

Исследование свойств поверхности арсенида галлия методом сканирующей атомно-силовой микроскопии

© В.Г. Божков, Н.А. Торхов[¶], И.В. Ивонин*, В.А. Новиков*

ОАО „Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов“,
634050 Томск, Россия

* Томский государственный университет,
634050 Томск, Россия

(Получена 11 сентября 2007 г. Принята к печати 24 сентября 2007 г.)

Методом атомно-силовой микроскопии проведены комплексные исследования рельефа, распределения потенциала $\varphi(x, y)$ и распределения фазового контраста поверхности n -GaAs, подвергнутой различным химическим обработкам. Распределение потенциала и фазового контраста на микроуровне в целом коррелируют с характером рельефа. Поверхность, обработанная в растворе $\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O} = 1:10$, характеризуется высокой степенью неоднородности со средней неровностью основного рельефа $\Delta h \approx 10$ нм. Значительная часть поверхности покрыта выступами высотой 20–60 нм и диаметром 100–500 нм, образующими специфическую субструктуру, которым соответствуют скачки потенциала до 50–60 мВ на общем фоне 0.77–0.80 В. На „наноуровне“ заметно выражена корреляция рельефа и фазового контраста, но между рельефом и распределением потенциала корреляция не обнаружена. Обработка поверхности n -GaAs в концентрированном водном растворе NH_4OH приводит к понижению величины $\varphi(x, y)$ на ~ 0.2 В, ее неровности — более чем на порядок (~ 0.75 нм). Распределение рельефа и фазового контраста по площади поверхности носит близкий к идеальному гауссовый характер на относительно малых участках поверхности ($200 \times 200 \text{ нм}^2$). С ростом площади отступление от гауссиана становится весьма существенным из-за плавного изменения потенциала по площади контакта. Сохранение гауссового характера рельефа поверхности при одновременном росте среднего уровня неровности с увеличением анализируемой площади указывает на фрактальный механизм формирования рельефа поверхности.

PACS: 68.47.Fg, 68.37.Ps, 73.61.Ey, 68.35.Ct, 61.43.Nv, 68.55.-a

1. Введение

Многие проблемы микроэлектроники, и в особенности наноэлектроники, напрямую связаны с созданием полупроводниковых структур с чистой и однородной поверхностью достаточно большой площади. Это относится и к GaAs. В идеале речь идет о создании атомарно-чистой и атомарно-гладкой поверхности. Однако реально достижение этой цели в лабораторных и тем более производственных условиях встречает целый ряд трудностей. Они связаны как с разработкой методов обработки и очистки поверхности полупроводника, так и методов достаточно простого и эффективного контроля состояния поверхности: структуры, состава, рельефа и потенциала. В последние два десятилетия значительные успехи достигнуты по обоим направлениям. В частности, методы сканирующей атомно-силовой микроскопии дают не только важную информацию о свойствах поверхности на наноуровне, но и становятся более доступными в практической разработке.

В ряде работ (см., например, [1]) показано, что использование концентрированной соляной кислоты в растворах этанола и изопропанола (с $\text{pH} < -1$) приводит к образованию на поверхности GaAs аморфного мышьяка (от долей до одного–трех монослоев — в зависимости от предварительного состояния), который можно достаточно просто удалить прогревом (при $T \leq 400^\circ\text{C}$) в сверхвысоком вакууме и получить практически ато-

марно-чистую поверхность. Однако в практике производства используются более доступные обработки [2], которые дают вполне удовлетворительные результаты, например, при создании контактов с барьером Шоттки (БШ) микронных размеров. На это указывает достаточно высокое качество их вольт-амперных (ВАХ) и других характеристик [3]. Тем не менее проблема улучшения характеристик контактов с БШ (в самых разных приложениях), повышения их воспроизводимости и стабильности стоит достаточно остро, особенно при переходе в область субмикронных размеров, и она в значительной степени упирается в качество подготовки поверхности и контроля ее в процессе создания прибора.

В связи со сказанным целью предлагаемой работы является исследование методом сканирующей атомно-силовой микроскопии (АСМ) состояния поверхности (рельефа, фазового контраста и потенциала) эпитаксиального арсенида галлия, подвергнутого различным обработкам, используемым в практике создания контактов металл–полупроводник (МП) с БШ.

2. Методика эксперимента

Исследовались структуры n - n^+ -GaAs:Sn(100), полученные МОС-гидридной эпитаксией, с толщиной эпитаксиального слоя 0.3 мкм и концентрацией легирующей примеси в n -слое $6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Структуры проходили „стандартный“ технологический маршрут обработки (маршрут 1). Он включал предварительную

[¶] E-mail: trkf@mail.ru

химическую очистку (в основном с целью обезжиривания) путем последовательных обработок в моноэтаноламине (C_2H_7ON), диметилформамиде (C_3H_7ON) и изопропиловом спирте (ИПС, C_3H_7OH). Для удаления собственных оксидов использовалась обработка в растворе $H_2SO_4:H_2O=1:10$ ($pH = -0.5$) в течение 10 с (декапировка). Далее, перед созданием омического контакта (ОК) к подложке эпитаксиальный слой защищался слоем оксида кремния (SiO_2) толщиной 100 нм, который наносили плазмохимическим осаждением (разложением моносилана) при $T = 280^\circ C$. ОК, который необходим для проведения точных АСМ-исследований, создавался после удаления „следов подпыления“ SiO_2 в 5%-м растворе плавиковой кислоты и 30 мкм подложки — в травителе $H_2SO_4:H_2O:H_2O=3:1:1$. Создание ОК включало электрохимическое осаждение сплава AuGe (0.2 мкм), вжигание его в атмосфере водорода в течение 5 мин при $450^\circ C$ и последующее осаждение слоя золота толщиной 0.2 мкм. Затем диэлектрик с лицевой стороны удалялся в буферном травителе ($HF:NH_4F(40\%):H_2O=15:115:31$ объемных долей) с последующей промывкой в деионизованной воде в течение 2 мин. В качестве финишной обработки, обычно используемой непосредственно перед осаждением или напылением барьерных контактов, использовалась декапировка поверхности (см. выше) и ее промывка в ИПС.

Маршрут 2 отличался от маршрута 1 только финишной обработкой поверхности, где вместо декапировки использовалась „аммиачная обработка“. Последняя включала обработку в концентрированном (25%) водном растворе NH_4OH ($pH = 12$) и промывку в ИПС.

Исследования поверхности проводились с использованием промышленного атомно-силового микроскопа (АСМ) „Solver-HV“, позволяющего измерять рельеф поверхности, распределение потенциала по поверхности и ее фазовый контраст [4–6]. Шаг сканирования определялся выбором линейных размеров области сканирования и используемым числом шагов (256×256).

