

Динамика морфологии поверхности и оптические характеристики InGaAs/AlGaAs/GaAs структур, выращенных селективной эпитаксией

*В.В. Шамахов**, С.О. Слипченко, Д.Н. Николаев, А.Д. Бондарев, Е.В. Фомин, Н.А. Пихтин

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

* - shamakhov@mail.ioffe.ru

Цель работы:

Сегодня монолитная интеграция оптоэлектронных элементов интенсивно исследуется с целью создания фотонных интегральных схем (Si/A3B5, Si/GaN и т.д.). Селективная эпитаксия (SAE) является одним из эффективных способов реализации таких схем. Принцип селективной эпитаксии основан на использовании пассивирующих масок для локализации области роста. При этом хорошо известно, что свойства полупроводниковых структур квантовых ям/точек/проволок зависят от морфологии поверхности, формируемой в процессе эпитаксии.

Работа была направлена:

- на исследование механизмов роста объемных слоев GaAs и закономерности изменения этих механизмов в процессе селективной эпитаксии для сверхшироких окон (ширина 100мкм),
- на исследование оптических свойств квантовой ямы (КЯ) InGaAs, полученной SAE.

Экспериментальные образцы и методы исследования

Образцы для исследований выращивались на подложках n-GaAs (100) методом МОС-гидридной эпитаксии на установке EMCORE GS3100.

Рост образцов происходил в два этапа. На первом этапе роста на подложке стандартным методом осаждался эпитаксиальный слой GaAs толщиной 0.5 мкм. Затем на него методом реактивного ионно-плазменного распыления наносилось диэлектрическое покрытие SiO₂ толщиной 150 нм. После этого при помощи литографии и буферного травителя был сформирован рисунок маски из чередующихся полос диэлектрическая маска SiO₂/окно шириной 100/100 мкм. Полосы формировались вдоль направления [011]. После создания рисунка происходило удаление в окна мокрым химическим травлением части слоя GaAs толщиной 0.1 мкм. Ступени роста в окне в слое, на который осуществлялся рост, располагались перпендикулярно относительно маски. Далее начинался второй этап роста, на котором слой GaAs выращивался методом селективной эпитаксии. Было выращено 4 образца: образец 1 – толщина 0.12 мкм, образец 2 – 0.6 мкм, образец 3 – 1.2 мкм, образец 4 – 1.9 мкм. Указанная толщина соответствует центру окна.

Фотолюминесцентная (ФЛ) структура представляла собой: на втором этапе выращивались GaAs толщиной 0.12 мкм, КЯ InGaAs, GaAs (0.2 мкм), широкозонный слой Al_{0,3}Ga_{0,7}As (0.1 мкм).

Методы исследования:

- для оценки изменения профиля образцов по ширине окна использовался профилометр поверхности AmBios XP-1;
- для оценки морфологии поверхности образцов по ширине окна использовался атомно-силовой микроскоп (АСМ) NTEGRA (NT-MDT Spectrum Instruments) со сканированием в полуконтактном режиме. Использовался зонд ETALON HA_FM с резонансной частотой 114 кГц;
- для исследования оптических свойств КЯ использовалась микрофотолюминесценция (μ-ФЛ). Исследования проводили как при комнатной температуре, так и при температуре 80 К с использованием спектрометра T64000 (Horiba Jobin-Yvon), снабженного конфокальным микроскопом. Эти спектры были измерены с использованием непрерывного (CW) возбуждения на длине волны 532 нм (2,33 эВ) Nd: YAG-лазера (Torus, Laser Quantum) с мощностью на образцах ~ 40 мкВт. Спектры регистрировались с помощью решетки 600 штрихов/мм и охлаждаемой жидким азотом ПЗС-камеры с объективом Mitutoyo 100 × NIR (NA = 0,90) с большим рабочим расстоянием для фокусировки падающего луча в пятно диаметром ~ 2 мкм.

