

Анализ ПЭМ изображения квантово-каскадной лазерной гетероструктуры, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии

Ан. А. Афоненко¹, А. А. Афоненко^{1,*}, Д. В. Ушаков¹, Т. А. Багаев², М. А. Ладугин²,
А. А. Мармалюк², С. С. Пушкарёв³, Р. А. Хабибуллин³

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

²АО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха», ул. Введенского, 3, Москва, 117342

³Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники РАН, Нагорный пр., 7/5, Москва, 117105

*afonenko@bsu.by

В работе проанализированы характеристики ПЭМ изображения квантово-каскадной гетероструктуры GaAs/AlGaAs с частотой генерации около 3,8 ТГц. Для аппроксимации экспериментального профиля использованы различные законы размытия состава: нормальный, экспоненциальный и несимметричный экспоненциальный для выявления различий в отклонении состава при границе барьер – яма и яма – барьер. Построены автокорреляционные функции флуктуаций состава барьерных слоев. Проведен анализ шероховатостей гетерограниц и эффективной длины шероховатости.

Введение

Важным этапом обработки 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 [1].

В работе представлены результаты анализа характеристик ПЭМ-изображения квантово-каскадной гетероструктуры $Al_{0,15}Ga_{0,85}As/GaAs$ с разрешением 0,23 нм на пиксель, найдены размеры переходных областей, среднеекватратичные шероховатости гетерограниц и их автокорреляционные функции.

Анализ профиля гетероструктуры

Для восстановления профиля гетероструктуры производилось суммирование интенсивности пикселей ПЭМ-изображения вдоль наклонных линий (рис. 1). Оптимальный наклон выбирался из условия максимального контраста получающегося профиля. Для подгонки восстановленного профиля использовались три вида функций размытия состава (рис. 2):

нормальная:

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

симметричная экспоненциальная:

$$f_e(z) = \frac{1}{\exp\left(-\frac{\pi z}{2\tau_e}\right) + \exp\left(\frac{\pi z}{2\tau_e}\right)}, \quad (2)$$

несимметричная экспоненциальная:

$$f_{ab}(z) = \frac{1}{\exp\left(-\frac{\pi z}{2\tau_a}\right) + \exp\left(\frac{\pi z}{2\tau_b}\right)}. \quad (3)$$

Для нормального распределения среднеекватратичное размытие гетерограниц составило $\tau_g = 1,14$ нм, для симметричного экспоненциального – $\tau_e = 1,37$ нм, для несимметричного экспоненциального – $\tau_a = 1,37$ нм, $\tau_b = 1,40$ нм. Таким образом, существенных различий профиля гетеропереходов квантовая яма – барьер и барьер – квантовая яма не выявляется, так же как и для структур, выращенных методом лучевой эпитаксии [2].

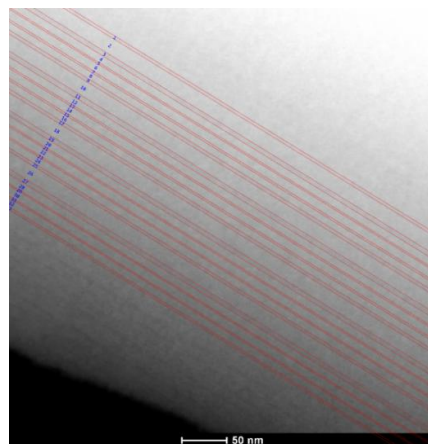


Рис. 1. ПЭМ-изображение с размеченными слоями после обработки

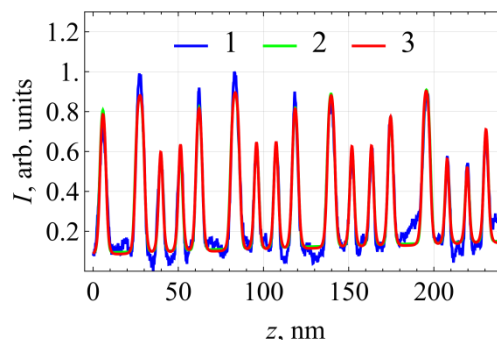


Рис. 2. Зависимость средней по строкам интенсивности пикселей обработанного ПЭМ-изображения (I) от координаты z , направленной вдоль нормали к плоскости слоев из верхнего правого угла ПЭМ-изображения, профиль состава, восстановленный с помощью нормального (2) и несимметричного экспоненциального (3) профиля

При этом восстановленные толщины слоев для нормального распределения составили 3,3/17,0/5,0/8,9/1,7/9,9/1,7/8,8 (период 56,4 нм), для симметричного экспоненциального распределения – 3,3/17,1/4,9/9,0/1,8/9,9/1,7/8,7 (период 56,4 нм), для несимметричного экспоненциального – 3,3/17,2/4,8/9,0/1,7/9,9/1,7/8,7 (период 56,3 нм).