Измерения проводились на воздухе при нормальных условиях в полуконтактном режиме работы, с использованием двухпроходной методики. Для работы в полуконтактном режиме использовались Si-кантилеверы марки NSG10/ W_2C , представляющие собой микромеханическое устройство, состоящее из закрепленной на основании балки шириной 35, длиной 60 и толщиной 2 мкм (рис. 1, а). На свободном конце балки со стороны ее нижней плоскости сформировано острие радиусом $r = 35$ нм, покрытое твердым токопроводящим покрытием толщиной 30 нм из W_2C . Работа в полуконтактном режиме подразумевает колебание острия кантилевера на резонансной частоте балки ω_z . Двухпроходная методика предполагает двукратное прохождение острием (сканирование) одного и того же ряда развертки.

Во время первого прохода механические колебания балки на резонансной частоте ω_z возбуждаются пьезоэлементами. Измерение рельефа поверхности (координаты i -й точки поверхности $i(x, y, z)$) образца происходит по сигналу обратной связи, который определяется

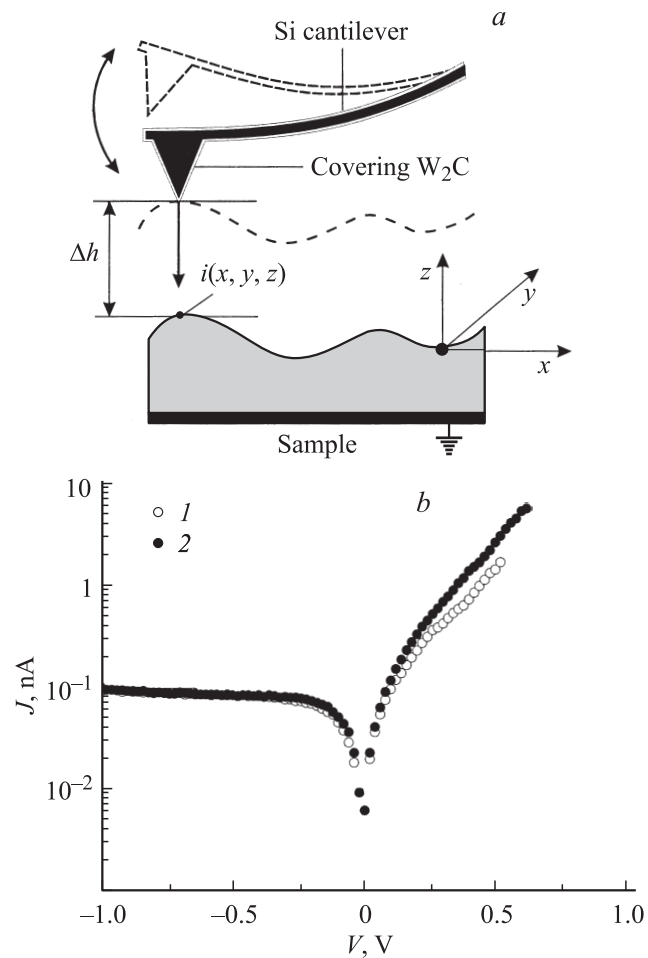


Рис. 1. Схематический рисунок работы атомно-силового микроскопа в двухпроходном режиме (а) и вольт-амперные характеристики (зонд, снятые сканирующим зондом (острием иглы кантилевера) контактным способом в двух разных точках поверхности (b), обозначенных символами 1 и 2.

перемещением острия балки в плоскости (xy) и изменением амплитуды ее колебаний $A_{iz}(\omega_z)$ по оси z в момент соприкосновения острия с поверхностью.

Одновременно с построением изображения пространственного рельефа поверхности во время первого прохода строится и изображение ее фазового контраста. Во время сканирования поверхности в полуконтактном режиме происходит периодическое измерение фазы колебаний θ при каждом соударении острия иглы кантилевера с поверхностью, обусловленное взаимодействием иглы с веществом поверхности. Изображение поверхности фазового контраста представляет собой распределение в плоскости (x, y) изменения фазы $\Delta\theta$. Изменение $\Delta\theta$ обусловлено различными свойствами участков поверхности, с которыми контактирует игла (микротвердость, вязкость, пластичность и др.), что на практике отражает изменение фазового состава поверхности. На двумерном изображении фазового контраста одинаковое изменение $\Delta\theta$ (однородность фазового состава) характеризуется одной тональностью серого цве-

та. Таким образом, распределение тональности серого цвета на плоскости (x, y) дает качественную картину пространственного распределения физических свойств поверхности.

При повторном проходе кантилевера (после измерения пространственного рельефа и фазового контраста) измеряется потенциальный рельеф поверхности. Для этого игла кантилевера поднимается над поверхностью на расстояние Δz . Для возбуждения колебаний иглы в этом случае переменное напряжение (сигнал) прикладывается непосредственно к системе зонд–образец. Частота переменного сигнала выбирается равной резонансной частоте ω_z , что и позволяет выделить и измерить только электрическую составляющую силы, действующей между образцом и кантилевером F_{zi} .

Сила электрического взаимодействия F_{iz} между i -й точкой поверхности образца и острием иглы кантилевера определяется градиентом энергии E , запасенной емкостью этой системы C_i ($E = C_i U_i^2/2$):

$$F_{zi} = -\frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{1}{2} U_i^2 \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (1)$$

где $U_i(z)$ — разность потенциалов между i -й точкой поверхности и кантилевером, включающая потенциал поверхности относительно заземленного контакта $\varphi_i(x, y)$, внешний слабый переменный сигнал с амплитудой U_1 и частотой ω_z , а также постоянное (компенсирующее) напряжение U_0 :

$$U = U_0 - \varphi_i(x, y) + U_1 \sin(\omega_z t). \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), нетрудно выделить измеряемую гармоническую составляющую силы взаимодействия:

$$F_{zi}(\omega_z) = -\frac{1}{2} \left\{ [U_0 - \varphi_i(x, y)] U_1 \sin(\omega_z t) \right\} \frac{\partial C}{\partial z}. \quad (3)$$

Из условия баланса $F_{zi}(\omega_z) = 0$ и определяется потенциал $\varphi_i(x, y)$, равный внешнему компенсирующему напряжению U_0 .

Так как $\partial C/\partial z$ значительно возрастает при уменьшении расстояния, оптимальным условием для проведения измерений является условие $\Delta z < r$.

На рис. 1, *b* представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) системы зонд–образец (W_2C-n -GaAs) при точечном соприкосновении острия иглы с поверхностью для двух различных точек. Несмотря на то что радиус такого контакта мал (соизмерим с радиусом острия иглы кантилевера — 35 нм), вид приведенных ВАХ соответствует виду диодной ВАХ контакта металл–полупроводник с БШ. Это непосредственно указывает на существование в системе зонд–образец потенциального барьера, частью которого в общем случае является контактная разность потенциалов (или поверхностный потенциал $\varphi_i(x, y)$) [7].

Отметим, что сканирование поверхности осуществлялось с фиксированным числом шагов (точек, пикселей) $N = 256 \times 256$ независимо от сканируемой площади.