Исследование профилей GaAs, полученных SAE

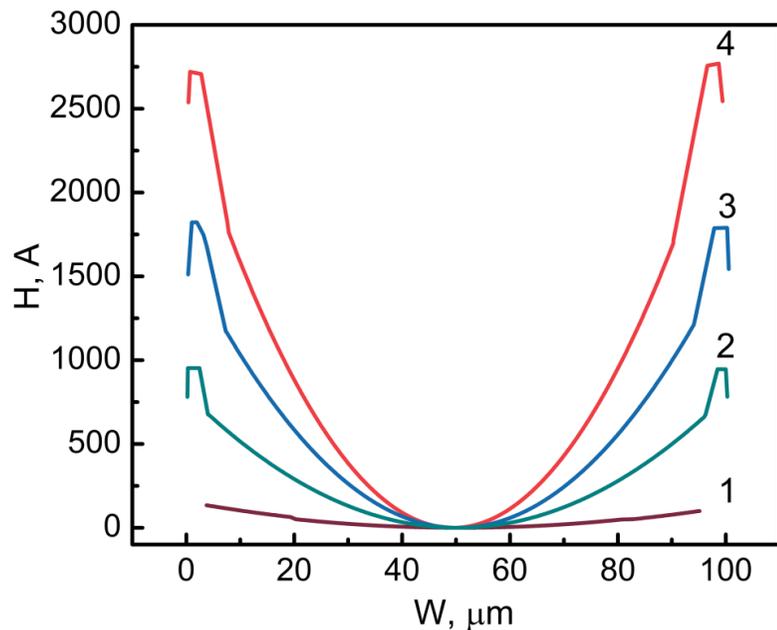


Рис. 1 - Профили слоев GaAs, выращенных SAE: 1 – образец 1, 2 – образец 2, 3 - образец 3, 4 – образец 4.

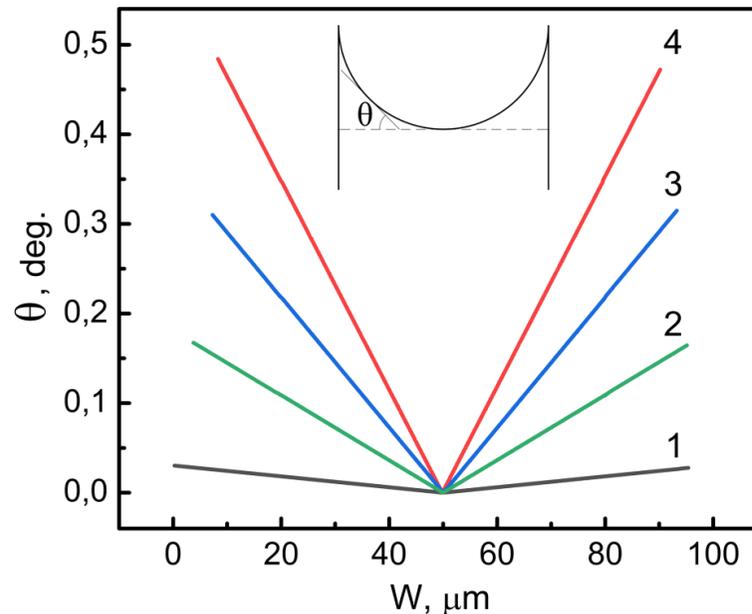


Рис. 2 - Изменение углов локальной разориентации слоев GaAs, выращенных SAE, по ширине окна: 1 – образец 1, 2 – образец 2, 3 - образец 3, 4 – образец 4. Вставка – схематическое изображение определения угла локальной разориентации слоя θ .

