

InGaAs 光电阴极制备工艺中的原位光电子能谱

李姗¹, 张益军^{1*}, 荣敏敏¹, 李诗曼¹, 石峰¹, 焦岗成², 王自衡¹, 钱芸生¹¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;²微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065

摘要 为了探索 InGaAs 光电阴极高温净化工艺的最佳加热温度点, 利用超高真空光电阴极制备与表征互联装置开展了不同加热温度点下的高温净化实验和表面铯/氧(Cs/O)激活实验。通过扫描聚焦 X 射线光电子能谱对化学清洗后、高温净化后以及表面激活后的 InGaAs 样品表面进行原位分析, 检测不同温度点下表面杂质的脱附程度和化学元素组成变化。结果表明, 样品表面的碳污染物和氧化物在 625 °C 时都被完全去除, 获得原子级清洁表面, 但此时 In 元素会出现挥发现象, 导致材料表面 In 含量降低, 会使 InGaAs 材料的红外响应特性不明显, 因此 600 °C 被认为是最佳加热温度。结合原位紫外光电子能谱发现二次电子截止边随着温度的升高不断向高结合能的位置偏移, 这表明高温净化能有效降低表面功函数值, 而 Cs/O 激活能进一步降低表面功函数值, 获得负电子亲和势, 提高 InGaAs 光电阴极的近红外光电发射性能。

关键词 材料; InGaAs 光电阴极; 光电子能谱; 高温净化; 铯/氧激活

中图分类号 TN233

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0116001

In-situ Photoelectron Spectroscopy of InGaAs Photocathode in Preparation ProcessLi Shan¹, Zhang Yijun^{1*}, Rong Minmin¹, Li Shiman¹, Shi Feng¹,
Jiao Gangcheng², Wang Ziheng¹, Qian Yunsheng¹¹ School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China;² Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract In order to explore the optimal heating temperature of the InGaAs photocathode, the high-temperature cleaning experiments were carried out at different temperatures by using the ultra-high vacuum interconnection setup for photocathode preparation and characterization, and Cs/O activation experiments were followed. By scanning focused X-ray photoelectron spectroscopy, *in-situ* analysis of InGaAs samples after chemical cleaning, heat cleaning, and surface activation was performed, to detect the desorption of surface impurities and the change of chemical element composition at different temperatures. The results show that the carbon contaminants and oxides are completely removed at 625 °C, resulting in an atomically clean surface. However, the In element is volatilized at this time, which leads to the decrease of In composition and makes the infrared response of InGaAs material unobvious. Therefore, 600 °C is treated as the optimal heating temperature. Combined with *in-situ* ultraviolet photoelectron spectroscopy, it is found that the secondary electron cut-off edge continuously shifts towards higher binding energy as the temperature rises, indicating that high temperature cleaning can effectively reduce the work function. After Cs/O activation, the work function value is further reduced, and the negative electron affinity state is achieved, which improves the near infrared photoemission performance of the InGaAs photocathode.

Key words materials; InGaAs photocathode; photoelectron spectroscopy; high temperature cleaning; Cs/O activation

收稿日期: 2021-05-31; 修回日期: 2021-07-04; 录用日期: 2021-07-13

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)

通信作者: *zhangyijun423@126.com

1 引言

InGaAs 材料由于在近红外波段具有光谱响应范围可调的独特优势,在条纹变像管、短波红外焦平面探测器、单光子探测器、光伏电池、量子阱激光器等器件的研制中具有重要的应用^[1-5]。负电子亲和势光电阴极由于具有量子效率高、暗电流小、电子发射能量集中分布等优点,被广泛用于微光夜视、高能物理和空间遥感等领域^[6-8]。在 InGaAs 光电阴极的制备工艺中,阴极表面需要经过适当的激活,通过降低表面势垒高度来达到负电子亲和势(NEA)状态,而表面的洁净程度是影响阴极激活成功与否的关键^[9]。现阶段,InGaAs 光电阴极表面净化工艺值得继续深入研究。阴极表面净化可以分为化学清洗和高温净化两步^[10]。化学清洗不能完全去除阴极材料表面的自然氧化物和碳污染物,需要通过后续的高温净化工艺使表面残留的碳污染物和氧化物在受热时从表面脱附,获得原子级清洁表面状态^[11-12]。因此,高温净化中温度点的选取显得尤为重要,要求该加热温度点既能使样品表面所有的杂质发生脱附,又要确保此条件下 InGaAs 样品的表面结构和表面元素不被破坏^[13-14]。

本文利用自研的光电阴极制备与表征超高真空互联系统^[15-16],在超高真空环境下对化学清洗后的 InGaAs 样品进行不同加热温度点下的高温净化,以确定最佳高温净化温度后再进行表面 Cs/O 激活^[17-18]。通过扫描聚焦 X 射线光电子能谱技术(XPS)检测 InGaAs 样品表面的化学元素成分和含量,分析对比不同加热温度点下表面的洁净程度和化学态,结合紫外光电子能谱技术(UPS)研究高温净化对样品表面功函数的影响,综合确定最佳高温净化温度。此外,利用 XPS 和 UPS 探索激活前后阴极表面的变化情况,以验证高温净化工艺和 Cs/O 激活工艺提高 InGaAs 光电阴极近红外光电发射性能的效果。