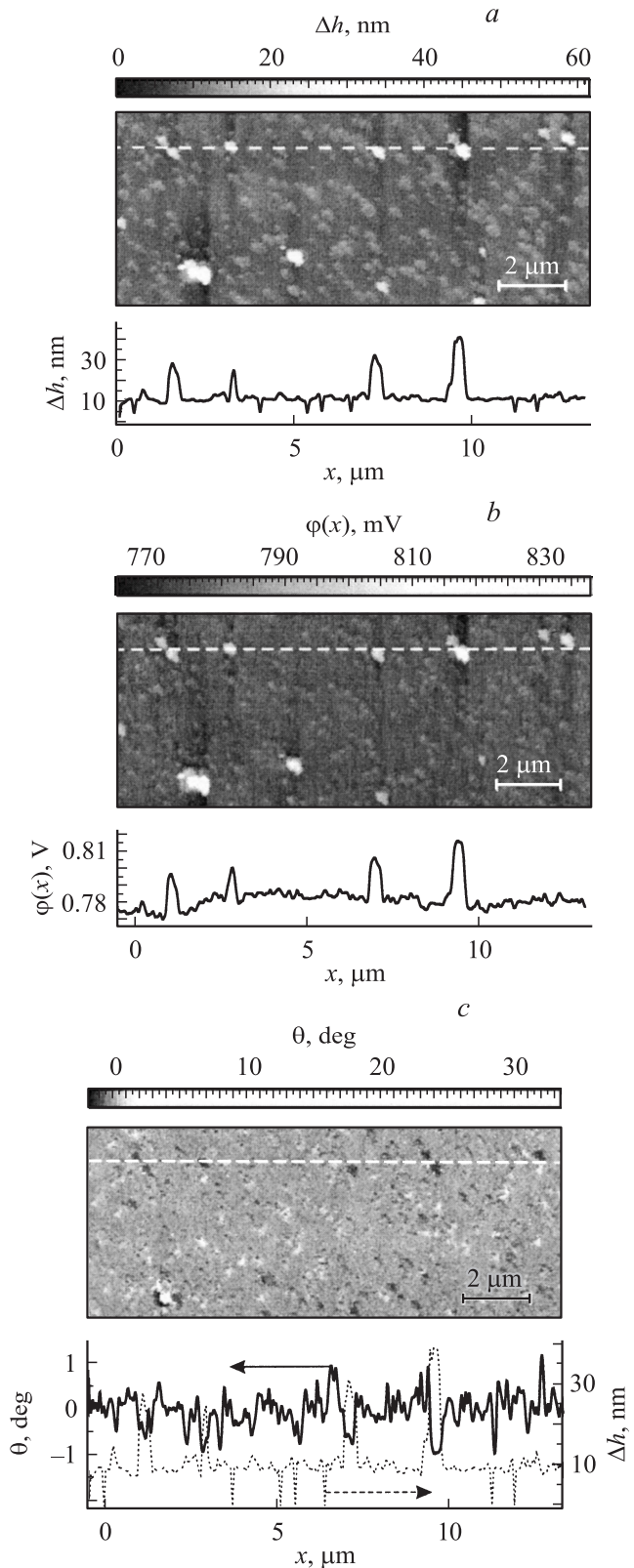


Рис. 2. АФМ-изображения обработанного по маршруту 1 участка ($13.3 \times 13.3 \text{ мкм}^2$) поверхности эпитаксиального n -GaAs: пространственного рельефа и его поперечного сечения (*a*), потенциального рельефа поверхности и его поперечного сечения (*b*), фазового контраста поверхности и его поперечного сечения (*c*). Пунктирная линия на рис. *c* повторяет профиль рельефа $\Delta h(x)$ на рис. *a*.

3. Результаты исследований и обсуждение

Хотя предварительная история формирования поверхности безусловно важна, очевидно, что наибольшее влияние на ее состояние оказывают финишные процессы. В нашем случае это удаление оксида кремния в буферном травителе, обработка в водном растворе серной кислоты и кратковременная промывка в деионизованной воде (маршрут 1). Известно (см., например, [8]), что кислые растворы ($\text{pH} < -0.3$) растворяют оксиды GaAs. Для этой цели используются растворы не только серной, но и соляной кислоты ($\text{HCl}:\text{H}_2\text{O} = 1:1$, $\text{pH} = -0.7$) [9,11]. Последующая отмывка в деионизованной воде удаляет продукты растворения и следы самого раствора, но одновременно стимулирует окисление поверхности [8]. По этой причине используется кратковременная отмывка. В результате формируется поверхность, на которой не только возможно [8], но и реально наблюдается (см., например, [12]) присутствие оксидов галлия и мышьяка.

На рис. 2 представлены изображения, полученные с помощью АСМ-измерений рельефа поверхности (*a*), потенциального рельефа (*b*) и фазового контраста (*c*) эпитаксиального *n*-GaAs, прошедшего стандартную химическую обработку (маршрут 1). В нижней части каждого из рисунков приведены профили рельефов этих изображений, соответствующие указанным штриховыми линиями сечениям. Отметим сразу хорошо выраженную корреляцию между всеми тремя характеристиками поверхности в том, что касается характерных выступов (островков) высотой 20–60 нм и диаметром 100–500 нм на относительно гладкой поверхности *n*-GaAs (рис. 2, *a*). Этим выступам соответствуют скачки потенциала 20–40 мВ на фоне относительно плавного его изменения (рис. 2, *b*) и заметно выраженные изменения фазового контраста (рис. 2, *c*). Соответствие фазового контраста и рельефа поверхности подтверждается и при сравнении их профилей (см. пунктирную линию на рис. 2, *c*): пикам рельефа соответствуют провалы фазового контраста, хотя картина фазового контраста выглядит более сложной. Можно сказать, что описанные выступы (островки) отличаются в целом фазовым составом и образуют специфическую субструктуру, равномерно покрывающую всю поверхность эпитаксиального слоя *n*-GaAs. Есть все основания связать наличие выступов рельефа (как и других его особенностей) с характером обработки. На это, например, указывает сравнение с аналогичными результатами исследования поверхности GaAs после травливания оксида кремния в буферном травителе. Как оказалось, в последнем случае рельеф не содержит значительного количества выступов (что однозначно связывает их появление с процессом декапировки), и уровень шероховатости поверхности (см. далее) существенно ниже, чем при декапировке.

Основному, более гладкому рельефу поверхности (между выступами) соответствует уровень неровностей

$\Delta h \approx 10\text{--}15$ нм. Заметно выражены отдельные ямки глубиной до 10 нм и поперечником до 100 нм (рис. 2, *a*). Потенциал поверхности в этой области изменяется достаточно плавно (рис. 2, *b*): колебания 10–20 мВ на площадях в сотни квадратных мкм, а флуктуации потенциала на нанометровом уровне еще ниже. Говорить о корреляции между профилями потенциала, рельефа и фазового контраста на нанометровом уровне сложно. Можно лишь отметить, что обнаруженные на пространственном рельефе ямки (или поры) на потенциальном рельефе заметно не проявляются.