Исследование морфологии поверхности слоев GaAs, полученных SAE

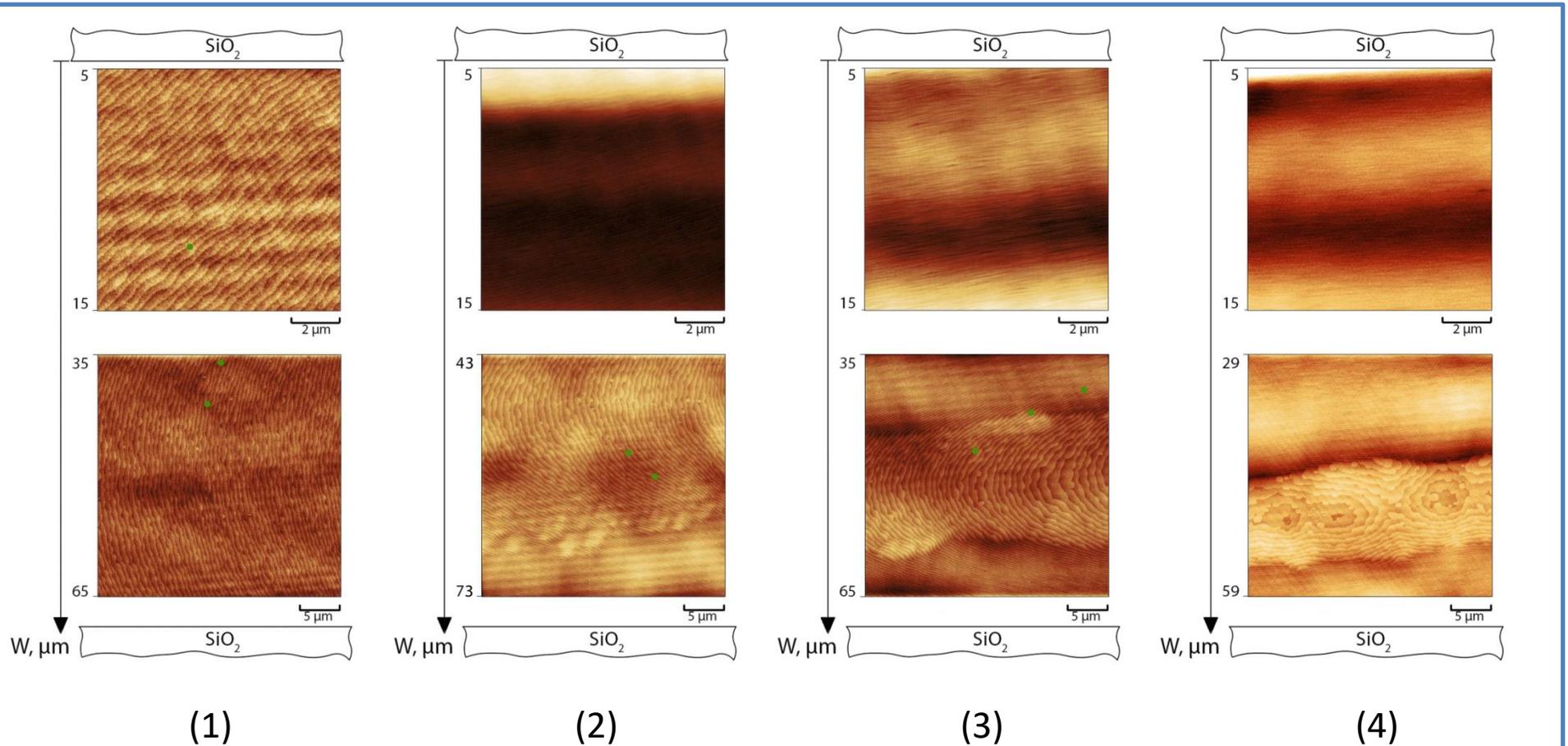


Рис. 3 - AFM изображение поверхности: (1) - образец 1, (2) - образец 2, (3) - образец 3, (4) - образец 4.

