

## 基于扫描聚焦 XPS 技术的 InGaAs 表面清洁研究

荣敏敏<sup>1</sup>, 张益军<sup>1\*</sup>, 李诗曼<sup>1</sup>, 焦岗成<sup>2</sup>, 刘伟鑫<sup>3</sup>, 王自衡<sup>1</sup>, 舒昭鑫<sup>1</sup>, 钱芸生<sup>1</sup><sup>1</sup>南京理工大学工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;<sup>2</sup>微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065;<sup>3</sup>上海航天技术研究院 808 所, 上海 201109

**摘要** 为了获得清洁度更高的 InGaAs 材料表面, 利用氢氟酸溶液、盐酸与水的混合溶液、盐酸与异丙醇的混合溶液, 研究了化学清洗方法对材料表面碳污染物和氧化物的去除效果, 并在此基础上提出了一种与紫外臭氧清洗相结合的方法。利用扫描聚焦 X 射线光电子能谱技术, 对不同方法清洗后的 InGaAs 样品表面进行分析, 基于样品表面产生的二次电子图像, 对表面进行了微区特征分析, 精准检测了表面化学成分和表面被腐蚀程度。分析发现, 基于氢氟酸溶液的刻蚀会严重腐蚀样品表面, 破坏表面结构和成分, 而结合了紫外臭氧清洗的基于盐酸和异丙醇混合溶液的刻蚀对样品表面具有更好的清洁效果, 能够更好地去除表面的碳污染物和氧化物。

**关键词** 材料; InGaAs 材料; 扫描聚焦 X 射线; 表面污染; 化学清洗

中图分类号 TN223

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0516004

## InGaAs Surface Cleaning Based on Scanning Focused XPS Technique

Rong Minmin<sup>1</sup>, Zhang Yijun<sup>1\*</sup>, Li Shiman<sup>1</sup>, Jiao Gangcheng<sup>2</sup>, Liu Weixin<sup>3</sup>,  
Wang Ziheng<sup>1</sup>, Shu Zhaoxin<sup>1</sup>, Qian Yunsheng<sup>1</sup><sup>1</sup> School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,  
Nanjing, Jiangsu 210094, China;<sup>2</sup> Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710065, China;<sup>3</sup> No. 808 Institute, Shanghai Academy of Spacecraft Technology, Shanghai 201109, China

**Abstract** To obtain a cleaner InGaAs material surface, the effects of chemical cleaning methods on the removal of InGaAs surface carbon contaminations and oxides are investigated using the hydrofluoric acid solution, the mixed solution of hydrochloric acid and deionized water, and the mixed solution of hydrochloric acid and isopropanol. On this basis, a method combined with ultraviolet-ozone cleaning is proposed. The InGaAs surfaces cleaned by different methods are analyzed using scanning focused X-ray photoelectron spectroscopy. Moreover, the micro-area characteristics of the surface are obtained with the aid of the secondary electron image produced on the sample surface, and the surface chemical element composition and surface corrosion degree are accurately detected. The analysis discloses that the hydrofluoric acid etching seriously corrodes the sample surface and destroys the surface structure and compositions, in contrast, the etching based on the mixed solution of hydrochloric acid and isopropanol etching combined with ultraviolet-ozone cleaning shows a better cleaning effect and can more effectively remove the surface carbon contaminations and oxides.

**Key words** materials; InGaAs material; scanning focused X-ray; surface contamination; chemical cleaning

**OCIS codes** 160.2100; 300.6560; 230.0250

收稿日期: 2020-09-03; 修回日期: 2020-10-15; 录用日期: 2020-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(61771245, 61301023)、微光夜视技术重点实验室基金(J20200102)

\* E-mail: zhangyijun423@126.com

## 1 引言

InGaAs 是一种重要的三元 III-V 族半导体材料,在应变量子阱激光器、短波红外焦平面探测器、单光子探测器、光伏电池等领域具有广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。洁净的 InGaAs 表面经过适当的激活工艺可以形成负电子亲和势(NEA)。NEA InGaAs 光电阴极材料具有近红外光谱响应范围可调、暗电流低、电子发射能量集中等优异性能,对于研制近红外微光夜视器件、单光子探测成像器件等具有重要的意义<sup>[6-8]</sup>。基于外延技术生长的 InGaAs 材料不能在真空环境下实现切割和存储,因此其表面受自然氧化物、水和含碳分子等混合物的污染<sup>[9]</sup>,这严重影响了 InGaAs 材料在器件和系统中的性能,同时也阻碍了 InGaAs 阴极表面有效激活层的形成。因此,为了使 InGaAs 材料在制备器件之前有一个洁净的表面状态,寻找一种能够有效去除 InGaAs 表面污染物的清洁方法显得至关重要。