При большем разрешении (рис. 3, *a* и 3, *b*) видно, что рельеф поверхности *n*-GaAs и фазовый контраст формируются слоем плотно примыкающих друг к другу достаточно однородных зерен. Эти зерна (особенно на изображении фазового контраста) имеют хорошо выраженные границы и относительно небольшие колебания размеров (50–100 нм в диаметре, 10–15 нм по высоте). Интересно то, что выступающие „островки“ рельефа на рис. 3, *a*, как и области вне их, также имеют зернистую структуру с той разницей, что зерна собраны в трехмерные образования (скопления), что и выделяет их на фоне основного рельефа. На рис. 3, *b* изображение фазового контраста в области „островков“ и вне их отличается довольно слабо. Вместе с тем качественная корреляция между рельефом и фазовым контрастом не вызывает сомнения: видно, что выступам рельефа на рис. 3, *a* соответствуют достаточно определенно очерченные области фазового контраста.

На рис. 3, *a* и 3, *b* внизу приведены профили рельефа и фазового контраста, соответствующие указанным сечениям (1) и (2). Сечения выбраны таким образом, что одно из них проходит через выступающий „островок“ (2), а другое — через область основного, гладкого рельефа поверхности (1). Профили рельефа выглядят более плавными (за исключением некоторых резких провалов, обусловленных, по-видимому, порами), что отражает овальную форму зерен. На профилях фазового контраста областям зерен соответствует относительно плоская часть (что отражает однородность фазы), а их границам — провалы, наиболее глубокие из которых возможно также соответствуют порам. При внимательном рассмотрении нетрудно убедиться в корреляции обоих профилей для сечения (1) (рис. 3, *a*): границам зерен на профиле рельефа соответствуют скачки фазового контраста. Относительно сечения (2) такой вывод сделать сложнее, так как профиль рельефа существенно „заглублен“ из-за наличия довольно высокого выступа. В целом можно сказать, что хотя интерпретация фазового контраста носит качественный характер, он дает важную дополнительную информацию относительно не только фазовой, но и геометрической структуры поверхностных образований.

Нужно отметить, что метод АСМ довольно широко используется для исследования рельефа поверхности полупроводников. Однако сведения об исследованиях фазового контраста и распределения потенциала поверхности довольно ограничены. Качественно подобные

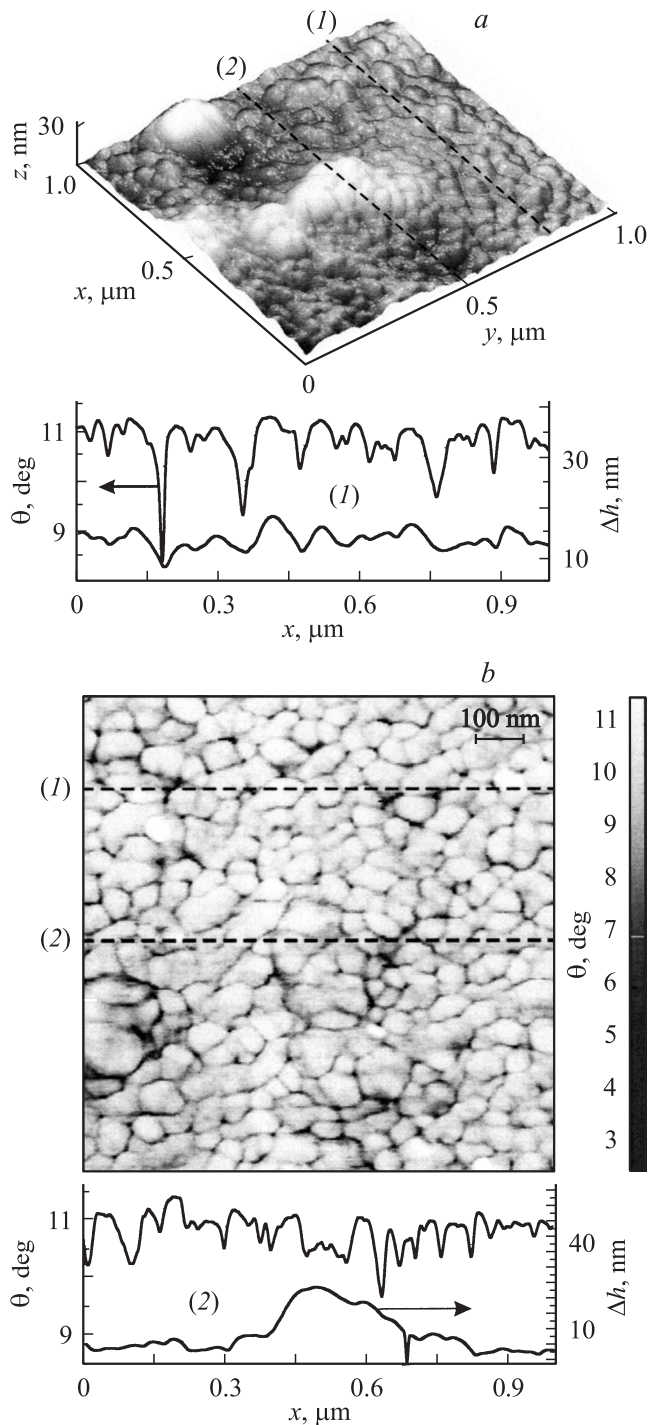


Рис. 3. АСМ-изображения обработанного по маршруту 1 участка $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ поверхности эпитаксиального n -GaAs: трехмерного пространственного рельефа (*a*) и фазового контраста (*b*). Под рисунками даны профили рельефа и фазового контраста для поперечных сечений (1) и (2).

рис. 2, *a* и 3, *a* результаты исследования рельефа поверхности GaAs получены в работе [12], хотя из-за различной „истории“ поверхности количественные параметры рельефа отличаются существенно. Опираясь на результаты работы [12] и других работ [2,8,13], можно

утверждать, что поверхностный рельеф GaAs формируется преимущественно оксидами галлия и мышьяка. На основе приведенных результатов можно предположить, что наличие выступов, в силу корреляции их положения с распределением поверхностного потенциала, связано с наличием активных участков на поверхности (где локализован отрицательный заряд), способствующих более быстрому росту оксида.

Общее представление о сложности рельефа, потенциала и фазового контраста поверхности дают соответствующие гистограммы, представленные на рис. 4. Основная часть изображений аппроксимируется тремя гистограммами, которые можно условно приписать трем основным фазово-структурным образованиям на поверхности. Это могут быть, согласно ожидаемым из анализа равновесного состояния системы в контакте с кислыми растворами и водой [8], оксиды мышьяка и галлия и элементарный мышьяк. Хотя не исключены и более сложные образования. Обращает на себя внимание наличие довольно выраженных „хвостов“ распределений. Большая часть из них соответствует относительно большим по размерам образованиям (выступам с $\Delta h > 20 \text{ нм}$) с повышенным потенциалом и фазовым контрастом. Дополнительная сложность интерпретации гистограммы потенциала заключается в том, что на общую картину накладывается плавное изменение потенциала по поверхности, связанное, вероятно, с неоднородностью объемных свойств. Что касается гистограммы фазового контраста, то она приводится, скорее, для полноты картины, поскольку ее непосредственная физическая интерпретация пока вызывает сложности.

