

УДК 532.64

ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ЭФФЕКТЫ СМАЧИВАНИЯ ПРИ РОСТЕ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ ПО МЕХАНИЗМУ ПАР→ЖИДКОСТЬ→КРИСТАЛЛ

© 2024 г. В. А. Небольсин*, В. А. Юрьев, А. С. Самофалова

Воронежский государственный технический университет,
ул. 20-летия Октября, 84, Воронеж, 394026 Россия

*e-mail: vcmsao13@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2024 г.

После доработки 22.05.2024 г.

Принята к публикации 22.05.2024 г.

Представлены модели возникновения гистерезисных эффектов на периметре смачивания жидкофазной капли металла-катализатора, связанных с влиянием кромки торцевой (вершинной) грани нитевидных нанокристаллов (ННК) и линейного натяжения границы трехфазного контакта на краевые углы. Показано, что гистерезис краевого угла капли каталитической жидкости на торце растущего по механизму пар→жидкость→кристалл ННК обусловлен ее индифферентным равновесием на периметре смачивания. Сделан вывод о двойственной, не строго равновесной природе гистерезисного краевого угла при смачивании капель катализатора кристаллической поверхности ННК.

Ключевые слова: нитевидные нанокристаллы, рост, катализатор, угол смачивания, двойственная природа, гистерезис, трехфазная система

DOI: 10.31857/S0002337X24060152, EDN: MRKQKE

ВВЕДЕНИЕ

При выращивании нитевидных нанокристаллов (ННК) методом пар→жидкость→кристалл (ПЖК) на вершине кристалла присутствует капля катализатора в виде усеченной в основании сферы [1]. Наряду с поверхностной энергией параметром, характеризующим каплю жидкости на вершине ННК, является контактный угол θ . Угол θ выступает в роли ключевого параметра, характеризующего мениск жидкой фазы, и определяется между касательной к поверхности капли и торцевой сингулярной гранью ННК в точке на линии сопряжения трех фаз [2, 3]. От величины и стабильности контактного угла зависят радиус и форма поперечного сечения кристалла, скорость роста ННК, форма фронта кристаллизации, ориентация (обычно $\langle 111 \rangle$ для ННК Si и Ge), полярность граней (111)A или $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})B$ в ННК GaAs, GaP, InAs и др. [1–4]. Совсем недавно было обнаружено, что от величины угла θ зависит тип формируемой кристаллической фазы нанопроволок $A^{III}B^V$ [5–8]. Кроме того, мониторинг роста ННК *in situ* показывает, что образование внутренних наклонных плотноупакованных граней (усечение) на фронте кристаллизации (ФК) под каплей возникает при больших контактных углах ННК и отсутствует при малых углах [9].

Однако именно с контактным углом капли катализатора в литературе по росту ННК связаны наибольшие недопонимание и путаница [3, 10]. Данная ситуация не может быть приемлемой и определяется тем, что в процессе роста ННК величина угла θ отличается от краевого угла θ_0 , определяемого соотношением величин удельной свободной поверхностной энергии (УСПЭ) на границах раздела трех фаз [11]. Проявление гистерезиса краевого угла не позволяет обеспечить воспроизводимый и управляемый рост ННК. Из-за наличия гистерезиса не удастся устойчиво выращивать ННК соединений $A^{III}B^V$ через жидкие капли одного из компонентов [3]. Без учета гистерезиса нельзя правильно интерпретировать результаты экспериментов по выращиванию ННК и управлять ростом в желаемом направлении.

Цель настоящей работы — детальное рассмотрение и анализ факторов, приводящих к гистерезису краевого угла.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

ННК Si, Ge и Si_xGe_{1-x} выращивали по методике [1, 2] на Si(111)-подложках методами химического парового осаждения (ХПО) при температурах 773–1373 К с использованием частиц Au, Ni, Pt,

Cu, Ga, Cu, Sn, Al, In и двойных сплавов AuAl, AuGa в качестве катализатора процесса роста. Диаметр частиц составлял от 30 нм до 20 мкм. Применялись химические системы $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$ и $\text{GeCl}_4 + \text{H}_2$. Используемый для выращивания ННК кремния H_2 имел точку росы 215 К. ННК GaP выращивали методом химических газотранспортных реакций при 1100–1200 К. Максимальная температура в зоне источника составляла 1300–1480 К. Подложками служили пластины GaP ориентации $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ В, катализаторами – частицы Ga, Cu, Sn и In. Для анализа также использовали результаты работ [9, 12]. ННК β -SiC выращивали методом ХПО на графитовых подложках из жидкостных источников, содержащих SiCl_4 и CH_3SiCl_3 . Катализаторами процесса роста были частицы Cu, Mn, Fe и Ni. Температура процесса выращивания составляла 1473–1873 К. Выращенные ННК исследовались методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Для металлографических исследований изготавливались шлифы ННК [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдения за ростом ННК Si, Ge, $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$, GaP, β -SiC показывают следующее. Капля М(металла)-катализатора на вершине ННК представляет собой усеченный шаровой сегмент практически идеальной сферической формы (рис. 1). ФК ННК, как правило, представлен кристаллографической гранью семейства $\{111\}$ или $\{0001\}$ под каплей. Капли катализаторов М–Si, М–Ge и М–Si–Ge, М–Ga–P, М–Si–C и др. на вершинах ННК Si, Ge и $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$, GaP, β -SiC, имеющих круглое поперечное сечение, не опускаются на боковую поверхность кристаллов, а смачивают вершинную грань $\{111\}$

