

# Влияние температуры роста на статистические параметры морфологии поверхности GaN

© В.А. Новиков<sup>¶</sup>, В.В. Преображенский<sup>+</sup>, И.В. Ивонин

Томский государственный университет,  
634050 Томск, Россия

<sup>+</sup> Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук,  
630090 Новосибирск, Россия

(Получена 5 ноября 2013 г. Принята к печати 13 ноября 2013 г.)

В рамках работы показано, что для более полного анализа статистических параметров морфологии поверхности твердых тел, в частности эпитаксиальных пленок GaN, необходимо получать соотношение скейлинга. Данное соотношение учитывает параметры как эксперимента, так и условий исследования. На примере исследования методами атомно-силовой микроскопии эпитаксиальных пленок нитрида галлия, полученных при различных температурах, показано, что соотношение скейлинга позволяет связать в одном уравнении три параметра: температуру роста, ширину области сканирования и количество точек измерения. Из полученного соотношения можно более точно оценить шероховатость поверхности при областях сканирования более  $10 \times 10$  мкм и спрогнозировать ее величину при изменении температуры роста.

## 1. Введение

В настоящее время широкое применение получили методы атомно-силовой микроскопии (АСМ) для анализа различных характеристик поверхности: топографии, распределения зарядов по поверхности или магнитных доменов и т.д. Методы АСМ позволяют реконструировать трехмерные участки поверхности твердого тела с различным увеличением, что дает возможность получать ряд статистических параметров для характеристики развитости рельефа поверхности. Наибольшее распространение получили такие параметры, как средний перепад по высоте и шероховатость или среднеквадратичная шероховатость поверхности. Из сравнения среднего перепада по высоте и шероховатости можно сделать вывод о том, что на поверхности присутствуют глубокие кратеры (поры) или выступы. Например, если значение среднего перепада по высоте имеет большую величину, а значение шероховатости очень мало, то, следовательно, на поверхности присутствуют в небольшом количестве кратеры (поры), которые увеличивают значение среднего перепада по высоте, так как минимальная точка рельефа соответствует дну кратера (поры).

В ряде работ [1–4] показано, что значения статистических параметров при АСМ-измерениях сильно зависят от ширины области сканирования (увеличения). Кроме того, значения данных параметров также зависят от количества точек измерения. Для определения влияния параметров сканирования на средний перепад по высоте и шероховатость была исследована серия эпитаксиальных пленок GaN, которые выращивались в установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) „СВЕ Riber 32P“ (Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск).