Добавим к сказанному, что на левую часть распределений, возможно, оказывают влияние „темные дорожки“ вблизи структурных выступов (рис. 2, *a*), которые связаны с методическими особенностями формирования изображения вблизи резких выступов, а также порами.

Радикального изменения состояния (прежде всего состава) поверхности GaAs можно достичь обработкой в ярко выраженных щелочных ($\text{pH} \geq 13$) и кислых ($\text{pH} < -1$) средах, в которых возможно не только растворение собственных оксидов, но и эффективное удаление их с поверхности. В этом случае в равновесии на поверхности GaAs может присутствовать только элементарный мышьяк [8]. Такое резкое изменение состояния поверхности должно привести к столь же резкому изменению ее характеристик. В данной работе для достижения этой цели использовалась финишная обработка поверхности в концентрированном водном растворе NH_4OH (аммиачная обработка), после чего образец помещали в изопропиловый спирт, доводили до кипения, а затем высушивали в его парах в течение 5 мин (см. маршрут 2). В такой среде присутствовавшие там ранее собственные оксиды эффективно растворяются и удаляются с поверхности [8].

Из рис. 5 и 6 действительно следует, что состояние поверхности GaAs изменяется радикально. Прежде всего исчезают выступы микрорельефа (островковые образования) и соответствующие им выступы потенциала.

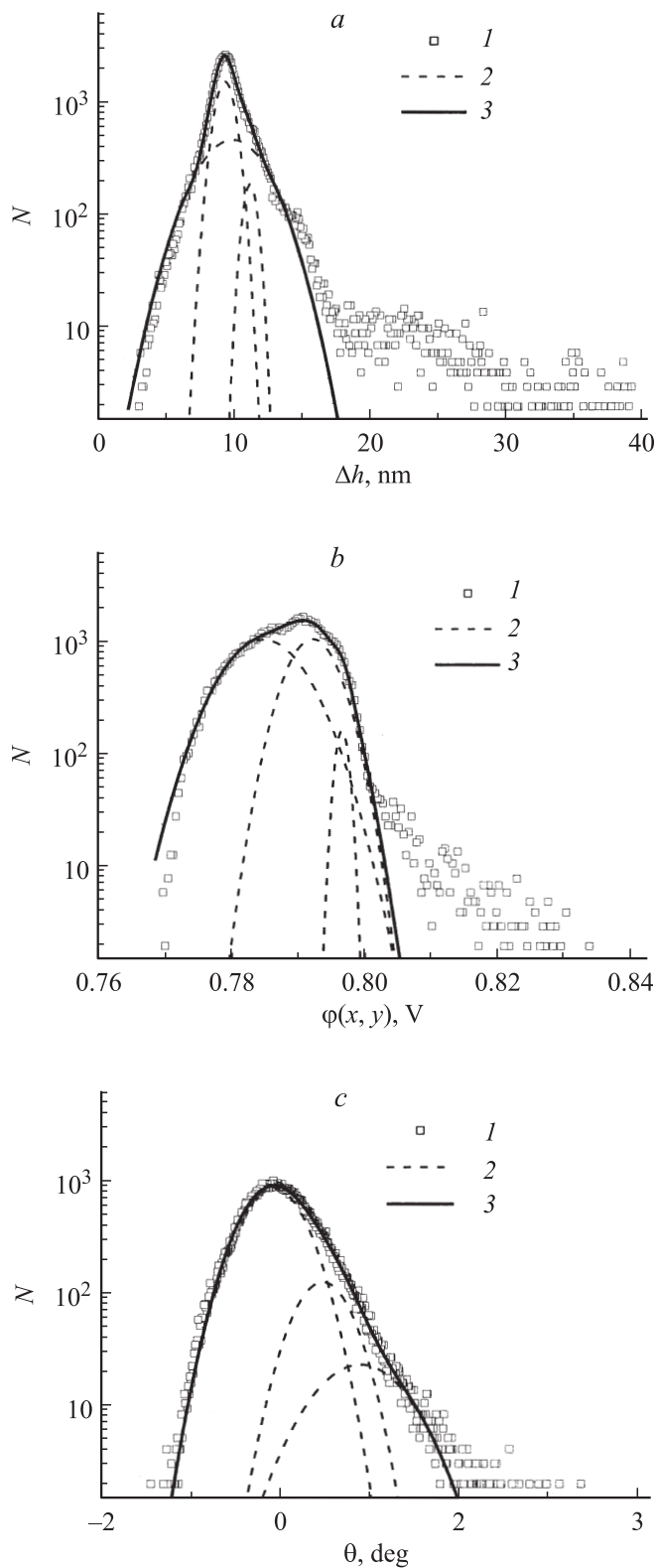


Рис. 4. Гистограммы распределения значений величины неровностей Δh приведенного на рис. 2, *a* (маршрут 1) пространственного рельефа поверхности (*a*), гистограмма распределения значений величины потенциала этой поверхности $\varphi(x, y)$ (*b*) и фазового контраста (*c*). Точки — экспериментальные значения (1), штриховые линии — аппроксимация функциями Гаусса (2), сплошные линии — сумма функций Гаусса (3).

