

文章编号: 1000-5013(2013)02-0139-04

利用 $\text{SiCl}_4/\text{Ar}/\text{H}_2$ 气体 ICP 干法刻蚀 GaAs 材料

吕晓敏, 邱伟彬, 王加贤

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 利用 $\text{SiCl}_4/\text{Ar}/\text{H}_2$ 气体的电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀 GaAs 材料,研究反应气体流量、样品室压力、源功率 RF1 和 RF2 等参数对刻蚀速率的影响.结果表明:在反应气体 SiCl_4 , Ar 和 H_2 的流量分别为 2, 4, 1 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 样品室压力为 0.400 Pa, RF1 和 RF2 的功率分别为 120, 500 W 的最佳优化参数下,得到的刻蚀速率为 486 $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$, 且同时满足垂直而光滑的台面.利用该优化后的配方刻蚀 GaAs 衬底 10 min 后,得到大面积的光滑表面,其粗糙度为 0.20 nm.

关键词: GaAs; 干法刻蚀; 电感耦合等离子体; SiCl_4 ; 光滑表面

中图分类号: TN 405.98

文献标志码: A

干法刻蚀有利于各向异性,严格控制刻蚀速率、台面尺寸和形状,成为垂直刻蚀结构尺寸控制的关键工艺.反应离子刻蚀(RIE)和电感耦合等离子体(ICP)是Ⅲ~Ⅴ族化合物半导体最常用的刻蚀方法.ICP具有降低离子轰击造成的损耗,及在 ICP 系统更容易获得大面积均匀性^[1]等特点.近年来,在Ⅲ~Ⅴ族半导体的干法刻蚀工艺中,氢气常被当作钝化气体用来光滑处理刻蚀表面.Choquette 等^[2]采用 RIE 方法,通过 H_2 与 SiCl_4 发生化学反应来预处理 GaAs,将表面粗糙度从 11.8 nm 降低到 0.9~1.5 nm,可与刻蚀之前(0.6 nm)相比拟.Rommel 等^[3]采用 ICP-RIE 方法,在 Cl_2/Ar 等离子体中加入 H_2 来刻蚀 InP 基材料,获得各向异性且具有极高品质因数的光滑谐振腔.本文利用 $\text{SiCl}_4/\text{Ar}/\text{H}_2$ 气体 ICP 干法刻蚀 GaAs 材料,并分析刻蚀速率随着反应气体流量、样品室压力和功率的变化规律.

1 实验部分

采用传统的光刻技术,在 GaAs 衬底得到宽度分别为 3, 5, 10, 20, 30 μm 的条纹;然后,利用电子束蒸发的方法蒸发 Ti/Ni 作为刻蚀的掩模,蒸发金属后的样品浸泡在丙酮中剥离即可得到金属条形.为了比较各种不同的刻蚀配方对最终形貌的影响,将样品解离成几个小片分别送进刻蚀系统的样品室中.

样品采用 SLR 770 型 ICP-RIE 系统(美国 PT 公司)进行刻蚀.将射频偏压(13.56 MHz)和感应线圈(2 MHz,功率为 0~1 000 W)通过上面的电极线圈提供给样品室,并通过反馈控制节流阀来保持恒定.刻蚀气体通过一套流速控制精度优于 0.1 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的质量流量控制器(MFCs)引入到样品室中,刻蚀台面和刻蚀速率由剖面图来表征.剖面图采用 S4800 型扫描电子显微镜(日本 Hitachi 公司)来观测,三维表面的表面形貌和粗糙度采用 D3000 型原子力显微镜(美国 DI 公司)进行测量.

2 结果和讨论

2.1 刻蚀速率随气体流量的变化规律

当保持其他参数(SiCl_4 的流量($Q(\text{SiCl}_4)$)为 2 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, Ar 的流量($Q(\text{Ar})$)为 3 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 样品室压力为 0.133 Pa, RF1 的功率为 120 W 和 RF2 的功率为 500 W,下同)不变时,考察 GaAs 材料的刻蚀速率(v)随 H_2 流量($Q(\text{H}_2)$)的变化,结果如图 1 所示.