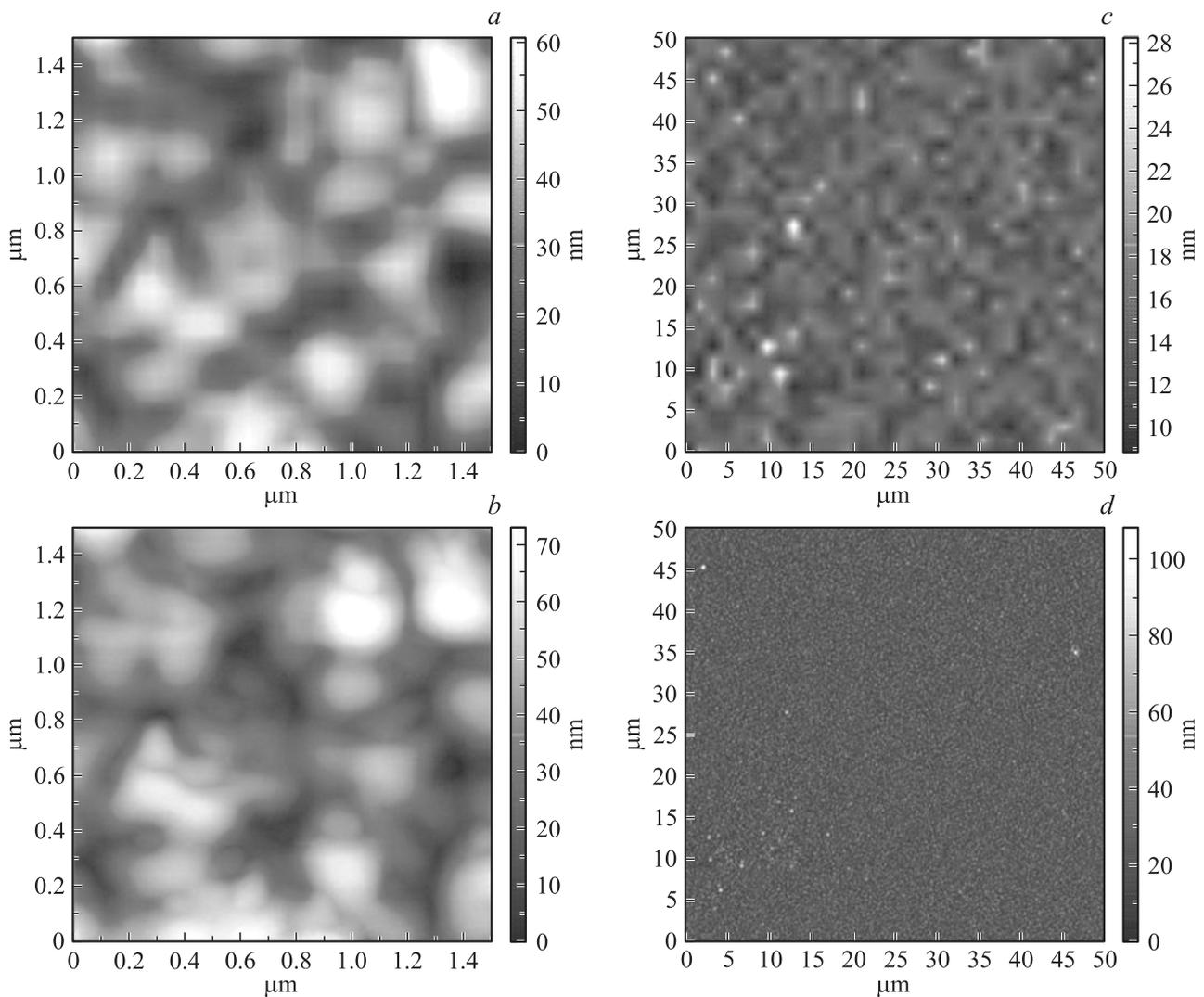
## 2. Исследованные образцы

В рамках данной работы проводилось исследование морфологии поверхностей слоев GaN, выращенных методом МЛЭ, при изменении температуры роста ( $T_g$ ) от 830 до 910°C. Температура изменялась с шагом в 20°C. Исследования проводились с применением атомно-силового микроскопа „Solver HV“ производства фирмы НТ-МДТ, г. Зеленоград. В процессе измерения были получены АСМ-изображения поверхности, ширина области сканирования ( $L$ ) изменялась от 0.3 до 100 мкм (полный размер области сканирования от  $0.3 \times 0.3$  до  $100 \times 100$  мкм). Для каждой области количество точек сканирования  $N_x \times N_y$  менялось от  $32 \times 32$  до  $1024 \times 1024$ . Типичные АСМ-изображения поверхности представлены на рис. 1.

Из АСМ-изображений поверхности видно, что достоверность получаемых данных сильно зависит от количества точек измерения, это особенно актуально при больших полях сканирования, т.е. при малом увеличении. Например, при ширине области сканирования  $L = 50$  мкм и количестве точек на линию  $N_x = 256$  расстояние между соседними точками измерения составляет 195.3 нм, увеличение количества точек измерения до  $N_x = 1024$  уменьшает данную величину до 48.8 нм. Следовательно, в зависимости от ширины области сканирования и количества точек измерения часть информации при АСМ-измерениях теряется, что хорошо видно из рис. 1.

Поэтому при АСМ-измерениях необходимо анализировать зависимости статистических параметров морфологии поверхности не только от внешних факторов (в нашем случае температуры роста эпитаксиальных пленок нитрида галлия), но и от параметров сканирования: ширины (или площади) области сканирования и количества точек измерения.

