

低温下InAs纳米结构在GaAs (001)表面形成机制的研究

王一 丁召 杨晨 罗子江 王继红 李军丽 郭祥

Formation mechanism of InAs nanostructures on GaAs (001) surface at low temperature

Wang Yi Ding Zhao Yang Chen Luo Zi-Jiang Wang Ji-Hong Li Jun-Li Guo Xiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 193601 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210645

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210645>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Al原子在Ni基衬底表面的扩散及团簇的形成

Diffusion of Al atoms and growth of Al nanoparticle clusters on surface of Ni substrate

物理学报. 2020, 69(13): 136601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200120>

纳米结构及浸润性对液滴润湿行为的影响

Effects of base angle and wettability of nanostructures on droplet wetting behaviors

物理学报. 2021, 70(12): 126101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201584>

GaAs (001)图形衬底上InAs量子点的定位生长

Controllable growth of InAs quantum dots on patterned GaAs (001) substrate

物理学报. 2019, 68(11): 117301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190317>

液滴撞击圆柱内表面的数值研究

Numerical study of droplet impact on the inner surface of a cylinder

物理学报. 2018, 67(18): 184701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180364>

气体团簇离子束装置的设计及其在表面平坦化、自组装纳米结构中的应用

Design and application of gas cluster accelerator for surface smoothing and nanostructures formation

物理学报. 2020, 69(9): 093601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191990>

超疏水表面液滴的振动特性及其与液滴体积的关系

Oscillation properties of water droplets on a superhydrophobic surface and their correlations with droplet volume

物理学报. 2021, 70(7): 076801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201771>

低温下 InAs 纳米结构在 GaAs(001) 表面形成机制的研究*

王一¹⁾²⁾ 丁召¹⁾²⁾³⁾ 杨晨¹⁾³⁾ 罗子江⁴⁾
王继红¹⁾ 李军丽²⁾ 郭祥^{1)2)3)†}

1) (贵州大学大数据与信息工程学院, 贵阳 550025)

2) (贵州大学, 半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心, 贵阳 550025)

3) (贵州大学, 贵州省微纳电子与软件技术重点实验室, 贵阳 550025)

4) (贵州财经大学信息学院, 贵阳 550025)

(2021 年 4 月 7 日收到; 2021 年 5 月 19 日收到修改稿)

改变生长工艺、控制并调整液滴中原子扩散机制是对复杂纳米结构制备的关键途径, 并且对基于液滴外延方法研究半导体纳米结构十分重要. 本文在不同衬底温度, 不同 As 压下在 GaAs(001) 上沉积相同沉积量 (5 monolayer) 的 In 液滴并观察其表面形貌的变化. 原子力显微镜图像显示, 液滴晶化后所形成的扩散“盘”且呈现一定的对称性. 随着衬底温度的增高, 圆盘半径逐渐扩大, 扩散圆盘中心出现了坑. 而随着 As 压的增高, 所形成的液滴密度增加, 以液滴为中心所形成的扩散圆盘宽度逐渐减小. 基于经典的成核扩散理论对实验数据拟合得到: GaAs(001) 表面 In 原子在 $[1\bar{1}0]$ 和 $[110]$ 晶向上的扩散激活能分别为 (0.62 ± 0.01) eV 和 (1.37 ± 0.01) eV, 且扩散系数 D_0 为 1.2×10^{-2} cm²/s. 对比其他研究小组的结果证实了理论的正确性. 实验中得到的 In 原子的扩散激活能以及 In 液滴在 GaAs(001) 上扩散机理, 可以为 InAs 纳米结构特性的调制提供实验指导.

关键词: InAs 纳米结构, 表面扩散, 液滴外延

PACS: 36.40.Sx, 68.37.Ps, 81.15.Hi

DOI: 10.7498/aps.70.20210645

1 引言

近年来, 量子点 (quantum dots, QD) 与量子环 (quantum rings, QR) 等低维纳米结构因其独特的电学、光学以及磁学特性已经被广泛运用于光电子、微电子和量子通信等多个领域^[1-3]. 由于这样的纳米结构与原子系统具有相似性, 围绕此类结构体系特征对纳米材料多项量子特性进行灵活调制、制备新型的光电子器件的相关研究已成为热

