

低 As 压退火对 GaAs(001) 表面形貌与重构的影响

周勋 罗子江 王继红 郭祥 丁召

Effect of low As pressure annealing on the morphology and reconstruction of GaAs (001)

Zhou Xun Luo Zi-Jiang Wang Ji-Hong Guo Xiang Ding Zhao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 216803 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.216803

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.216803>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I21>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[Au\(111\) 表面吸附单个八乙基钴卟啉分子的电子态和输运性质调控](#)

[Controlling the electronic states and transport properties of single cobalt\(II\)octaethylporphyrin molecule adsorbed on Au\(111\) surface](#)

物理学报.2015, 64(7): 076803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.076803>

[氢原子吸附对金表面金属酞菁分子的吸附位置、自旋和手征性的调控](#)

[Tuning the spin chirality and adsorption site of metal-phthalocyanine on Au\(111\) surface with hydrogen atoms](#)

物理学报.2015, 64(7): 076802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.076802>

[InGaAs 薄膜表面的粗糙化过程](#)

[Roughening and pre-roughening processes on InGaAs surface](#)

物理学报.2013, 62(3): 036802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.036802>

[锰的硅化物薄膜在 Si\(100\)-2×1 表面生长的 STM 研究](#)

[STM study of growth of manganese silicide thin films on a Si\(100\)-2×1 surface](#)

物理学报.2012, 61(6): 066801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.066801>

[La<sub>0.67</sub>Ca<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub>\(001\) 薄膜表面结构的扫描隧道显微术研究](#)

[Study of La<sub>0.67</sub>Ca<sub>0.33</sub>MnO<sub>3</sub>\(001\) thin film surface structure using scanning tunneling microscopy](#)

物理学报.2011, 60(4): 046801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.046801>

# 低 As 压退火对 GaAs(001) 表面形貌与重构的影响\*

周勋<sup>1)†</sup> 罗子江<sup>2)</sup> 王继红<sup>3)</sup> 郭祥<sup>3)</sup> 丁召<sup>3)†</sup>

1)(贵州师范大学物理与电子科学学院, 贵阳 550001)

2)(贵州财经大学教育管理学院, 贵阳 550004)

3)(贵州大学理学院, 贵阳 550025)

(2015 年 4 月 6 日收到; 2015 年 7 月 13 日收到修改稿)

在低 As 压条件下退火处理原子级平坦的 GaAs(001)  $\beta 2(2 \times 4)$  重构表面. 利用扫描隧道显微镜对表面进行研究, 发现随着低 As 压退火时间的延长, 表面形貌与表面重构的演变同步进行. 表面形貌经历了从有序平坦转变为无序平坦, 然后逐渐恢复到有序平坦状态的过程. 表面重构则由  $\beta 2(2 \times 4)$  重构逐渐转变为  $(2 \times 6)$  重构, 然后再转变为锯齿状的  $(2 \times 6)$  重构, 并且表面形貌与表面重构的演变存在一定的相互关系.

**关键词:** 表面形貌, 表面重构, 预粗糙,  $(2 \times 6)$  重构

**PACS:** 68.37.Ef, 64.60.-i, 68.35.Ct

**DOI:** 10.7498/aps.64.216803

## 1 引言

以 GaAs 为代表的 III-V 族化合物半导体材料是继硅材料之后的第二代半导体材料, 由于其高电子迁移率、优异的光电特性, 目前被广泛的应用于高电子迁移率器件与光电子器件的制造. 其中 GaAs(001) 衬底为器件制造使用最广泛的化合物半导体衬底材料之一. 由于大部分半导体器件结构均制作于半导体材料表面, 表面的质量直接与器件的光电特性密切相关<sup>[1-4]</sup>. 对于 GaAs(001) 衬底材料而言, 研究其表面形貌与表面重构对于制造高品质的器件具有重要意义. 近年来, 国内外一些研究机构对 GaAs(001) 表面进行了大量的研究. Xue 等对 GaAs(001) 表面富 As 的  $C(4 \times 4)$ ,  $(2 \times 4)$ ,  $(1 \times 6)$ ,  $(2 \times 3)$  等重构, 以及富 Ga 的  $(4 \times 6)$ ,  $(4 \times 2)/C(8 \times 2)$  等重构进行了详细的研究<sup>[5-10]</sup>. LaBella 等提出了 GaAs(001) 表面重构相图以及表面形貌的演变规

律<sup>[11-13]</sup>. 根据他们的研究可知, 表面重构相的转变以及表面形貌的演变与衬底温度、As 保护气压两个变量的改变密切相关. 在高 As 保护气压条件下表面形貌与重构随衬底温度的改变而迅速变化, 当衬底温度不变时表面形貌与重构稳定不变. 然而如果在一定温度下将较高的 As 保护气压降低, 表面形貌与重构的演变将会有所不同. 本文利用分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 技术在获得原子级平坦的 GaAs(001) 表面基础上, 在低 As 保护气压条件下退火. 利用扫描隧道显微镜 (scanning tunneling microscopy, STM) 表征表面形貌与重构随着退火处理时间的延长而不断变化过程.