для ННК Si, Ge и $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$, $\{\bar{1}\bar{1}\bar{1}\}$ В для ННК GaP или $\{0001\}$ для кристаллов β -SiC, расположенную перпендикулярно оси кристалла. Поперечная сингулярная грань примыкает к округлой трехфазной линии (ТЛ) на периметре смачивания капли, расположенном по кромке кристалла, а в стационарных условиях вырастают ННК постоянного диаметра. При этом для ННК Si, выращенных в системе Au–Si с малыми углами контакта $\theta < 100^\circ$, установлено, что кольцевая кромка (ребро) кристалла на вершине представляет собой излом с атомарно-резким углом между поперечной гранью $\{111\}$ и боковыми стенками.

На подложке Si(111) краевой угол смачиваемости твердой поверхности каплями Au составляет $\sim 25^\circ$ для диапазона температур 950–1100°C и $\sim 45^\circ$ для температур 500–650°C. При этом величина контактного угла капли на вершинной грани ННК Si, Ge, $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$, GaP и SiC всегда превышает 90° и обычно составляет 100° – 150° (рис. 1). По наблюдениям установлено, что с уменьшением диаметра нанокристалла контактный угол увеличивается (рис. 1б). У кристаллов, выращенных в системах AuAl–Si, AuGa–Si, Au–Ge и др., т.е. при больших углах контакта $\theta \sim 125^\circ$ – 150° , ФК вблизи ТЛ искривляется [9]. В этом случае вместо излома на торце кристалла наблюдается плавный переход от торцевой поперечной грани к боковой поверхности ННК.

По мере подъема капли от подложки до участка цилиндрического роста ННК контактный угол θ увеличивается от значения равновесного краевого угла $\theta = \theta_0 < 90^\circ$ до $\theta > 90^\circ$ и далее сохраняется практически постоянным (рис. 2а). Однако при резком понижении и затем повышении темпера-

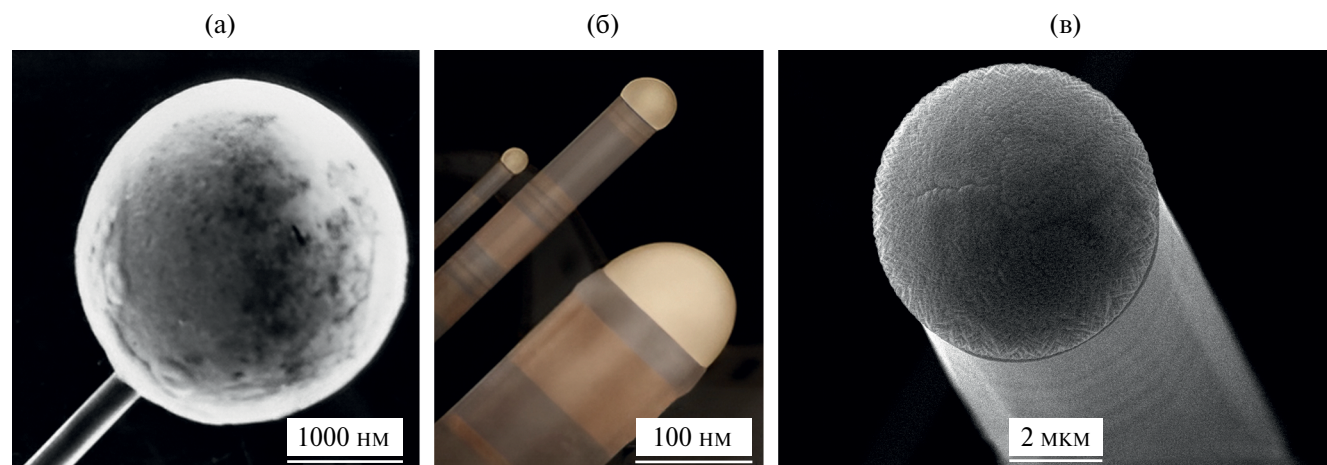


Рис. 1. РЭМ-изображения вершин ННК SiC (а), GaAs [14] (б) и Si (в), иллюстрирующие практически идеальную форму усеченной сферы капель катализатора.