<sup>¶</sup> E-mail: novikovvadim@mail.ru



**Рис. 1.** АСМ-изображения поверхности слоев GaN, выращенных методом МЛЭ при  $T_g = 830$  (a, b) и  $870^\circ\text{C}$  (c, d). Размер области сканирования  $1.5 \times 1.5$  мкм (a, b),  $50 \times 50$  мкм (c, d). Количество точек измерения  $N_x = 32$  (a, b), 1024 (c, d).

### 3. Результаты измерений

Из полученных АСМ-изображений были определены значения среднего перепада по высоте  $\langle h \rangle$  и шероховатости поверхности  $w$ . По этим данным были построены в двойных логарифмических координатах зависимости  $\langle h \rangle$  и  $w$  от ширины области сканирования ( $L$ ) для нескольких значений количества точек сканирования. Полученные зависимости для  $T_g = 910^\circ\text{C}$  приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, зависимости для  $\langle h \rangle$  и  $w$  имеют подобный вид, с увеличением области сканирования происходит увеличение значений  $\langle h \rangle$  и  $w$ , далее в некоторой точке достигается максимальное значение и затем наблюдается уменьшение данных параметров.

В области, где наблюдается уменьшение статистических параметров, зависимости данных параметров от ширины области сканирования имеют линейный вид в двойных логарифмических координатах. С увеличением количества точек измерения тангенс угла наклона

уменьшается. Например, для поверхности эпитаксиальной пленки GaN, выращенной при  $T_g = 910^\circ\text{C}$ , тангенс угла наклона,  $\text{tg } \alpha$ , в зависимости от  $N_x$  меняет свое значение для  $\langle h \rangle$  от  $-0.424$  до  $-0.129$ , для  $w$  от  $-0.469$  до  $-0.176$ . С увеличением числа точек измерения  $\text{tg } \alpha$  экспоненциально стремится к некоторому конечному значению  $\text{tg } \alpha_0$ :

$$\text{tg } \alpha = \text{tg } \alpha_0 - A \exp(-N_x/t), \tag{1}$$

где  $\text{tg } \alpha_0$  — значение тангенса угла наклона зависимости статистического параметра при  $N_x \rightarrow \infty$ ,  $t$  — параметр затухания.

Для пленок GaN, выращенных методом МЛЭ, значение  $\text{tg } \alpha_0$  линейно уменьшается с увеличением температуры роста:

$$\text{tg } \alpha_0 = BT_g + C. \tag{2}$$

Так как на рассматриваемом участке наблюдается линейная зависимость среднего перепада по высоте от шири-

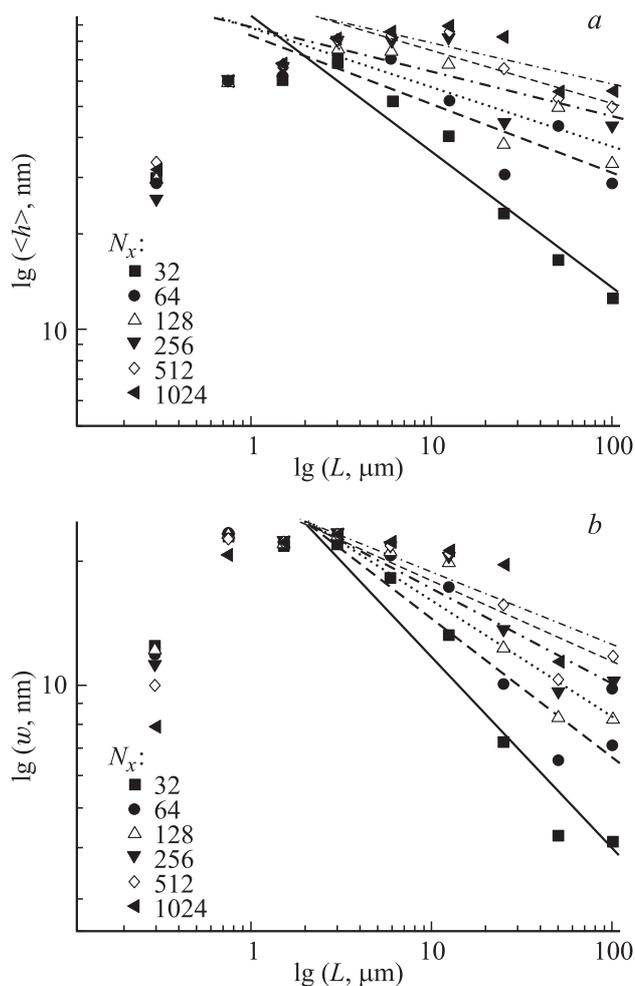


Рис. 2. Зависимости  $\lg\langle h \rangle$  (а) и  $\lg w$  (б) от  $\lg L$ .