## 2 实验

本实验是在 Omicron 生产的超高真空 MBE-STM 联合系统中进行的, MBE 的背景真空值为  $3.0 \times 10^{-9}$  Pa, As 坩埚温度  $365^\circ\text{C}$ , As 裂解

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61564002)、教育部博士点基金 (批准号: 20105201110003)、贵州师范大学 2012 年博士基金、2013 年度贵州财经大学引进人才科研项目 (批准号: [2013]2114) 和贵州省科学技术基金项目 (批准号: 黔科合 J 字 [2011]2095 号) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhouxun99@163.com; zding@gzu.edu.cn

温度 500 °C. 实验之前校准衬底温度<sup>[14]</sup>, 校准 Ga 源温度 1000—1070 °C 下等效束流压强 (As beam equivalent pressure, As BEP), 以及 As 阀门 0—80% 下等效束流压强. 将 10 mm × 10 mm 厚度约为 500 μm 的 GaAs(001) 单晶衬底 (Si 掺杂浓度为  $N_D = 1.49 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ) 用 In 黏接在钼样品盘上, 通过快速进样室传送至超高真空的 MBE 系统中. 利用反射式高能电子衍射仪 (reflection high energy electron diffraction, RHEED) 监测整个实验过程, 电子束的能量为 15 keV, 灯丝电流为 1.5 A, 掠射角小于 1°. 在 As BEP 为  $1.3 \times 10^{-3}$  Pa 的 As<sub>4</sub> 气氛保护下缓慢升高衬底温度, 当温度达到 580 °C 时完成脱氧. 随后, 将衬底温度降低至 550 °C, 设置 Ga 源温度为 1050 °C, 在 V/III 束流比大于 15 的条件下, 以 0.25 ML/s (monolayer/second) 的生长速率生长 500 nm 厚的 GaAs 缓冲层, 原位退火 40 min 获得原子级平坦的表面. 以此表面作为初始表面, 将衬底温度降低至 530 °C, 改变 As BEP 为  $1.3 \times 10^{-6}$  Pa, 分别退火处理 5, 10, 15, 30, 120, 240 min. 每一次退火完成后, 关闭 As 阀, 将样品快速淬火至室温并传送至 STM 中对其表面进行扫描表征.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 表面形貌的演变

根据 GaAs(001) 表面重构相图可知, 在  $1.3 \times 10^{-3}$  Pa 的 As<sub>4</sub> BEP 条件下 GaAs(001) 表面的  $\beta_2(2 \times 4)$  重构温度区间为 520—560 °C<sup>[13,15]</sup>. 本实验中样品降温至 530 °C 所获得的初始表面即为原子级平坦的  $\beta_2(2 \times 4)$  重构表面如图 1 所示. 图 1(a) 为 RHEED 衍射图, 能够清晰的分辨出 [110] 方向为  $2 \times$ , [100] 方向为  $1 \times$ ,  $[\bar{1}\bar{1}0]$  方向为  $4 \times$ , 图 1(b) 为 1000 nm × 1000 nm 的 GaAs(001) 表面 STM 图, 单层台阶宽度大于 400 nm, 表面无二维岛或坑的存在.

在平坦稳定的  $\beta_2(2 \times 4)$  重构相下, 将 As<sub>4</sub> BEP 由  $1.3 \times 10^{-3}$  Pa 降低为  $1.3 \times 10^{-6}$  Pa, 表面的平衡态被打破, 平坦的表面形貌也随之发生改变. 随着退火时间的延长, 表面形貌伴随着剧烈的演变. 退火 5 min 后表面开始出现大量沿  $[\bar{1}\bar{1}0]$  方向的条状小坑如图 2(a) 所示; 退火 10 min 后坑的尺寸变大如图 2(b) 所示, 条状的坑沿 [110] 与  $[\bar{1}\bar{1}0]$  方向扩展; 退火 15 min 后坑的扩展使台阶彻底破裂, 原本

平坦的单层平台消失, 表面转变为无序平坦状态如图 2(c) 所示; 退火 30 min 后表面呈现梳状结构如图 2(d) 所示, 表面处于混乱的无序平坦状态; 退火 2 h 后表面处于无序平坦状态, 但是相对于图 2(d) 表面的粗糙程度有所下降; 退火 4 h 后表面又趋于平坦, 只有少数的长条形坑存在. 从图 2(a)—(d) 可以看出随着退火时间的延长, GaAs(001) 表面经历了由平坦表面逐渐转变为无序平坦表面的过程. 与 GaAs(001) 表面预粗糙化过程的理论与实验研究相对比, 图 2(a)—(d) 反映的是典型的表面预粗糙化过程. 然而, 图 2(d)—(f) 却表明预粗糙状态并不能在此退火条件下长时间稳定. 图 2(d)—(e) 显示无序平坦表面有重新愈合形成大尺寸台阶的趋势, 而图 2(f) 显示表面只有少数未完全合并的区域, 有长条形坑的存在, 大尺寸台阶接近形成. 可以认为在衬底温度为 530 °C 低 As 压条件下退火, GaAs(001) 表面经历了从平坦到预粗糙状态, 然后再恢复到平坦的过程. 且恢复平坦的过程比预粗糙化过程所需要的时间更长. 对于整个表面形貌的演变, 实际上是从高 As 压 (As<sub>4</sub> BEP 为  $1.3 \times 10^{-3}$  Pa) 平衡态表面转变为低 As 压 (As<sub>4</sub> BEP 为  $1.3 \times 10^{-6}$  Pa) 平衡态表面的过程, 参与其中的表面原子必然经历了一个重新组织的过程.