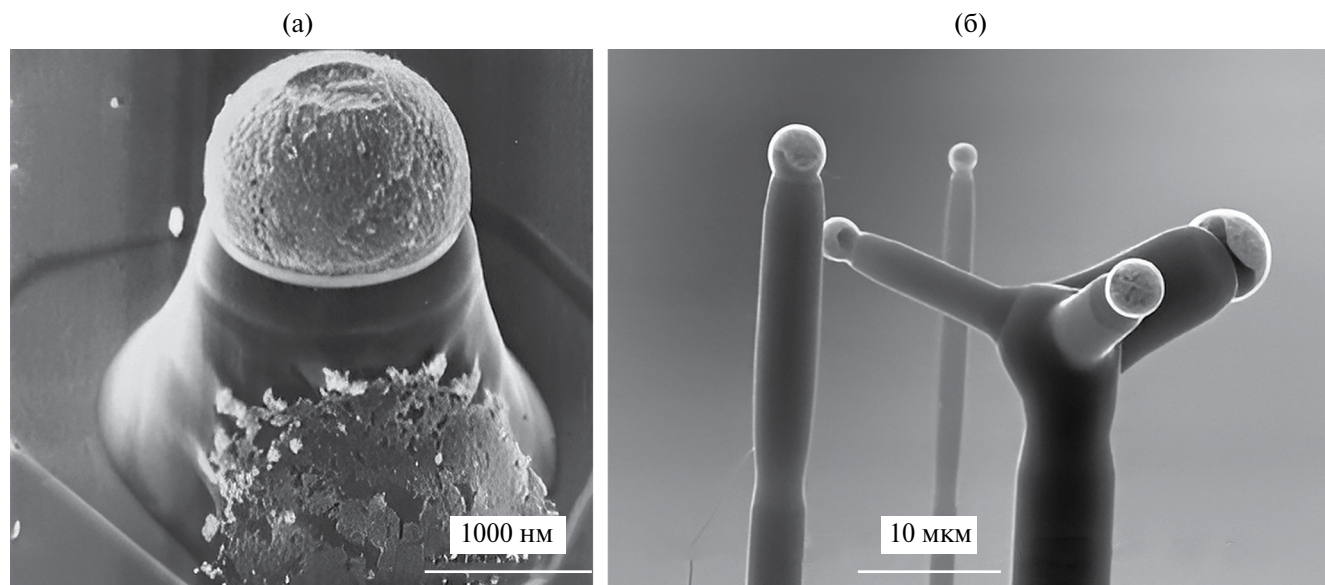


Рис. 2. Образование “пьедестала” ННК Si в системе Au—Si (а); скачкообразное изменение диаметра ННК (слева) и разрыв капли (справа) при резком изменении температуры в процессе роста ННК $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ (б).

туры примерно на 10–100 К происходит скачкообразное изменение диаметра ННК и даже разрыв капли на отдельные фрагменты, катализирующие впоследствии самостоятельный рост кристаллов (рис. 2б).

При наличии поперечного градиента температуры кристаллы изгибаются в сторону зоны реак-

тора с более высокой температурой (рис. 3а). В отсутствие роста ННК (при отжиге) и достаточном боковом градиенте температуры капля катализатора сползает на боковую поверхность ННК также в сторону с более высокой температурой (рис. 3б).

В отличие от идеальной протяженной поверхности твердого тела, для которой существует един-