Анализ флуктуаций компонентного состава гетероструктуры

В анализе рассеяния обычно используется понятие шероховатости гетерограницы. Для его нахождения разделим все изображение на полосы, границы которых проходят через середины слоев (квантовых ям или барьеров). Яркость значительно отличается на разных частях изображения (см. рис. 1), поэтому для анализа флуктуаций необходимо исключить фоновую засветку. Для каждого сечения полосы вдоль нормали считаем, что фоном является средняя интенсивность изображения, попадающего в квантовую яму. Полученные флуктуации интенсивности изображения в области барьеров позволяют найти автокорреляционную функцию флуктуаций и среднеквадратическое отклонение гетеросостава барьера σ_x . Это значение можно преобразовать в эквивалентную шероховатость барьерного слоя

$$\sigma_d = \frac{\sigma_x d_b}{x_b 2}, \quad (4)$$

где x_b и d_b – состав и толщина барьерного слоя.

Автокорреляционные функции флуктуаций гетеросостава имеют спадающий осциллирующий вид (рис. 3), который приближенно можно представить в виде

$$K(x) = \exp\left(-\frac{x}{\tau_c}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{T_c}\right), \quad (5)$$

где τ_c и T_c – постоянная затухания и период корреляционной функции.

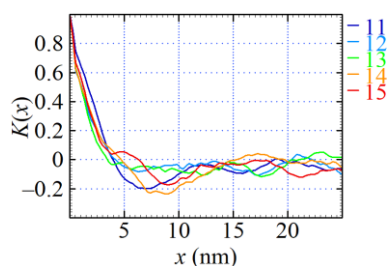


Рис. 3. Автокорреляционные функции флуктуации состава вдоль слоев для некоторых границ гетерослоев (номера границ от начала структуры)

Рассчитанные параметры флуктуаций представлены на рис. 4. Постоянная затухания корреляционной функции находится в диапазоне 3–11 нм со средним значением 5 нм. Период осцилляций корреляционной функции находится в диапазоне 11–26 нм со средним значением 20 нм. Среднеквадратичная шероховатость гетерограниц находится в диапазоне 0,3–1,3 нм со средним значением 0,7 нм. Более широкие барьеры имеют большую шероховатость (см. рис. 4).

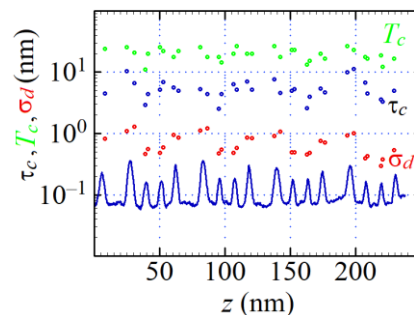


Рис. 4. Постоянная затухания τ_c , период осцилляций T_c и среднеквадратичная ширина шероховатостей гетерограниц σ_d в зависимости от их координаты. Внизу приведен профиль состава

Заключение

Таким образом, разработана методика и проведен анализ ПЭМ изображений гетероструктур квантово-каскадных лазеров. Размеры переходных областей составили 1,1 и 1,4 нм для аппроксимации размытия границ нормальным и экспоненциальным распределением соответственно. Существенных различий профиля гетеропереходов квантовая яма – барьер и барьер – квантовая яма не выявлено. Среднеквадратичные шероховатости гетерограниц составили 0,7 нм, постоянная затухания корреляционной функции – 5 нм, период осцилляций – 20 нм.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках проекта БРФФИ Ф23РНФМ-064 (РНФ № 24-49-10004).

Литература

1. Д. В. Ушаков, А. А. Афоненко, А. А. Дубинов и др. // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. С. 913–918.
2. Ан. А. Афоненко, А. А. Афоненко, Д. В. Ушаков и др. // Труды XXV Международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника»: (Нижний Новгород, 9–12 марта 2021 г.) в 2 т. Том 2. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2021. С. 566–567.