

Исследование интерфейсов гетероструктур квантово-каскадных лазеров ТГц диапазона

Ан.А. Афоненко¹, А.А. Афоненко^{1*}, Д.В. Ушаков¹, С.С. Пушкарёв², Р.А. Хабибуллин²

¹ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь.

² Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105, Россия.

*afonenko@bsu.by

В работе проведен анализ ПЭМ изображений квантово-каскадных лазерных гетероструктур ТГц-диапазона. Обнаружено, что толщина переходных слоев гетерограниц исследованных образцов составляет 1.0–1.8 нм, среднеквадратичное отклонение состава гетеросоединения $\Delta x \sim 0.015$. Автокорреляционная функция флуктуаций состава имеет резкий максимум протяженностью 0.3 нм. В пределах этого максимума автокорреляционная функция уменьшается от 1 до 0.5. Далее она имеет затухающий осциллирующий вид с постоянной затухания около 12 нм и периодом осцилляций 24 нм.

Введение

Важным этапом отработки технологии роста квантово-каскадных лазерных гетероструктур являются исследования, направленные на анализ структурного совершенства выращенных образцов. Наиболее ценной является информация о толщинах и составах полупроводниковых слоев, которая необходима для прогнозирования характеристик лазеров и валидации используемых материальных параметров и теоретических моделей. Сведения о толщинах переходных слоев и характеристиках шероховатостей границ необходимы для учета спектрального уширения и корректного расчета спектров усиления.

В работе проанализированы характеристики ПЭМ изображения трёх квантово-каскадных гетероструктур $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{GaAs}$, найдены размеры переходных областей, среднеквадратичные флуктуации состава и их автокорреляционные функции.

Анализ флуктуаций компонентного состава гетеросоединения

Изображения отдельных элементарных ячеек имеют внутреннюю структуру (рис. 1а), поэтому даже для ряда одинаковых ячеек математическая дисперсия интенсивности не равняется нулю. Для вычисления флуктуаций интенсивность изображения предварительно усреднялась по каждой элементарной ячейке в отдельности (рис. 1б). В данном случае элементарные ячейки имели форму ромба. Далее высчитывалось среднее в каждой строке изображения (рис. 2а), и оно вычиталось из всех пикселей этой строки.

Как видно на рис. 2а, препарат для ПЭМ был изготовлен не в форме плоскопараллельной пластинки,

а в форме клина. Поэтому профиль интенсивности ПЭМ-сигнала вдоль оси z имеет общий линейный наклон, а гистограмма интенсивностей пикселей не имеет два четко выраженных максимума, соответствующих квантовой яме и барьеру (рис. 2б).

На анализ флуктуаций влияет только неравномерность засветки вдоль плоскости слоев. Чтобы от нее избавиться, к исходному ПЭМ изображению добавлялся линейный градиентный фон таким образом, чтобы суммарная корреляция интенсивности всех пикселей с координатой обращалась в ноль. Полученные после этого величины флуктуаций интенсивности ПЭМ-сигнала изображены на рис. 1в. Среднеквадратичное отклонение составило 2.0 усл. ед. С учетом разницы интенсивности пикселей в квантовой яме и в барьере (около 20 усл. ед.), среднеквадратичное отклонение состава гетеросоединения можно оценить величиной $\Delta x \sim 0.015$. Следует отметить, что на приведенном снимке нет заметных различий в флуктуациях состава гетеросоединения в центральных частях квантовых ям GaAs и переходных слоев гетерограниц $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As} / \text{GaAs}$.

Автокорреляционные функции флуктуаций состава гетеросоединения получены как среднее автокорреляционных функций пяти гетерограниц и двух квантовых ям (рис. 2в). Они имеют резкий максимум протяженностью 0.3 нм, что соответствует расстоянию между элементарными ячейками. В пределах этого максимума автокорреляционные функции уменьшаются от 1 до 0.5. Далее они имеют затухающий осциллирующий вид. Постоянная затухания составляет 12 нм, период осцилляций около 24 нм. Различие между автокорреляционными функциями центральных частей квантовых ям и