在清洗过程中,化学蚀刻通常使用的是酸性溶液,其可以与氧化剂或有机溶剂配比融合<sup>[10]</sup>,常用的试剂有 HF 溶液<sup>[11-12]</sup>、HCl 溶液<sup>[13-15]</sup>和 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液<sup>[16-17]</sup>。本文使用几种常用的湿化学清洗方法,通过结合紫外臭氧清洗技术<sup>[18-19]</sup>,综合对比了不同方法对 InGaAs 表面的清洁效果和对表面的腐蚀程度,选取了最优清洗工艺,将其应用于 InGaAs 表面的清洁。现有的半导体表面杂质分析的标准方法有热解析气相色谱法、全反射 X 光荧光光谱测试法和二次离子质谱法等,但这些方法存在只能测量元素种类和含量的局限性,其中热解析气相色谱法和二次离子质谱法属于破坏性测试方法。本文采用非破坏性的 X 射线光电子能谱技术(XPS),该技术不仅能够检测 InGaAs 样品表面的元素种类和含量,还能够通过识别特征谱峰结合能的位置来表征 InGaAs 表面的各种元素化学态,进而利用分峰拟合处理 XPS 谱图以确定清洗前、后氧化物的种类和含量的变化情况。此外,本文采取 XPS 的微区成像定位技术,对 InGaAs 表面进行精准定位<sup>[20]</sup>,利用扫描聚焦 X 射线激发样品表面,基于产生的二次电子图像(SXI),分析了表面微区特征,检测了微区的化学元素成分和被腐蚀程度。

## 2 实验

实验采用以 GaAs 作为衬底材料的 InGaAs 外延片,从衬底到表面,In 组分(原子数分数,全文同

在 0~0.2 的区间内呈线性变化。在直径为 2 inch (1 inch=2.54 cm)、厚度为 300 μm 的单晶圆片上取 4 个尺寸为 11 mm×11 mm 的样品,分别记为样品 1、样品 2、样品 3 和样品 4。样品 1、2、3 均先进行脱脂清洗,再在超声波清洗器中,依次使用四氯化碳、丙酮、无水乙醇和去离子水清洗 5 min,以去除样品表面油脂,然后用三种不同的溶剂对三个样品分别进行化学刻蚀。采用质量分数为 40% 的 HF 溶液对样品 1 刻蚀 10 min,采用 HCl 和 H<sub>2</sub>O(体积比例为 1:3)的混合溶液对样品 2 刻蚀 10 min,采用 HCl 和异丙醇(IPA)(体积比例为 1:10)的混合溶液对样品 3 刻蚀 10 min。对样品 4 先进行紫外臭氧清洗,然后进行脱脂清洗,最后使用 HCl 和 IPA(体积比例为 1:10)的混合溶液刻蚀 10 min。四个样品清洗完成后,均用去离子水反复冲洗样品表面,以确保表面没有化学溶液残余,最后用氮气干燥样品后送入 XPS 分析系统。利用扫描聚焦 X 射线光电子能谱技术激发化学清洗后的样品表面,基于产生的 SXI,选取分析区域,对表面化学组成和含量进行微区分析检测。XPS 分析系统为 ULVAC-PHI 公司生产的 PHI5000 VersaProbe II,采用单色铝靶(Al-Kα)扫描聚焦 X 射线源(能量为 1486.6 eV)激发电子,X 射线的束斑直径在 10~400 μm 范围内连续可调。本文采用束斑直径为 50 μm 的 X 射线进行微区分析,窄扫描通过能为 58.7 eV,能量步长为 0.125 eV,本底真空度优于 1×10<sup>-7</sup> Pa。以样品表面碳污染的 C1s 峰为标准,校准其余所有光谱 C1s 峰的结合能为 284.8 eV。

## 3 分析与讨论

### 3.1 HF 溶液腐蚀样品分析

样品 1 经化学清洗后被送入 XPS 分析系统,利用扫描聚焦式单色化 X 射线对样品进行微区选点分析。首先利用 X 射线激发样品产生 SXI,如图 1(a)所示。能够明显看出,样品 1 的表面有不规则的斑块,初步判定其为 HF 溶液腐蚀留下的腐蚀坑。为了进一步确定样品 1 表面是否被 HF 溶液腐蚀,在 SXI 上的斑块区域选取尺寸为 50 μm×50 μm 的微区 1-1,在斑块区域外选取同样尺寸的微区 1-2,用束斑直径为 50 μm 的 X 射线对微区进行扫描分析,Ga2p<sup>3</sup>,As2p<sup>3</sup> 和 In3d 的 XPS 谱图如图 2 所示。可以看出,对于区域 1-1 的元素 Ga、As 和 In,其特征谱峰的高度均低于区域 1-2,尤其是元素 In,区域 1-1 的 In 元素含量远远低于区域 1-2。这是由于

HF 溶液腐蚀了样品 1 表面的 InGaAs 层,导致表面的 In 元素含量大大降低。XPS 分析结束后,利用光学显微镜观察样品 1 表面,如图 1(b)所示,可明显看到坑内被腐蚀的现象。可以判定, HF 溶液会腐蚀 InGaAs 表面,破坏了样品表面结构和成分。运

用同样的方法对化学清洗后的样品 2、样品 3 和样品 4 的表面进行 XPS 检测和光学显微镜观察,结果显示,表面均光滑完整,并未出现腐蚀坑现象,说明 HCl 和 H<sub>2</sub>O 的混合溶液以及 HCl 和 IPA 的混合溶液都不会对表面结构和成分产生破坏。

