

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРРАСНО-СТУПЕНЧАТЫХ НАНОСТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ (0001) КРИСТАЛЛОВ САПФИРА

© 2012 г. А. В. Буташин, В. П. Власов, В. М. Каневский, А. Э. Муслимов, В. А. Федоров

*Институт кристаллографии РАН, Москва
E-mail: amuslimov@mail.ru*

Поступила в редакцию 09.04.2012 г.

Методом атомно-силовой микроскопии исследованы террасно-ступенчатые структуры на атомно-гладких вицинальных поверхностях кристаллов лейкосапфира, подвергнутых после механической и химической обработки термическому отжигу. Таким путем проведены исследования влияния величин вицинальных углов и режимов термической обработки сапфировых пластин на метрические параметры террасно-ступенчатых структур, включая отжиги как на воздухе, так и в вакууме. Показано, что, изменяя вицинальный угол и режимы термической обработки, можно формировать на поверхности лейкосапфира ступени от монокатомных (0.22 нм) до 3 нм и более. Результаты интерпретируются с точки зрения минимума поверхностной энергии и диффузионных процессов на поверхности.

ВВЕДЕНИЕ

Террасно-ступенчатые структуры из атомно-гладких граней на вицинальных поверхностях кристаллов возникают вследствие анизотропии их поверхностной энергии и наблюдаются на свежих сколах, растущих или подвергнутых травлению поверхностях кристаллов [1]. В ходе развития эпитаксиальных технологий в части получения кристаллических подложек со сверхгладкой поверхностью и их характеристики методами зондовой микроскопии показана возможность получения регулярной террасно-ступенчатой наноструктуры (ТСН) путем отжига на воздухе при температурах $\geq 1000^\circ\text{C}$ [2] для одного из наиболее широко используемых подложечных материалов – монокристаллов лейкосапфира. В дальнейших исследованиях было установлено, что использование вицинальных (0001) сапфировых подложек с ТСН, для которых нормаль к плоскости подложки составляет с направлением $\langle 0001 \rangle$ угол α менее 1° , при молекулярно-лучевой эпитаксии ряда полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}$ и $A^{III}B^V$ приводит к заметному повышению структурного совершенства кристаллических слоев этих соединений [3–7]. Также ТСН на сапфировых подложках (0001) использованы для формирования на них упорядоченных ансамблей металлических (Fe, Au) наночастиц и полупроводниковых (ZnO) нанопроводов [8–10] и в качестве тестовых образцов в метрологии нанометрового диапазона [11]. В ряде работ изучено влияние температуры отжига сапфировых пластин и величин вицинальных углов их поверхностей на метрику и структуру ТСН [2, 3, 8, 12–17]. В этих работах для получения ТСН на вицинальных (0001) сапфировых пласти-

нах проводили отжиг на воздухе при температурах $1000\text{--}1500^\circ\text{C}$ в течение 1–10 ч. При этом в мягких режимах отжига (температура $1000\text{--}1100^\circ\text{C}$, время 1 ч) на сапфировых пластинах с вицинальными углами до 0.67° относительно сингулярной грани (0001) формируются, как правило, ТСН с минимальной высотой ступеней ~ 0.22 нм (так называемые моноступени), соответствующие минимальному расстоянию между кислородными слоями в кристаллической решетке сапфира ($1/6$ параметра решетки), и шириной в диапазоне 30–1000 нм в зависимости от вицинального угла. Увеличение температуры и времени отжига в общем случае приводит к формированию ограниченных террасных структур с существенно большими высотами ступеней (до 3 нм и более). Однако сопоставление результатов [2, 3, 8, 12–17] показывает, что некоторые из них находятся в противоречии друг с другом, что дает основание провести собственное исследование влияния величин вицинальных углов и режимов термической обработки сапфировых пластин на метрические параметры и структуру ТСН на поверхности пластин, включая отжиги в вакууме, чего ранее не делалось. Отметим, что выбор объекта исследования обусловлен еще и тем, что поверхность сапфировых пластин в существенно меньшей степени подвержена влиянию внешних факторов (механические и химические повреждения, сорбция газов) по сравнению с другими кристаллами (металлов, полупроводников, галоидов, сульфатов и т.д.) и может быть повторно очищена от загрязнения без повреждения.