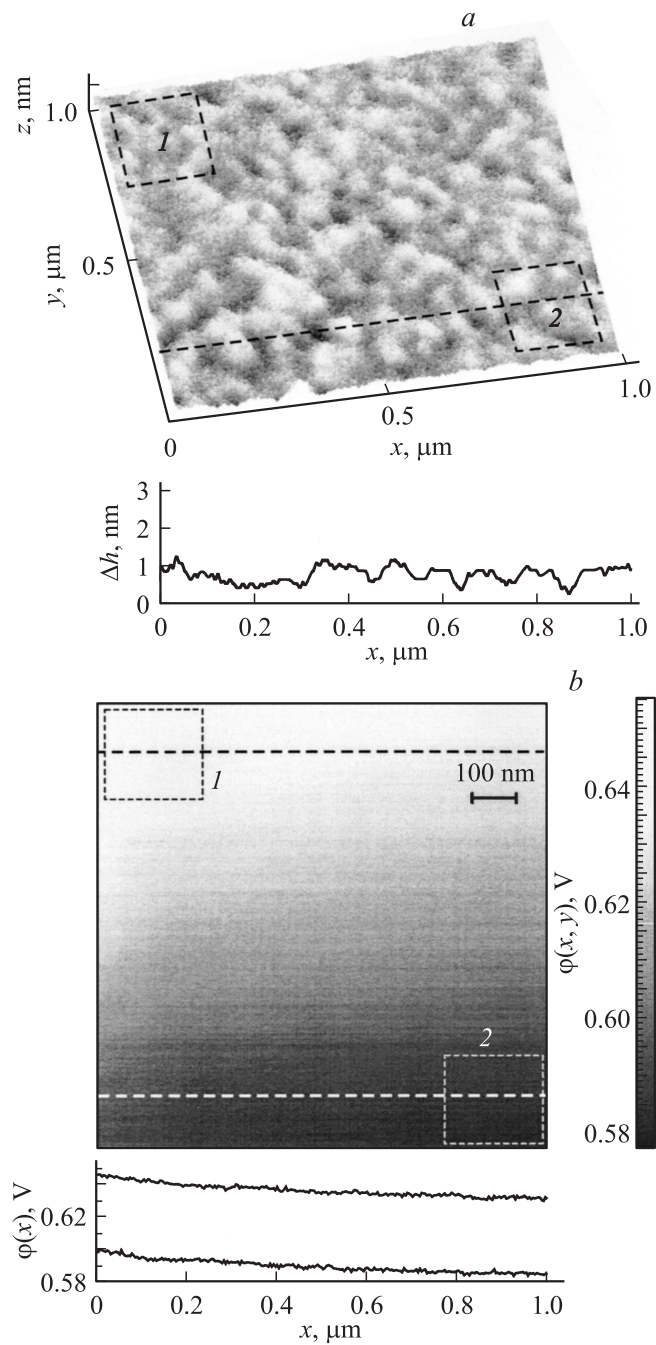


Рис. 5. АСМ-изображения обработанного по маршруту 2 участка $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ поверхности эпитаксиального *n*-GaAs: трехмерного пространственного рельефа и его поперечного сечения (*a*), потенциального рельефа поверхности и его поперечных сечений (*b*).

Практически на порядок уменьшается неровность поверхности (рис. 5, *a*). Подобным же образом уменьшаются флуктуации потенциала (рис. 5, *b*) и фазового контраста (рис. 6, *a*) (представленные в нижней части рисунков профили изображений соответствуют указанным штриховыми линиями сечениям). Еще одним существенным изменением является уменьшение поверхностного потенциала примерно на 0.2 В. Заметно выражено плав-

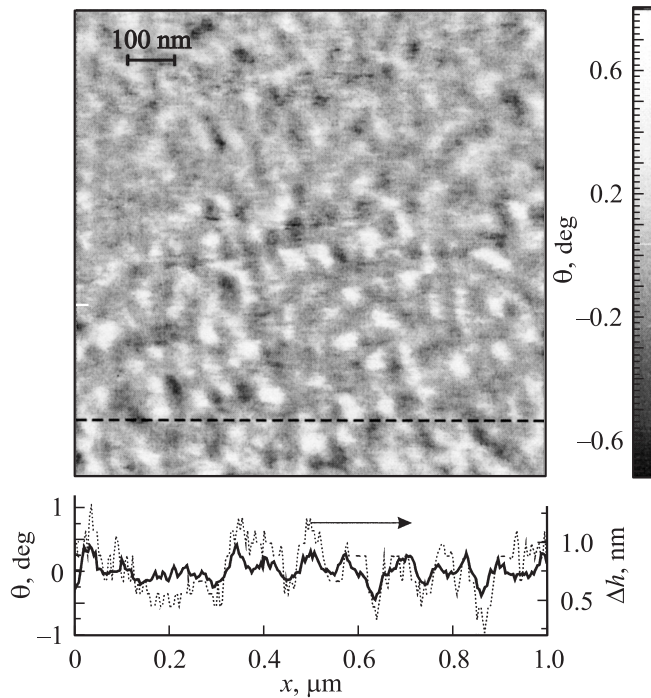


Рис. 6. Изображение фазового контраста рельефа обработанного по маршруту 2 участка $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ поверхности эпитаксиального $n\text{-GaAs}$ и его поперечного сечения.

ное изменение потенциала (рис. 5, *b*), причины которого связаны, по-видимому, с влиянием объемных свойств на выбранных для исследования образцах.

Нельзя не отметить одно интересное обстоятельство. Изменение потенциала поверхности в результате обработки, которая инициирует появление на поверхности элементарного мышьяка, полностью соответствует объяснению изменения высоты барьера в модели Spicer et al. [14–16]. Согласно выводам авторов, увеличение содержания мышьяка в приповерхностной области (а значит, и увеличение As_{Ga} -центров в сравнении с Ga_{As} -центрами) должно сдвигать уровень Ферми к уровню 0.75 эВ, одному из двух донорных уровней, возникающих на поверхности при нанесении металла. Высота барьера в контакте $M-n\text{-GaAs}$ (M — металл) при этом должна уменьшаться. Напротив, уменьшение As_{Ga} -центров должно сдвигать уровень Ферми к уровню 0.5 эВ, т.е. увеличивать высоту барьера в контакте. Очевидно, что в нашем случае уменьшение поверхностного потенциала полностью соответствует увеличению влияния мышьяка в контакте $M-n\text{-GaAs}$.

Как следует из рис. 5, *a* и 5, *b* и особенно из сравнения профилей рельефа и потенциала, корреляция между рельефом поверхности и распределением потенциала отсутствует. Однако о корреляции рельефа и фазового контраста поверхности, как это следует из сравнения их профилей на рис. 6, можно говорить и в этом случае. Наличие ее еще раз подтверждает естественную связь между рельефом поверхности и ее фазовым контрастом, о которой говорилось при анализе рис. 3.

Статистическая обработка данных рельефа (рис. 7, *a*) показывает, что последний идеально описывается гауссовым распределением с максимумом при $\Delta h \approx 0.76 \text{ нм}$. Практически то же можно сказать о распределении фазового контраста (рис. 7, *c*), что еще раз свидетельствует об их связи. Распределение потенциала (рис. 7, *b*) существенно сложнее, но причина этого очевидна — довольно сильное и плавное изменение потенциала, о котором говорилось выше (рис. 6, *b*). Для выбранных на рис. 5, *b* участков 1 и 2 с примерно однородным оттенком изображения распределения потенциала близки к гауссовому (рис. 8).

Отметим еще один интересный результат. Гауссовое распределение для рельефа поверхности сохраняется практически в том же виде, что на рис. 7, *a*, и для отдельно взятых (рис. 5, *a*) участков поверхности 1 и 2, рис. 8. Возможно, это свидетельствует о том, что характерный размер $\sim 0.76 \text{ нм}$ является минимальным размером для данного рельефа. Дело в том, что с ростом анализируемой площади гауссово распределение по-прежнему выполняется, но характерный размер (соответствующий максимуму распределения) растет: для площади $10 \times 10 \text{ мкм}^2$ он составляет 2.51 нм, а для площади $99 \times 99 \text{ мкм}^2$ — 7.52 нм. Это обстоятельство позволяет сделать заключение о соответствии характера рельефа фрактальному механизму его формирования, широко используемому для описания рельефа металлических и других поверхностей [13,17].

В общем случае фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому [18]. Основной характеристикой фрактальных поверхностей является величина их фрактальной размерности $2 < D_f < 3$, которая, по определению, превышает величину топологической размерности исследуемой поверхности ($D_t = 2$) и поэтому является дробной величиной. В природе не существует истинно фрактальных поверхностей. Реальные поверхности могут быть только самоафинными, т.е. могут обладать свойством подобия лишь в довольно узком интервале измерительных масштабов δ . Согласно проведенным оценкам [13], для эпитаксиального $n\text{-GaAs}$ величина δ может изменяться в пределах от сотых долей до десятков нанометров.