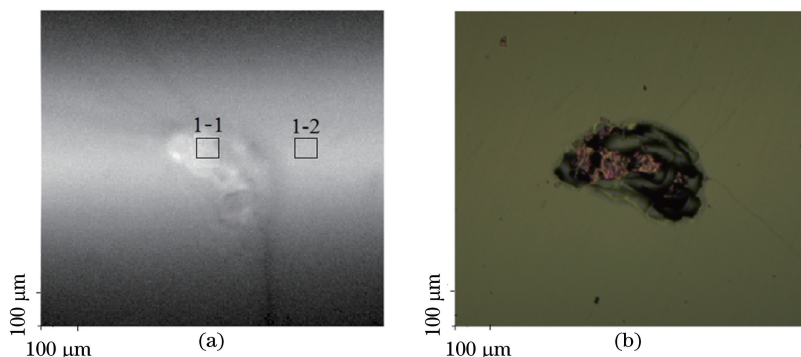


图 1 样品 1 的表面 SXI 和光学显微镜图像。(a) SXI 图像;(b)光学显微镜图像

Fig. 1 Surface SXI and optical microscope images for sample 1. (a) SXI image; (b) optical microscope image

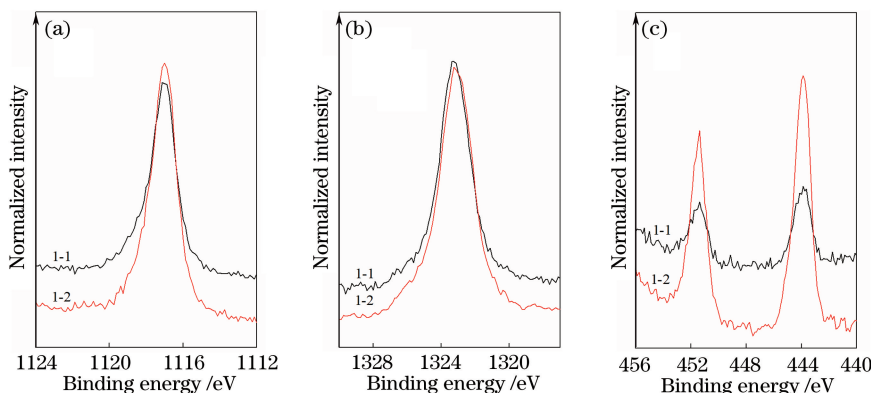


图 2 微区 1-1 和 1-2 的元素 XPS 谱图。(a) Ga2p<sup>3</sup>; (b) As2p<sup>3</sup>; (c) In3d

Fig. 2 XPS spectra of elements in micro-areas 1-1 and 1-2. (a) Ga2p<sup>3</sup>; (b) As2p<sup>3</sup>; (c) In3d

### 3.2 不同化学溶剂清洗效果的对比分析

在未清洗样品、样品 1(未腐蚀区域)、样品 2 和样品 3 表面的 SXI 上选取尺寸为 50 μm×50 μm 的微区,利用 XPS 对样品的元素进行表征,并利用 C1s 的特征谱峰进行标定,利用 Shirley background 和 Lorentzian 线的高斯卷积对 Ga2p<sup>3</sup>、As2p<sup>3</sup> 以及 In3d<sup>5</sup> 进行分峰拟合<sup>[10]</sup>。不同样品的 Ga2p<sup>3</sup> 的拟合光谱如图 3 所示。由图 3 可以看出, Ga2p<sup>3</sup> 的 XPS 谱中存在 InGaAs 和 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 两种结合态,其结合能分别为 1116.8 eV 和 1118.3 eV<sup>[21]</sup>,结合能的偏差

为±0.1 eV。从图 3 中能够清楚地看出,未清洗的样品表面有较多的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,清洗后的样品 1、样品 2 和样品 3 的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量都有不同程度的减少,具体含量如表 1 所示。样品 1 和样品 3 中 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量(摩尔分数,全文同)分别为 2.18%和 2.34%,样品 2 中 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量最高,为 4.24%。可见, HF 溶液及 HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀对表面 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的去除效果大致相同,而 HCl 和 H<sub>2</sub>O 的混合溶液刻蚀对表面 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的去除效果在三种方法中是最差的。

表 1 不同样品微区表面元素的 XPS 拟合峰的占比

Table 1 XPS fitted peak ratios of surface micro-area elements for different samples

unit: %

Sample	C1s	O1	Ga-InAs	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As-InGa	As	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	In-GaAs	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Uncleaned sample	33.05	40.16	7.72	5.58	1.62	1.12	5.04	3.08	2.64
Sample 1	28.31	19.99	18.69	2.18	12.02	10.58	0.70	6.06	1.47
Sample 2	28.12	21.20	19.08	4.24	13.11	5.90	0.87	5.73	1.75
Sample 3	28.77	10.32	22.18	2.34	15.55	11.48	0.34	8.28	0.74