Наиболее полный обзор теоретических представлений о ступенях на поверхности кристаллов представлен в [18], правда, в основном, для кри-

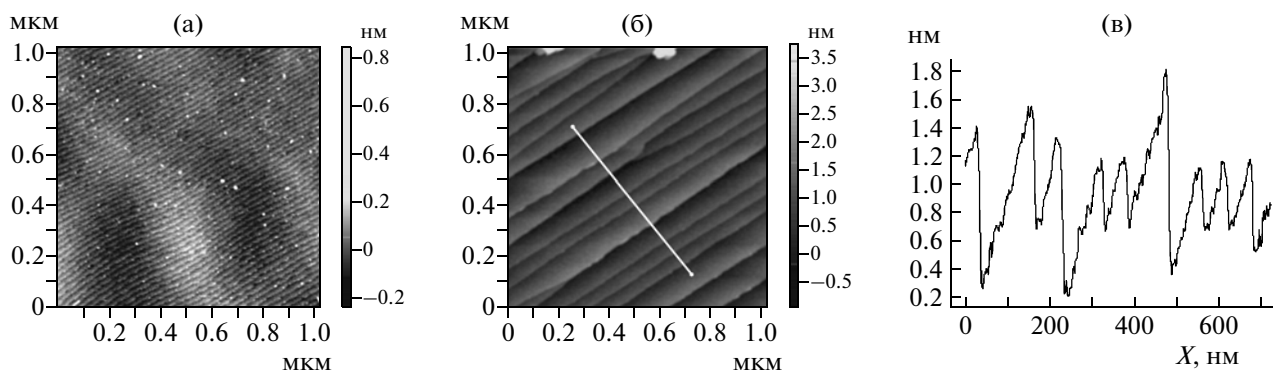


Рис. 1. АСМ-изображение поверхности сапфировой пластины с $\alpha = 0.5^\circ$ после химико-механической полировки: а – без отжига, б – после отжига на воздухе при 1200°C (б). Профиль сечения поверхности сапфировой пластины после отжига (в).

сталлов с ковалентными и металлическими связями между атомами.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных объектов для получения ТСН использовали сапфировые пластины собственного производства с односторонней химико-механической полировкой до средней шероховатости поверхности не более 0.3 нм [19]. Поверхность подложек отклонялась от кристаллографической плоскости (0001) на углы от 0.03° до 5° (далее обозначается как вицинальный угол α) в направлениях $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ или $\langle 1\bar{1}20 \rangle$.

Пластины или их части отжигали на воздухе или в вакууме. Проведенные многочисленные эксперименты показали необходимость обеспечения чистоты атмосферы, окружающей кристаллические элементы со сверхгладкой или наноструктурированной поверхностью при их высокотемпературном отжиге. С этой целью использовали специально разработанный контейнер [20]. В ходе работы варьировали типы отжиговых печей и варианты технологической оснастки, величину остаточного давления в камере при вакуумном отжиге. Время отжига сапфировых пластин при рабочей температуре выбирали постоянным – 1 ч, разогрев и охлаждение печи вели с максимально допустимыми для данного типа оборудования скоростями (не менее $300^\circ\text{C}/\text{ч}$).

Исследования поверхности сапфировых пластин, включая обнаружение и характеризацию ТСН, проводили в режиме топографии на атомно-силовых микроскопах “Ntegra Prima”, “Ntegra Aura” и “Solver Pro-M”.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Типичное изображение атомно-силовой микроскопии (АСМ) поверхности исходных сапфи-

ровых подложек со сверхгладкой поверхностью приведено на рис. 1а.

Отжиг на воздухе сапфировых пластин при температурах 1000 – 1100°C с вицинальными углами в диапазоне 0.03 – 0.5° дает ТСН с высотой ступеней 0.22 нм, соответствующей минимальному расстоянию между кислородными слоями в структуре сапфира.

Отжиг на воздухе сапфировых пластин с вицинальными углами в диапазоне 0.3 – 1.0° при 1200°C дает ТСН с высотой ступеней в 0.4 – 2.0 нм и шириной террас 50 – 150 нм (рис. 1б, 1в). Оценки, сделанные по данным АСМ, дают значение углов при вершине ступеней, близкое к 90° , что свидетельствует о формировании ступеней системой кристаллографических плоскостей пинакоида (0001) и призмы ($1\bar{1}00$).

Отжиг на воздухе при температуре 1200°C приводит к образованию ТСН с шириной террас 15 – 45 нм и высотой ступеней 1 – 1.5 нм на поверхности пластин с $\alpha = 5.0^\circ$ (рис. 2а).