В данной работе для определения D_f поверхности эпитаксиального $n\text{-GaAs}$ использовался метод триангуляции [18]. Вычисление величины D_f методом триангуляции заключается в последовательной аппроксимации поверхности набором пирамид и измерением площади их боковых поверхностей. Точность измерения площади поверхности S в данном случае будет зависеть от количества таких пирамид (числа разбиений), которое определяется величиной измерительного масштаба δ . Так как для фрактальной (самоафинной) поверхности величины S и δ связаны соотношением [18]

$$S = S_0 \delta^{2-D_f} \quad (4)$$

(где S_0 — площадь проекции боковой поверхности на плоскость (x, y)), то по углу наклона линейного участка зависимости $\ln S = f(\ln \delta)$ нетрудно определить

величину D_f . Проведенная методом триангуляции оценка величины фрактальной размерности поверхности дала значение $D_f = 2.42 \pm 0.01$, что означает довольно развитую (в частности — сильно шероховатую) поверх-

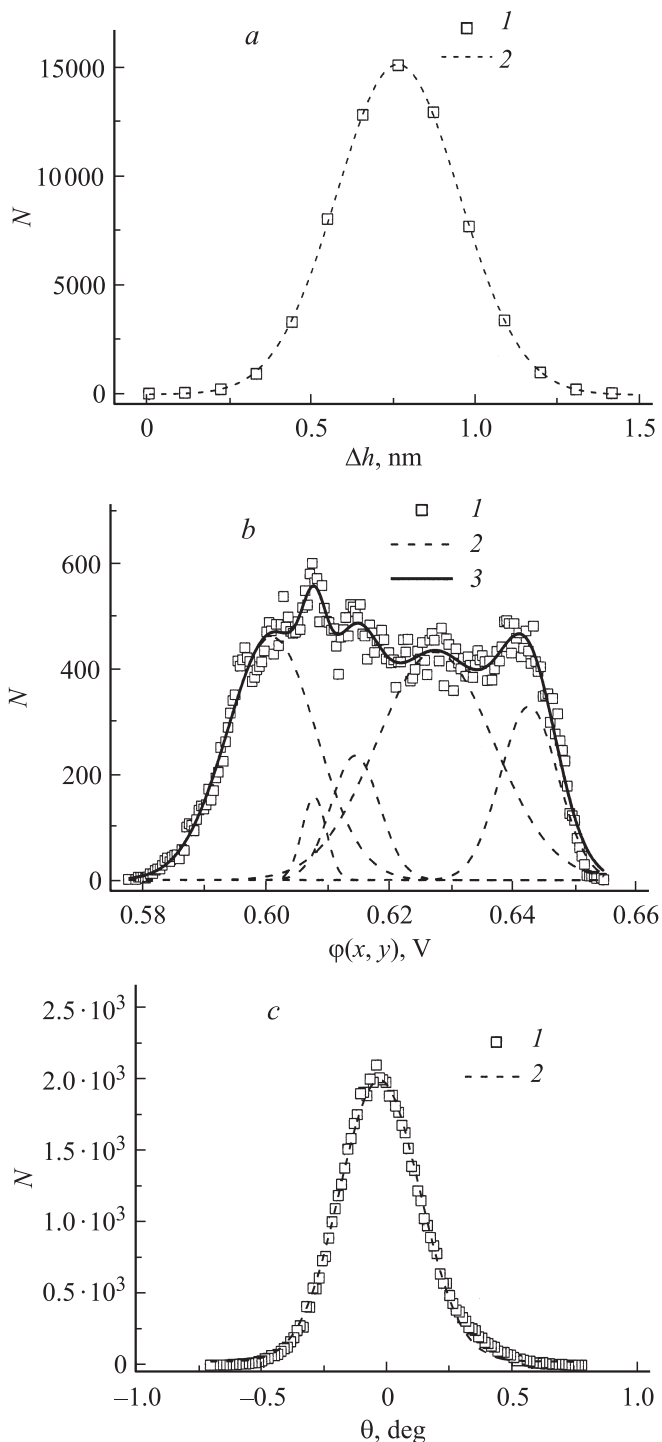


Рис. 7. Гистограммы распределения значений величин: *a* — неровности Δh приведенного на рис. 5, *a* (маршрут 2) пространственного рельефа поверхности, *b* — потенциала этой поверхности $\varphi(x, y)$, *c* — фазового контраста. 1 — экспериментальные значения, 2 — аппроксимация функциями Гаусса, 3 — сумма функций Гаусса.

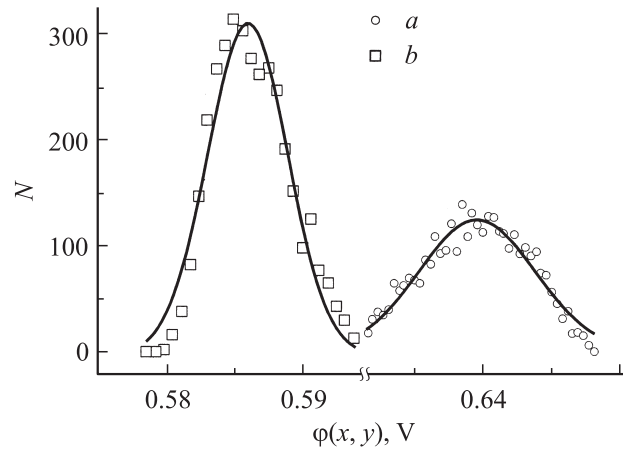


Рис. 8. Гистограммы распределения значений потенциала $\varphi(x, y)$ выделенных участков 1 и 2 поверхностей потенциального рельефа (маршрут 2), приведенного на рис. 5, *b*. Символы *a, b* — эксперимент, сплошные кривые — аппроксимация функциями Гаусса. Символами *a* показаны данные для участка 2 на рис. 5, символами *b* — для участка 1 на рис. 5.

ность *n*-слоя GaAs. Сильная шероховатость поверхности эпитаксиального *n*-GaAs ведет к существенному увеличению площади ее поверхности. Так, проведенные с использованием выражения (4) оценки реальной площади поверхности, приведенной на рис. 5, *a*, дали величину $10.27 \mu\text{км}^2$, что более чем на порядок превышает площадь сканируемого окна (скана), равного всего $1 \mu\text{км}^2$.

Интересно отметить, что для обработанной по маршруту 1 поверхности также наблюдается зависимость величины средней неровности от размера исследуемой площади. В результате установлено, что декапировка поверхности эпитаксиального *n*-GaAs приводит к меньшему значению $D_f = 2.19 \pm 0.01$. Меньшее значение величины D_f говорит о том, что, несмотря на большее значение среднего размера неровностей поверхности Δh (размер неровности), поверхность менее развита и ее фактическая площадь всего в 2.87 раз превышает площадь скана $1 \mu\text{км}^2$. Таким образом, мы видим, что величина фрактальной размерности поверхности полупроводника отражает не только величину среднего значения неровностей, но и характер их распределения по поверхности.