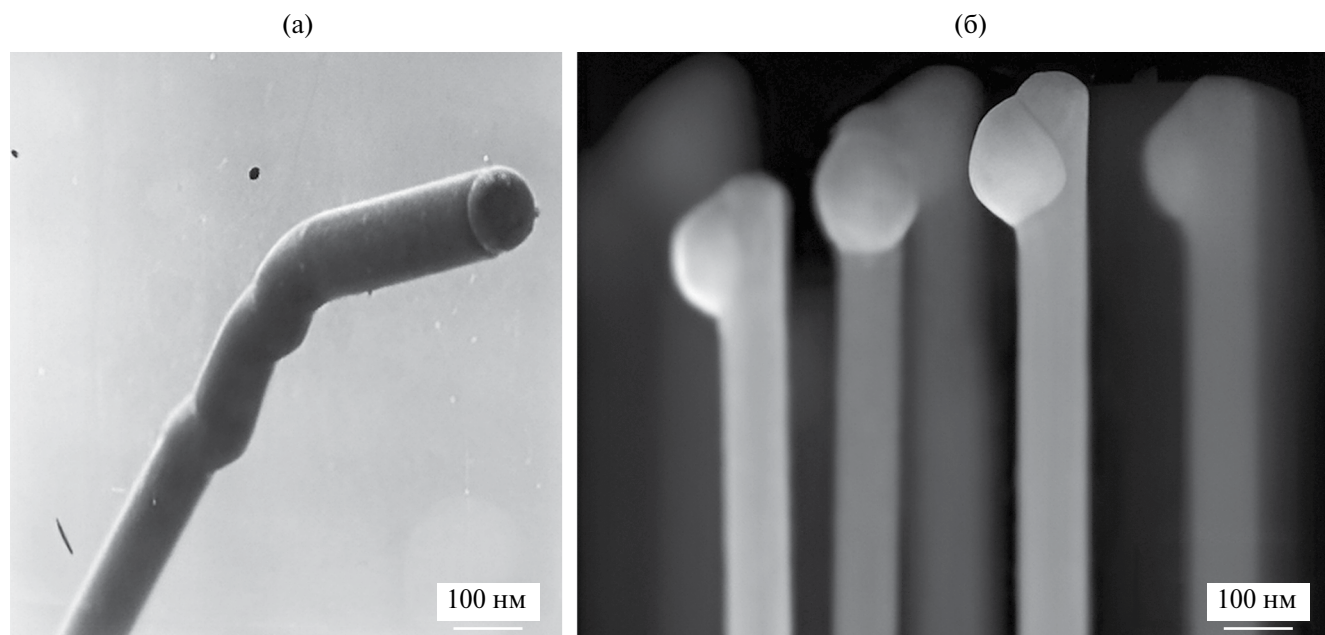


Рис. 3. Изгибание ННК Si в сторону более горячей зоны реактора при росте в условиях поперечного градиента температур (а) и сползание каталитических капель In на боковые стенки ННК InAs, выращенных на подложках GaAs{111}В при $T = 803\text{ K}$, в результате послеростового отжига в течение 15 мин [6] (б).

ственное значение равновесного краевого угла θ_0 жидкофазной капли М-катализатора, определяемого уравнением Юнга [15, 16], на реальной твердой поверхности ННК может существовать множество краевых углов, которые можно назвать кажущимися (видимыми) краевыми углами. Далее контактным углом смачивания $\theta = \varphi + 90^\circ$ мы будем называть кажущийся краевой угол на вершине ННК. Термином “контактный” мы подчеркиваем неравновесный характер данного угла на периметре смачивания.

Влияние кромки кристалла (кольцевого излома).

Пусть капля катализатора растекается по гладкой торцевой грани $\{111\}$ ННК (или $\{0001\}$), но на периферии (кромке) грани имеется кольцевой излом (ребро кристалла, образованное краем боковой поверхности и торцевой поперечной гранью ННК), представляющий собой энергетический барьер для беспрепятственного растекания жидкости. Кромка кристалла как характерный поверхностный дефект меняет условия формирования краевых углов капли катализатора, в результате чего возникает гистерезис. Угол наклона внешней поверхности излома к горизонтальной торцевой грани $\{111\}$ δ может быть произвольным, но в случае роста ННК постоянного диаметра он составляет 90° . Существование кромки кристалла в виде кольцевого излома на вершине ННК вызывает искривление контактной поверхности, в результате чего появляется вертикальная составляющая поверхностного натяжения (точнее – составляющая, перпендикулярная к торцу кристалла $\{111\}$). Таким образом, на вершине ННК УСПЭ границ раздела фаз кристалл/пар α_{SV} и кристалл/жидкость α_{SL} действует не в одной плоскости, а в разных плоскостях.

При наличии кольцевого излома на периферии торцевой грани $\{111\}$ для растекания капли ситуация осложняется тем, что при затекании жидкости за излом площадь ее поверхности увеличивается сильнее, чем при перемещении ТЛ по гладкой грани $\{111\}$ вдоль направления x (пунктирная линия на рис. 4). Сила поверхностного натяжения действует по отношению к новому направлению растекания AN под углом $(\theta - \delta)$. Сопротивление излома может быть преодолено каплей лишь при условии, что угол, образованный поверхностью жидкости и внешней поверхностью излома (боковой поверхностью ННК) $(\theta - \delta)$, больше равновесного краевого угла смачивания боковой поверхности кристалла θ'_0 ($(\theta - \delta) > \theta'_0$). Сила сопротивления кольцевого излома аналогична “силе трения” и должна исчезать при

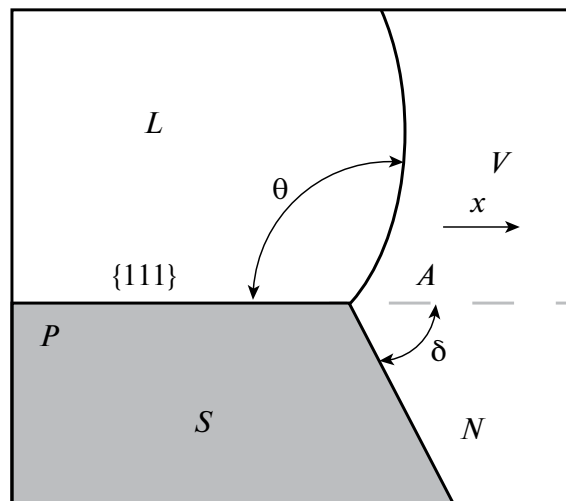


Рис. 4. Остановка периметра смачивания капли катализатора у кольцевого излома PAN (кромки кристалла) на торцевой грани $\{111\}$ ННК.