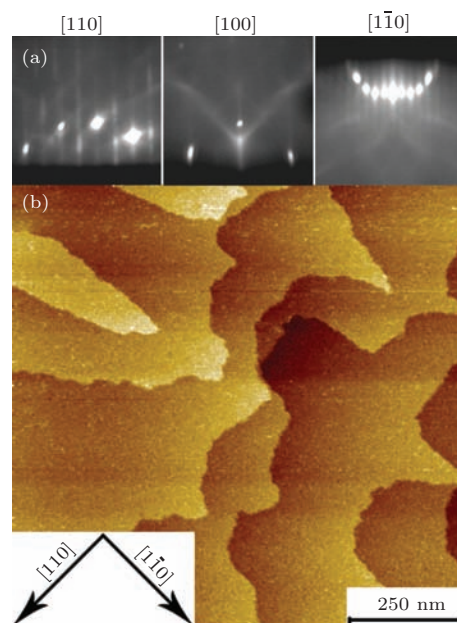


图 1 (a) 平坦的  $\beta_2(2 \times 4)$  重构表面 RHEED 衍射图; (b) 平坦的  $\beta_2(2 \times 4)$  重构表面 STM 图 (STM 间隙电压为 -2.3 V, 电流为 300 pA)

Fig. 1. (a) RHEED Parttens of  $\beta_2(2 \times 4)$  reconstruction flat surface; (b) STM image of  $\beta_2(2 \times 4)$  reconstruction flat surface, STM gap voltage -2.3 V, current 300 pA.

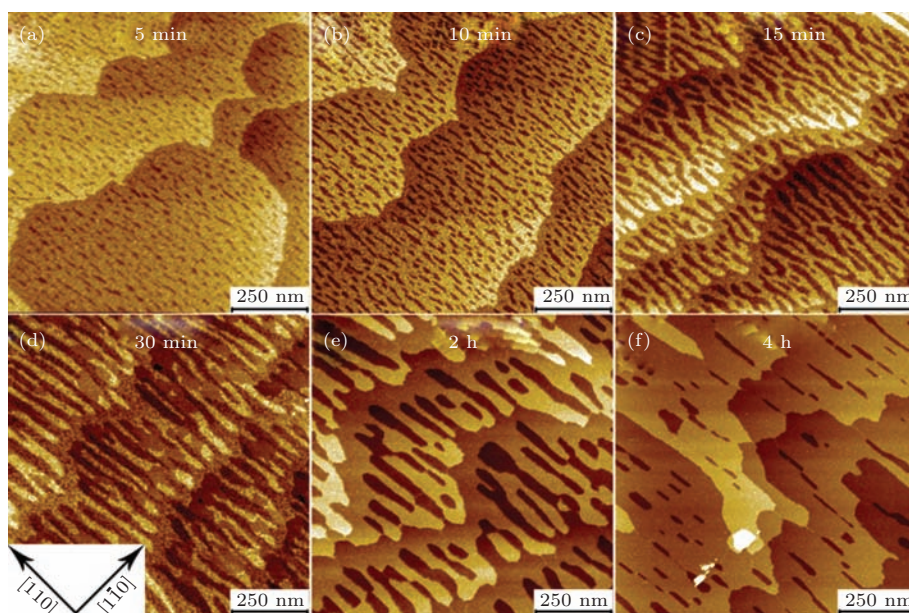


图2 低As压条件下退火的表面STM图 (a)–(f)分别对应的退火时间为5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 120 min, 240 min, (a) STM间隙电压为 $-2.6$  V, 电流为300 pA, (b)–(f) STM间隙电压为 $-3$  V, 电流为200 pA

Fig. 2. STM images of annealing surface under low As pressure, patterns (a)–(f) correspond to annealing time 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 120 min, 240 min respectively, patterns (a) STM gap voltage  $-2.6$  V, current 300 pA, patterns (b)–(f) STM gap voltage  $-3$  V, current 200 pA.

### 3.2 表面重构演变

初始表面为图1所示的平坦 $\beta 2(2 \times 4)$ 重构表面, 表面RHEED衍射如图1(a)所示. 利用RHEED实时监测低As压退火的GaAs(001)表面, 获得了一组随着退火时间增加而变化的表面RHEED衍射图, 如图3所示. 当退火5 min, 10 min, 15 min时, RHEED衍射图显示 $[110]$ 方向的 $2 \times$ 与 $[1\bar{1}0]$ 方向的 $4 \times$ 逐渐变得模糊, 单一的 $\beta 2(2 \times 4)$ 重构表面不复存在, 表面重构相在逐渐的改变,  $\beta 2(2 \times 4)$ 重构逐渐的转变其他的重构; 当退火30 min后,  $[110]$ 方向的 $2 \times$ 与 $[1\bar{1}0]$ 方向的 $4 \times$ 消失,  $[1\bar{1}0]$ 方向出现微弱的 $6 \times$ ; 当退火60 min后,  $[110]$ 方向为模糊的 $6 \times$ ,  $[100]$ 方向为模糊 $6 \times$ ,  $[1\bar{1}0]$ 方向为清晰的 $6 \times$ , 这表明表面已经从图1(a)所示的 $\beta 2(2 \times 4)$ 重构相彻底的转变为所谓的GaAs(001)-6重构相<sup>[10,16,17]</sup>; 退火120 min, 240 min后 $[1\bar{1}0]$ 方向为的 $6 \times$ 越来越清晰, 表面的GaAs(001)-6重构相稳定不变. 可以看出低As压条件下退火, 表面重构相变是一个缓慢的演变过程,  $(2 \times 4)$ 重构相逐渐消失, GaAs(001)-6重构相逐渐形成. 在整个表面重构转变过程中, 由于转