点^[4,5]. 液滴外延方法作为主要的纳米结构制备方法之一, 其重要特征是通过 III 族液滴的扩散和刻蚀行为的调制, 改变液滴在表面形成的状态, 从而制备出多种多样的基于 III-V 族半导体材料的纳米结构^[6]. 2010 年, Li 等^[7]通过液滴外延法在 GaAs 衬底上沉积 Al 液滴, 改变退火温度和 As 束流研究了孔洞结构的转变过程. 2011 年, Pankaow 等^[8]采用混合液滴外延的方法制备了 InGaAs 量子环, 并研究了 In_{0.5}Ga_{0.5}混合液滴沉积量对所形成的 InGaAs 量子环的形貌的影响. 2011 年, Boonpeng

* 国家自然科学基金 (批准号: 62065003)、贵州省自然科学基金 (批准号: QKH-[2017]1055) 和半导体功率器件可靠性教育部工程研究中心开放项目 (批准号: ERCMEKFJJ2019-(08)) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xguo@gzu.edu.cn

等^[9]采用混合液滴外延的方法,制备出新型的量子结构-环中量子点 (quantum dots in the ring, QDIR). 2013年 Boonpeng 等^[10]制备了 GaAs/AlGaAs 量子点 (环) 结构. 综上所述,改变生长工艺,控制并调整液滴中原子扩散机制是对复杂纳米结构 (量子环) 制备的关键途径,而这也对于液滴外延方法研究半导体纳米结构制备工艺十分重要^[11–19]. 虽然目前有众多研究组采用液滴外延的方式制备了许多 III-V 族纳米结构,但大多数的研究主要集中于对 III 族元素低密度液滴扩散机制研究及其激活能的模拟,关于扩散激活能的模拟数据与实测数据之间仍然存在差异 (扩散激活能测量的准确性将对理解原子扩散过程以及纳米结构的形成产生重大影响),扩散激活能的测量、拟合、计算仍然是一个尚待解决的基础问题. 因此以研究原子表面扩散与纳米结构的关系及其解释,仍然是一个可以为先进纳米电子器件和纳米光子器件做出贡献的课题.

本文采用液滴外延法在不同衬底温度,不同 As 压下在 GaAs(001) 上沉积了 5 monolayer (ML) 的 In,从纳米液滴的形貌演化和 In 原子的表面扩散等方面解释了其纳米结构形成机理. 利用经典的成核理论和扩散理论,讨论了液滴在 GaAs(001) 表面的形成机理. 同时,实验的结果也验证了 In 在 GaAs(001) 表面扩散时的扩散激活能的计算结果.

2 实验

本实验所有样品制备均在 Omicron 公司制造的超高真空分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 系统中完成,实验过程中生长室真空度保持为 1.6×10^{-8} — 4.0×10^{-7} Pa,衬底采用可直接外延的 n^+ GaAs(001) 单晶片,掺硫 (S) 杂质浓度为 1.0×10^{17} — 3.0×10^{18} cm^{-3} . GaAs 衬底在 580 °C 完成脱氧. 在 560 °C 的衬底温度条件下,以 0.3 ML/s 生长速率同质外延 1000 nm 的 GaAs 缓冲层. 实验分别为两组:第一组样品在这样的衬底下分别采用在衬底温度 (140, 160, 170 和 180 °C),以 0.15 ML/s 的速率沉积 5 ML 的 In 金属液滴后,在相同的 As 压下 (3.3 ML/s) 晶化完成后立即淬火;第二组样品在相同衬底温度 (160 °C) 下采用不同的 As 压 (1.6 ML/s, 3.3 ML/s, 4.6 ML/s) 下对沉积的 5 ML In 液滴进行晶化. 最后,样品在零 As 压下淬火至室温后取出,送往原子力显微镜 (atomic force

microscopy, AFM) 进行扫描,获得不同退火时间下的 In 在 GaAs 表面扩散形成的表面形貌.

