

АНАЛИЗ ШЕРОХОВАТОСТЕЙ ГЕТЕРОГРАНИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЭМ ИЗОБРАЖЕНИЙ КВАНТОВО-КАСКАДНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Ан. А. Афоненко¹, А. А. Афоненко¹, Д. В. Ушаков¹,
С.С. Пушкарев^{2,3}, Р.А. Хабибуллин^{2,3}

1) Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

E-mail: afonenko@bsu.by

2) Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Моке-
рова РАН, Москва, Россия

3) Московский физико-технический институт (национальный исследовательский
университет), Долгопрудный, Россия

В работе проведен анализ ПЭМ изображений квантово-каскадной гетероструктуры, содержащей 228 периодов из трех квантовых ям GaAs/Al_{0,18}Ga_{0,82}As и выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Найдены размеры переходных областей. Получены спектры и автокорреляционные функции флуктуаций состава. Проведены оценки толщины и корреляционной длины шероховатостей гетерограниц.

Ключевые слова: квантово-каскадная гетероструктура; просвечивающая электронная микроскопия; шероховатости гетерограниц.

Квантово-каскадные лазеры (ККЛ), основанные на межподзонных переходах электронов в зоне проводимости гетероструктур GaAs/AlGaAs, являются уникальными компактными твердотельными источниками терагерцового (ТГц) излучения в диапазоне от 1,2 до 5,4 ТГц [1]. Важным этапом отработки технологии роста квантово-каскадных лазерных гетероструктур являются исследования, направленные на анализ структурного совершенства выращенных образцов [2, 3]. Сведения о толщинах переходных слоев и характеристиках шероховатостей границ необходимы для учета спектрального уширения энергетических уровней и корректного расчета спектров усиления и плотности тока через структуру.

Целью данной работы является анализ ПЭМ изображения (ПЭМ: просвечивающая электронная микроскопия) квантово-каскадной гетероструктуры Al_{0,18}Ga_{0,82}As/GaAs, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии, определение размеров переходных областей, оценка среднеквадратичных шероховатостей гетерограниц и их автокорреляционной функции.

ПРОФИЛЬ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

Для восстановления профиля гетерограниц в исследуемой гетероструктуре производилось суммирование интенсивности пикселей ПЭМ изображения (рис. 1) вдоль атомных плоскостей. При этом найденный наклон атомных плоскостей к горизонтали составлял 1,23–1,29°. Подгонка

восстанавливаемого профиля проводилась методом наименьших квадратов с использованием линейной интерполяции фона и нормальной функции размытия состава (рис. 2)

$$f_g(z) = \exp\left(-\frac{z^2}{2\tau^2}\right), \quad (1)$$

где τ – среднеквадратичная величина размытия.

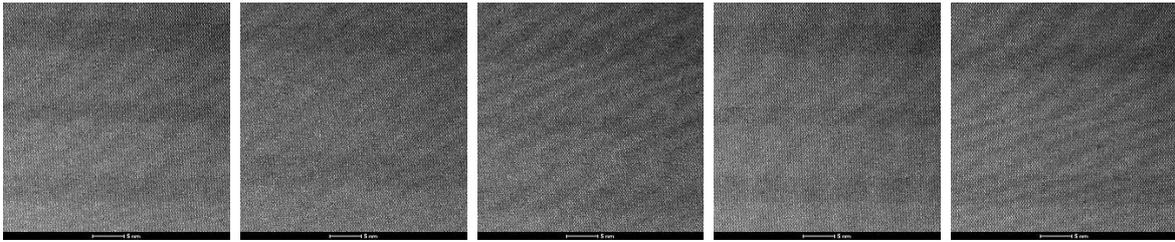


Рис. 1. ПЭМ изображения областей гетероструктуры квантово-каскадного лазера с разрешением 0,0352 нм на пиксель.