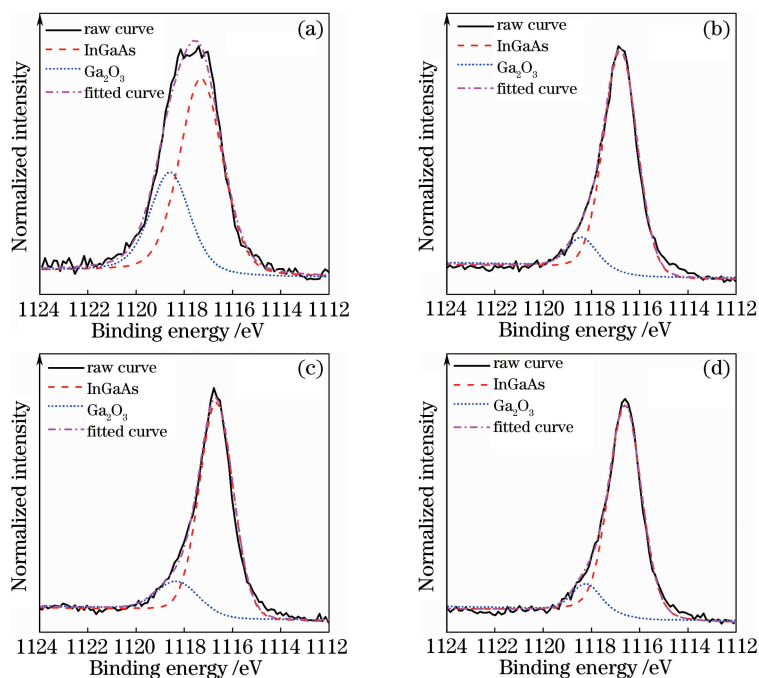


图 3 不同样品  $Ga2p^3$  的 XPS 拟合光谱。(a) 未清洗的样品; (b) 样品 1; (c) 样品 2; (d) 样品 3  
 Fig. 3 XPS fitted spectra of  $Ga2p^3$  for different samples. (a) Uncleaned sample; (b) sample 1; (c) sample 2; (d) sample 3

图 4 所示为不同样品的  $As2p^3$  的拟合光谱。结果表明,  $As2p^3$  的 XPS 谱中存在三种结合态 ( $As_2O_3$ 、InGaAs 和单质 As), 结合能最高位置的谱

峰特征与  $As_2O_3$  的特征吻合, 结合能为 1325.9 eV, InGaAs 和单质 As 的结合能分别为 1322.8 eV 和 1323.5 eV。由图 4 可明显地看出, 样品 3 中  $As_2O_3$

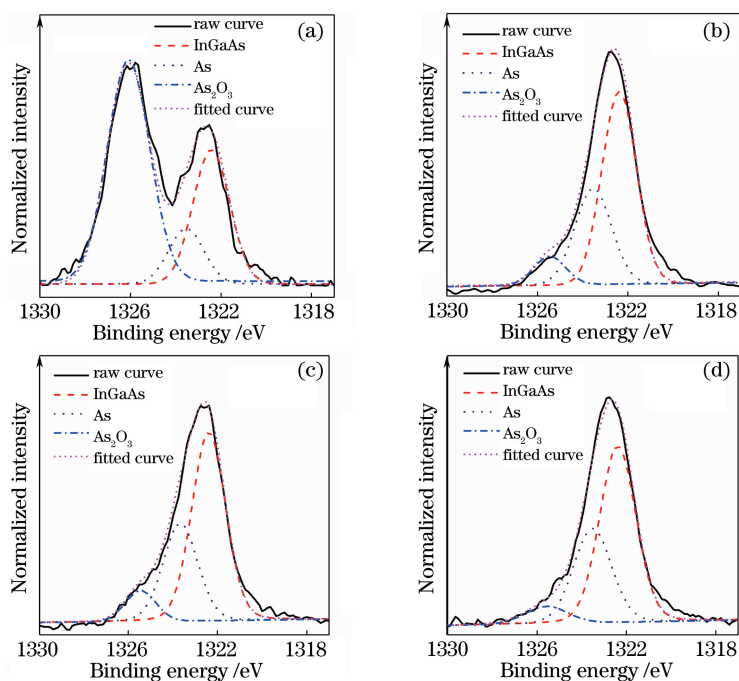


图 4 不同样品  $As2p^3$  的 XPS 拟合光谱。(a) 未清洗的样品; (b) 样品 1; (c) 样品 2; (d) 样品 3  
 Fig. 4 XPS fitted spectra of  $As2p^3$  for different samples. (a) Uncleaned sample; (b) sample 1; (c) sample 2; (d) sample 3

的含量最低,为 0.34%,样品 1 和样品 2 中  $As_2O_3$  的含量分别为 0.70% 和 0.87%,均高于样品 3。可见,HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀对  $As_2O_3$  具有很好的去除效果,而且清洗后样品 3 表面  $As_2p^3$  中 InGaAs 的含量和单质 As 的含量均远远高于样品 1 和样品 2。

图 5 给出了不同样品的 In3d 的拟合光谱,其中高结合能位置 451.5eV 处的谱峰为  $In_3d^5$  的谱峰。

结果表明, $In_3d^5$  的 XPS 谱中存在 InGaAs 和  $In_2O_3$  两种结合态,其结合能分别为 443.7 eV 和 444.9 eV<sup>[21]</sup>。由图 5 可以清楚地看出,化学清洗能够有效地去除样品表面的  $In_2O_3$ 。样品 1 和样品 2 中  $In_2O_3$  的含量分别为 1.47% 和 1.75%,样品 3 中  $In_2O_3$  的含量最低,为 0.74%。可见,HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀对  $In_2O_3$  的去除效果好于 HF 溶液及 HCl 和  $H_2O$  的混合溶液刻蚀。