3 实验结果与讨论

图 1 显示了相同 As 压下 (3.3 ML/s) 下,不同衬底温度 (140, 160, 170 和 180 °C) 下晶化后 In 液滴在 GaAs 衬底表面的 AFM 形貌图. 事实上,围绕着内环的盘状结构是由于 In 的迁移而形成的,当从液滴中扩散出来的 In 原子和来自于 As 气氛提供的 As 原子在衬底表面相遇时,会形成一个新的 In-As 键,从而降低了进一步迁移的可能性,这一过程导致了 InAs 材料在液滴外 In 扩散范围内的积累. 从图 1 中可以看出,在不同衬底温度下,液滴晶化后所形成的扩散“盘”呈现一定的对称性. 选取单个 In 液滴晶化后表面的圆盘 (如图 1(b)—(d)) 进行分析发现随着衬底温度的增高,圆盘半径逐渐扩大;随着扩散过程的持续进行,扩散圆盘中心出现了坑,这是由于少量的 In 原子向下扩散刻蚀导致. 对于中心存在塌陷的液滴,In 液滴中心分裂成了 2—3 个小液滴 (图 1(d)),这可能是由于衬底温度过低,In 原子所获得的能量不足以继续向下刻蚀,As 气氛提供的原子 As 又阻碍了 In 原子的向外扩散,使得液滴内部的 In 原子被“困”在液滴内部直到与 As 原子结合形成 InAs 纳米结构.

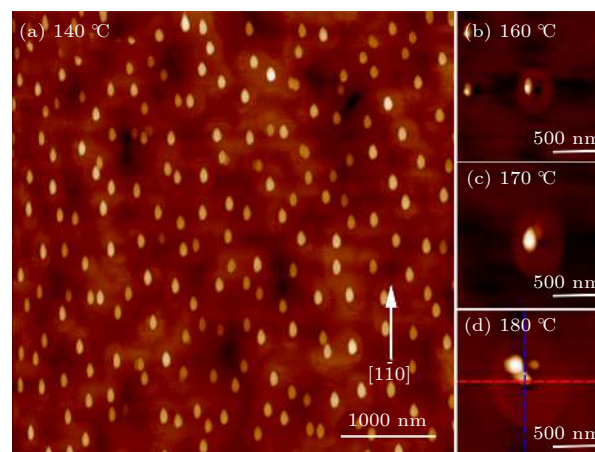


图 1 不同衬底温度 (140, 160, 170 和 180 °C) 下 InAs 纳米结构 AFM 扫描图
Fig. 1. AFM images of InAs nanostructures at different substrate temperatures (140, 160, 170 and 180 °C).

针对 In 液滴在 180 °C 所形成的量子环盘结构 (quantum ring-disk, DR-D) 进行剖面线分析,如图 2(a) 和图 2(b) 所示. 从图 2 可以发现,扩散

圆盘在不同的晶向上的半径略有差异,这是由于 In 原子在 GaAs 表面具有扩散各向异性,使得液滴更倾向 $[1\bar{1}0]$ 分裂,从而导致其方向上液滴宽度更大,如图 2(b) 所示. 由于衬底温度提供给 In 原子的能量较低,因此 In 原子虽然向下刻蚀,但是刻蚀的深度浅,在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 时中心形成了一个约 3 nm 的坑.

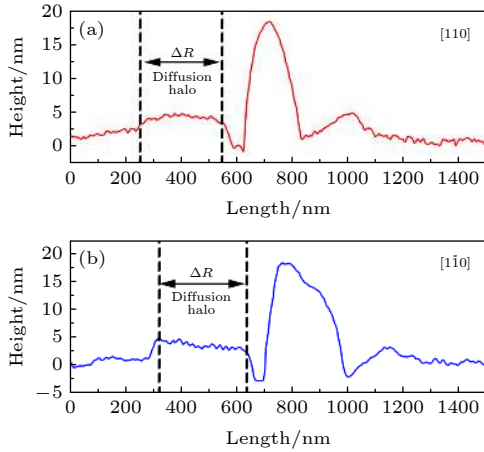


图 2 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 下 $[110]$ (a) 和 $[1\bar{1}0]$ (b) 方向上 InAs 纳米结构 AFM 剖面线图

Fig. 2. AFM profiles of InAs nanostructure at $180\text{ }^\circ\text{C}$ along the $[011]$ (a) and $[1\bar{1}0]$ (b) directions with labels indicating the regions that constitute the InAs diffusion halo.

由于实验温度均低于 $200\text{ }^\circ\text{C}$,可以忽略许多其他热力学效应(例如 Ostwald 熟化)对原子扩散的影响. 因此 In 原子所走过的有效距离应该是从液滴边缘计算出来的,为了直观地理解,定义 ΔR 为圆环中心圆坑边沿至圆环边缘之间的距离(需要指出的是,由于无论在 $[1\bar{1}0]$ 方向还是 $[110]$ 方向上均存在并未垮塌的液滴,这将阻碍原子的扩散,因此实际原子可以扩散达到的距离应该为液滴对侧的扩散盘距离,如图 2 所示),其可以表示为^[20]

