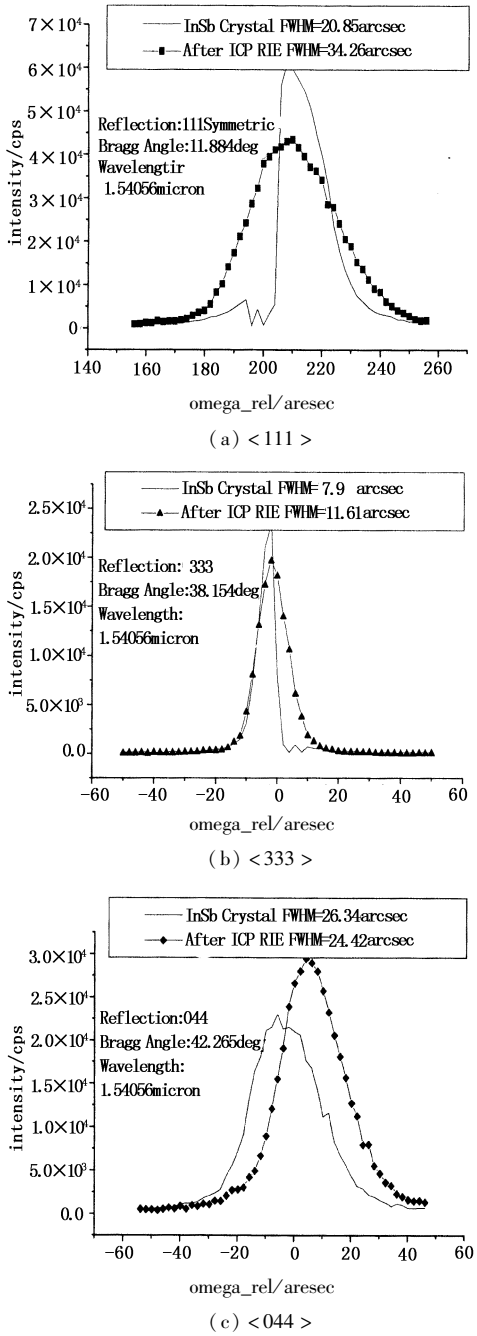
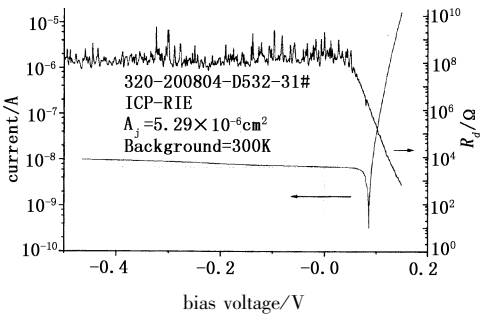


图4 InSb晶片刻蚀前后XRD分析结果

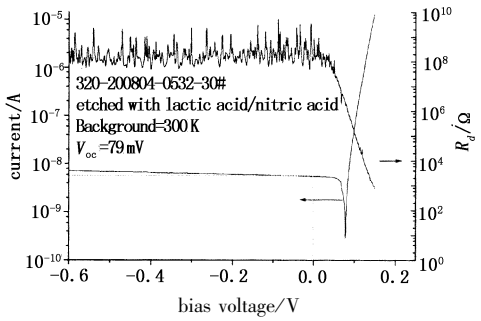
用于制备探测芯片的InSb晶片,通过扩散Cd形成PN结。晶片表面制备SiO_2掩模图形并进行感应耦合等离子(ICP)刻蚀后,利用HF酸溶液去除InSb晶片表面的SiO_2掩模,清洗处理后利用PCVD设备重新沉积SiO_2钝化层,并采用热蒸发制备Au/Cr电极,结合光刻腐蚀等工艺制成阵列InSb探测芯片。

ICP 刻蚀加工后 P 型台面尺寸为 23 μm × 23 μm，台面中心覆盖直径 20 μm 的圆形 Au/Cr 电极。将制备的 320 × 256 元 InSb 探测芯片置于 77 K 低温探针台上测试 $I-V$ 曲线。器件 $I-V$ 曲线及动态阻抗如图 5(a)所示。在 300 K 背景下，测得阵列内典型器件的开路电压(V_{oc})为 86 mV，短路电流 I_{sc}(即背景光电流)为 6.93 nA，推算出其背景光电流密度为 3220 μA/cm^2，略大于 300 K 背景下量子效率为 1、视场 180°情形下的光电流密度(J_{ph})理论值为 3200 μA/cm^2[9]。测得的背景光电流密度偏大，这可能与 InSb 二极管台面周围的光生载流子收集引起有效光敏面扩大有关。在 −500 mV 到零偏压附近的范围内，二极管的动态阻抗(100 ~ 1000) MΩ。另外，可以看出在这一偏压范围内二极管的动态阻抗略有起伏，分析这一现象可能与测试时背景及自然光起伏有关。