收稿日期: 2012-04-05

通信作者: 王加贤(1954-),男,教授,主要从事激光技术与固体激光器件的研究. E-mail: wangjx@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J1277); 华侨大学高层次人才启动基金资助项目(07170406)

当样品室没有 H_2 , 刻蚀速率为 $380 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 样品室中对应台面的扫描电子图, 如图 2(a) 所示. 由图 2(a) 可知: 其表面粗糙且台面呈现梯形. 调整 Ar 的流量可以细微地改善台面形状, 但是侧壁和表面粗糙度并没有得到改善. 当 H_2 的流量增加到 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 样品室中对应台面的扫描电子图, 如图 2(b) 所示. 由图 2(b) 可知: 侧壁和刻蚀表面变光滑, 但台面垂直度并没有得到明显的改善, 因此有必要对刻蚀参数做进一步优化.

当样品室通入 H_2 气体时, 除了正常的化学反应外, SiCl_4 和 H_2 还进行反应, 所产生的硅纳米晶体防止进一步的刻蚀, 是一种有效的钝化处理的方法^[4-6]. 同时, 由于部分 SiCl_4 参与 H_2 反应, 导致与 GaAs 反应的 SiCl_4 数量减少, 故刻蚀速率下降. 由图 1 还可知: 随着 H_2 浓度的增加刻蚀速率减小, 因此 SiCl_4 的消耗数量

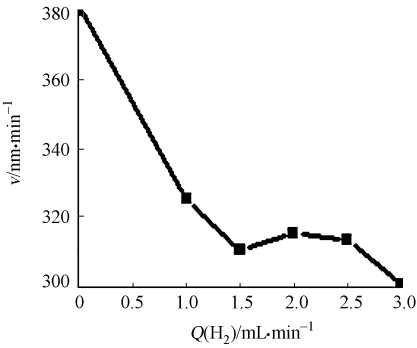
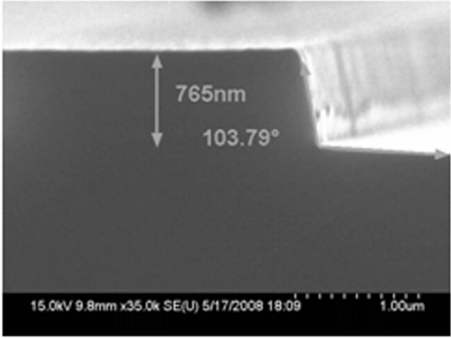
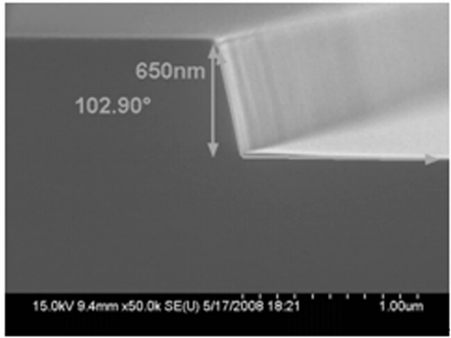