На поверхности пластины с $\alpha = 3.0^\circ$ образуются ТСН с шириной террас 25 – 60 нм и высотой ступеней 1 – 2 нм.

Увеличение температуры отжига на воздухе до 1400°C приводит к образованию значительно более рельефных ТСН на поверхности образцов. На поверхности пластины с $\alpha = 3.0^\circ$ образуются ТСН с шириной террас 60 – 180 нм и высотой ступеней 2 – 7 нм (рис. 2б), а с $\alpha = 5.0^\circ$ – с шириной террас 30 – 90 нм и высотой ступеней 1.5 – 5.5 нм.

Обнаружено, что отжиг на воздухе при 1400°C пластины с $\alpha = 0.3^\circ$ (рис. 2в) приводит к значительному нарушению регулярности ТСН при сохранении средних значений высоты и ширины ступеней, характерных для отжига при 1200°C (рис. 1 б, 1 в). Поэтому повышение температуры отжига при получении ТСН на пластинах с такой ориентацией нецелесообразно.

Температурные диапазоны отжига на воздухе сапфировых пластин для получения ТСН с требу-

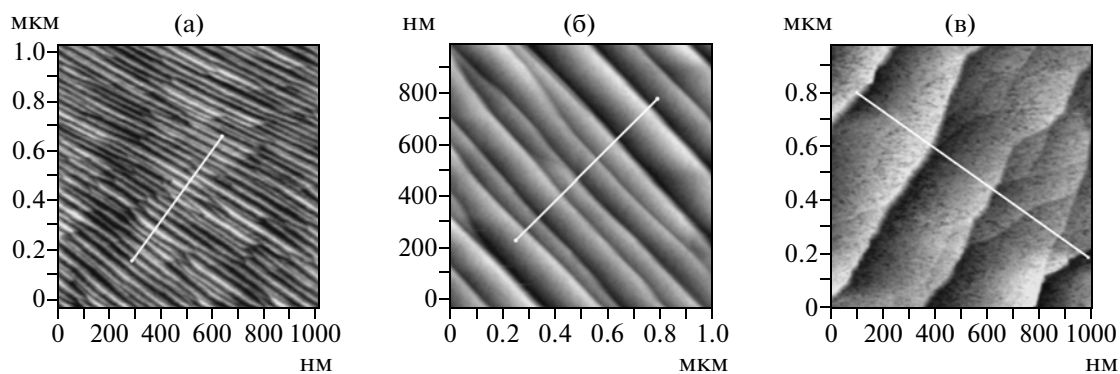


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности сапфировых пластин после отжига на воздухе: а – $\alpha = 5.0^\circ$ при 1200°C , б – $\alpha = 3.0^\circ$ при 1400°C , в – $\alpha = 0.3^\circ$ при 1400°C .

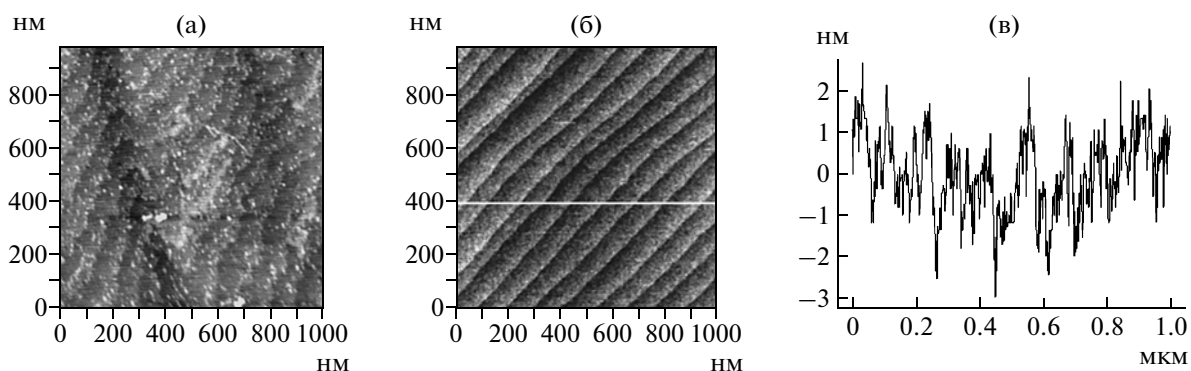


Рис. 3. АСМ-изображение поверхности сапфировой пластины ($\alpha = 0.1^\circ$) после химико-механической полировки (а) и последующего вакуумного отжига (б); профиль сечения поверхности после отжига (в).