достижении равновесного угла контакта [17, 18].

Для установления взаимосвязи между гистерезисным углом θ и краевым углом θ_0 запишем и решим систему уравнений

$$\begin{cases} \alpha_{SL} + \alpha_{LV} \cos \theta = 0 \\ \alpha_{SV} - \alpha_{LV} \cos \theta_0 - \alpha_{SL} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь α_{LV} – УСПЭ границы жидкость/пар.

Первое уравнение в (1) выражает механическое равновесие капли на вершине цилиндрического ННК при $\delta = 90^\circ$ [1]. Второе – уравнение Юнга [15]. В результате решения системы уравнений (1) получим

$$\cos \theta = \cos \theta_0 - \frac{\alpha_{SV}}{\alpha_{LV}}. \quad (2)$$

Для ННК Si, выращиваемых через жидкие капли Au–Si, при $\delta = 90^\circ$, значениях УСПЭ $\alpha_{LV}^{\text{Au}} = 1.0$ Дж/м² и $\alpha_{SV}^{\text{Si}} = 1.2$ Дж/м² [1, 2], краевом угле $\theta_0 \approx 45^\circ$ [10] в соответствии с (2) находим, что $\theta \approx 120^\circ$.

Проанализируем уравнение (2) подробнее. Пусть на единицу длины ТЛ действует сила сопротивления кольцевого излома ψ (Дж/м²), т.е. сила, необходимая для сдвига ТЛ из неподвижного состояния. Растекание происходит до тех пор, пока движущая сила $f > 0$. При $f = 0$ контактный угол θ , соответствующий постоянной смоченной площади

кристалла, определится уравнением

$$\cos \theta = \cos \theta_0 \pm \frac{\psi}{\alpha_{LV}}, \quad (3)$$

где знак “+” соответствует оттеканию, знак “–” – натеканию.

В работе [11] было получено выражение

$$\alpha_{LV} \cos \theta + \alpha_{SL} = \alpha_{SV} \cos \delta, \quad (4)$$

представляющее собой механическое равновесие сил, соответствующих УСПЭ трех фаз, в точке A на периметре смачивания.

Подставим выражение (4) в (3). Получим

$$\cos \theta = \cos \theta_0 + \frac{\alpha_{SV}(\cos \delta - 1)}{\alpha_{LV}}. \quad (5)$$

Из сопоставления выражений (3) и (5) можно видеть, что при смачивании капель катализатора торцевой грани ННК сила сопротивления

$$\psi = \alpha_{SV}(\cos \delta - 1). \quad (6)$$

Из последнего выражения следует, что, во-первых, сила сопротивления ψ зависит от угла наклона боковой поверхности ННК δ . При $\delta = 0$ из (5) и (6) получаем $\cos \theta = \cos \theta_0$, $\theta = \theta_0$ и $\psi = 0$. Следовательно, на гладкой твердой поверхности сила сопротивления излома отсутствует. При $\delta = 90^\circ$ сила сопротивления излома $\psi = -\alpha_{SV}$. Это означает, что ψ возникает только в том случае, если ТЛ движется перпендикулярно плоскости, в которой она расположена (или под углом к этой плоскости при $\delta < 90^\circ$). При движении вдоль линии трехфазного контакта $\delta = 0$ и $\psi = 0$. При $\delta = 90^\circ$ действует сила сопротивления, равная по величине α_{SV} (3), но противоположно направленная относительно силы, соответствующей УСПЭ твердой фазы. Тогда сила, соответствующая α_{SV} , полностью компенсируется силой $\psi = -\alpha_{SV}$, поэтому равновесие капли на вершине цилиндрического ННК обеспечивается за счет α_{LV} и α_{SL} (см. первое уравнение в (1)).

Во-вторых, контактный угол на вершине ННК $\theta > 90^\circ$, так как это угол натекания, а при натекании он должен быть больше равновесного угла смачивания торцевой грани $\{111\}$ ($\theta > \theta_0$), поскольку при актуальных значениях $0 \leq \delta \leq 90^\circ$ сила сопротивления ψ имеет отрицательный знак, т.е. противоположный знаку α_{SV} . Уравнение (3) показывает, что при натекании капли на боковую поверхность ННК $\cos \theta_A = \cos \theta_0 - \psi_A/\alpha_{LV}$, где θ_A – краевой угол натекания, ψ_A – сопротивление при натекании.