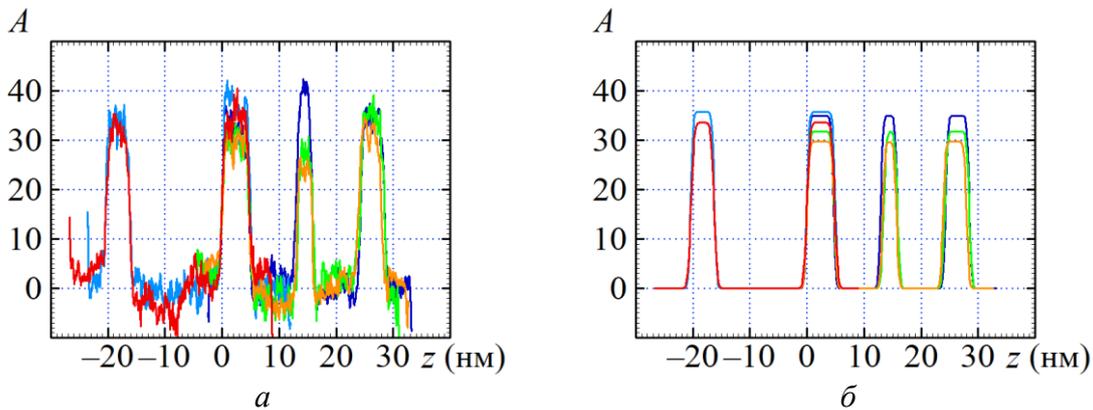


Рис. 2. Зависимость интенсивности пикселей A обработанных ПЭМ изображений от координаты z , направленной вдоль нормали к плоскости слоев (a) и восстановленный профиль состава (b). Начало координат для каждого профиля выбрано на границе широкой квантовой ямы и барьерного слоя

Результаты анализа приведены в таблице. Среднее размытие гетерограниц составило 0,37 нм, что в 2–3 раза меньше, чем для структур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии [3]. Измеренная толщина 3-го слоя оказалась на 0,86 нм больше проектного значения. Для остальных слоев отклонение от проектных величин не превышает толщины монослоя 0,28 нм.

**Восстановленная амплитуда профиля A , размытие гетерограниц τ
и толщины слоев структуры d**

№ п.п.	A	τ , нм	d_1 , нм	d_2 , нм	d_3 , нм	d_4 , нм	d_5 , нм	d_6 , нм	d_1' , нм
1	34,9	0,34			4,65	8,31	2,89	8,48	4,15
2	35,7	0,34	4,15	16,22	4,96				
3	31,7	0,38			4,75	8,69	2,43	8,27	4,33
4	29,7	0,36			4,82	8,45	2,43	8,16	4,15
5	33,6	0,45	4,05	16,26	4,89				
Среднее	33,12	0,37	4,10	16,24	4,81	8,48	2,58	8,30	4,21
Проект			4,23	16,09	3,95	8,75	2,54	8,18	4,23

ФЛУКТУАЦИИ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

Для нахождения шероховатостей гетерограниц анализировались флуктуации состава в диапазонах $\pm\tau$ от установленных в предыдущем разделе гетерограниц. Спектральная плотность “мощности” флуктуаций получалась усреднением квадратов Фурье-компонент всех 26 гетерограниц (рис. 3 а). Резонансы полученной зависимости соответствуют периоду расположения атомов $\sim 0,4$ нм. Среднеквадратичное значение флуктуаций состава σ_x соответствует эквивалентной шероховатости гетерограницы

$$\sigma_d = 2\tau \frac{\sigma_x}{x_b}, \quad (2)$$

где x_b – средняя величина состава барьерного слоя.