емыми параметрами приведены в таблице. Для ТСН, полученных на сапфировых пластинах в результате отжига, как правило, выполняется соотношение

$$h = d \times \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где h – высота ступеней ТСН, кратная 0.22 нм , d – ширина ступеней ТСН и α – вицинальный угол.

Для расширения возможностей получения ТСН на сапфировых пластинах проведены эксперименты по вакуумному отжигу. Для проверки печи и изготовленного контейнера проведен пробный эксперимент по вакуумному отжигу при 900°C в течение 3 ч сапфировой пластины, на поверхности которой обнаружены некоторые загрязнения после сверхгладкой полировки (рис. 3а).

Высоты ступеней ТСН (в нм) в зависимости от вицинального угла α и температуры отжига сапфировых пластин на воздухе и в вакууме ($P_{\text{ост}} \sim 0.13 \text{ Па}$)

Угол разори- ентации пла- стин α , град	Температура отжига T , $^\circ\text{C}$						
	1000		1100	1200		1300	1400
	На воздухе	В вакууме	В вакууме	На воздухе	В вакууме	На воздухе	На воздухе
0.03	0.22						
0.1	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22–0.6	
0.2	0.22	0.22			0.4–0.8		
0.3	0.22	0.22		1–3	0.8–1	1–2	1–2*
0.5	0.22	0.22	1.5–2	0.4–2.2	0.8	0.6–1.8	
1.0	×	×	0.2–0.4*	0.4–1.2	1	1–3	
3.0	×			1–2			2–7
5.0	×			1–5			1.5–5.5

* ТСН отличаются значительной нерегулярностью.

Результаты приведены на рис. 3б, 3в. Наблюдается очистка поверхности пластины в различных масштабах и существенное сглаживание поверхности с образованием ТСН с высотой ступеней 0.22 нм.

Результаты всех экспериментов по получению ТСН при вакуумном отжиге ($P_{\text{ост}} \sim 0.13$ Па) приведены в таблице. Отметим, что поверхности всех отожженных пластин характеризуются также высокой чистотой, близкой к наблюдаемой на упомянутых выше пластинах (рис. 3б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зависимость параметров ТСН от вицинального угла сапфировой пластины и температуры отжига. Большинство изучаемых в данной работе сапфировых пластин уже имело на своей поверхности вполне различимые ТСН с высотой ступеней 0.22 нм (рис. 1а, 3а), которые, очевидно, образовались в результате финишной операции химико-механической полировки. То же наблюдалось на поверхности сапфировых пластин до отжигов другими авторами [15]. Анализ результатов проведенных экспериментов по получению ТСН на сапфировых пластинах различной разориентации относительно плоскости (0001) (таблица) показывает, что при малых вицинальных углах ($\alpha \leq 0.1^\circ$) не происходит укрупнения ТСН при увеличении температуры до 1200°C , а для больших углов ($\alpha \geq 1^\circ$) процессы рекристаллизации поверхности с образованием ТСН проходят при температурах $\geq 1200^\circ\text{C}$. Эти результаты в целом согласуются с данными [13]. Предлагаем следующую качественную интерпретацию этих результатов.

В рамках предложенной в [21] модели вицинальной поверхности кристалла ее удельная поверхностная энергия $f(T)$ может быть представлена в следующем виде [22]:

$$f(T) = \gamma_0(T) + \beta |\text{tg } \alpha| / h + g |\text{tg } \alpha|^3, \quad (2)$$

где $\gamma_0(T)$ представляет собой удельную свободную энергию плоской части поверхности; $\beta = (\beta_0 - TS_0)$ – свободная энергия единицы длины образования изолированной термически изогнутой ступени высотой h , β_0 – свободная энергия единицы длины ступени без изломов, S_0 – энтропия ступени без изломов; α – вицинальный угол; g – параметр взаимодействия ступеней, характеризующий степень диффузности, т.е. изогнутости ступени за счет термического воздействия.