Модель разворота ступеней роста слоя, полученного SAE

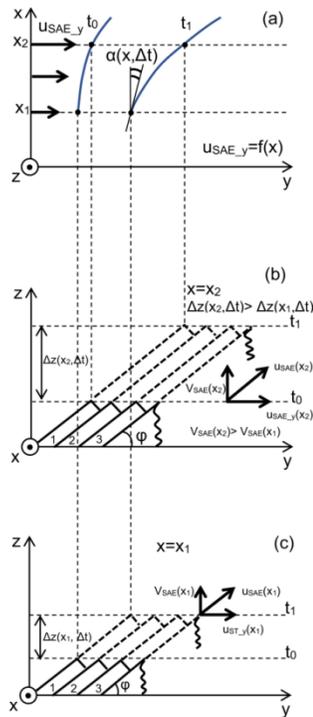


Рис. 4

Рис. 4 - Для случая селективной эпитаксии схематическое изображение: (а) движения фронта ступени моноатомной плоскости 1 в плоскости роста (x,y) для моментов времени t_0 and t_1 ; (б) и (с) для координаты $x=x_2$ и $x=x_1$, соответственно, проекции сечений моноатомных плоскостей 1,2,3 на плоскость (z,y) в момент времени t_0 (сплошные прямые) и t_1 (пунктирные прямые). t_0 – время начала роста, t_1 – время окончания роста, Δt – время роста, z_0 – координата плоскости роста в момент времени t_0 , Δz – толщина эпитаксиального слоя, который вырос за время Δt , V_{SAE} – скорость роста слоя, u_{SAE} – скорость движения фронта ступени, $u_{SAE,y}$ – проекция скорости u_{SAE} на ось OY, φ – угол разориентации, 1-3 – условные номера моноатомных плоскостей, выбранных для наглядной демонстрации механизмов роста.

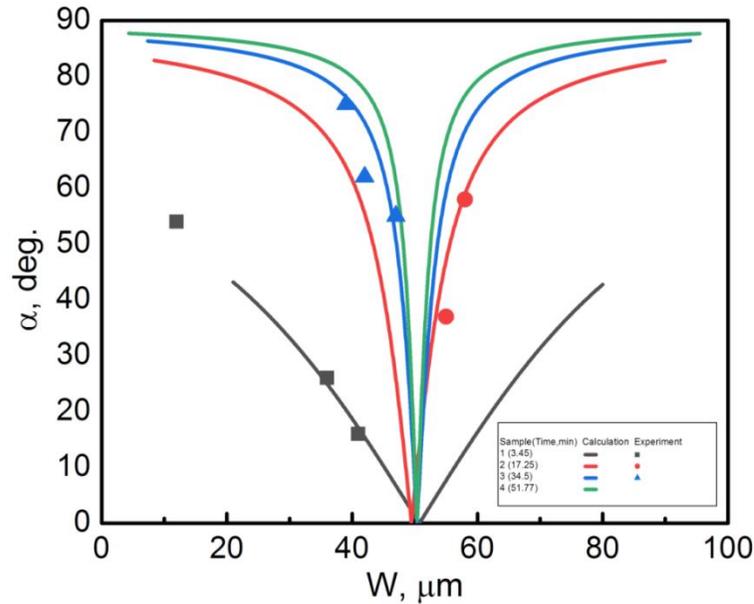


Рис. 5

Рис. 5 - Зависимости угла разворота фронта роста моноатомных ступеней для различных моментов времени роста: кривые 1-4 – расчет; точки – экспериментальные данные, полученные из рис. 3 для образцов 1-3.

$$\Delta z(x, \Delta t) = V_{ST} \cdot GRE(x) \cdot \Delta t$$

$$tg\varphi = \frac{\Delta z}{\Delta y}$$

$$\Delta y(x, \Delta t) = \frac{V_{ST} \cdot GRE(x) \cdot \Delta t}{tg\varphi}$$

где V_{ST} – скорость роста при стандартной эпитаксии; GRE – увеличение скорости роста при селективной эпитаксии относительно стандартной; φ – угол разориентации слоя на который осуществляется селективный рост.

$$ctg\alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{V_{ST} \cdot \Delta t}{tg\varphi} \cdot \frac{dGRE(x)}{dx}$$

где $\alpha(x, \Delta t)$ - угол разворота фронта роста ступени на плоскости (X,Y) для точки с координатой x за время роста Δt (рис. 4а).