$$\Delta R = \sqrt{D_{\text{In}}\tau}, \quad (1)$$

其中 D_{In} 为 In 的扩散系数,可以进一步表示为

$$D_{\text{In}} = D_0 \exp(-E_{\text{In}}/kT). \quad (2)$$

式中, D_0 为扩散系数 (cm^2/s); E_{In} 为扩散激活能 (eV); k 为玻尔兹曼常数 (eV/K); T 为液滴沉积温度 (K). 而 As 解吸时间 τ 与温度无关且成反比^[21],即 $\tau \equiv 1/J_{\text{As}}$, J_{As} 为归一化 As 通量 (ML/s). 联立 (1) 式和 (2) 式,并根据经典扩散理论,可得到 In 扩散率对温度和 As 压力的函数关系为

$$\Delta R = \sqrt{D_0 \exp(-E_{\text{In}}/kT) \frac{1}{J_{\text{As}}}}. \quad (3)$$

采用 (3) 式,结合实验数据可以拟合出所需要的参数. 图 3 显示了我们的数据与 (3) 式的指数拟合,实验数据和拟合出的曲线具有良好的贴合性. 正如所期望的那样,随着温度的升高 In 原子扩散能力也随之增加. 由于 In 原子在 $[1\bar{1}0]$ 方向上具有更小的扩散激活能, $[110]$ 与 $[1\bar{1}0]$ 晶向 In 原子的扩散各向异性导致的 ΔR 扩散距离存在差距,因此 In 原子在 $[1\bar{1}0]$ 晶向具有更长的扩散距离. 通过拟合结果可以获得 In 在低温下 ($T < 200\text{ }^\circ\text{C}$) 的在 $[110]$ 与 $[1\bar{1}0]$ 晶向上的扩散激活能 E_{In} 分别为 1.379 eV 和 0.625 eV . 观察图 3 中曲线可以发现,扩散各向异性随着温度的降低而弱化,当低于 $140\text{ }^\circ\text{C}$ 时 In 在两个方向上的扩散距离差距逐步缩小. 此外,随着温度的提升扩散长度将越来越大以至于实验系统中的 As 压不足以使 In 原子晶化,In 扩散形成金属层.

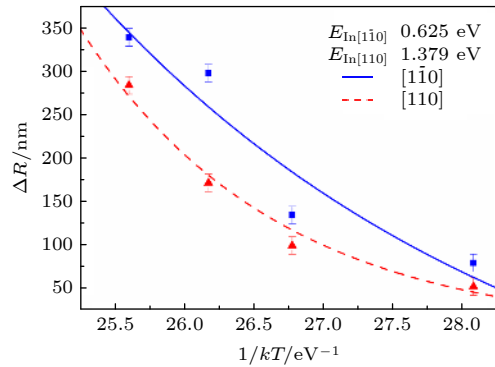


图 3 扩散长度 (ΔR) 随液滴沉积温度演变函数关系图
Fig. 3. Evolution of diffusion length (ΔR) as a function of droplet deposition temperature.

自 2014 年以来,有研究组探索了液滴外延作为提取扩散参数的方法. 表 1 是本文实验与其他研究组通过其他方式测算出的 In 扩散激活能对比表. 从表 1 中可以看出,实验结果在 $[1\bar{1}0]$ 方向拟合结果与 Rosini 等^[22] 和 Margaret 等^[23] 的理论与实验结果均接近,验证了实验结果的可靠性. 对比 Rosini 等和 Margaret 等的结果,我们求出 In 原子在的 $[110]$ 方向激活能偏大,是由于理论计算中忽略了表面 In 原子向下扩散刻蚀以及垮塌 In 液滴对 In 原子扩散的阻碍. 然而我们求出的扩散激活能对比 Takeshi 等^[24] 值稍大,这可能是由于 Takeshi 等在所在的实验条件温度更高,In 原子在高的温度下扩散系数更大以及扩散过程中的熟化效应导致的.

表 1 本文得到的 E_{in} 值与文献的比较
Table 1. Comparison of the E_{in} values obtained in this paper with the literatures.