2 实验

自研的光电阴极制备与表征超高真空互联系统主要包括表面分析系统、超高真空激活系统、预处理系统和多信息量在线监测控制系统,能够实现高温净化或者对表面激活的阴极样品在超高真空环境下的原位表面分析,避免样品暴露于大气受到二次污染,从而大大提高了实验的可靠性。实验采用的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 阴极材料是以 GaAs 为衬底,采用金属

有机化学气相沉积外延生长,从衬底到表面 x 呈现 0.05~0.2 的线性变化。本文使用的表面分析系统是由 ULVAC-PHI 公司生产的 PHI5000 VersaProbe II 型 XPS,同时还装配了紫外线光源。XPS 采用的是单色铝靶($\text{Al-K}\alpha$)的扫描聚焦 X 射线源(激发源的能量 $h\nu=1486.6$ eV)。XPS 进行元素谱分析时,通过能设置为 58.7 eV,能量步长设置为 0.125 eV,进行分析时要保证系统本底真空度在 1×10^{-7} Pa 以上,以样品表面污染碳的 $\text{C}1s$ 峰(284.8 eV)为标准,校准其余元素峰的位置。进行 UPS 分析时,采用能量为 21.2 eV 的 HeI 紫外激发源,通过能设置为 1.175 eV,能量步长设置为 0.04 eV。

实验采用 6 个尺寸为 11 mm×11 mm 的 InGaAs 样品,样品均为由直径为 2 inch(1 inch=2.54 cm)、厚度为 350 μm 的单晶圆片切割得到,将其分别记为样品 a、样品 b、样品 c、样品 d、样品 e 和样品 f。对样品 a~f 均先进行紫外臭氧清洗,然后进行脱脂清洗,最后使用体积比为 1:10 的盐酸和异丙醇混合溶液刻蚀 10 min^[19-21]。将化学清洗后的样品送入表面分析系统,进行 XPS 分析,然后通过磁力传输杆将样品送入激活系统腔体,进行高温净化实验。加热程序设置为:从室温上升到 200 $^{\circ}\text{C}$ 用时 5 min,从 200 $^{\circ}\text{C}$ 上升到最高温度点用时 60 min,在最高温度点维持 20 min,从最高温度点降温到 200 $^{\circ}\text{C}$ 用时 40 min,最后待样品温度自然下降至室温。实验中样品 a~f 的最高加热温度点分别设置为 500,525,550,575,600,625 $^{\circ}\text{C}$ 。待每个样品冷却至室温后,均进行 XPS 和 UPS 分析。通过对比表面分析结果,确定 InGaAs 样品的最佳净化温度,然后对其表面进行 Cs、O 激活。激活采用 Cs 源持续、O 源断续的方法^[17],使用的 Cs 源、O 源均为固态源,光源为电压为 12 V、功率为 100 W 的卤素灯。激活过程中通过激活监测控制系统实时采集光电流,在首次 Cs 激活且光电流到达峰值时,以及 Cs/O 交替激活且光电流到达峰值时,分别将样品送至表面分析室进行 XPS 和 UPS 分析。

3 分析与讨论

3.1 高温净化分析

待高温净化的 InGaAs 样品冷却至室温后,对其表面进行 XPS 分析,以表征该温度点下高温净化对表面碳污染和自然氧化物的去除效果。不同加热温度点下 InGaAs 样品表面 $\text{C}1s$ 和 $\text{O}1s$ 的含量变化

趋势如图 1 所示。通过图 1(a)可以看出,高温净化对表面的碳污染物具有较为明显的去除效果,在 550 °C 的温度下,碳污染物基本完全从表面脱附,而

表面氧化物的去除则需要较高的温度,正如图 1(b)所示,随着温度的升高,表面氧化物逐渐减少,直至完全去除。

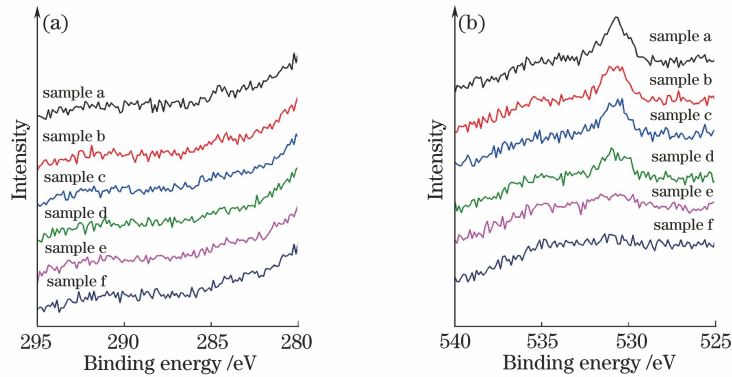


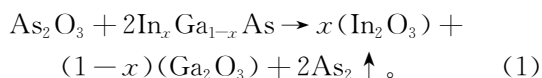
图 1 不同加热温度点下 C1s 和 O1s 的 XPS 谱图。(a) C1s; (b) O1s