4. Заключение

Впервые методом АСМ проведены комплексные исследования рельефа, распределения потенциала и распределения фазового контраста поверхности *n*-GaAs, подвергнутой различным химическим обработкам. Поверхность, обработанная в сернокислотном водном растворе ($\text{H}_2\text{SO}_4:\text{H}_2\text{O} = 1:10$) в течение 10 с (декапировка), характеризуется высокой степенью неоднородности: среднее значение неровностей основного рельефа

составляет $\Delta h \approx 10$ нм. При этом значительная часть поверхности покрыта выступами (островками) высотой 20–60 нм и диаметром 100–500 нм, образующими специфическую субструктуру, равномерно покрывающую всю поверхность эпитаксиального *n*-GaAs. На связь рельефа с характером обработки указывает то, что поверхность GaAs после удаления диоксида кремния в буферном травителе характеризуется примерно в 5 раз меньшей неровностью и отсутствием заметных выступов. Распределение потенциала и фазового контраста в целом коррелируют с характером рельефа. В частности, выступам рельефа соответствуют скачки (выбросы) потенциала до 50–60 мВ на общем фоне 0.77–0.80 В. Однако на „наноуровне“ (при исследовании участков с размерами 1×1 мкм²) заметной корреляции между рельефом и распределением потенциала не обнаружено. Более выражена корреляция рельефа и фазового контраста. Последний, как это уже известно, позволяет получить более четкую картину рельефа.

Финишная обработка поверхности *n*-GaAs в концентрированном водном растворе NH₄OH с pH = 12 (аммиачная обработка) с последующей промывкой в изопропиловом спирте, в которой собственные оксиды удаляются с поверхности и основным продуктом взаимодействия является элементный мышьяк [8], дает существенно отличную картину рельефа, потенциала и фазового контраста. Абсолютная величина потенциала поверхности понижается на ~ 0.2 В, ее неровность — более чем на порядок; то же относится и к уровню флуктуаций потенциала. Распределение рельефа и фазового контраста по площади поверхности носит близкий к идеальному гауссовый характер. Распределение потенциала соответствует гауссовому на относительно малых участках поверхности (200×200 нм²). С ростом площади отступление от гауссиана становится весьма существенным из-за плавного изменения потенциала по площади контакта.

Наблюдаемое сохранение гауссового характера рельефа поверхности при одновременном росте среднего уровня неровности с увеличением анализируемой площади является отражением фрактального механизма формирования рельефа поверхности.

Список литературы

- [1] V.L. Alperovich, O.E. Tereshchenko, N.S. Rudaya, D.V. Sheglov, A.V. Latyshev, A.S. Terelhov. Appl. Surf. Sci., **235**, 249 (2004).
- [2] Т.П. Бекезина, Г.М. Мокроусов. Неорг. матер., **36** (9), 1029 (2000).
- [3] В.Г. Божков, В.В. Вилисова, К.И. Куркан, О.Ю. Малаховский, Т.М. Табакаева. Электронная промышленность, **9**, 82 (1993).
- [4] www.ntmdt-tips.com
- [5] В.Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии (Н. Новгород, Ин-т физики микроструктур, 2004).
- [6] А.Д. Зимон. Адгезия жидкости и смачивание (М., Химия, 1974).
- [7] E.H. Rhoderick, R.H. Williams. Metal–semiconductor contacts, 2nd edn. (Clarendon, Oxford, 1988).

- [8] Г.М. Мокроусов. Перестройка твердых тел на границе твердых фаз (Томск, Изд-во Томск. гос. ун-та, 1990).
- [9] H. Palm, M. Arbes, M. Schulz. Phys. Rev. Lett., **71** (4), 2224 (1993).
- [10] G.M. Vanalme, L. Goubert, R.L. Van Meirhaeghe, F. Cardon, P. Van Daele. Semicond. Sci. Technol., **14**, 871 (1999).
- [11] S. Forment, R.L. Van Meirhaeghe, A. De Vrieze, K. Strubbe, W.P. Gomes. Semicond. Sci. Technol., **16**, 975 (2001).
- [12] D. Sadowska, A. Gładki, K. Mazur, E. Talik. Vacuum, **72**, 217 (2004).
- [13] Н.А. Торхов. ФТП, **37** (10), 1205 (2003).
- [14] W.E. Spicer, T. Kendelewicz, N. Newman, R. Cao, C. McCants, K. Miyano, I. Lindau, Z. Liliental-Weber, E. Weber. Appl. Surf. Sci., **33** (34), 1009 (1988).
- [15] W.E. Spicer, Z. Liliental-Weber, E. Weber, N. Newman, T. Kendelewicz, R. Cao, C. McCants, K. Miyano, P.H. Mahowald, I.J. Lindau. Vac. Sci. Technol., **B6**, 1245 (1988).
- [16] W.E. Spicer, R. Cao, K. Miyano, T. Kendelewicz, I. Lindau, E. Weber, Z. Liliental-Weber, N. Newman. Appl. Surf. Sci., **41** (42), 1 (1989).
- [17] А.В. Панин, А.Р. Шугуров. Поверхность, **6**, 64 (2003).
- [18] Е. Федер. Фракталы (М., Мир, 1994).

Редактор Т.А. Полянская

Study of properties of gallium arsenide surface by scanning atomic-force

V.G. Bozhkov, N.A. Torkhov, I.V. Ivonin*, V.A. Novikov*

Joint-Stock Company,
„Research Institute of Semiconductor Devices“,
634050 Tomsk, Russia
* State Tomsk University,
634050 Tomsk, Russia

Abstract Using atomic-force microscopy, a complex study of the relief and distributions of the potential $\varphi(x, y)$ and phase contrast is performed for *n*-GaAs surface treated with different chemical etchants. At the micro level, the potential and phase contrast distributions correlate as a whole with the surface relief. The surface etched with a H₂SO₄:H₂O = 1:10 solution is characterized by a high degree of nonuniformity with an average roughness of the surface relief $\Delta h \approx 10$ nm. A considerable part of the surface is covered by ridges 20–60 nm in height and 100–500 nm in diameter that form a specific substructure. Potential jumps up to 50–60 mV above the background level of 0.77–0.80 V correspond to these ridges. At the nano level, a correlation between the surface relief and the phase contrast is pronounced. However, no correlation is observed between the relief and the potential distribution. Treatment of the *n*-GaAs surface in aqueous NH₄OH solution results in a decrease in $\varphi(x, y)$ by ~ 0.2 V and in the surface roughness more than by an order of magnitude (~ 0.75 nm). The distributions of the relief and phase contrast over the surface area have an almost ideal Gaussian character. Whereas, the potential distribution has a Gaussian character only on the relatively small surface areas (200×200 nm²). As the area increases, deviation from the Gaussian becomes more pronounced due to the smooth variation of the potential over the contact area. The fact that a Gaussian character of the surface relief is kept, as an average roughness increases with the examined area, is indicative of the fractal mechanism of the surface relief formation.