Как обратное диффузности вводится понятие жесткости $\tilde{\beta}(\theta, T)$, которую можно представить как тенденцию к выпрямлению ступени, т.е. уменьшению ее длины и плотности изломов:

$$\tilde{\beta}(\theta, T) = \beta(\theta, T) + \frac{\partial^2 \beta}{\partial \theta^2}, \quad (3)$$

где θ – азимутальный угол на поверхности кристалла. Тогда параметр g может быть выражен через жесткость ступени следующим образом [21]:

$$g(\theta, T) = \frac{(\pi k T)^2}{6h^3 \tilde{\beta}(\theta, T)}. \quad (4)$$

Термодинамические аргументы касательно свободной поверхностной энергии сами по себе не объясняют возникновения террас и их изменения со временем и при изменении температуры до достижения равновесия. Необходимо учитывать механизмы переноса отдельных атомов (молекул или агрегатов), осуществляющиеся как путем диффузии по поверхности или через объем кристалла, так и по схеме испарение–конденсация [23], из которых первый механизм представляется наиболее вероятным для случая сапфировых пластин.

Классическое выражение для диффузионного потока j имеет вид:

$$j = -D_S \Delta \mu, \quad (5)$$

где D_S – коэффициент поверхностной диффузии в области ($r_2 = r + \delta r$), $\Delta \mu = \mu(r_2) - \mu(r_1)$ – разность химических потенциалов.

Химический потенциал поверхности представим как изменение поверхностной энергии при смещении атома (молекулы) в позиции (x, y) :

$$\mu(x, y) \equiv \Omega_v \frac{\delta f}{\delta z(x, y)}, \quad (6)$$

где Ω_v – объем, занимаемый атомом (молекулой).

Согласно формуле Аррениуса, коэффициент поверхностной диффузии

$$D_S \sim \exp(-E_A/kT), \quad (7)$$

где E_A – энергия активации поверхностной диффузии (высота энергетического барьера).

Полученные результаты показывают активацию процесса диффузии на поверхности сапфировых пластин при температуре выше 1000°C , что отчетливо проявляется при сравнении рис. 3а и 3б: после отжига ступени значительно более ровные, их диффузность невелика, а наблюдаемый изгиб может быть обусловлен исходной шероховатостью поверхности пластин. Отметим, что при 1000°C расширения террас и увеличения высоты ступеней не наблюдается, – только выравнивание ступеней. Укрупнение нанорельефа наблюдалось при температуре отжига 1100°C и выше.

Согласно формулам (2) и (4), зависимость удельной поверхностной энергии $f(T)$ убывает с ростом высоты ступеней h , что качественно объясняет наблюдаемую тенденцию укрупнения ширины террас при повышении температуры отжига пластин: уменьшение энергии вызывает изменение химического потенциала (6), что в свою очередь активизирует поверхностную диффузию вещества. Согласно (4), параметр g , характеризую-

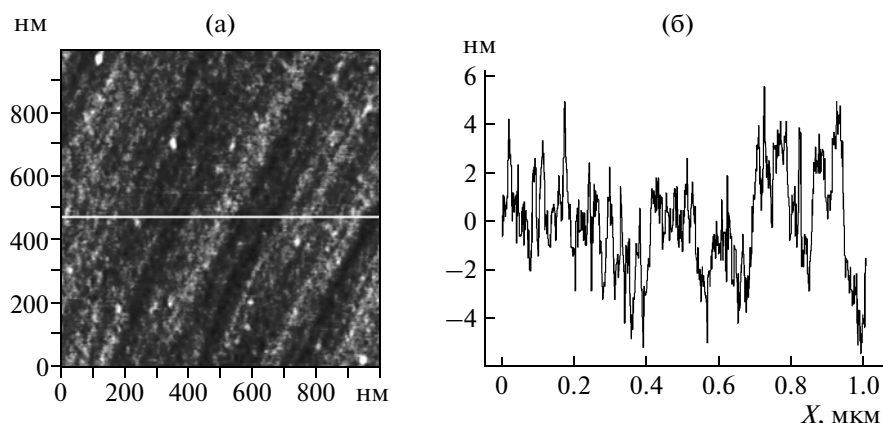


Рис. 4. АСМ-изображение (а) и профиль сечения (б) поверхности сапфировой пластины с $\alpha = 1.0^\circ$ после отжига при 1100°C в вакууме ($P_{\text{ост}} \sim 0.13$ Па).