变的过程缓慢, 必然有不同的重构相共存于表面, 本文获得的高分辨率的STM图能证实这一点, 如图4所示.

初始的重构为 $\beta 2(2 \times 4)$ 重构如图4(a)所示表面重构原胞排列规则. 退火30 min后表面无序平坦, 此时表面如图4(b)和(c)所示. 其中图4(b)显示表面重构局域化严重, 图4(b)中的A区域重构原胞有序规则排列, 而B与C区域重构无序混乱. 图4(b)中A区域 $20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$ 的STM图如图4(c)所示, 利用SPIP软件分析图4(c), Line profile图显示Line 1的重复周期为 $2.4 \text{ nm}$ 恰好是Line 2的二倍, 由此可知图4(b)中A区域为 $(2 \times 6)$ 重构, 重构的球棍模型如图6中B结构所示,  $[110]$ 晶向为 $6 \times$ ,  $[1\bar{1}0]$ 晶向为 $2 \times$ . 退火30 min后一种新的重构相在表面开始形成, 此时的表面状态正好与图3中退火30 min的RHEED衍射图相符, 表面重构相开始由无序状态转变为有序的 $(2 \times 6)$ 重构相. 退火60 min—240 min的RHEED衍射图所显示的是GaAs(001)-6重构, 且GaAs(001)-6重构相的RHEED衍射图中 $[110]$ 与 $[100]$ 方向的 $6 \times$ 一直很模糊微弱. 然而 $[1\bar{1}0]$ 方向的 $6 \times$ 却越来越清晰可见, 表面处于稳定的GaAs(001)-6重构相.

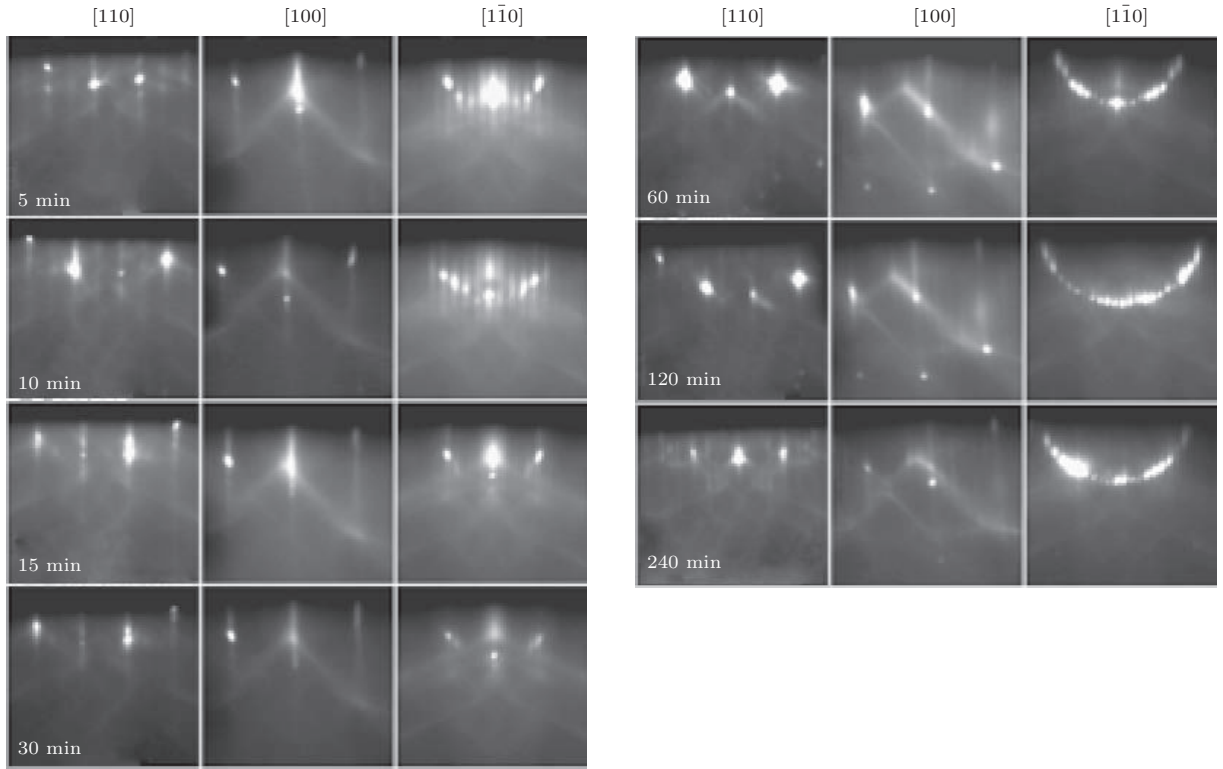


图3 退火5—240 min 的GaAs(001) 表面RHEED 衍射图

Fig. 3. RHEED patterns of GaAs(001) surface under 5–240 min annealing.