ны области сканирования в двойных логарифмических координатах, то, используя выражения (1) и (2), можно записать следующее соотношение для среднего перепада по высоте:

$$\lg\langle h \rangle \propto \text{tg } \alpha \lg L = [-A \exp(-N_x/t) + BT + C] \lg L. \quad (3)$$

Данное соотношение показывает зависимость среднего перепада по высоте для поверхности эпитаксиального GaN от температуры роста и количества точек измерения при АСМ-сканировании. Используя аналогичные рассуждения, можно записать выражение для шероховатости поверхности:

$$\lg w \propto \text{tg } \beta \lg L = [-A' \exp(-N_x/t') + B'T + C'] \lg L. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) справедливы только для областей сканирования более  $10 \times 10$  мкм и называются соотношениями скейлинга. Аналогичные выражения могут быть получены для других материалов. Можно предположить, что общий вид функции останется без изменений, за исключением блока с температурной зависимостью.

Для области зависимостей, где наблюдается увеличение статистических параметров, можно также определить значения тангенса угла наклона. Однако его величина меняется более сложным образом, и не для всех образцов наблюдалась область увеличения  $\lg\langle h \rangle$  или  $\lg w$  в зависимости от  $\lg L$ . Поэтому в рамках данной работы этот участок зависимостей не рассматривается.

#### 4. Заключение

Таким образом, в работе на примере эпитаксиальных пленок GaN показано, что при анализе статистических параметров морфологии поверхности твердых тел необходимо учитывать такие параметры сканирования, как ширину области сканирования и количество точек измерения. Из анализа зависимости статистических параметров от количества точек измерения можно определить значения параметров, наиболее близкие к реальным, т. е. не зависящие от числа точек измерения.

В результате анализа зависимостей среднего перепада по высоте и шероховатости поверхности эпитаксиального GaN были получены соотношения скейлинга, которые позволяют прогнозировать величину данных параметров при различных значениях температуры роста, увеличения и количества точек измерения. Вместо линейной зависимости от температуры может быть добавлена другая, которая описывает зависимость статистического параметра от условий эксперимента.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-02-90713 мол\_рф\_нр.

#### Список литературы

- [1] Н.А. Торхов, В.Г. Божков, И.В. Ивонин, В.А. Новиков. ФТП, **43** (1), 38 (2009).
- [2] П.А. Арутюнов, А.Л. Толстихина, В.Е. Демидов. Микроэлектроника, **27** (6), 431 (1998).
- [3] В.А. Новиков. Письма ЖТФ, **39** (7), 66 (2013).
- [4] А.Р. Шугуров, А.В. Панин, А.О. Лязгин, Е.В. Шестериков. Письма ЖТФ, **38** (10), 70 (2012).

Редактор Л.В. Шаронова

## **The influence the growth temperature on the statistical parameters of GaN surface morphology**

*V.A. Novikov, V.V. Preobrazhenskii<sup>+</sup>, I.V. Ivonin*

Tomsk State University,  
634050 Tomsk, Russia

<sup>+</sup> Institute of Semiconductor Physics,  
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
630090 Novosibirsk, Russia

**Abstract** In this paper it is shown that for a complete analysis of the statistical parameters of surface morphology of solids in particular epitaxial GaN the scaling function is necessary. This function takes into account the parameters of the experiment and the conditions of the study. The studies by the atomic force microscopy of gallium nitride epitaxial films grown at different temperatures showed that the scaling function combined three parameters: the temperature growth, the width of the scan and the number of measurement points. This function allowed to estimate more accurately the surface roughness at the scanning area of more than  $10 \times 10 \mu\text{m}$  and to predict its value at the growth temperature.