References	Material system	E_{in}/eV	Method
Takeshi等 ^[24]	InAs/GaAs	[110]: 0.34 [1 $\bar{1}$ 0]: 0.21	Droplet epitaxy
Margaret等 ^[23]	InAs/InGaAs/InP	[110]: 0.686 ± 0.04 [1 $\bar{1}$ 0]: 0.546 ± 0.03	Droplet epitaxy
Rosini等 ^[22]	InAs/InGaAs/GaAs	[110]: 0.8–1.0 [1 $\bar{1}$ 0]: 0.4–0.9	Simulation: KMC and DFT
Our work	InAs/GaAs	[110]: 1.37 ± 0.01 [1 $\bar{1}$ 0]: 0.62 ± 0.01	Droplet epitaxy

为了探索盘微观形貌对温度的依赖性, 使用 AFM 来分析扩散盘的高度曲线和 3D 形貌, 如图 4(a)–(c) 所示. 图 4 中的纳米结构 3D 形貌显示, 由于 In 原子的能量较低, 在液滴中心形成了深度很浅小孔, 晶化之后中心的液滴仍然存在 (图 4(a)). 但是, 中心液滴随着衬底温度升高逐渐坍塌, 呈现先坍塌后从单个液滴逐步“分裂”成多个小液滴的扩散态势. 这是由于衬底温度较低和 As 晶化导致尺寸更大的液滴内部的 In 原子来不及向远处扩散

而又不具备足够的能量向下刻蚀, 此时大液滴由于 In 原子的流失不足以支撑, 因此致使大液滴坍塌并分裂成了小液滴, 小液滴受到 As 晶化从而形成了“连绵山脉”似的分裂的 InAs 纳米结构, 如图 4(c) 所示.

从图 4(d)–(f) 中的液滴扩散圆盘的剖面线图比较中可以看见, 随着温度的提升, 圆环中心圆坑边沿至圆环边缘之间距离 (即 ΔR) 的值由 160 °C 的 135 nm 增长到 180 °C 的 339 nm. 不仅如此, ΔR 越大的扩散圆盘其高度也更高, 并且在扩散圆盘的表面随着温度的增加, 呈现出规律性的起伏, 这证明扩散圆盘上可能形成了其他的纳米结构. 从图 4(f) 可以看到, 在衬底温度达到 180 °C 时平台高度达到 6–8 nm, 此时扩散圆盘上开始产生规律性的起伏, 起伏高度约为 1 nm 左右, 可以看出此时在圆盘上由于 QD 的形成而产生表面的粗糙化, 圆盘的表面可能已经开始产生 InAs QD (见图 4(f) 中红色虚线圈).

分析 (3) 式可以知道, 衬底温度和 As 压 (J_{As}) 对 In 液滴内的 In 原子扩散有显著的影响. 因此在相同衬底温度 (160 °C) 下采用不同的 As 压 (1.6, 3.3 和 4.6 ML/s) 下对沉积的 5 ML In 液滴进行晶化. 将样品淬火后进行 AFM 扫描, 结果如图 5 所示. 随着 As 压的增高, 以液滴为中心所形成的扩散圆盘宽度逐渐减小, 甚至消失 (如图 5(d) 所示). 正如预期的那样, 发现随着温度的升高 In 原子扩散率增加, 而随着 As 压力的增加 In 原子扩散率降低. 针对图 5(a) 和图 5(c) 中的纳米结构形貌做剖面线分析, 可以发现由于 As 压的明显增大, 使得 In 液滴内的原子来不及向外扩散就被 As 原子晶化 (即结合形成 In-As 键), 因此围绕 In 液滴中心向外扩散所形成的同心圆盘高度很低, 而 In 液滴则几乎没有坍塌, 如图 5(d) 中的黑色液滴剖面线所示.