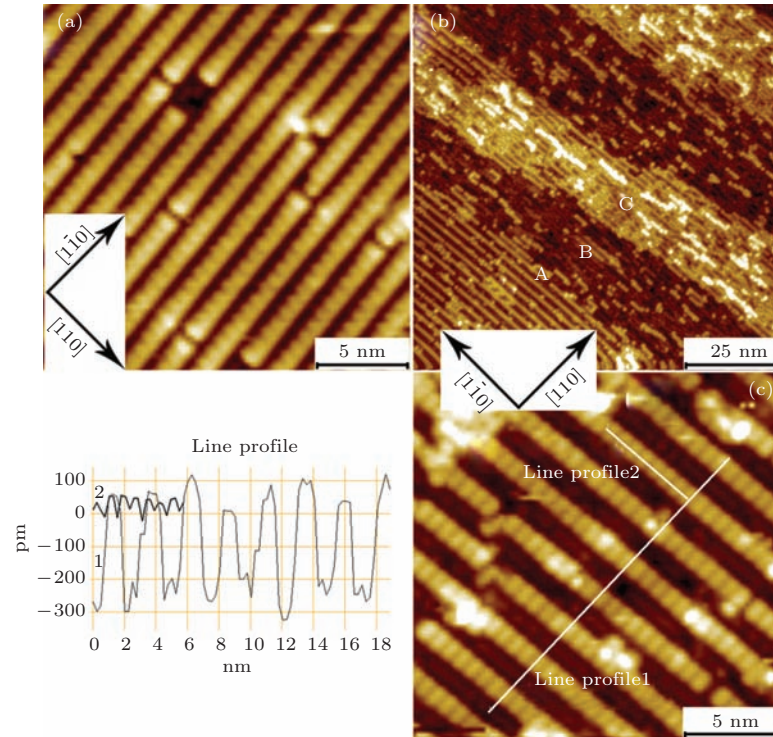


图4 (a) 20 nm  $\times$  20 nm GaAs(001)  $\beta_2(2 \times 4)$  重构表面STM图, STM 间隙电压为  $-2.7$  V, 电流为 150 pA; (b) 100 nm  $\times$  100 nm 无序平坦表面STM图, STM 间隙电压为  $-3$  V, 电流为 200 pA; (c) 20 nm  $\times$  20 nm GaAs(001)  $(2 \times 6)$  重构STM图以及Line profile图, STM 间隙电压为  $-2.5$  V, 电流为 200 pA

Fig. 4. (a) 20 nm  $\times$  20 nm STM image of GaAs(001)  $\beta_2(2 \times 4)$  reconstruction surface, STM gap voltage  $-2.7$  V, current 150 pA; (b) 100 nm  $\times$  100 nm STM image of disorder surface, STM gap voltage  $-3$  V, current 200 pA; (c) 20 nm  $\times$  20 nm STM image of  $(2 \times 6)$  reconstruction and their line profile pattern, STM gap voltage  $-2.5$  V, current 200 pA.

退火 120 min 后的高分辨率 STM 图如图 5(a) 与 (b) 所示, 图 5(a) 显示表面不存在局域化的重构相, 但是也不是由单一的  $(2 \times 6)$  重构构成的重构表面. 在  $[110]$  晶向为  $6 \times$  是确定的, 而在  $[1\bar{1}0]$  晶向并不像图 4(a) 和 (b) 中的二聚体排 (dimer row) 整齐, 在 dimer row 的方向有 As dimer 的缺失, 这种缺失现象在图 5(b) 可以更明显的看出. 从图 5(a) 与 (b)

可知退火 120 min 后的表面, 实际是由一些完整的  $(2 \times 6)$  重构原胞和缺失了一个顶层 dimer 的  $(2 \times 6)$  重构原胞所构成. 这可能是表面 RHEED 衍射图中  $[110]$  方向的  $4 \times$  一直很模糊微弱的原因. 当退火 240 min 后, 高分辨率 STM 图如图 5(c) 与 (d) 所示.  $[110]$  晶向依然为  $6 \times$ , 但是  $[1\bar{1}0]$  晶向的 dimer row 转变为锯齿状的结构, dimer row 的宽度变窄.