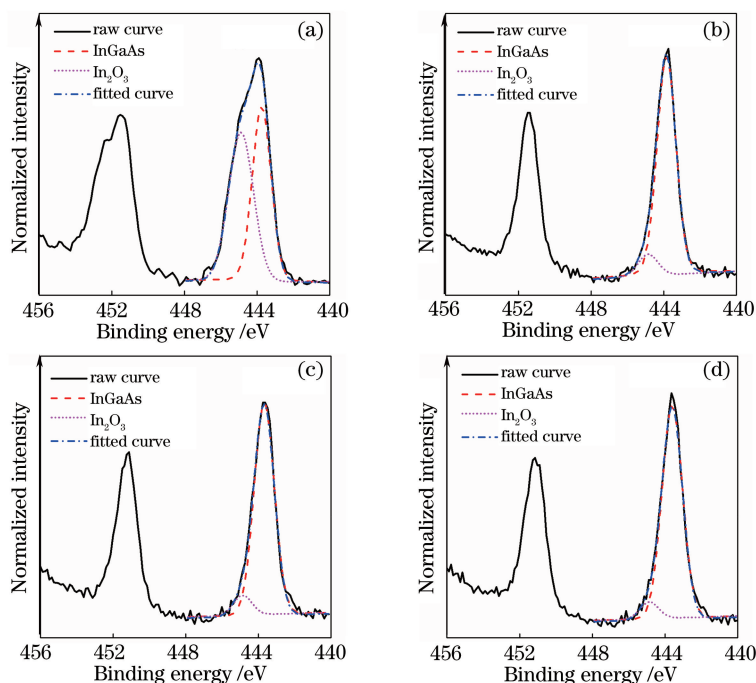


图 5 不同样品 In3d 的 XPS 拟合光谱。(a)未清洗的样品;(b)样品 1;(c)样品 2;(d)样品 3

Fig. 5 XPS fitted spectra of In3d for different samples. (a) Uncleaned sample; (b) sample 1; (c) sample 2; (d) sample 3

图 6 给出了不同样品 C1s 和 O1s 的 XPS 光谱变化。在清洗前,样品表面含有较高比例的 C 和 O。如图 6(a)所示,在化学清洗后,样品 1、2、3 表面的 C 含量(摩尔分数,全文同)均有很大程度的下

降,但表面的 C 含量仍然较高,分别为 28.31%、28.12%和 28.77%,这并不能满足人们对化学清洗效果的要求。如图 6(b)所示,化学清洗对氧化物杂质的去除效果较为明显,清洗后样品 1 和样品 2 的

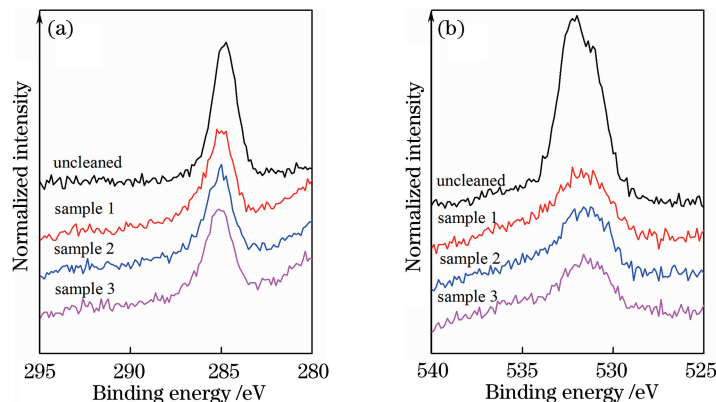


图 6 不同样品 C1s 和 O1s 的 XPS 光谱。(a) C1s;(b) O1s

Fig. 6 XPS spectra of C1s and O1s for different samples. (a) C1s; (b) O1s

O1s 含量(摩尔分数,全文同)分别为 19.99% 和 21.20%,样品 3 表面的 O1s 含量(10.32%)远低于样品 1 和样品 2,可见 HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀能够较好地去除样品表面的氧化物。

### 3.3 紫外臭氧清洗效果的分析

由前面的分析可以知道,HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀对 InGaAs 样品表面天然氧化物的去除能力较强,但这种清洗方法对表面碳污染物的去除效果并不令人满意。因此,本文在常用的化学清洗方法中加入了紫外臭氧清洗,此为样品 4 的清洗方法。图 7 给出了不同清洗步骤后样品 4 和样品 3 表面 C1s、O1s 的 XPS 光谱。由图 7(a)可明显看出,臭氧

清洗后样品表面的 C 含量大大减少,具体含量如表 2 所示,C 含量由清洗前的 33.05%降低为 7.10%。虽然臭氧清洗后样品表面的 O 含量增幅很大,但后续的脱脂清洗和溶剂刻蚀会去除表面的氧化物,最终得到一个较为洁净的表面。所有清洗步骤完成后,样品 3 表面的 C1s 和 O1s 的含量分别为 28.77%和 10.32%,样品 4 表面的 C1s 和 O1s 的含量分别为 15.91%和 8.78%,样品 3 表面的 As 含量为 11.48%,样品 4 表面的 As 含量为 18.85%。显而易见,加入紫外臭氧清洗后,HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀对 InGaAs 表面的碳污染物和氧化物的去除效果均大大增强。