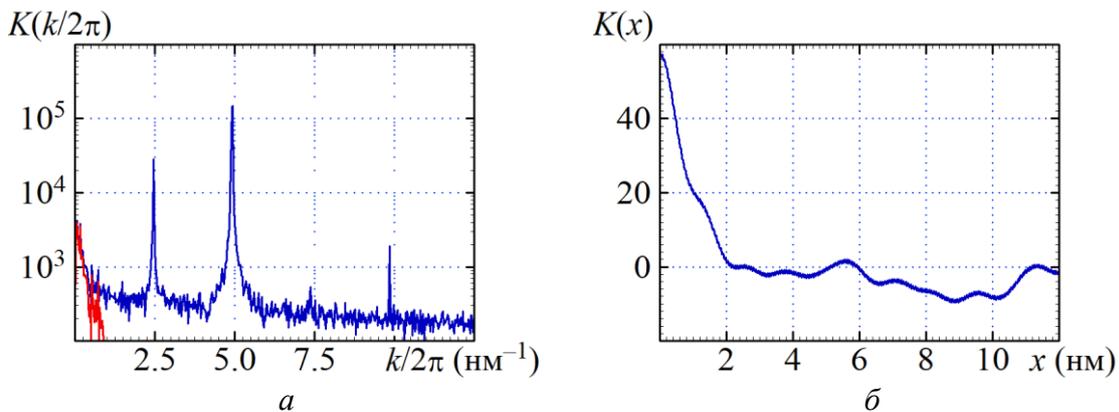


Рис. 3. Усреднённая по всем анализируемым гетерограницам спектральная плотность (а) и автокорреляционная функция флуктуации состава (б). Красным цветом показана спектральная плотность флуктуаций после вычитания белого шума и вклада высокочастотных резонансов, которая использована для получения автокорреляционной функции

Автокорреляционная функция флуктуаций получалась Фурье-преобразованием спектральной плотности. При этом учитывалась только низкочастотная часть спектра, из которой вычтен белый шум по его среднему уровню в высокочастотной области (рис. 3 б). Оцененное значение длины корреляции составило 1,0 нм, относительная среднеквадратичная флуктуация состава – 23 %, среднеквадратичная шероховатость гетерограниц – 0,17 нм. Следует отметить, что приведенные значения являются характеристиками изображения. Например, измеряемая среднеквадратичная величина флуктуаций $\sigma_{x\text{ТЕМ}}$ уменьшается обратно пропорционально квадратному корню из толщины образца L :

$$\sigma_{x\text{ТЕМ}} \approx \sigma_x \sqrt{\frac{2L_c}{L}}, \quad (3)$$

где L_c – длина корреляции. Поэтому для получения истинных параметров флуктуаций полученные значения необходимо корректировать [2].

Таким образом, в работе выполнен анализ профиля и шероховатостей гетерограниц на основе ПЭМ изображений гетероструктуры, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Найденные размеры переходных областей составили 0,37 нм для нормального закона размытия границ. Оцененная длина корреляции шероховатостей гетерограниц составила 1,0 нм, среднеквадратичное отклонение 0,17 нм. Полученная длина корреляции в несколько раз меньше величин, получаемых методом сканирующей электронной микроскопии. Это свидетельствует о существенном вкладе шероховатостей или загрязнений поверхности образца в флуктуации интенсивности анализируемого ПЭМ изображения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках проектов БРФФИ Ф23РНФМ-064 и гранта Российского научного фонда № 24-49-10004, <https://rscf.ru/project/24-49-10004/>».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Хабибуллин Р.А., Маремьянин К.В., Пономарев Д.С. Квантово-каскадный лазер на 3.3 ТГц на основе активного модуля из трех квантовых ям GaAs/AlGaAs с рабочей температурой >120 К. ФТП. 2021. Т. 55, вып. 11. С. 989–994.
2. Исследование интерфейсов гетероструктур квантово-каскадных лазеров ТГц диапазона / Афоненко Ан. А., Афоненко А.А., Ушаков Д.В. [и др.] // Труды XXV Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». Том 2. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2021. С. 566–567.
3. Анализ ПЭМ изображения квантово-каскадной лазерной гетероструктуры, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии. / Афоненко Ан. А., Афоненко А.А., Ушаков Д.В. [и др.] // Труды XXVII Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника». Том 2. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2024. С. 585–586.