Fig. 1 XPS spectra of C1s and O1s at different heated temperatures. (a) C1s; (b) O1s

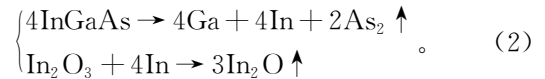
对经化学清洗后不同加热温度点样品的 XPS 元素谱峰进行拟合,得到 In、Ga、As 的氧化物以及其他成分的拟合峰的占比,如表 1 所示。在拟合元素谱峰时,利用 Shirley background 和 Lorentzian 线的高斯卷积对样品元素中的 Ga2p3、As2p3 和 In3d5 进行分峰拟合^[16]。不同加热温度点下样品 Ga2p3、As2p3 和 In3d5 的 XPS 拟合谱图分别如图 2~4 所示,其中标号(a)~(f)分别对应样品 a~f。结果表明,Ga2p3 的 XPS 谱中存在两种结合态(InGaAs 和 Ga₂O₃),结合能分别为 1116.8 eV 和 1118.3 eV;In3d5 的 XPS 谱中也存在两种结合态(InGaAs 和 In₂O₃),结合能分别为 443.7 eV 和 444.9 eV^[19],而 As2p3 的 XPS 谱中存在三种结合态(As₂O₃、InGaAs 和单质 As),结合能的位置分别在 1325.9 eV、1322.5 eV 和 1324 eV 处。从表 1 中能够明显看出,在温度为 500 °C 时,样品表面的 C1s 的拟合峰占比大大减少,由化学清洗后的 15.91% 降到 1.81%,在温度达到 550 °C 时,表面碳污染物被彻底去除,而氧化物仍然没有完全脱附。当温度达到 625 °C 时,样品表面的碳污染物和氧化物都被完全去除,可以得到一个原子级清洁的 InGaAs 表面。

通过不同元素谱图中拟合峰的变化情况,能够清晰地看出砷氧化物(As₂O₃)、砷单质(As)、铟氧化物(In₂O₃)、镓氧化物(Ga₂O₃)以及 InGaAs 含量随温度的变化情况。

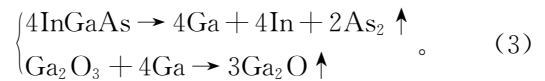
随着温度的升高,最先与 In_xGa_{1-x}As 样品发生反应的是砷氧化物,化学反应方程式为



当温度继续升高到 500 °C 以上时,样品表面的铟氧化物开始和 In_xGa_{1-x}As 样品发生反应:



当温度继续升高到 550 °C 以上时,样品表面的镓氧化物开始与 In_xGa_{1-x}As 样品发生反应:

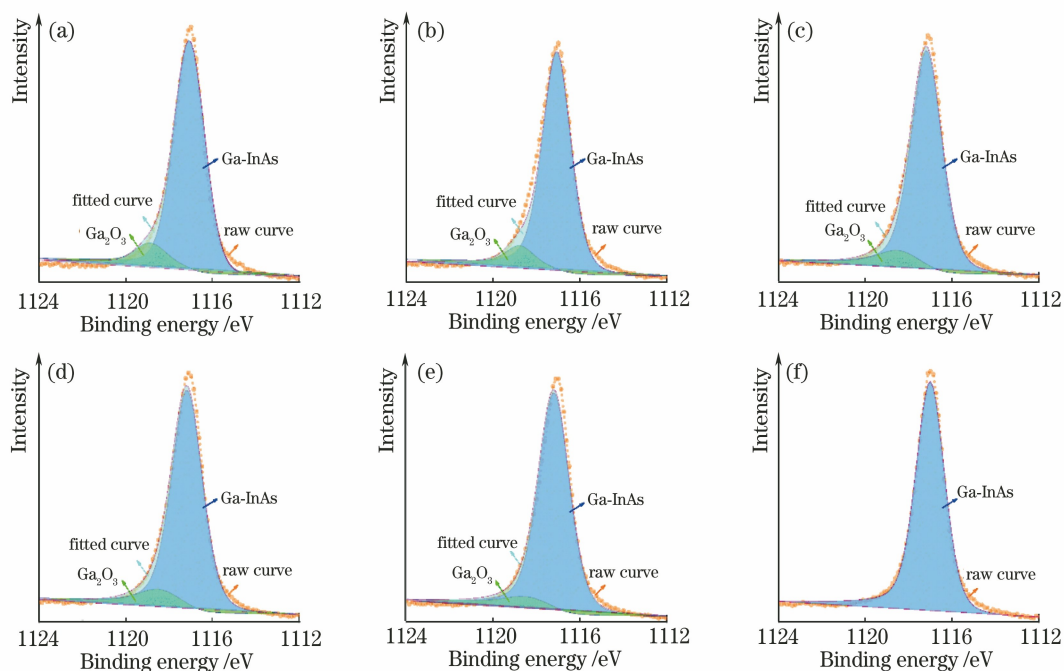


由此可见,InGaAs 样品在高温净化时,最先被去除的是 As₂O₃,接着是 In₂O₃,最不易去除的是 Ga₂O₃,XPS 分析结果很好地说明了该变化趋势。

由图 1~4 还可以看出,随着加热温度的升高,表面的碳污染物、氧化物和 As 单质的含量都呈现逐渐降低的趋势,InGaAs 的含量不断上升,最终得到一个不含杂质的 InGaAs 洁净表面。但从表 1 中可以发现,当加热温度点达到 625 °C 时,虽然样品表面的所有杂质都被去除,但样品内 In3d5 谱峰中 InGaAs 的拟合峰占比出现了下降的现象,由 11.42% 下降到了 8.43%,这是由于高温净化的温度点过高(大于 620 °C)时,在持续高温环境下,In 元素会从 InGaAs 样品中挥发,造成 InGaAs 样品中 In 含量减少。如果在高温净化过程中 In 含量减少,InGaAs 阴极样品将不能吸收有效波段的近红外光,造成其近红外响应特性不明显,达不到延伸红外响应的效果。因此,本文认为 625 °C 的温度不适合用于 InGaAs 样品的高温净化,而 600 °C 被认为是 InGaAs 样品最合适的加热温度,通过延长加热时间能够达到高温净化的原子级清洁表面效果。

表 1 经化学清洗和高温加热后样品表面元素 XPS 拟合峰的占比

Sample	Cl _s	O1 _s	Ga-InAs	Ga ₂ O ₃	As-InGa	As	As ₂ O ₃	In-GaAs	In ₂ O ₃	%
Cleaned sample (25 °C)	15.91	8.78	26.17	1.41	21.09	18.85	0.28	7.20	0.31	
Sample a (500 °C)	1.81	6.89	44.95	1.32	32.74	2.93	0	9.09	0.27	
Sample b (525 °C)	1.02	5.80	46.16	1.20	34.03	2.17	0	9.40	0.22	
Sample c (550 °C)	0	3.80	47.86	0.90	35.41	1.92	0	9.94	0.17	
Sample d (575 °C)	0	1.60	48.57	0.72	37.37	1.11	0	10.52	0.11	
Sample e (600 °C)	0	0.28	49.45	0.18	38.14	0.53	0	11.42	0	
Sample f (625 °C)	0	0	51.97	0	39.60	0	0	8.43	0	

图 2 不同加热温度下 Ga2p₃ 的 XPS 拟合谱图。(a)样品 a; (b)样品 b; (c)样品 c; (d)样品 d; (e)样品 e; (f)样品 fFig. 2 XPS fitted spectra of Ga₂p₃ at different heating temperatures. (a) Sample a; (b) sample b;

(c) sample c; (d) sample d; (e) sample e; (f) sample f

为了研究高温净化对 InGaAs 光电阴极表面功函数值的影响情况,对化学清洗后以及不同温度高温净化后的样品进行了 UPS 分析。图 5 给出了化学清洗后样品在不同加热温度下的 UPS 谱图和表面功函数变化图。可以发现,随着温度的增加,UPS 的二次电子截止边不断向高结合能位置移动,即表现为向左偏移。为了便于观看,在图 5 中仅用虚线标记了清洗后和 625 °C 加热后 UPS 的二次电子截止边的位置。可以看到,当加热温度点为 500 °C、525 °C 和 550 °C 时(即样品 a、b 和 c),与化学清洗后相比,二次电子截止边会向低结合能位置偏移,即表现为 UPS 谱图向右移动,这是由于加热温度点较低时,样品表面的杂质脱附不完全,表面元素成分的变化对材料功函数产生了影响。当加热温度上升到 575 °C 及以上时,样品表面杂质较少,二次电子截止

边的向左偏移现象较为明显。利用光电子阈值法可以计算出近红外 InGaAs 光电阴极在不同加热温度点下表面的功函数 ϕ ,其计算公式为^[22]

$$\phi = h\nu - E_{\text{Cutoff}} + E_{\text{Fermi}}, \quad (4)$$

式中: $h\nu = 21.2$ eV; E_{Cutoff} 表示紫外光电子能谱二次电子截止边对应的能量; E_{Fermi} 表示费米能级,由于样品具有较好的导电性,其费米能级和标准样品金相同,能量为 0 eV。具体的功函数数值如图 5 中功函数值变化图所示,可见,随着温度的升高,样品表面的功函数值逐渐减小。经 550 °C 高温净化后,样品 a 的表面功函数值为 4.62 eV,而经 625 °C 高温净化后样品 f 的表面功函数值为 3.8 eV,这说明合适的高温净化工艺能够有效降低 InGaAs 材料表面功函数,有利于后续 Cs 激活和 Cs/O 激活对其表面功函数值的进一步降低,从而获得负电子亲和势。