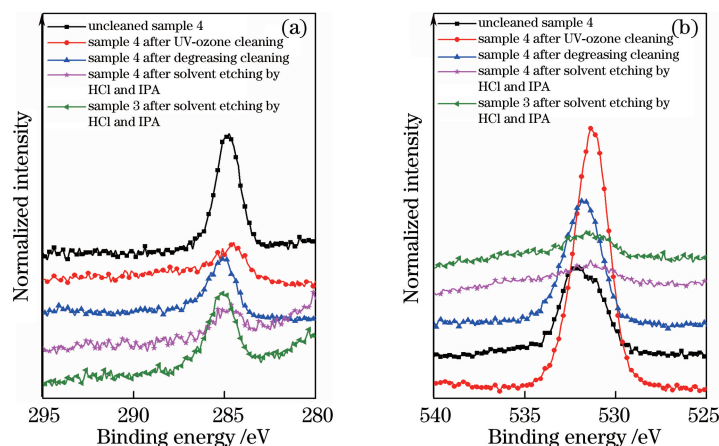


图 7 不同清洗步骤后不同样品 C1s 和 O1s 的 XPS 光谱。(a) C1s;(b) O1s

Fig. 7 XPS spectra of C1s and O1s for different sample after different cleaning steps. (a) C1s; (b) O1s

表 2 不同清洗步骤后不同样品微区表面元素的 XPS 拟合峰的占比

Table 2 XPS fitted peak ratios of surface micro-area elements for different samples after different cleaning steps

Sample	C1s	O1s	Ga-InAs	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As-InGa	As	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	In-GaAs	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Uncleaned sample 4	33.05	40.16	7.72	5.58	1.62	1.12	5.04	0	3.08	2.64
Sample 4 after UV-ozone cleaning	7.10	62.94	2.25	11.70	0.31	4.76	4.84	1.79	0.60	3.72
Sample 4 after degreasing cleaning	21.93	49.58	4.89	12.70	0.62	1.43	3.50	0	1.03	4.34
Sample 4 after solvent etching by HCl and IPA	15.91	8.78	26.17	1.41	21.09	18.85	0.28	0	7.20	0.31
Sample 3 after solvent etching by HCl and IPA	28.77	10.32	22.18	2.34	15.55	11.48	0.34	0	8.28	0.74

unit: %

图 8~10 给出了不同清洗步骤后样品 4 的 Ga2p<sup>3</sup>、As2p<sup>3</sup> 和 In3d 的拟合光谱曲线。由图 9 可以看出,在紫外臭氧清洗后,产生了新的 As 氧化物

As<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>[22]</sup>,可通过脱脂清洗以及 HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀去除该氧化物,最终产生碳污染物和氧化物较少且富砷的表面。

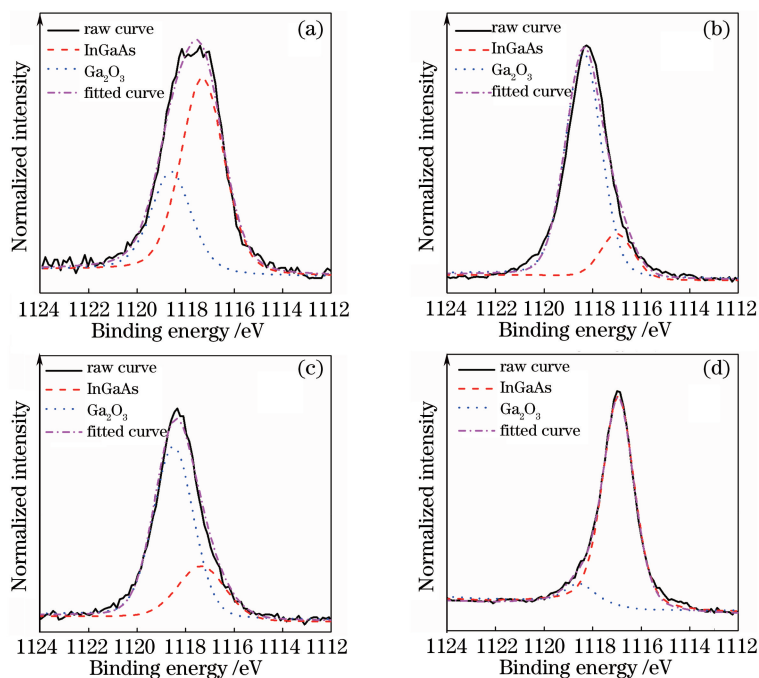


图 8 不同清洗步骤后样品 4 的  $Ga2p^3$  的 XPS 拟合光谱。(a)未清洗;(b)臭氧清洗;  
(c)脱脂清洗;(d) HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀

Fig. 8 XPS fitted spectra of  $Ga2p^3$  for sample 4 after different cleaning steps. (a) Uncleaning;  
(b) UV-ozone cleaning; (c) degreasing cleaning; (d) etching based on HCl and IPA mixed solution