图 1 刻蚀速率随着 H_2 流量的变化
Fig. 1 GaAs etching rate as a function of H_2 flow



(a) 无 H_2

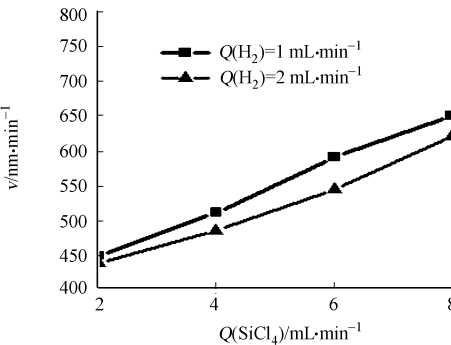


(b) 有 H_2

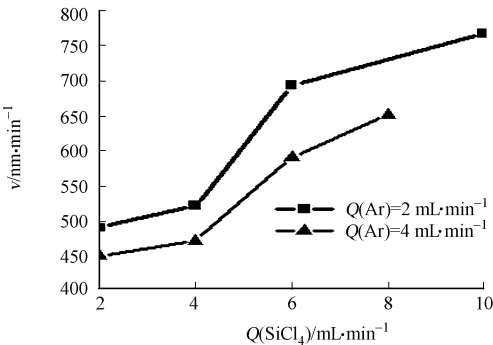
图 2 样品室中对应台面的扫描电子图

Fig. 2 SEM pictures of the mesa with and without H_2 flow in the chamber with sample chamber H_2 concentration.

刻蚀速率(v)随 SiCl_4 流量($Q(\text{SiCl}_4)$)的变化, 如图 3 所示. 由图 3 可知: GaAs 的刻蚀速率随着 SiCl_4 流量的增加而增大, 当 SiCl_4 流量不变时, 随着 H_2 或 Ar 流量的增加刻蚀速率下降.



(a) 不同 H_2 流量



(b) 不同 Ar 流量

图 3 GaAs 刻蚀速率随着 SiCl_4 流量的变化规律

Fig. 3 GaAs etching rate as function of SiCl_4 flow with various

比较图 3 和图 1 可知: Ar 作为缓冲气体, 虽然可以减小化学刻蚀, 但却增加了等离子体物理轰击刻蚀. 化学性刻蚀趋于产生梯形形状台面, 但是其侧壁比较光滑, 而且受到的损伤较少; 而物理刻蚀更加容易获得接近垂直的台面, 但其侧壁粗糙度较大, 且受到的损伤较大. 因此, 为了得到光滑而又垂直的侧壁, 可以通过改变缓冲气体 Ar 流量, 使化学刻蚀和物理刻蚀达到平衡状态.

2.2 刻蚀速率随样品室压力的变化

刻蚀速率随着样品室的压力(p)变化规律, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 当样品室压力等于 0.133 Pa 的时候, 刻蚀速率低于 $350 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$; 当样品室的压力上升到 1.067 Pa 的时候, 刻蚀速率增加到 1.1

$\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$; 如果继续提高样品室压力, 意味着在样品室中有更多的刻蚀气体, 导致刻蚀速率继续上升.

上述的分析表明, 在样品室中反应速度受到压力的限制^[7]. 当样品室压力过高, 金属表面和刻蚀表面均变粗糙, 表明在高的样品室压力条件下, GaAs 材料遭到严重的损坏, 同时金属掩膜发生溅射, 将进一步影响半导体材料的表面光滑度^[7]. 综合分析表明: 0.400 Pa 是样品室的最佳压力.

2.3 刻蚀速率随着 RF1 和 RF2 功率的变化

RF1 是 Chuck RF 功率, 与 RIE 系统中的 RF 功率相类似, 决定了样品室中等离子体的能量. RF2 是 ICP 功率, 在样品室中, 它决定了离子密度^[8]. 为了保持等离子体的稳定, 在不同 RF2 的功率下, 考察刻蚀速率随着 RF1 功率的变化, 结果如图 5 所示. 由图 5 可知: RF 功率也会影响 GaAs 材料的刻蚀速率; 随着 RF1 或 RF2 功率的增加, 刻蚀速率增大. 因为离子能量越高, 化学刻蚀反应更加容易发生, 所以随着 RF1 功率的增大, 刻蚀速率上升. 此外, 随着 RF2 功率的增大, 刻蚀速率也会上升. 这是由于 RF2 功率增大可以使表面等离子体的能量和密度增大.