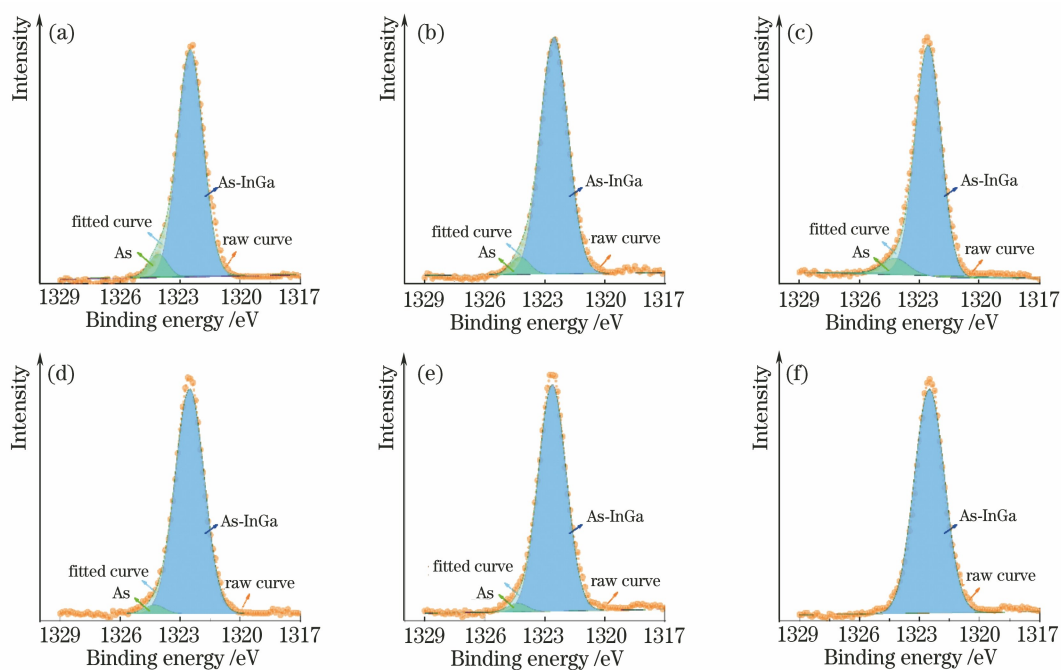


图 3 不同加热温度点下 As2p3 的 XPS 拟合谱图。(a)样品 a;(b)样品 b;(c)样品 c;(d)样品 d;(e)样品 e;(f)样品 f
 Fig. 3 XPS fitted spectra of As2p3 at different heating temperatures. (a) Sample a; (b) sample b; (c) sample c; (d) sample d; (e) sample e; (f) sample f