Аналогично, при оттекании $\cos \theta_R = \cos \theta_0 + \psi_R/\alpha_{LV}$ (θ_R – краевой угол оттекания, ψ_R – сопротивление при оттекании) и $\theta = \theta_R < \theta_0$. Краевые углы натекания капли на вершине ННК могут изменяться в пределах от равновесного θ_0 до максимального θ_A^* , т.е. $\theta_0 < \theta_A < \theta_A^*$. Соответственно, краевые углы оттекания находятся в интервале $\theta_R^* < \theta_R < \theta_0$. Необходимо сказать, что для роста ННК имеет значение лишь краевой угол натекания θ_A .

В-третьих, капля катализатора на периметре смачивания вершинной грани ННК будет находиться в состоянии безразличного равновесия, описываемого двойным неравенством $\theta_0 < \theta < (\theta_0' + \delta)$, где θ_0' – равновесный угол смачивания боковой поверхности ННК, а условие перетекания капли жидкости через кольцевой излом на боковые стенки кристалла запишется как $(\theta - \delta) > \theta_0'$. Так, например, контактный угол на торце ННК в системе Au–Si может изменяться от $\sim 25^\circ$ до $\sim 115^\circ$. Тогда в пределах этого разрешенного диапазона углов θ и при $\delta = 90^\circ$ капля катализатора может принять равновесную форму, определяемую выражением [1]

$$\alpha_{SL} = -\alpha_{LV} \cos \theta. \quad (7)$$

Растягивающие α_{LV} и сжимающие α_{SL} силы в этом случае в динамике компенсируются, и последнее выражение является условием динамического равновесия на периметре смачивания. При образовании контактного угла на плоской вершинной грани $\{111\}$ взаимно уравновешиваются только составляющие поверхностных сил, направленные вдоль смачиваемой поверхности. Баланс этих сил означает, что линия смачивания не может перемещаться по твердой поверхности без совершения внешней работы. Таким образом, устойчивость форм роста ННК определяется устойчивостью равновесной формы капель катализатора, находящихся на их вершинах.

За пределами вышеуказанного диапазона углов θ (например, при изменении θ в условиях поперечного $\text{grad } T$) индифферентное равновесие и симметрия контактного угла относительно оси кристалла нарушаются, на определенных участках ТЛ со стороны более высокой температуры достигается условие $\theta > \theta_0'$ и капля смещается по боковой поверхности кристалла до положения, где справедливо уравнение Юнга. В результате либо ННК будет изгибаться, либо капля сместится на боковую стенку так, что температурный градиент в жидкости будет нивелирован (рис. 3).

В-четвертых, соотношение (5) определяет не истинное равновесие трехфазной системы на периметре смачивания капли, а метастабильное равновесие на вершине ННК, характеризуемое одним из локальных минимумов свободной энергии Гиббса [18, 19]. При отсутствии сил, препятствующих свободному движению ТЛ, т.е. при $\psi = 0$ уравнение Юнга можно получить из (4). В этом случае $\delta = 0$ и $\theta = \theta_0$.

Таким образом, наличие кромки в форме кольцевого излома приводит к возникновению состояния метастабильного равновесия трехфазной системы на периметре смачивания [19, 20]. Поэтому гистерезисные углы капли катализатора θ существенно отличаются от угла Юнга θ_0 [21, 22]. Гистерезисные краевые углы зависят от крутизны наклона боковых стенок ННК, характеризуемой углом δ , например на стадии образования “пьедестала” ННК (рис. 2), и от направления течения жидкости, поскольку положение ТЛ в состояниях метастабильного равновесия различно при натекании и оттекании.

Влияние линейного натяжения. При рассмотрении наноразмерных и особенно ультрамалоразмерных систем нельзя пренебрегать вкладом линейной плотности энергии в равновесие капли. При искривлении поверхности раздела фаз на ТЛ возникает двумерное давление $\alpha_\chi = \chi/r$ (χ – удельная линейная энергия (или натяжение), $1/r$ – кривизна ТЛ) [1]. Очевидно, что χ (Дж/м) создает существенный энергетический барьер и сопротивление растеканию капли $\psi_1 = \chi/r$. Тогда для механического равновесия капли на вершине ННК с учетом влияния χ можно записать

$$\alpha_{SL} + \alpha_{LV} \cos \theta_\chi + \frac{\chi}{r} = 0, \quad (8)$$

где θ_χ – угол смачивания капли с учетом влияния линейной энергии χ .