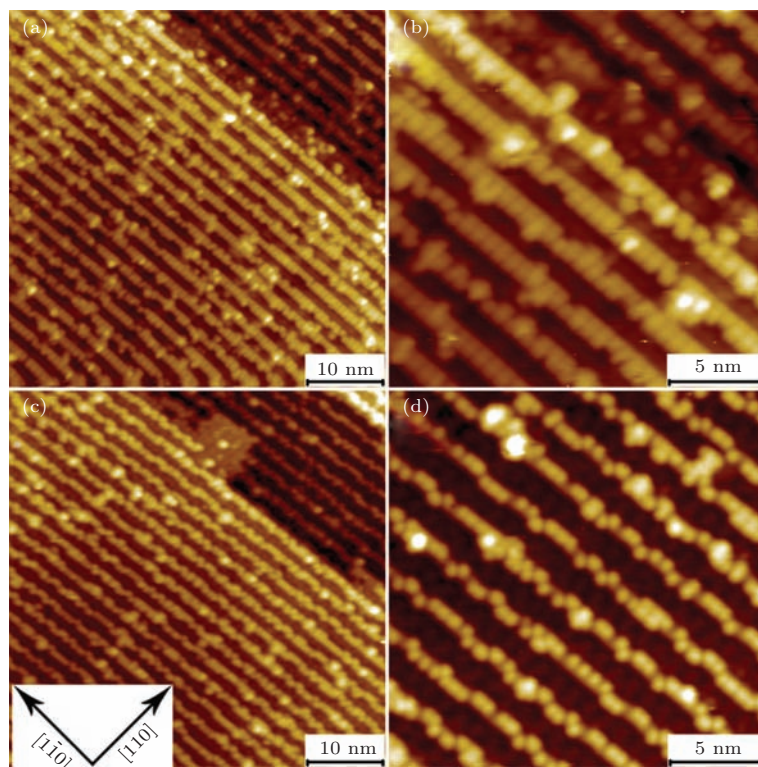


图 5 50 nm  $\times$  50 nm (a) 与 20 nm  $\times$  20 nm (b) 低 As 压退火 120 min GaAs(001) 高分辨率 STM 图, (a) 与 (b) STM 间隙电压分别为  $-3$  V 与  $-3.3$  V, 电流分别为 300 pA 与 400 pA; 50 nm  $\times$  50 nm (c) 与 20 nm  $\times$  20 nm (d) 低 As 压退火 240 min GaAs(001) 高分辨率 STM 图, (c) 与 (d) STM 间隙电压分别为  $-2.9$  V 与  $-2.8$  V, 电流均为 100 pA

Fig. 5. 50 nm  $\times$  50 nm (a) and 20 nm  $\times$  20 nm (b) high resolution STM image of GaAs(001) under low As pressure annealing 120 min, (a) and (b) STM gap voltage  $-3$  V and  $-3.3$  V, current 300 pA and 400 pA; 50 nm  $\times$  50 nm (c) and 20 nm  $\times$  20 nm (d) high resolution STM image of GaAs(001) under low As pressure annealing 240 min, (c) and (d) STM gap voltage  $-2.9$  V and  $-2.8$  V, current 100 pA.

### 3.3 表面形貌与重构演变的关系

将  $\text{As}_4$  BEP 由  $1.3 \times 10^{-3}$  Pa 降低为  $1.3 \times 10^{-6}$  Pa, 表面形貌与表面重构同步演变, 演变的过程以退火 120 min 为界分两个阶段, 由 3.1 与 3.2 可知表面形貌与重构的演变过程中, 第一阶段比第二阶段要剧烈. 第一阶段为退火 0—120 min 之间, 初始  $\beta 2(2 \times 4)$  重构表面在没有足够 As 压保护的情况下, As 原子会从其表面脱附<sup>[18]</sup>, 在  $\text{As}_4$  BEP 为  $1.3 \times 10^{-6}$  Pa 的条件下, 整个 GaAs(001) 表面的演变过程都伴随着表面 As 的脱附. 图 6 中 A 结构与

B 结构分别为初始表面  $\beta 2(2 \times 4)$  重构与退火后表面  $(2 \times 6)$  重构的球棍模型, 其表面 As 的覆盖率分别为 0.75 ML, 0.33 ML<sup>[10,13]</sup>. 从  $\beta 2(2 \times 4)$  重构逐渐向  $(2 \times 6)$  重构演变的过程中, 表面 As 的覆盖率逐渐降低了 56%,  $\beta 2(2 \times 4)$  重构表面的 As dimer 数量减少了超过一半,  $\beta 2(2 \times 4)$  重构原胞中的 3 个 As dimer 都可能参与脱附. 当然表面最容易脱附的是  $\beta 2(2 \times 4)$  重构最顶层的两个 As dimer, 因此表面最初形成的长条形坑均沿 dimer row 方向即  $[1\bar{1}0]$  晶向. 在 As 脱附的同时, 表面的也会吸附 As 原子, 只是吸附的 As 原子少于脱附的 As 原子. 当 As dimer

脱附后, 表面原子重新组织再构成具有低As覆盖率的 $(2 \times 6)$ 重构表面. 在 $[110]$ 晶向上由 $4 \times$ 转变为 $6 \times$ , 需要破坏原来的 $\beta 2(2 \times 4)$ 重构原胞重新构造新原胞. 仅仅靠最顶层的As dimer 在表面的脱附、吸附和迁移不能在 $[110]$ 晶向构造 $6 \times$ 重复周期. 因此必然有表面2—3个原子层的原子都参与表面的脱附、吸附和迁移, 只有彻底改变 $\beta 2(2 \times 4)$ 重构才能形成 $(2 \times 6)$ 重构. 那么表面低层与高层原子会在垂直于表面的 $[001]$ 方向上迁移, 表面自然会形成坑与岛促使表面进入无序平坦的状态. 第一阶段中由 $\beta 2(2 \times 4)$ 重构逐渐转变为较为稳定的 $(2 \times 6)$ 重构, 是两种不同类型重构之间的转变, 表面必须要经历预粗糙化过程. 因此可以推断在其他不同类型的重构表面之间相互转变时, 表面会经历一个无序平坦的过程.