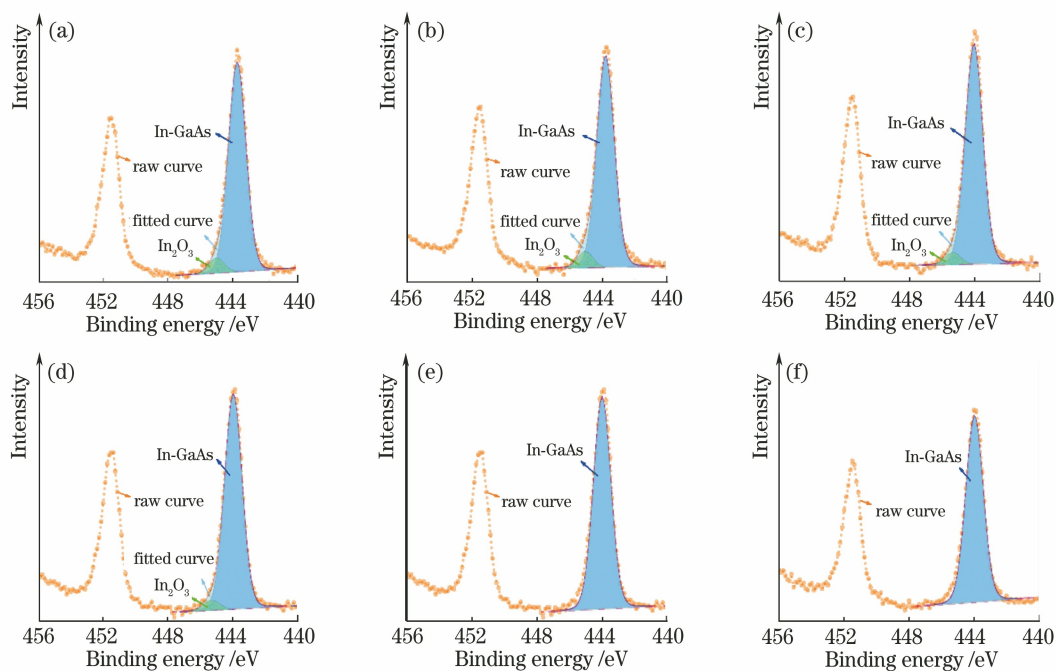


图 4 不同加热温度点下 In3d5 的 XPS 拟合谱图。(a)样品 a;(b)样品 b;(c)样品 c;(d)样品 d;(e)样品 e;(f)样品 f
 Fig. 4 XPS fitted spectra of In3d5 at different heating temperatures. (a) Sample a; (b) sample b; (c) sample c; (d) sample d; (e) sample e; (f) sample f

3.2 表面激活分析

对在 600 °C 最佳温度下加热后的净化样品 e 进行表面 Cs 激活和 Cs/O 交替激活,其中 Cs 激活的实验过程为:开启 Cs 源,光电流曲线开始慢慢上升,在激活光电流到达第一个峰值后,关闭 Cs 源,

停止激活,立即对样品进行表面 XPS 和 UPS 分析,之后进行 Cs/O 交替激活,待光电流峰值不断上升到最大值后,再进行表面 XPS 和 UPS 分析。图 6 给出了不同实验步骤后的 C1s 和 O1s 的 XPS 光谱曲线,如图 6(a)所示。高温净化去除了样品表面残

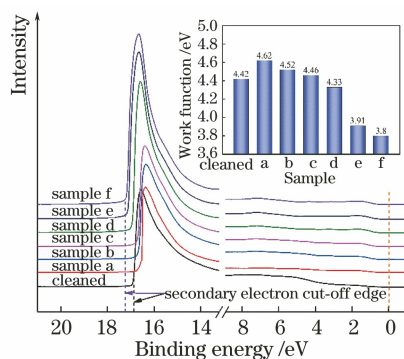


图 5 不同加热温度点下的 UPS 谱图以及功函数变化图

Fig. 5 UPS spectra and change trend of work function at different heating temperatures

留的碳污染物,并且在后续的Cs激活和Cs/O激活

实验中都没有出现 C1s 的峰,说明在表面激活实验中没有出现二次污染,实验准确可靠。而在图 6(b)中,高温净化能够完全去除样品表面的自然氧化物,但在 Cs/O 激活后又检测到 O1s 的峰,这是由于在 Cs、O 激活过程中,样品表面吸附了 O 原子后与 Cs 构成偶极子降低功函数,另外吸附的 O 原子会与样品表面元素发生氧化反应。对比加热后与 Cs/O 激活后样品表面 XPS 分析结果,可以发现样品内 Ga2p3 谱峰中 Ga₂O₃ 拟合峰的占比也由 0.18% 增加到 5.80%、In3d5 谱峰内出现了 In₂O₃ 且 In₂O₃ 拟合峰的占比为 0.26%,而 As2p3 谱峰内没有出现 As₂O₃,说明激活后样品表面只有镓氧化物和铟氧化物,而无砷氧化物,该结果证实表面发生了氧化反应^[23]。

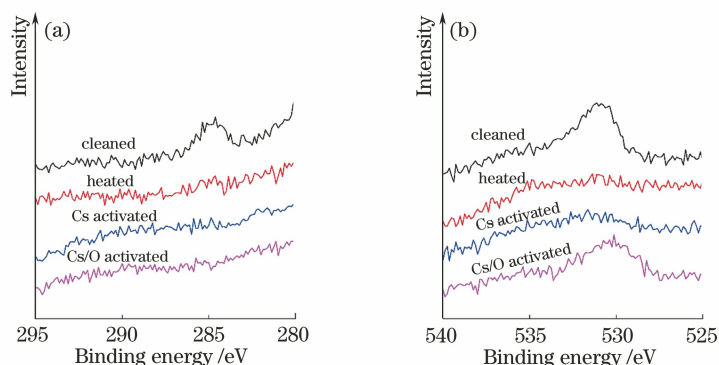


图 6 不同实验步骤后 C1s 和 O1s 的 XPS 谱图。(a) C1s;(b) O1s

Fig. 6 XPS spectra of C1s and O1s after different experimental steps. (a) C1s; (b) O1s

图 7 给出了不同实验步骤后 Ga2p3、As2p3 和 In3d5 的 XPS 光谱曲线。与化学清洗相比,高温净化后的谱图半峰全宽更窄,高度更高。高温净化去除了样品表面的杂质,表面洁净程度高,使得半峰全宽更窄,峰值高度更高。同时,表面的洁净程度还会对元素谱峰的结合能位置造成影响,如图 7 中用虚线标记了经化学清洗后的元素谱峰的结合能位置,能够