Пренебрегая изменением величины свободной межфазной энергии границ раздела трех фаз с изменением радиуса r ННК (для $r > 2$ нм), из совместного решения уравнений (7) и (8) получаем

$$\cos \theta_\chi = \cos \theta - \frac{\chi}{\alpha_{LV} \cdot r}. \quad (9)$$

Выражение (9) представляет собой математическую запись наноразмерного эффекта при смачивании капель торцевой грани ННК. С уменьшением r под влиянием χ угол θ_χ увеличивается. Знак “–” перед вычитаемым в (9) соответствует натеканию капли.

Из (9) следует, что чем хуже смачивание (больше краевой угол θ и, следовательно, меньше α_{LV}), тем больше сила сопротивления растеканию ψ_1 и тем больше гистерезис смачивания на вершине ННК (больше угол θ_χ). Естественно, что в предельном случае, как и при $\delta = 0$ в уравнении (5), при $r \rightarrow \infty$ или $\chi \rightarrow 0$ из уравнения (8) следует, что $\theta_\chi = \theta$ и все полученные нами выражения переходят в известные соотношения теории капиллярности. Величина χ составляет по различным оценкам $\sim 1 \times 10^{-7}$ Дж/м. Поэтому для жидкофазных катализаторов с УСПЭ 0.8–1.2 Дж/м² заметный вклад в величину θ_χ оно может внести в случае кристаллов с $r < 100$ нм.

Физико-химическая природа краевого угла.

Как видим, контактный угол смачивания капель катализатора вершинной грани ННК θ имеет двойственную, механо-термодинамическую, природу. С одной стороны, угол θ определяется кинетическими ограничениями на периметре смачивания и находится в диапазоне $\theta_0 < \theta < (\theta_0' + \delta)$. С другой стороны, в пределах указанного гистерезисного диапазона в условиях подвижности ТЛ к углу контакта применима термодинамическая трактовка: краевой угол θ определяется условием минимума свободной поверхностной энергии капли, чему при $\delta = 90^\circ$ отвечает пропорциональность УСПЭ различных участков ее поверхности их расстояниям от центра капли (первое уравнение в (1)).