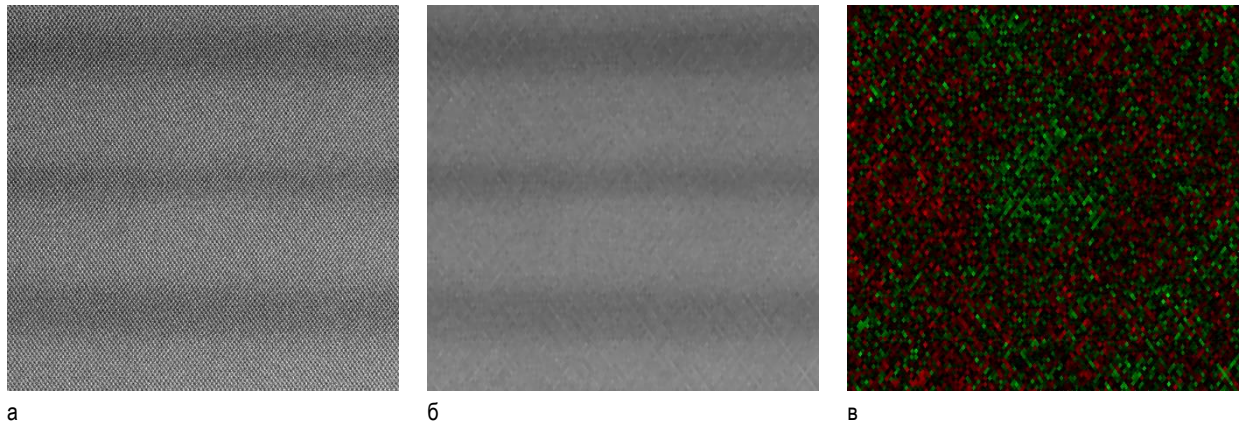


Рис. 1. Исходное ПЭМ изображение структуры (а), изображение структуры после усреднения интенсивности по элементарным ячейкам (б), флуктуационная составляющая изображения (в) (зеленые и красные области соответствуют положительным и отрицательным отклонениям от средних по строкам величин). Ширина изображения 36 нм

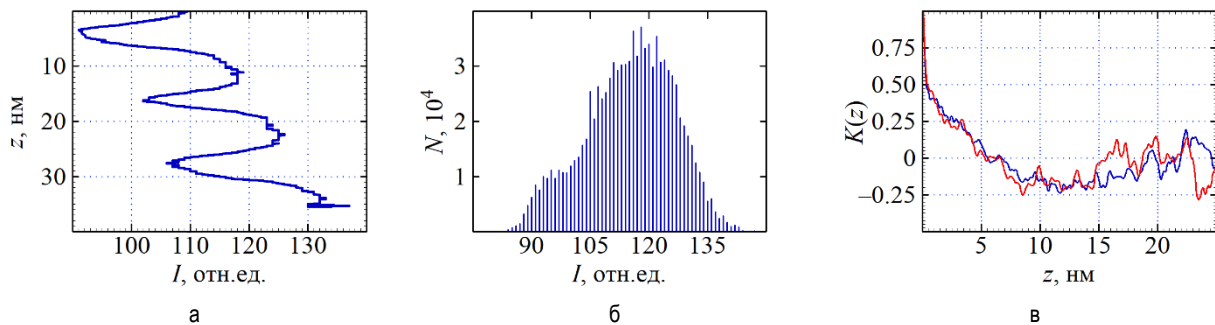


Рис. 2. Зависимость средней по строкам интенсивности пикселей обработанного ПЭМ изображения от координаты z (а), гистограмма интенсивностей пикселей обработанного ПЭМ изображения (б), автокорреляционная функция флуктуаций $K(z)$ обработанного ПЭМ изображения в области гетерограниц (синяя линия) и средней части квантовых ям (красная линия) (в)

переходных слоев гетерограниц заметно только на расстояниях больше 15 нм, но, скорее всего, оно обусловлено случайным фактором из-за ограниченности размеров снимка (36 нм).

Анализ профиля гетероструктуры

Толщина переходных слоев гетерограниц составила 1.0–1.8 нм (рис. 2а). Поэтому в узких слоях (< 4 нм) средний состав оказывается отличным от заданного. Анализ не выявил существенных различий профиля гетеропереходов квантовая яма – барьер и барьер – квантовая яма.

Отклонение периода от заданного (~ 450 Å) составило -3.3 , $+5.2$ и -14.5 Å для трех исследованных образцов (относительное отклонение -0.7% , 1.2% , 3.2% соответственно). При этом генерация лазерного ТГц-излучения была получена только на первых двух структурах. Проведенное моделирование ха-

рактеристик квантово-каскадных лазеров с учетом измеренных толщин также подтверждает вывод о том, что отклонение периода сверхрешетки не должны превышать 3% [1].

Таким образом, в работе разработана методика и проведен анализ ПЭМ изображений гетероструктур квантово-каскадных лазеров. Найдены размеры переходных областей, среднеквадратичные флуктуации состава и их автокорреляционные функции.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России Института сверхвысоко-частотной полупроводниковой электроники РАН.

Литература

1. Ушаков Д.В., Афоненко А.А., Дубинов А.А., и др. // Квантовая электроника, Т. 49, № 10, 913 (2019).