看出在高温净化、Cs 激活和 Cs/O 激活后,元素的谱峰位置均向低结合能位置偏移。激活前后,Ga2p3 和 In3d5 的谱峰结合能位置均只向右偏移了 0.125 eV,而 As2p3 的谱峰结合能向右偏移了 0.5 eV,这说明高温净化 As2p3 谱峰偏移现象最为明显。

表 2 给出了 InGaAs 样品在不同的实验步骤,即化学清洗后、高温净化后、Cs 激活后和 Cs/O 激

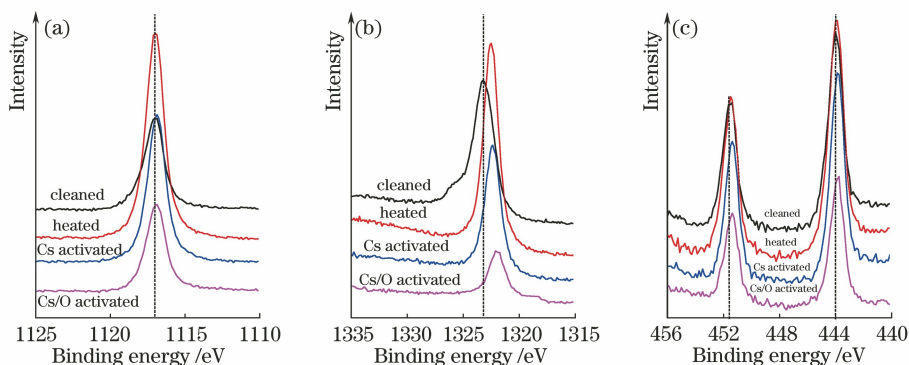


图 7 不同实验步骤后 Ga2p3、As2p3 和 In3d5 的 XPS 谱图。(a) Ga2p3;(b) As2p3;(c) In3d5

Fig. 7 XPS spectra of Ga2p3, As2p3, and In3d5 after different experimental steps. (a) Ga2p3; (b) As2p3; (c) In3d5

活后的 C1s、O1s、Ga2p3、As2p3、In3d5 和 Cs3d 的 XPS 元素的拟合峰占比。可以明显看出,高温净化会造成 InGaAs 表面由化学清洗后的富 As 表面变为富 Ga 表面,这是由在加热过程中表面 As 反应生成的 As₂ 的挥发造成的。经过 Cs 激活和 Cs/O 激活后,表面 Ga、As 的拟合峰占比会进一步增大,As2p3 元素的拟合峰占比下降得尤为明显,这是因

表 2 不同实验步骤后样品表面元素的拟合峰占比

Step	C1s	O1s	Ga2p3	As2p3	In3d5	Cs3d	%
Chemical cleaning	13.86	11.59	25.83	41.39	7.33	0	
Heat cleaning	0	0	49.79	41.80	8.41	0	
Cs activation	0	0	45.73	35.46	6.56	12.25	
Cs/O activation	0	20.47	32.76	16.65	6.01	24.11	

图 8 给出了 InGaAs 样品在不同实验步骤后的 UPS 谱图和功函数值变化图,能够明显看出,Cs 激活和 Cs/O 激活后的 UPS 谱的二次电子截止边均向高结合能方向偏移,且与高温净化后相比偏移幅度大得多,这说明表面 Cs、Cs/O 激活能够更有效降低 InGaAs 光电阴极的功函数值,具体的功函数值如图 8 所示。Cs 激活和 Cs/O 激活后的 InGaAs 光电阴极的功函数值分别为 1.41 eV 和 0.94 eV,可见对 InGaAs 光电阴极表面进行适当的 Cs/O 激活能够获得负电子亲和势,从而提高其近红外的光电发射性能。

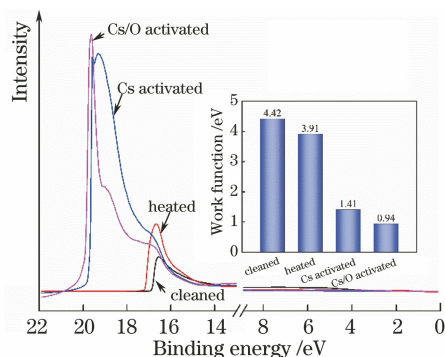


图 8 不同实验步骤后的 UPS 谱图和功函数值变化图
Fig. 8 UPS spectra and change trend of work function value after different experimental steps

4 结 论

通过在超高真空环境下对在不同温度点加热净化后的 InGaAs 样品进行原位 XPS 和 UPS 分析,发现随着温度不断升高,样品表面碳污染物先被去除,而氧化物的去除需要更高的温度,其中砷氧化物、铟氧化物和镓氧化物会逐渐脱附,最终得到原子级清