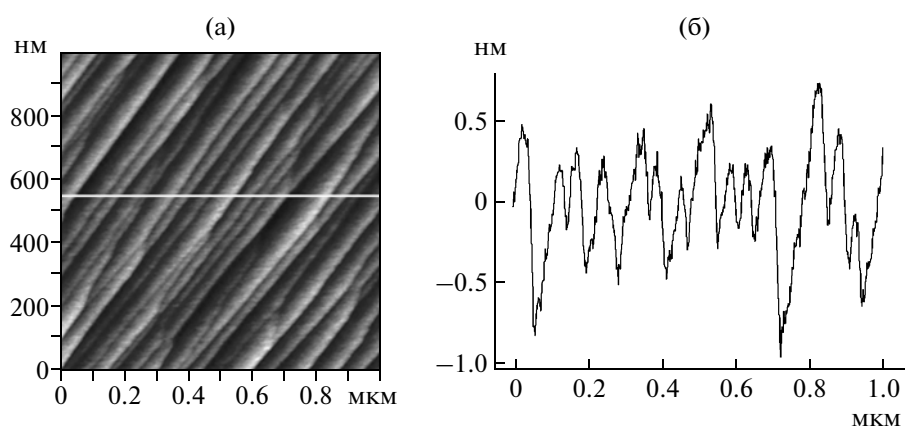


Рис. 5. АСМ-изображение (а) и профиль сечения (б) поверхности сапфировой пластины с $\alpha = 1.0^\circ$ после отжига при 1200°C в вакууме ($P_{\text{ост}} \sim 0.13$ Па).

щий диффузность ступеней, растет с температурой по крайней мере по квадратичному закону (жесткость $\tilde{\beta}(\theta, T)$ в знаменателе с температурой, очевидно, только уменьшается). Когда величина диффузности ступеней достигает 1/2 ширины террас (порядка 30 нм при 1200°C для пластины с $\alpha = 0.2^\circ$, таблица), начинается взаимодействие торцов ступеней соседних террас и возможно образование зародышей террас с высотой ступени 0.22×2 нм и рост таких и более крупных террас по механизму “Zipper-like” [15]. Характерные для этого механизма Y-образные точки соединения трех ступеней можно наблюдать на рис. 2а.

Очевидно, что если террасы очень широкие, то соседние ступени не могут взаимодействовать для слияния в более крупные ТСН, и это обстоятельство препятствует укрупнению ступеней на пластинах с малой разориентацией ($\alpha \leq 0.1^\circ$) при температурах $\leq 1200^\circ\text{C}$, ширина террас в которых составляет 125 нм и более. Так, укрупнение ТСН на поверхности пластины с вицинальным углом $\alpha = 0.1^\circ$ обнаружено лишь при 1300°C (таблица). Взяв минимальную температуру начала взаимодействия ступеней и полуширины соответствующих

террас, выполнили оценку энергии активации поверхностной диффузии E_A на основе соотношения Эйнштейна и формулы Аррениуса (7). Получено значение $E_A = 2.9 \pm 0.3$ эВ, которое примерно втрое меньше энергии активации объемной диффузии Al и O в монокристаллах сапфира [24].

На пластинах с большой разориентацией ($\alpha \geq 1^\circ$), где ширина террас и соответственно расстояние между ступенями значительно меньше (не более 13 нм), существенный и определяющий вклад в поверхностную энергию вносит энергия взаимодействия ступеней (третий член в (2)). Процессы перестройки поверхности здесь также начинаются при температурах выше 1000°C , как это демонстрирует пример нерегулярной, слабовыраженной ТСН после отжига пластины при 1100°C (рис. 4). Однако равновесие достигается при температурах отжига $\geq 1200^\circ\text{C}$ с образованием регулярной, отчетливой ТСН с высотой ступеней до 1.3 нм (рис. 5).

И в этом случае, по-видимому, оказывается энергетически выгодным образование сразу крупных ТСН при температурах $\geq 1200^\circ\text{C}$, вместо