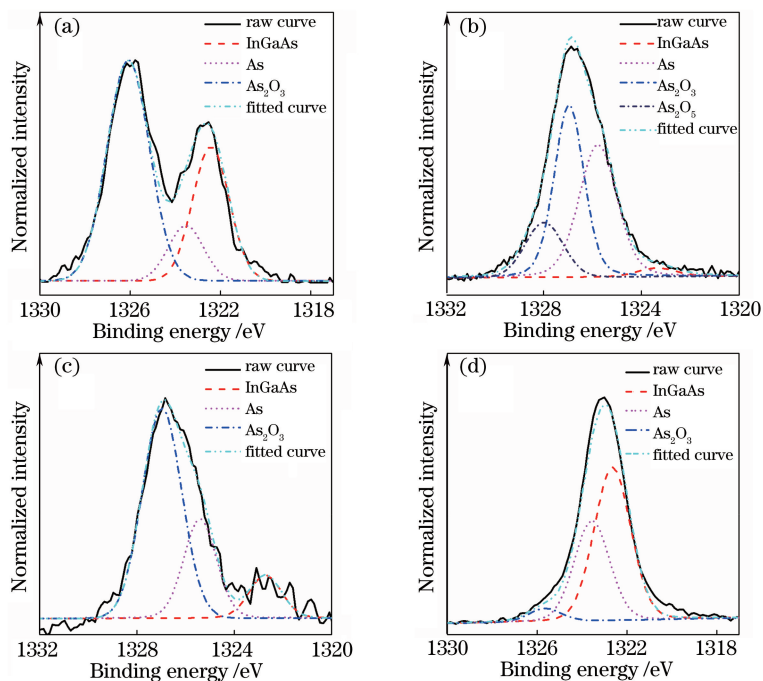


图 9 不同清洗步骤后样品 4 的  $As2p^3$  的 XPS 拟合光谱。(a)未清洗;(b)臭氧清洗;  
(c)脱脂清洗;(d) HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀

Fig. 9 XPS fitted spectra of  $As2p^3$  for sample 4 after different cleaning steps. (a) Uncleaning;  
(b) UV-ozone cleaning; (c) degreasing cleaning; (d) etching based on HCl and IPA mixed solution

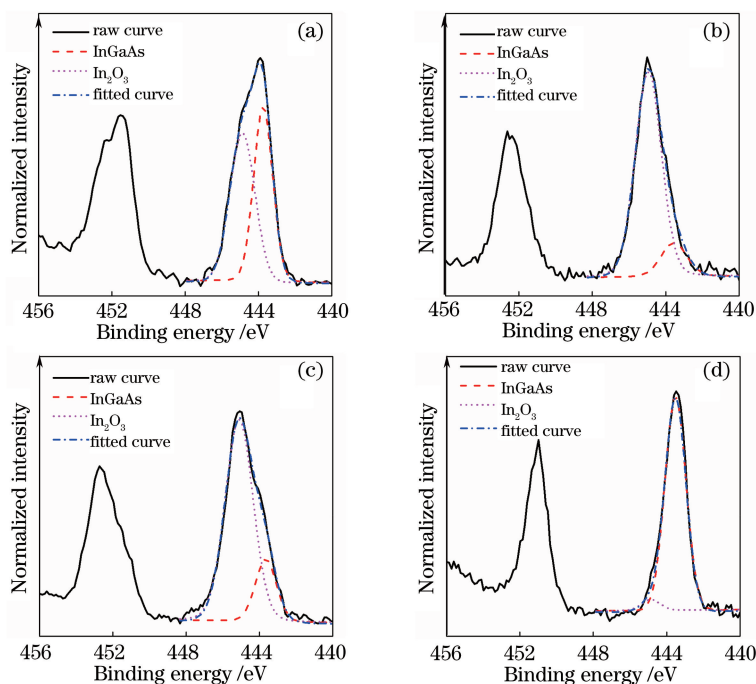


图 10 不同清洗步骤后样品 4 的 In3d 的 XPS 拟合光谱。(a) 未清洗;(b) 臭氧清洗;  
(c) 脱脂清洗;(d) HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀

Fig. 10 XPS fitted spectra of In3d for sample 4 after different cleaning steps. (a) Uncleaning; (b) UV-ozone cleaning; (c) degreasing cleaning; (d) etching based on HCl and IPA mixed solution

## 4 结 论

提出了一种紫外臭氧清洗和化学溶液刻蚀相结合的 InGaAs 材料表面清洗方法。通过扫描聚焦 XPS 激发样品产生二次电子像,并在二次电子像上选取微区以分析 InGaAs 表面的元素组成和含量变化,发现 HF 溶液刻蚀会严重腐蚀 InGaAs 表面层,对表面结构和成分造成破坏,不能用来清洗 InGaAs 样品。利用 XPS 对比了 HF 溶液、HCl 和 H<sub>2</sub>O 的混合溶液以及 HCl 和 IPA 的混合溶液对 InGaAs 表面的清洁效果,发现 HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀能够有效去除样品表面的氧化物,但对表面碳污染物的去除效果不够好。因此,在 HCl 和 IPA 混合溶液刻蚀的基础上,加入了紫外臭氧清洗。分析发现,依次进行紫外臭氧清洗、脱脂清洗及 HCl 和 IPA 的混合溶液刻蚀,可有效去除 InGaAs 表面的碳污染物和天然氧化物,得到高清洁度的 InGaAs 表面。采用扫描聚焦 X 射线光电子能谱技术并结合微区分析,能更加精确地检测 InGaAs 表面的化学元素组成和含量,进而为阴极制备和器件应用中的 InGaAs 材料提供优越的表面状态。