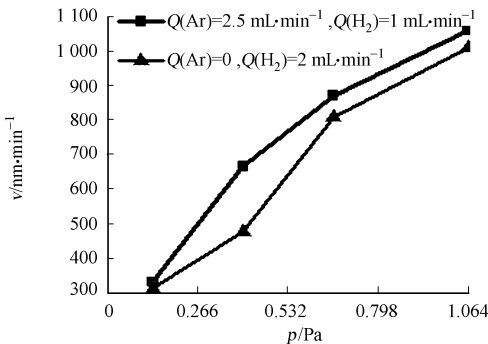


图 4 刻蚀速率随着样品室压力的变化

Fig. 4 Etching rate of GaAs as function of chamber pressure

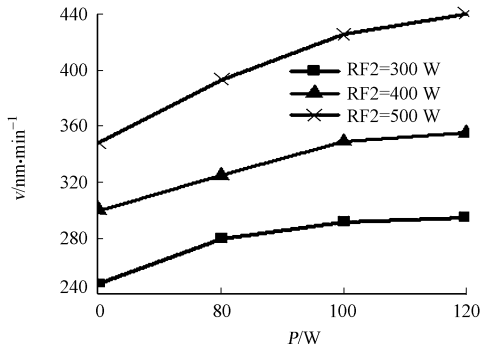


图 5 刻蚀速率随着 RF 功率的变化

Fig. 5 RF power as function of etching rate

和其他参数一样, RF1 和 RF2 功率同样也会影响刻蚀形状, 但是相比较而言, RF1 功率的影响更大, 对直流偏压有很大的影响. 为了得到最小的刻蚀损耗, 应尽可能地取小的 RF1 功率值. 在去除刻蚀掩模板之前, 可以在扫描电子显微镜 (SEM) 上观测到 GaAs 刻蚀台面的图像, 如图 6 所示.

通过分析, 可得到最佳优化参数: SiCl₄ 流量为 2 mL · min⁻¹, Ar 流量为 4 mL · min⁻¹, H₂ 流量为 1 mL · min⁻¹, 样品室压力为 0.400 Pa, RF1 和 RF2 功率分别为 120, 500 W. 此时, 得到的刻蚀速率为 486 nm · min⁻¹. 在该优化参数条件下, 对一个 GaAs 样品刻蚀 10 min 后, 用原子力显微镜 (AFM) 测量其表面形貌, 其三维扫描结果如图 7(a) 所示. 从图 7(a) 可知: 扫描面积为 10 μm × 10 μm 时, 其表面粗糙度为 0.20 nm, 可以与衬底的表面粗糙度相比拟. 相应的, 图 7(b) 为衬底的 AFM 形貌图, 扫描面积为 10 μm × 10 μm, 其表面粗糙度为 0.30 nm. 在所掌握的文献范围内, 当刻蚀深度超过 5 μm 时, 本实验所表面粗糙度是目前利用干法刻蚀 GaAs 表面的最低值.

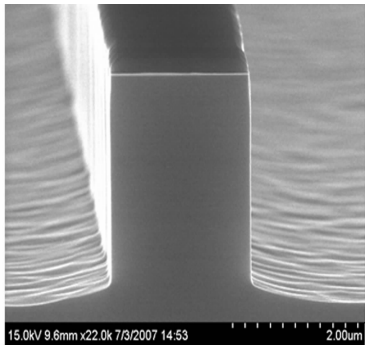
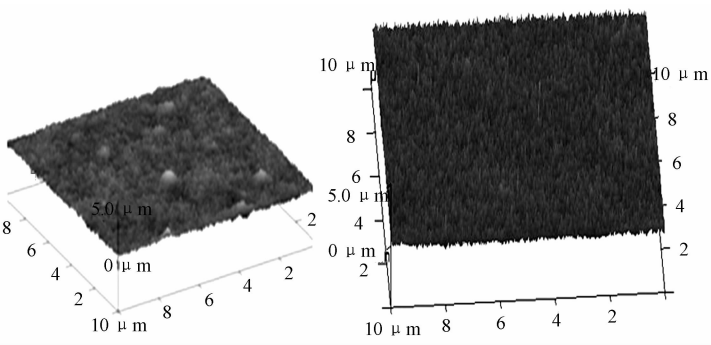