Оптические исследования КЯ InGaAs, полученной SAE

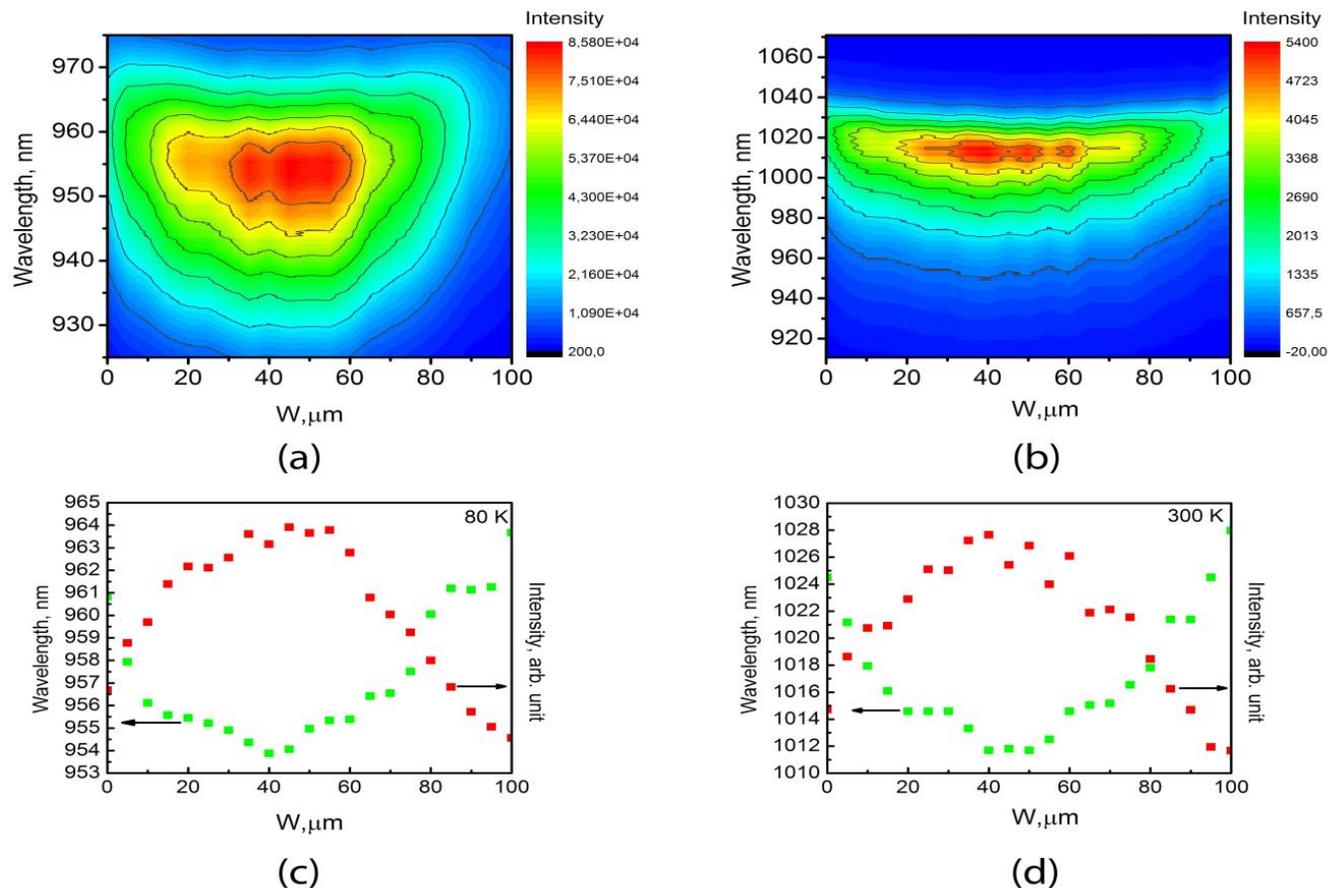


Рис. 6 - Карты спектров μ -ФЛ, измеренные при 80 К (a) и 300 К (b), которые показывают пространственное распределение спектрального положения и интенсивности спектров ФЛ КЯ InGaAs. Пики спектров ФЛ и соответствующие длины волн в зависимости от положения в окне, полученные из μ -ФЛ-карт, измеренных при 80К (c) и 300К (d).

Выводы:

1. Разворот ступеней приближающийся к 90 градусам происходит при локальной разориентации слоя Θ около 0.058 град.
2. Предложена модель позволяющая спрогнозировать разворот ступеней. Из модели видно, что разворот определяется профилем GRE по ширине окна и временем роста слоя.
3. Результаты полученные на основе предложенной модели имеют хорошее совпадение с экспериментальными результатами.

Благодарность:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-79-30072).