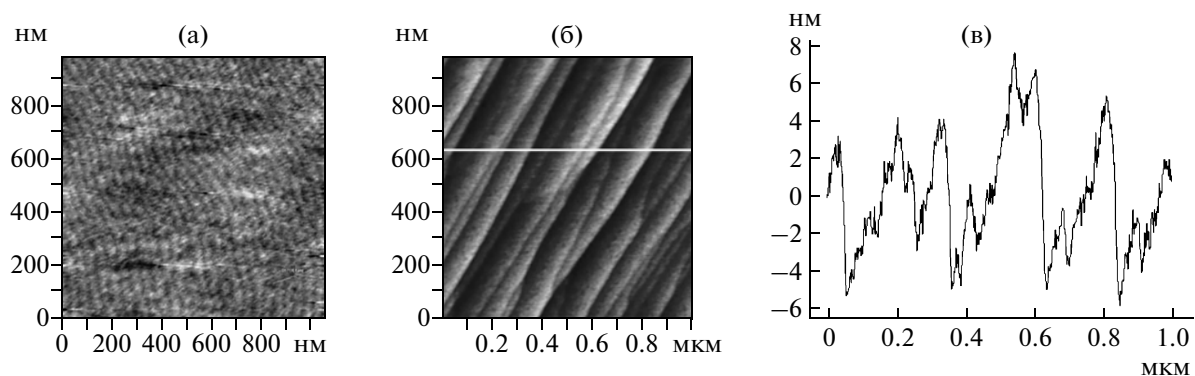


Рис. 6. АСМ-изображение поверхности сапфировой пластины с $\alpha = 0.5^\circ$ после отжига при 1200°C в вакууме: а — $P_{\text{ост}} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ Па, б — $P_{\text{ост}} \sim 0.13$ Па. Профиль сечения поверхности сапфировой пластины после отжига в вакууме с $P_{\text{ост}} \sim 0.13$ Па (в).

последовательного образования террас с высотой ступеней $0.22 \times 2, \times 3, \times 4$ и т.д. нанометров, как это происходит на пластинах с меньшими вицинальными углами.

Влияние величины остаточного давления при вакуумном отжиге на формирование ТСН на сапфировых пластинах. В дополнение к вакуумному отжигу при остаточном давлении $P_{\text{ост}} \sim 0.13$ Па в камере печи, который позволил получить на поверхности сапфировых пластин ТСН различных размеров (таблица), проведен отжиг в более высоком вакууме ($P_{\text{ост}} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ Па), результаты которого контрастируют с таковыми для низковакуумного отжига. Например, на поверхности сапфировой пластины с $\alpha = 0.5^\circ$ после отжига при 1200°C в высоком вакууме ($P_{\text{ост}} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ Па) наблюдалась не очень отчетливая ТСН со ступенями высотой ~ 0.22 нм и террасами шириной ~ 25 нм (рис. 6), что характерно для исходной ТСН на поверхности пластин, возникшей в результате химико-механической полировки (рис. 1а). Отжиг аналогичной пластины в низком вакууме ($P_{\text{ост}} \sim 0.13$ Па) (рис. 6б, 6в) и на воздухе приводил к образованию существенно более крупных и отчетливых ТСН. Вероятно, причина этих различий кроется во взаимодействии поверхности кристалла с окружающей атмосферой при отжиге.

При остаточном давлении в камере $P_{\text{ост}} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ Па нагревание сапфировой пластины до 1200°C приводит к обеднению поверхности кислородом и нарушению стехиометрии оксида алюминия в приповерхностном слое [25]. При этом взамен слегка искаженной структуры сапфира [26] на поверхности образуются совсем другие структуры, отличные от структуры сапфира метрикой и симметрией, причем некоторые из них удалось обнаружить с использованием АСМ [27]. Именно эта структурная перестройка поверхности сапфировых пластин, возможно, препятствует росту и укрупнению ТСН при отжиге в высо-

ком вакууме при 1200°C . При отжиге в низком вакууме (и на воздухе) парциальное давление кислорода в камере оказывается достаточным для предотвращения обеднения поверхности пластин кислородом, структура поверхности остается сапфировой с небольшими искажениями, что не препятствует диффузии поверхностных атомов, приводящей к укрупнению ТСН.

В заключение отметим, что даже на воздухе отжиг сапфировых пластин при температуре 1400°C приводит к образованию кратеров на поверхности за счет сублимации (темные точки на поверхности террас на рис. 2в). Сублимация и структурные искажения поверхности сапфировых пластин особенно заметны при нагревании до температур свыше 1600°C в вакууме и в присутствии восстановителей [28, 29].

Проведенные предварительные эксперименты с отжигом пластин сапфира в сверхвысоком вакууме с регистрацией исходящих компонентов на масс-спектрометре (“Balzers”) и анализом химического состава приповерхностного слоя оже-спектрометром (“Riber”) показали, что пик от кислорода присутствует при $100\text{--}500^\circ\text{C}$, что обусловлено выходом адсорбционных слоев. Начиная с 900°C , пик от кислорода появляется вторично, что указывает на диссоциацию приповерхностного слоя сапфира. Интенсивность выхода кислорода возрастает с температурой. В оже-спектре виден сдвиг разности интенсивностей Al—O в сторону увеличения алюминия. Это соотношение стабилизируется, начиная с 1100°C , что, по-видимому, связано с диффузией кислорода из объема или испарением алюминия. Эти эксперименты продолжаются, их результаты будут опубликованы в деталях.