图 6 GaAs 刻蚀台面的扫描电子图
Fig. 6 SEM picture of the etched mesa of GaAs



(a) 无衬底 (b) 衬底
图 7 利用优化配方刻蚀 GaAs 10 min 后的三维表面形貌图
Fig. 7 Morphology of the GaAs surface after 10 minutes etching with optimal parameters

3 结 论

利用 $\text{SiCl}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ 等离子体刻蚀 GaAs 材料, H_2 和 SiCl_4 反应有助于干法刻蚀的钝化处理, 从而使侧壁变得更加光滑. 同时, Ar 作为缓冲气体可以使化学性和物理性刻蚀过程达到平衡状态, 有助于产生垂直侧壁. 将各参数分别优化得到最佳值, 其刻蚀速率为 $486 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$. 利用该配方刻蚀 10 min 后, GaAs 表面粗糙度为 0.2 nm, 可与衬底表面的粗糙度相比拟. 同时, 这个配方适用于含 Ga 的半导体材料的干法刻蚀.

参考文献:

- [1] LEE J W, JUNG P G, DEVRE M, et al. Optimization of gas flow and etch depth uniformity for plasma etching of large area GaAs wafers[J]. Solid-State Electronics, 2002, 46(5): 685-688.
- [2] CHOQUETTE K D, SHUL R J, HOWARD A J, et al. Smooth reactive ion etching of GaAs using a hydrogen plasma pretreatment[J]. Journal of Vacuum and Science and Technology B, 1995, 13(1): 40-42.
- [3] ROMMEL S L, JANG J H, LU W, et al. Effect of H_2 on the etch profile of InP/InGaAsP alloys in $\text{Cl}_2/\text{Ar}/\text{H}_2$ inductively coupled plasma reactive ion etching chemistries for photonic device fabrication[J]. Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2002, 20(4): 1327-1330.
- [4] BERG E W, PANG S W. Electrical and optical characteristics of etch induced damage in InGaAs[J]. Journal of Vacuum Science and Technology B, 1999, 17(6): 2745-2749.
- [5] BOUCHOULE S, PATRIARCHE G, GUILLET S, et al. Sidewall passivation assisted by a silicon coverplate during $\text{Cl}_2\text{-H}_2$ and HBr inductively coupled plasma etching of InP for photonic devices[J]. Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2008, 26(2): 666-674.
- [6] LEE K H, GUIKET S, SAGNES I, et al. Reduced features two-dimensional photonic crystals on InP-based materials etched using $\text{Cl}/\text{sub}2/\text{Ar}$ inductively coupled plasma[J]. IPRM, 2007, 1(1): 222-225.
- [7] NAMAM P S, FERRERIA L M, LEE T Y. Study of grass formation in GaAs backside via etching using inductively coupled plasma system[J]. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2000, 18(6): 2780-2784.
- [8] LEE J W, DEVRE M W, REELFS B H, et al. Advanced selective dry etching of GaAs/AlGaAs in high density inductively coupled plasmas[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 2000, 18(4): 1220-1224.

ICP Dry Etching GaAs Materials by Using $\text{SiCl}_4/\text{Ar}/\text{H}_2$ Gases

LYU Xiao-min, QIU Wei-bin, WANG Jia-xian

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Inductively coupled dry etching of GaAs materials with $\text{SiCl}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ gases. The effect of etching rate as function of gas flows, chamber pressure, source power RF1 and RF2 was investigated. The results show that the best optimization parameters are SiCl_4 flow at $2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, Ar flow at $4 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, H_2 flow at $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, chamber pressure at 0.400 Pa, RF1 at 120 W and RF2 at 500 W. In this condition, vertical mesas with ultra smooth surfaces were obtained with an etching rate of $468 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$. An large area smooth surface with surface roughness of 0.20 nm was achieved after 10 minutes etching with optimal parameters.

Keywords: GaAs; plasma etching; inductively coupled plasma; SiCl_4 ; smooth surface

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)