第二阶段为退火 120—240 min 之间, 从图 2 (e)

到(f)可以看出第二阶段表面逐渐熟化成由单层大平台构成的表面, 从图 5 (b) 到 (d)) 可以看出, 第二阶段表面重构由B结构转变为具有锯齿状dimer row的 $(2 \times 6)$ 重构. 图 6 中C结构与D结构为两种As dimer 错排的 $(2 \times 6)$ 重构模型. 图 5 (d) 所示的锯齿状 $(2 \times 6)$ 重构表面正是由C结构和D结构的重构原胞构成, 其中表面以D结构为主. C结构与B结构重构原胞As的覆盖率是一致的, 而D结构表面As的覆盖率为B结构的一半0.16 ML. 因此在第二阶段的演变过程中同样伴随着表面As的脱附, 但是只有B结构顶层的As dimer 参与表面脱附或表面迁移. 因此在 $[110]$ 晶向的 $6 \times$ 重复周期不会改变, 只是形成了锯齿状的 $(2 \times 6)$ 重构. 这说明GaAs(001)表面同种类型 $(2 \times 6)$ 重构之间的转变, 表面形貌不受重构转变的影响, 表面形貌按照熟化理论演化.

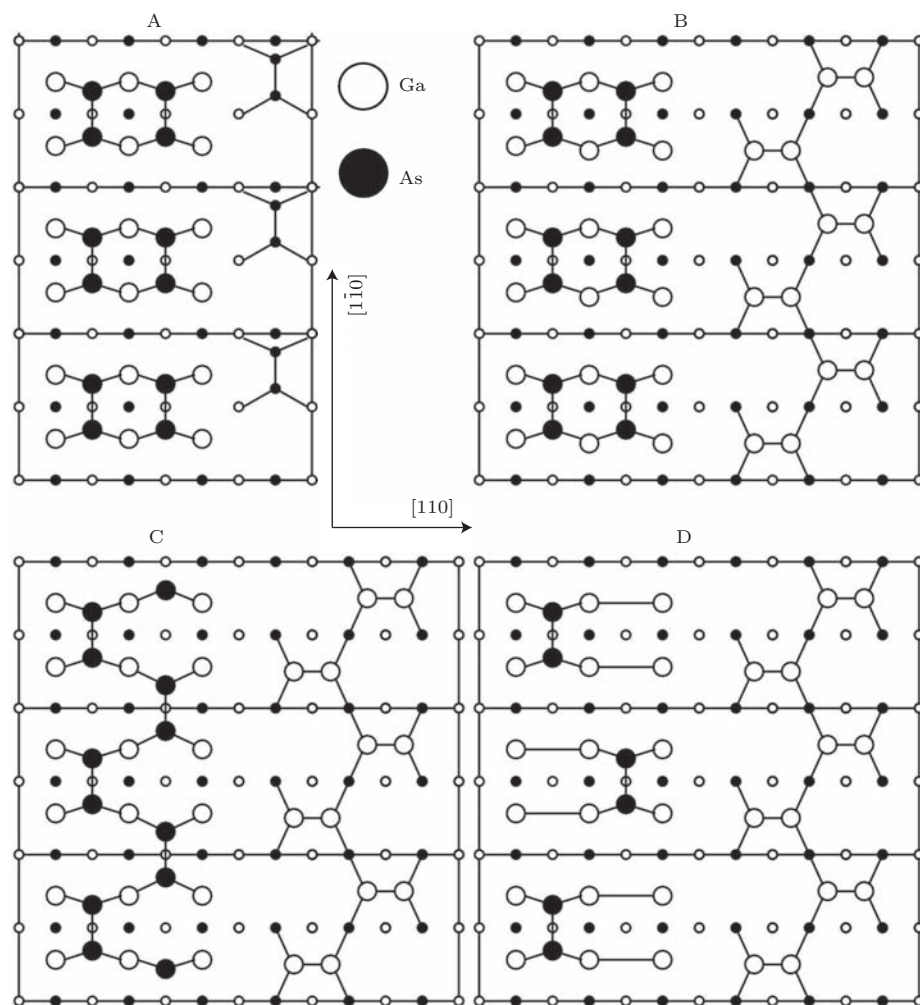


图 6 表面重构模型 A- $\beta 2(2 \times 4)$ , B- $(2 \times 6)$ , C 和 D-锯齿状的 $(2 \times 6)$

Fig. 6. Surface reconstruction mode A- $\beta 2(2 \times 4)$ , B- $(2 \times 6)$ , C and D-Zig-zag  $(2 \times 6)$ .