Двойственную, не строго равновесную природу контактного угла на вершине ННК можно объяснить смешанной механо-термодинамической природой трехфазной системы ПЖК. Суть ее заключается в том, что реальное равновесие здесь может быть только между паром и жидкостью, т.к. в силу заторможенности релаксации равновесного состояния твердых тел контактная поверхность ННК неравновесна. Это приводит к появлению энергетических барьеров для движения периметра смачивания и задержкам при его перемещении. Поэтому наблюдаемые экспериментально и изменяемые в широких пределах контактные углы капли катализатора на вершине ННК – это кажущиеся, гистерезисные краевые углы, характеризующие метастабильные состояния равновесия трехфазной системы (локальные минимумы на гиббсовской энергетической кривой). Отсюда следует вывод о некорректности традиционной трактовки контактного угла капли катализатора на вершине ННК как чисто термодинамического параметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что гистерезисные эффекты смачивания при росте ННК по ПЖК-механизму обусловлены индифферентным равновесием жидкофазной капли катализатора на периметре смачивания торцевой грани ННК в пределах значений контактного угла θ , определяемых двойным неравенством $\theta_0 < \theta < (\theta_0' + \delta)$. Наблюдаемый гистерезис краевого угла определяется влиянием кольцевого излома (кромки кристалла), представляющего собой энергетический барьер для беспрепятственного растекания жидкости $\psi = \alpha_{sv}(\cos\delta - 1)$, и размерно-зависимого натяжения линии трехфазного контакта $\cos\theta_x = \cos\theta - \chi/(\alpha_{sv}r)$. Первый фактор свидетельствует о том, что контактный угол смачивания каплей катализатора вершинной грани ННК θ имеет двойственную, механо-термодинамическую, природу, определяемую смешанной природой трехфазной ростовой системы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-22-00449 на оборудовании ЦКП “Наноэлектроника и нанотехнологические приборы”.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nebol'sin V.A., Dunaev A.I., Tatarenkov A.F., Shmakova S.S.* Scenarios of stable VLS nanowire growth // *J. Cryst. Growth*. 2016. № 450. P. 207–214.
2. *Givargizov E.I.* Fundamental aspects of VLS growth // *J. Cryst. Growth*. 1975. V. 31. P. 20–30.
3. *Dubrovskii V.G.* Development of Growth Theory for VLS NWs: Contact Angle, Facets, Crystal Phase // *Cryst. Growth Des.* 2017. V.17. № 5. P. 2544–2548.
4. *Maurice J.-L., Bulkin P., Ngo É., Wang W., Foldyna M., Florea I., Roca I., Cabarrocas P., Béjaud R., Duparc O.H.* Visualizing the effects of plasma-generated H atoms in situ in a transmission electron microscope // *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 2022. V. 97. № 7. P. 1–5.
5. *Jacobsson D., Panciera F., Tersoff J., Reuter M.C., Lehmann S., Hofmann S., Dick K.A., Ross F.M.* Interface dynamics and crystal phase switching in GaAs nanowires // *Nature*. 2016. № 531. P. 317–339.
6. *Panciera F., Baraissov Z., Patriarche G., Dubrovskii V.G., Glas F., Travers L., Mirsaidov U., Harmand J.-C.* Phase selection in self-catalysed GaAs nanowires // *Nano Lett.* 2020. V. 20. № 3. P. 1669–1675.
7. *Marnauza M., Tornberg M., Mårtensson E.K., Jacobsson D., Dick A.K.* Supporting information: In-situ observations of size effects in GaAs nanowire growth // *Nanoscale Horizons*. 2023. V. 8. № 8. P. 291–296.
8. *Nebol'sin V., Levchenko E.V., Swaikat N., Yuryev V.* About a fundamental uncertainty of the contact angle of the catalyst drop on the top of the nanowire // *J. Appl. Phys.* 2021. V. 129. P. 164302.
9. *Wen C.-Y., Hillerich K., Reuter M.C., Park J.H., Kodambaka S., Stach E.A., Ross F.M.* Periodically changing morphology of the growth interface in Si, Ge and GaP nanowires // *Phys. Rev. Lett.* 2011. V. 107. № 12. P. 025503.
10. *Ghisalberti L., Potts H., Friedl M., Zamani M., Günat L., Tütüncüoğlu G., Carter W.C., Fontcuberta I., Morral A.* Questioning liquid droplet stability on nanowire tips: from theory to experiment // *Nanotechnology*. 2019. V. 30. P. 285604–285613.
11. *Nebol'sin V.A., Yuriev V.A., Swaikat N., Korneeva V.V., Vasin E.N.* On the Stability of Catalyst Drops at the VLS Contact during the Growth of Nanowires // *RENSIT*. 2022. V. 14. № 4. P. 381–392.
12. *Ressel B., Prince K.C., Heun S.* Wetting of Si surfaces by Au-Si liquid alloys // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 93. № 7. P. 3886–3892.
13. *Harmand J.-C., Patriarche G., Glas F., Panciera F., Florea I., Maurice J.-L., Travers L., Ollivier Y.* Atomic Step Flow on a Nanofacet // *Phys. Rev. Lett.* 2018. №16. P.166101–166109.
14. *Свайкат Н.* Физико-технологические аспекты управляемого роста ННК полупроводников: Дис. канд. техн. наук. Воронеж. 2022. 299 с.
15. *Young T.* An essay on the cohesion of fluids // *Philos. Trans. R. Soc. London*. 1805. V. 95. P. 65–87.
16. *Nebol'sin V., Levchenko E. V., Swaikat N., Yuryev V.* About a fundamental uncertainty of the contact angle of the catalyst drop on the top of the nanowire // *J. Appl. Phys.* 2021. V. 129. P. 164302.
17. *Ребиндер П.А., Лунец И.Е., Римская М.М., Таубман А.Б.* Физико-химия флотационных процессов. Свердловск: Металлургиздат, 1933. 232 с.
18. *Adam N.K., Jessop G.* Angles of contact and polarity of solid surfaces // *J. Chem. Soc.* 1925. V. 127. P. 1863–1868.
19. *Huhtamäki T., Tian X., Korhonen J.T., Ras R.H.A.* Surface-wetting characterization using contact-angle measurements // *Nat. Protocols*. 2018. V. 13. P. 1521–1538.
20. *Peeters W.H.J., Vettori M., Fadaly E.M.T., Danescu A., Mao C., Verheijen M.A., Bakkers E.P.A.M.* Onset of uncontrolled polytypism during the Au-catalyzed growth of wurtzite GaAs nanowires // *Phys. Rev. Mater.* 2024. V. 8. P. L020401.
21. *Nebol'sin V.A., Dolgachev A.A., Dunaev A.I., Zavalishin M.A.* On the general regularities of the growth of micro- and nanoscale Si whiskers // *Bull. Rus. Acad. Sci., Phys.* 2008. V. 72. № 9. P. 1217–1220.
22. *Cirlin G.E., Reznik R.R., Samsonenko Yu.B., Khrebtov A.I., Kotlyar K.P., Ilkiv I.V., Soshnikov I.P., Kirilenko D.A., Kryzhanovskaya N.V.* Phosphorus-Based Nanowires Grown by Molecular-Beam Epitaxy on Silicon // *Semiconductors*. 2018. V. 52. № 11. P. 1416–1419.