为了便于对比，实验中同时采用 10∶1 乳酸/硝酸溶液[2]进行湿法腐蚀台面加工，其余配套工艺相同，制备的器件置于同样的测试条件下进行测试，$I-V$曲线及动态阻抗如图 5(b)所示，短路电流(即背景光电流)为 5.6 nA，二极管的动态阻抗(100 ~ 1000) MΩ。测得的背景光电流略小于同样背景下的 ICP 刻蚀 InSb 二极管光电流。



(a) ICP 反应刻蚀台面



(b) 乳酸硝酸溶液腐蚀台面

图 5　台面采用不同加工方式的 320 × 256 元 InSb 探测芯片内典型的电流 − 电压曲线

可见，在同样的背景条件下测试，反应刻蚀与湿法腐蚀两种工艺制备的 InSb 二极管在动态阻抗及光电流值方面差别不大。湿法腐蚀的二极管台面虽然尺寸明显减小，但光电流值无明显下降，分析这与台面周围区域光生载流子的横向扩散有关系。但是，从提高占空比、降低串扰的角度出发，ICP 反应刻蚀在制备密集型大阵列探测器芯片台面方面具有明显优势。

4　结　论

本研究通过优化感应耦合等离子刻蚀参数，实现了对 320 × 256 元阵列 InSb 台面的制备，刻蚀形貌理想，刻蚀台阶的垂直度达到 80°，未产生明显表面损伤及台面横向钻蚀。通过其余芯片配套工艺，制备了具有理想 $I-V$ 曲线的 InSb 探测阵列芯片。阵列器件芯片在 −500 mV 到零偏压附近的范围内，二极管的动态阻抗可以达到(100 ~ 1000) MΩ。与常规的硝酸/乳酸溶液实现的湿法腐蚀相比，明显提高了器件占空比，为高性能密集型大阵列探测器芯片研制打下了基础。

参考文献：

[1] K M Chang, J J Luo, C D Chiang, et al. Wet etching characterization of InSb for thermal imaging applications[J]. Jpn. J. Appl. Phys, 2006, 45(3): 1477 − 1482.

[2] L P Chen, J J Luo, T H Liu, et al. Ion beam etching for photovoltaic detector application[J]. Jpn. J. Appl. Phys, 1992, 31(7): 813 − 815.

[3] C R Eddy Jr., E A Dobisz, et al. Electron cyclotron resonance reactive ion etching of fine features in $Hg_xCd_{1-x}Te$ using CH_4/H_2 plasmas[J]. J. Vac. Sci. Technol A, 1993, 11(4): 1763 − 1767.

[4] 叶振华，胡晓宁，全知觉，等. HgCdTe 探测阵列干法技术的刻蚀形貌研究[J]. 红外与毫米波学报，2006，25(5): 325 − 328.

[5] N Haneji, G Segami, T Ide, et al. Electron cyclotron resonance-Reactive Ion etching of Ⅲ − Ⅴ Semiconductors by Cyclic Injection of $CH_4/H_2/Ar$ and O_2 with constant Ar flow[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2003, 42: 3958 − 3961.

[6] T Suzuki, N Haneji, K Tada, et al. Electron cyclotron resonance-reactive ion beam etching of InP by cyclic injection of $CH_4/H_2/Ar$ and O_2[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2002, 41: 15 − 19.

[7] Y J Han, S Xue, W P Guo, et al. Highly selective dry etching of GaN over AlGaN using inductively coupled $Cl_2/N_2/O_2$ plasmas[J]. Jpn. J. Appl. Phys., 2003, 42: 1139 − 1141.

[8] R Fastow, A strum. Monte Carlo simulation of the cross talk in InSb matrices[J]. SPIE, 1994, 2274: 136 − 146.

[9] E L Dereniak, G D Boreman. Infrared detectors and systems[M]. New York: Wiley-Interscience Publication, 1996: 310.