## 4 结 论

本文通过低 As 压退火处理原子级平坦的 GaAs(001)  $\beta 2(2 \times 4)$  重构表面, 利用 STM 表征不同退火时间的 GaAs(001) 表面形貌与表面重构. 发现其表面形貌经历了从平坦到无序平坦再恢复到平坦的过程, 而表面重构经历了由  $\beta 2(2 \times 4)$  重构逐渐转变为  $(2 \times 6)$  重构, 最后再转变为锯齿状的  $(2 \times 6)$  重构的过程. 表面形貌与表面重构的演变是由于 GaAs(001) 表面 As 保护气压不足所引起的, 整个演变过程中均伴随着表面 As 原子的脱附. 在低 As 压条件下, GaAs(001) 表面逐渐由富 As 的  $\beta 2(2 \times 4)$  平坦重构表面转变为富 Ga 的锯齿状的  $(2 \times 6)$  平坦重构表面, 这表明锯齿状的  $(2 \times 6)$  重构表面在衬底温度为 530 °C, As BEP 为  $1.3 \times 10^{-6}$  Pa 时能稳定的存在, 锯齿状的  $(2 \times 6)$  重构是低 As 压条件下的一个稳定的  $(2 \times 6)$  重构相.

## 参考文献

- [1] Zheng L X, Wu J, Zhang X C, Tu J H, Sun W F, Gao X J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104216 (in Chinese) [郑丽霞, 吴金, 张秀川, 涂君虹, 孙伟锋, 高新江 2014 物理学报 **63** 104216]
- [2] Harikumar K R, McNab I R, Polanyi J C, Zabet-Khosousi A, Hofer W A 2011 *Proc Natl. Acad. Sci.* **108** 950
- [3] Del Alamo J A 2011 *Nature* **79** 317
- [4] Tan S Y, Zhai T, Zhang R K 2015 *Chin. Phys. B* **24** 064211
- [5] Xue Q K, Hashizume T, Sakurai T 1997 *Prog. Surf. Sci.* **56** 1
- [6] Xue Q K, Hashizume T, Sakurai T 1999 *Appl. Surf. Sci.* **141** 244
- [7] Falta J, Tromp R M, Copel M, Pettit G D, Kirchner P D 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 3068
- [8] Bressler-Hill V, Lorke A, Varma S 1994 *Phys. Rev. B* **50** 8479
- [9] Xue Q K, Hashizume T, Sakata T 1996 *Thin solid films* **281** 556
- [10] Biegelsen D K, Bringans R D, Northrup J E, Swartz L E 1990 *Phys. Rev. B* **41** 5701
- [11] Ding Z, Thibado P M, LaBella V P 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 216109
- [12] LaBella V P, Bullock D W, Emery C, Ding Z 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 3065
- [13] LaBella V P, Krause M R, Ding Z, Thibado P M 2005 *Surf. Sci. Repts* **60** 1
- [14] Zhou X, Yang Z R, Luo Z J, He Y Q, He H, Ding Z 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 016109 (in Chinese) [周勋, 杨再荣, 罗子江, 贺业全, 何浩, 丁召 2011 物理学报 **60** 016109]
- [15] LaBella V P, Bullock D W, Ding Z, Emery C, Thibado P M 2000 *J. Vac. Sci. Technol. A* **18** 1526
- [16] Kuball M, Wang D T, Esser N, Cardona M 1995 *Phys. Rev. B* **51** 13880
- [17] Cho A Y 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 2841
- [18] Foxon C T, Joyce B A 1975 *Surf. Sci.* **50** 434

# Effect of low As pressure annealing on the morphology and reconstruction of GaAs (001)\*

Zhou Xun<sup>1)†</sup> Luo Zi-Jiang<sup>2)</sup> Wang Ji-Hong<sup>3)</sup> Guo Xiang<sup>3)</sup> Ding Zhao<sup>3)†</sup>

1) (School of Physics and Electronics Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

2) (School of Education Administration, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550004, China)

3) (College of Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

( Received 6 April 2015; revised manuscript received 13 July 2015 )

## Abstract

In the low As beam equivalent pressure condition, the in-situ annealing treatment is carried out for the previously atomically flat GaAs(001)  $\beta 2(2 \times 4)$  reconstruction surface. Utilizing scanning tunneling microscopy, the surface is found to change its morphology simultaneously with the surface reconstruction during the increase of low As beam equivalent pressure annealing time. The surface morphology undergoes from ordered flat to disordered flat and then gradually returns to the ordered flat state again. The surface reconstruction turns from  $\beta 2(2 \times 4)$  to  $(2 \times 6)$  and then changes to “zig-zag”  $(2 \times 6)$  state. And there is a correlation between the evolution of the surface morphology and surface reconstruction.

**Keywords:** surface morphology, surface reconstruction, pre-roughening,  $(2 \times 6)$  reconstruction

**PACS:** 68.37.Ef, 64.60.-i, 68.35.Ct

**DOI:** 10.7498/aps.64.216803

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61564002), Specialties Doctor Degree Foundation of Ministry of Education of China (Grant No.20105201110003), the 2012 Doctor Foundation of Guizhou Normal University of China, the 2013 Doctor Foundation of Guizhou University of Finance and Economics of China (Grant No. (2013)2114), and the Science-Technology Foundation of Guizhou Province of China (Grant No.(2011) 2095).

† Corresponding author. E-mail: [zhouxun99@163.com](mailto:zhouxun99@163.com); [zding@gzu.edu.cn](mailto:zding@gzu.edu.cn)