洁表面。值得注意的是,当温度设为 625 °C 时,材料内的 In 元素会挥发,导致 In 含量下降,造成 InGaAs 材料的近红外响应特性变差,综合考虑认为 600 °C 为高温净化工艺的最佳加热温度。另外 UPS 分析结果表明高温净化能有效降低阴极表面功函数值。对阴极进行 Cs 激活和 Cs/O 激活后,发现激活后 InGaAs 光电阴极的元素谱峰均会向低结合能方向偏移,且表面功函数会进一步降低,获得负电子亲和势,从而能够提高近红外光电发射性能。本文的实验结果对 InGaAs 光电阴极制备工艺的研究具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] Sun Q X, Xu X Y, An Y B, et al. Numerical study on time response characteristics of InP/InGaAs/InP infrared photocathode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3163-3167.
孙巧霞, 徐向晏, 安迎波, 等. InP/InGaAs/InP 红外光电阴极时间响应特性的模拟研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(12): 3163-3167.
- [2] Li X, Shao X M, Li T, et al. Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0103006.
李雪, 邵秀梅, 李淘, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(1): 0103006.
- [3] Liang Y, Fei Q L, Liu Z H, et al. Low-noise InGaAs/InP single-photon detector with widely tunable repetition rates [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(3): A1-A6.
- [4] Lu H B, Li G, Li X Y, et al. Small lattice-mismatched InGaAsP: material characterization and application in solar cells [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(4): 351-356.

- 陆宏波, 李戈, 李欣益, 等. 晶格小失配 InGaAsP 材料特性及太阳能电池应用[J]. 发光学报, 2020, 41(4): 351-356.
- [5] 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.
- [6] Qiu Y F, Yan W L, Hua S T. Resolution research of low-light-level image intensifier based on electronic trajectory tracking[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(12): 1223003.
邱亚峰, 严武凌, 华桑曦. 基于电子追迹算法的微光像增强器分辨力研究[J]. 光子学报, 2020, 49(12): 1223003.
- [7] Ding Y, Li Q, Li J Y, et al. Application of ultrafast lasers in the manufacture of passive optical waveguide devices: a review[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(8): 0802020.
丁焯, 李强, 李靖怡, 等. 超快激光在无源光波导器件制造中的应用综述[J]. 中国激光, 2021, 48(8): 0802020.
- [8] Shin J H, Park D W, Lee E S, et al. Highly reliable THz hermetic detector based on InGaAs/InP Schottky barrier diode[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 115: 103736.
- [9] 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.
- [10] Jin M C, Chen X L, Hao G H, et al. Research on quantum efficiency for reflection-mode with thin emission layer[J]. Applied Optics, 2015, 54(28): 8332-8338.
- [11] 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.
- [12] Ingrej S I J, Lau W M, Sodhi R N S. Characterization of surface oxides and oxide desorption on InGaAs[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1989, 7(3): 1554-1557.
- [13] Li L, Han B K, Hicks R F, et al. Atomic structure of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}(0\ 0\ 1)$ (2×4) and (3×2) surfaces[J]. Ultramicroscopy, 1998, 73(1/2/3/4): 229-235.
- [14] Shen L, Tang J L, Jia H M, et al. Effect of rapid thermal annealing on luminescence properties of InGaAsSb/AlGaAsSb multiple quantum wells material[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0711001.
申琳, 唐吉龙, 贾慧民, 等. 快速热退火对 InGaAsSb/AlGaAsSb 多量子阱材料发光特性的影响[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0711001.
- [15] Biswas J T, Cen J J, Gaowei M J, et al. Revisiting heat treatment and surface activation of GaAs photocathodes: *in situ* studies using scanning tunneling microscopy and photoelectron spectroscopy[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 128(4): 045308.
- [16] 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.
- [17] Yang M Z, Jin M C. Photoemission of reflection-mode InGaAs photocathodes after Cs, O activation and recaesiations[J]. Optical Materials, 2016, 62: 499-504.
- [18] Yang M Z, Jin M C, Chang B K. Spectral response of InGaAs photocathodes with different emission layers[J]. Applied Optics, 2016, 55(31): 8732-8737.
- [19] Rong M M, Zhang Y J, Li S M, et al. InGaAs surface cleaning based on scanning focused XPS technique[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(5): 0516004.
荣敏敏, 张益军, 李诗曼, 等. 基于扫描聚焦 XPS 技术的 InGaAs 表面清洁研究[J]. 光学学报, 2021, 41(5): 0516004.
- [20] Cossu G, Ingo G M, Mattogno G, et al. XPS investigation on vacuum thermal desorption of UV/ozone treated GaAs(100) surfaces[J]. Applied Surface Science, 1992, 56/57/58: 81-88.
- [21] Tereshchenko O E, Placidi E, Paget D, et al. Well-ordered (1 0 0) InAs surfaces using wet chemical treatments[J]. Surface Science, 2004, 570(3): 237-244.
- [22] Chen Y, Gong L, Du X, et al. Comparison of work functions of several materials measured by XPS and UPS[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2018, 37(7): 796-803.
陈瑜, 龚力, 杜相, 等. XPS 与 UPS 测量几种材料功函数的比较[J]. 分析测试学报, 2018, 37(7): 796-803.
- [23] 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.