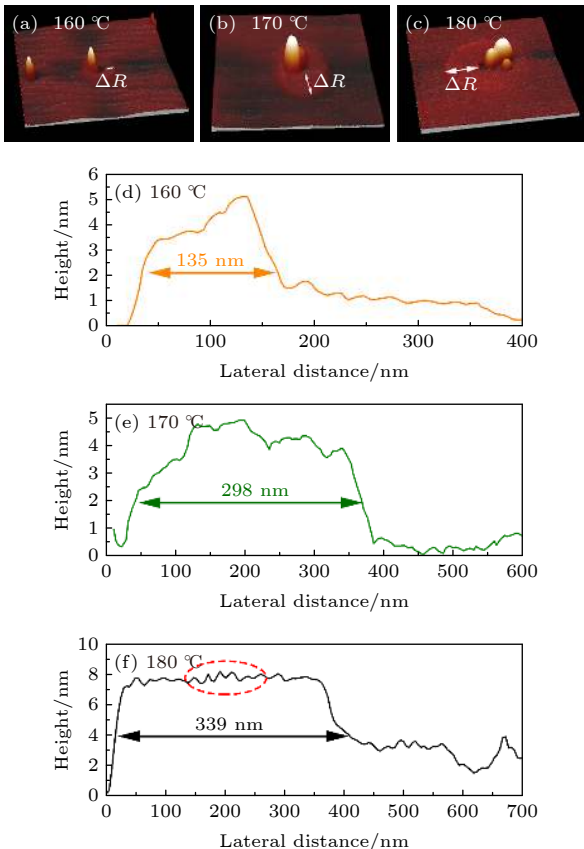


图 4 不同衬底温度 ((a), (d) 160 °C; (b), (e) 170 °C; (c), (f) 180 °C) InAs 纳米结构 3D 形貌及其扩散盘 (ΔR) 剖面线图
Fig. 4. 3D morphology of InAs nanostructures and the profile line of their diffusion disk ΔR at different substrate temperatures ((a), (d) 160 °C; (b), (e) 170 °C; (c), (f) 180 °C).

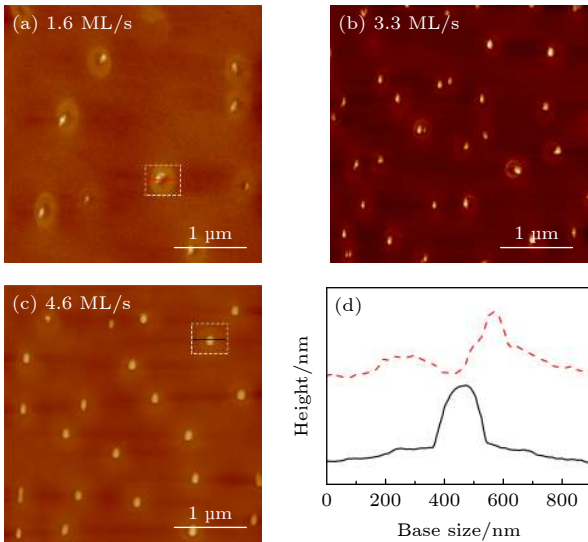


图5 (a)–(c) 不同 As 压力下 InAs 纳米结构 $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ AFM 扫描图; (d) 高砷压 (黑色实线) 与低砷压 (红色虚线) 下 InAs 纳米结构 AFM 剖面线图

Fig. 5. (a)–(c) InAs nanostructure $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ AFM scan under different As pressure; (d) AFM profiles of InAs nanostructures at high arsenic pressure (black solid line) and low arsenic pressure (red dashed line).

根据前文分析, 由于低温下 ($< 160\ \text{C}$) 扩散各向异性较弱, 因此对 In 在此温度下扩散各向异性可以忽略不计. 对图 5(a)–(c) 中的 ΔR 进行统计, 可以得到在不同 As 压 (1.6, 3.3 和 4.6 ML/s) 下 In 液滴内部 In 原子的平均扩散距离 ($\overline{\Delta R}$) 分别为 (197, 135 和 113 nm). 将测量得到的 $\overline{\Delta R}$ 结合 (3) 式, 可以进一步得到 As 压与 In 原子平均扩散距离之间的关系, 将其拟合成图 6 所示. 拟合得到的 In 液滴平均扩散激活能 E_{In} 为 0.63 eV, 且平均扩散系数 D_0 为 $1.2 \times 10^{-2}\ \text{cm}^2/\text{s}$.

计算结果 E_{In} 与之前针对衬底温度的拟合结果一致, 且在 Rosini 等 [22] 的研究结论范围内, 进一步证明了结果的准确性. 从图 6 中拟合结果可以发现, 随着 As 压的不断增大, $\overline{\Delta R}$ 曲线愈发平缓, 这显示 In 原子扩散距离 ΔR 的受到 As 压力的影响将越来越小, 作者认为这主要有几个方面的原因: 一方面 As 限制 In 原子的扩散, 但是 As 在液滴周围表面的吸附改变了表面状态, 并通过毛细作用力为 In 扩散出液滴提供了驱动力, 这样使得 As 晶化过程中 In 原子仍然有几率逃脱 As 原子的捕捉; 另一方面, 由于 As 原子从源中喷射出到衬底表面需要有一定的时间, 而 In 扩散速率很快, 这也可能会导致 In 原子的扩散. 从曲线的变化趋势

可以预计, 随着 As 压力的进一步增加, $\overline{\Delta R}$ 将逐渐趋于平稳达到一个稳定值, 此时 In 液滴内 In 原子向外扩散将更主要受到衬底温度的影响, 即向外扩散的原子数量将减少但是扩散距离不再受到 As 压力的影响.