### 参 考 文 献

- [1] Bernal-Correa R, Morales-Acevedo A, Pulzara Mora Á, et al. Design of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs/In<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As triple junction solar cells with anti-reflective coating [J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, 37: 57-61.
- [2] Li G J, Lu J, Wang C M, et al. Simulation of laser irradiation of one-dimensional In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As solar cells [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 101601.  
李广济, 陆健, 王程民, 等. 一维 In<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 太阳能电池的激光辐照模拟 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 101601.
- [3] Tang Y, Cao C F, Zhao X Y, et al. Laser single-mode characteristics of InGaAs/GaAs/InGaP quantum well lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(13): 131402.  
汤瑜, 曹春芳, 赵旭熠, 等. InGaAs/GaAs/InGaP 量子阱激光器的激光单模特性研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(13): 131402.
- [4] Li X, Gong H M, Tang H J, et al. 1024 × 1 elements near-infrared InGaAs linear focal plane arrays assembly [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(s1): s100305.  
李雪, 龚海梅, 唐恒敬, 等. 1024 × 1 元近红外 InGaAs 线列焦平面组件 [J]. *光学学报*, 2011, 31(s1): s100305.
- [5] Ding Y X, Li Y F, Liu H B, et al. Photon counting experiment based on InGaAs detector in daylight [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1104003.



- 丁宇星, 李永富, 刘鸿彬, 等. 基于 InGaAs 探测器的日光条件光子计数实验[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 1104003.
- [6] Zhang Y J, Niu J, Zhao J, et al. Influence of exponential-doping structure on photoemission capability of transmission-mode GaAs photocathodes[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(9): 093108.
- [7] Jin M C. Study of preparation and performance for near-infrared InGaAs photocathode[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 6-11.  
金睦淳. 近红外 InGaAs 光电阴极的制备与性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 6-11.
- [8] Wang W P, Ma J Y. Material and fabrication process of near infrared response III-V compound semiconductor photocathode[J]. Optoelectronic Technology, 2013, 33(3): 194-197, 207.  
王旺平, 马建一. 近红外响应的 III-V 族半导体光电阴极材料及工艺[J]. 光电子技术, 2013, 33(3): 194-197, 207.
- [9] Jin M C, Zhang Y J, Chen X L, et al. Effect of surface cleaning on spectral response for InGaAs photocathodes[J]. Applied Optics, 2015, 54(36): 10630-10635.
- [10] Feng C, Zhang Y J, Liu J, et al. Optimized chemical cleaning procedure for enhancing photoemission from GaAs photocathode[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2019, 91: 41-46.
- [11] Fang C W, Zhang Y J, Rong M M, et al. Micro-area analysis of surface contaminations of GaAs photocathode in preparation process[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(9): 0925001.  
方城伟, 张益军, 荣敏敏, 等. GaAs 光电阴极制备工艺中表面污染的微区分析[J]. 光子学报, 2019, 48(9): 0925001.
- [12] Guo J, Yang M Z, Zhao J, et al. Research on residual gas adsorption on surface of InGaAs photocathode[J]. Optik, 2019, 179: 941-947.
- [13] Tereshchenko O E, Paget D, Rowe A C H, et al. Clean reconstructed InAs(111) A and B surfaces using chemical treatments and annealing[J]. Surface Science, 2009, 603(3): 518-522.
- [14] Yoon S H, Kato K, Yokoyama C, et al. Re-examination of effects of sulfur treatment on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/InGaAs metal-oxide-semiconductor interface properties[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 126(18): 184501.
- [15] Chanlek N, Herbert J D, Jones R M, et al. The degradation of quantum efficiency in negative electron affinity GaAs photocathodes under gas exposure[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(5): 055110.
- [16] Sun Y, Pianetta P, Chen P T, et al. Arsenic-dominated chemistry in the acid cleaning of InGaAs and InAlAs surfaces[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(19): 194103.
- [17] Liu Z, Sun Y, Machuca F, et al. Preparation of clean GaAs(100) studied by synchrotron radiation photoemission[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2003, 21(1): 212-218.
- [18] Kohli R. Applications of UV-ozone cleaning technique for removal of surface contaminants[J]. Developments in Surface Contamination and Cleaning: Applications of Cleaning Techniques, 2019, 11: 355-390.
- [19] Lee K N, Donovan S M, Gila B, et al. Surface chemical treatment for the cleaning of AlN and GaN surfaces[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2000, 147(8): 3087-3090.
- [20] Moulder J F. The impact of the scanning XPS microprobe on industrial applications of X-ray photoelectron spectroscopy[J]. Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena, 2019, 231: 43-49.
- [21] Hussey R J, Sproule G I, McCaffrey J P, et al. Characterization of oxides formed on InP, InGaAs, InAlAs, and InGaAs/InAlAs heterostructures at 300-500 °C[J]. Oxidation of Metals, 2002, 57(5/6): 427-447.
- [22] Ghosh S C, Biesinger M C, LaPierre R R, et al. The role of proximity caps during the annealing of UV-ozone oxidized GaAs[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(11): 114321.