Таким образом, при высокотемпературном отжиге сапфировых пластин взаимодействия поверхность—вакуум или поверхность—атмосфера приводят к потере кристаллом вещества, что дает

основания рассматривать в качестве основного диффузный механизм формирования ТСН на поверхности.

Авторы выражают благодарность А.Н. Дерябину, М.Л. Занавескину, Е.О. Тихонову за помощь в работе.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ИК РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России и Президиума РАН (Программа фундаментальных исследований № 24 “Фундаментальные основы технологий наноструктур и наноматериалов”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов А.А. // Современная кристаллография / Под ред. Вайнштейна Б.К. др. М.: Наука, 1980. Т. 3. С. 5.
2. Yoshimoto M., Maeda T., Ohnishi T. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 2615.
3. Cui J., Sun A., Reshchikov M. et al. // MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 2000. V. 5. P. 7.
4. Shen X.Q., Matsuhata H., Okumura H. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 021912.
5. Shen X.Q., Okumura H. // J. Cryst. Growth. 2007. V. 300. P. 75.
6. Liu Y., Zhang J. // Physica B. 2010. V. 405. P. 1643.
7. Михайлов В.И., Бутащин А.В., Каневский В.М. и др. // Поверхность. 2011. № 6. С. 97.
8. Ismach A., Kantorovich D., Joselevich E. // J. Am. Chem. Soc. 2005. V. 127. P. 11554.
9. Муслимов А.Э., Бутащин А.В., Коновко А.А. и др. // Кристаллография. 2012. Т. 57. № 3. С. 471.
10. Son J.Y., Lim S.J., Cho J.H. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 053109.
11. Бутащин А.В., Каневский В.М., Федоров В.А. и др. Метрологический тестовый образец // Патент на полезную модель № 79992. Заявка от 07.06 2008.
12. Kurnosikov O., Pham Van L., Cousty J. // Surf. Sci. 2000. V. 459. P. 256.
13. Shiratsuchi Y., Yamamoto M., Kamada Y. // Jpn. J. Appl. Phys. 2002. V. 41. P. 5719.
14. Heffelfinger J.R., Carter C.B. // Surf. Sci. 1997. V. 389. P. 188.
15. Pham Van L., Kurnosikov O., Cousty J. // Surf. Sci. 1998. V. 411. P. 263.
16. Lintz M., Bouchiat M.-A. // Surf. Sci. 2002. V. 511. P. L319.
17. Saw K.G. // J. Mater. Sci. 2004. V. 39. P. 1211.
18. Jeong H.C., Williams E.D. // Surf. Sci. Rep. 1999. V. 34. P. 171294.
19. Асадчиков В. Е., Бутащин А. В., Волков Ю. О. и др. // Завод. лаб. 2008. №10. С. 21.
20. Бутащин А.В., Каневский В.М., Семенов В.Б. и др. Контейнер для отжига оксидных монокристаллов // Патент на полезную модель № 73877. Заявка от 13.12.2007.
21. Gruber E.E., Mullins W.W. // J. Phys. Chem. Solids. 1967. V. 28. P. 875.
22. Jayaprakash C., Rottman C., Saam W.F. // Phys. Rev. B. 1984. V. 30. P. 6549.
23. Mullins W.W. // Philos. Mag. 1961. V. 6. P. 1313.
24. Doremus R.H. // J. Appl. Phys. A. 2006. V. 100. P. 101301.
25. Renaud G., Vilette B., Vilfan I., Bourret A. // Phys. Rev. Lett. 1994. V. 73. № 13. P. 1825.
26. Godin T.J., LaFemina J.P. // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. № 11. P. 7691.
27. Wang J., Howard A., Egdell R.G. et al. // Surf. Sci. 2002. V. 515. P. 337.
28. Данько А.А., Ромм М.А., Сидельникова Н.С. и др. // Поверхность. 2005. № 11. С. 85.
29. Kim S.G., Yang J.S. // J. Am. Ceram. Soc. 2006. V. 89. P. 3194.