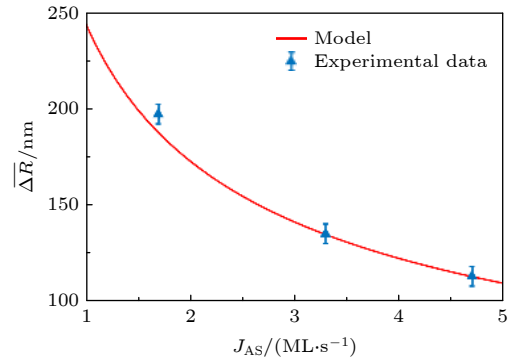


图6 $\overline{\Delta R}$ 随 As 压变化函数图

Fig. 6. Plot of $\overline{\Delta R}$ as a function of As pressure.

4 结论

综上所述, 本文讨论了不同衬底温度, 不同 As 压下在 GaAs(001) 上沉积了相同沉积量 (5 ML) In 的表面形貌. AFM 图像显示, 无论在何种温度下, 液滴晶化形成的扩散“盘”均呈现一定的对称性. 对 InAs 纳米结构尺寸分析发现, 随着衬底温度的增高, 圆盘半径逐渐扩大, 扩散圆盘中心出现了坑. 但随着 As 压的增高, 所形成的液滴密度增加, 以液滴为中心所形成的扩散圆盘宽度逐渐减小. 根据经典的成核扩散理论, 对实验数据拟合得到 GaAs(001) 表面 In 原子在 $[1\bar{1}0]$ 晶向上的扩散激活能为 $(0.62 \pm 0.01)\ \text{eV}$, 在 $[110]$ 晶向上的扩散激活能为 $(1.37 \pm 0.01)\ \text{eV}$ 且平均扩散系数 D_0 为 $1.2 \times 10^{-2}\ \text{cm}^2/\text{s}$, 对比其他研究组的结果证实了理论的正确性. 此外, 总结并获得 InAs 纳米结构中扩散盘的形成机制, 从曲线的变化趋势可以预计, 随着 As 压力的进一步增加, ΔR 将逐渐趋于平稳达到一个稳定值. 实验中得到的 In 原子的扩散激活能以及 In 液滴在 GaAs(001) 上扩散机理, 可以为 InAs 纳米结构特性的调制提供实验指导.

参考文献

- [1] Massimo G, Zhiming W, Armando R, Takashi K, Stefano S 2019 *Nat. Mater.* **5** 799
- [2] Francesco B B, Sergio B, Marcus R, Luca E, Alexey F, Daniel H, Armando R, Emiliano B, Rinaldo T, Stefano S 2018 *Nano*

Lett. **18** 505

- [3] Zocher M, Heyn C, Hansen W 2019 *J. Cryst. Growth* **512** 219
- [4] Sergey V B, Maxim S S, Mikhail M E, Boris G K, Oleg A A 2019 *Nanotechnology* **30** 505601
- [5] Ying Y, Hancheng Z, Jiawei Y, Lin L, Jin L, Siyuan Y 2019 *Nanotechnology* **30** 485001
- [6] Jong S K, Im S H, Sang J L, Jin D S 2018 *J. Korean Phys. Soc.* **73** 190
- [7] Li A Z, Wang Z M, Wu J, Salamo G J 2010 *Nano Res.* **3** 490
- [8] Pankaow N, Thainoi S, Panyakeow S, Ratanathamphan S 2011 *J. Cryst. Growth.* **323** 282
- [9] Boonpeng P, Jevasuwan W, Nuntawong N, Thainoi S, Panyakeow S, Ratanathamphan S 2011 *J. Cryst. Growth* **323** 271
- [10] Boonpeng P, Kiravittaya S, Thainoi S, Panyakeow S, Ratanathamphan S 2013 *J. Cryst. Growth* **378** 435
- [11] Pankaow N, Prongjit P, Thainoi S, Panyakeow S, Ratanathamphan S 2013 *Microelectron. Eng.* **110** 298
- [12] Biccari F, Bietti S, Cavigli L, Vinattieri A, Nötzel R, Gurioli M 2016 *J. Appl. Phys.* **120** 134312
- [13] Nataliya L S, Maxim A V, Alla G N, Igor G N 2018 *Comput. Mater. Sci.* **141** 91
- [14] David F, Kamal A, Benito A, Yolanda G, Luisa G 2016 *J. Cryst. Growth* **434** 81
- [15] Noda T, Jo M, Mano T, Kawazu T, Sakaki H 2013 *J. Cryst. Growth* **378** 529
- [16] Jong S K 2017 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **57** 70
- [17] Spirina A A, Shwartz N L 2019 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **100** 319
- [18] Chawner J M A, Chang Y, Hodgson P D, Hayne M, Robson A J, Sanchez A M, Zhuang Q 2019 *Semicond. Sci. Technol.* **34** 9
- [19] Zhao C J 2018 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **18** 7617
- [20] Bietti S, Somaschini C, Esposito L, Fedorov A, Sanguinetti S 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 114311
- [21] Somaschini C, Bietti S, Koguchi N, Sanguinetti S 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 203109
- [22] Takeshi N, Takaaki M, Hiroyuki S 2011 *Cryst. Growth. Des.* **11** 726
- [23] Rosini M, Righi M C, Kratzer P, Magri R 2009 *Phys. Rev. B* **79** 075302
- [24] Margaret A S, Stephanie T, Sergey M, Thomas EV, Michael KY 2017 *J. Appl. Phys.* **121** 195302

Formation mechanism of InAs nanostructures on GaAs (001) surface at low temperature*

Wang Yi¹⁾²⁾ Ding Zhao¹⁾²⁾³⁾ Yang Chen¹⁾³⁾ Luo Zi-Jiang⁴⁾
Wang Ji-Hong¹⁾ Li Jun-Li²⁾ Guo Xiang^{1)2)3)†}

1) (*College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

2) (*Power Semiconductor Device Reliability Research Center of the Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

3) (*Key Laboratory of Micro-Nano-Electronics of Guizhou Province, Guizhou University, Guiyang 550025, China*)

4) (*School of Information, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China*)

(Received 7 April 2021; revised manuscript received 19 May 2021)

Abstract

In recent years, low-dimensional nanostructures such as quantum dots (QD) and quantum rings (QR) have been widely used in many fields such as optoelectronics, microelectronics and quantum communication due to their unique electrical, optical and magnetic properties. Owing to the similarity between nanostructures and atomic systems, the flexible modulation of several quantum properties of nanomaterials and the preparation of new optoelectronic devices around the characteristics of these structural systems have become a hot topic of research. Changing the growth process to control and tune the atomic diffusion mechanism in droplets is a key way of preparing complex nanostructures, which is important for the study of semiconductor nanostructure by droplet epitaxy. In the present experiment, the same amount (5 monolayer (5 ML)) of indium is deposited on GaAs (001) at different substrate temperatures (140, 160, 170 and 180 °C) and different arsenic pressures (1.6, 3.3 and 4.6 ML/s), and the surface morphology evolutions are observed. As the substrate temperature increases, the radius of the disk gradually expands and a pit appears in the center of the diffusion disk. As the arsenic pressure increases, the density of the formed droplets increases, and the width of the diffusion disk formed in the center of the droplets gradually decreases. Our work involving nucleation theory is done at $T < 200$ °C to deactivate many thermal processes. This is a result of the diffusion coefficient being more complexly related to temperature. Based on the classical nucleation diffusion theory, the results of experimental data fitting include that the diffusion activation energies of In atoms on the surface of GaAs (001) are (0.62 ± 0.01) eV in $[1\bar{1}0]$ and (1.37 ± 0.01) eV in $[110]$ respectively, and that the diffusion coefficient D_0 is 1.2×10^{-2} cm²/s; those results confirm the theory after having been compared with the results obtained by other research groups. The diffusion activation energy of indium atoms and the diffusion mechanism of indium droplets on GaAs (001) obtained from the experiment can provide experimental guidance for modulating the structural property of InAs nanostructures.

Keywords: InAs nanostructures, surface diffusion, droplet epitaxy

PACS: 36.40.Sx, 68.37.Ps, 81.15.Hi

DOI: 10.7498/aps.70.20210645

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62065003), the Guizhou Provincial Natural Science Foundation of China (Grant No. QKH-[2017]1055), and the Open Project of Reliability Research Center for Semiconductor Power Devices, Ministry of Education, China (Grant No. ERCMEKFJJ2019-(08)).

† Corresponding author. E-mail: xguo@gzu.edu.cn