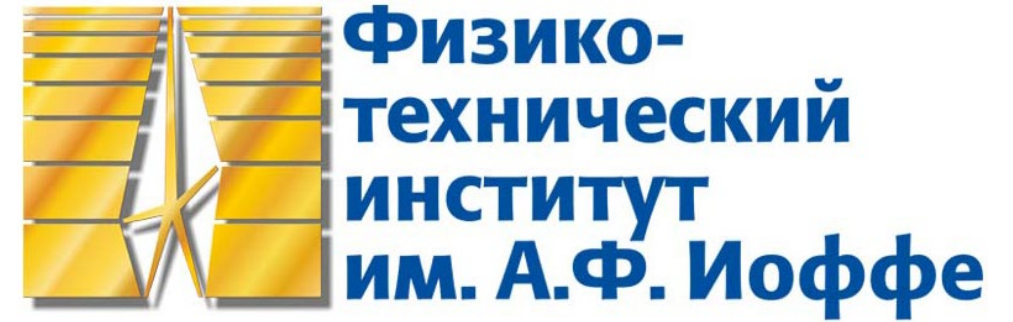


КОИПСС
2023

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СИМПОЗИУМ ПО КОГЕРЕНТНОМУ ОПТИЧЕСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ И СТРУКТУР



Исследование сильнонапряженных квантовых ям InGaAs, полученных селективной эпитаксией

В. Шамахов, Д. Николаев, М. Кондратов, А. Гришин, С. Слипченко, Н.Пихтин

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

e-mail: mikondratov@mail.ioffe.ru

Введение

Одним из основных направлений современной электроники является создание фотонных интегральных схем (ФИС). Одной из наиболее широко используемых и доступных технологий, для создания ФИС, является селективная эпитаксия.

Описание экспериментальных образцов

Parameter	SAEWG1	SAEWG2	SAEWG3	SAEWG4
SE GaAs буферный слой	0.5 мкм	0.5 мкм	0.5 мкм	0.5 мкм
SE Al _{0.3} Ga _{0.7} As нижний эмиттер	0.4 мкм	0.4 мкм	0.4 мкм	0.4 мкм
SE GaAs нижняя часть волновода	0.3 мкм	0.3 мкм	0.3 мкм	0.3 мкм
SAE GaAs нижняя часть волновода	0.12 мкм/ 3.57 мин	0.6 мкм/ 17.78 мин	1.2 мкм/ 35.58 мин	1.9 мкм/ 56.33 мин
SAE InGaAs квантовая яма	7 с	7 с	7 с	7 с
SAE GaAs верхняя часть волновода	0.3 мкм/ 8.88 мин	0.3 мкм/ 8.88 мин	0.3 мкм/ 8.88 мин	0.3 мкм/ 8.88 мин
SAE Al _{0.11} Ga _{0.89} As верхний эмиттер	0.3 мкм/ 7.85 мин	0.3 мкм/ 7.85 мин	0.3 мкм/ 7.85 мин	0.3 мкм/ 7.85 мин

*Для слоев, полученных SAE, указана толщина, измеренная в центре окна

Исследование толщин образцов

Толщина образцов по ширине окна рассчитывалась по формуле:

$$H = GRE_{GaAs} \cdot V_{GaAs} \cdot (t_{lw} + t_{uw}) + GRE_{AlGaAs} \cdot V_{AlGaAs} \cdot t_{uc},$$

где GRE_{GaAs} и GRE_{AlGaAs} - прирост скорости роста (GRE) для GaAs и $Al_{0.11}Ga_{0.89}As$, соответственно; V_{GaAs} и V_{AlGaAs} - скорости роста GaAs и $Al_{0.11}Ga_{0.89}As$, соответственно, при стандартной эпитаксии; t_{lw} , t_{uw} , t_{uc} - времена роста слоёв нижней и верхней части волновода и верхнего эмиттера, соответственно. Толщина квантовой ямы (КЯ) не бралась в учёт, так как пренебрежимо мала, по сравнению с толщиной остальных слоёв.

Измерение толщины слоёв по ширине окна проводилось при помощи профилометра AmBios XP-1. При этом SiO_2 маска предварительно удалялась с образцов.

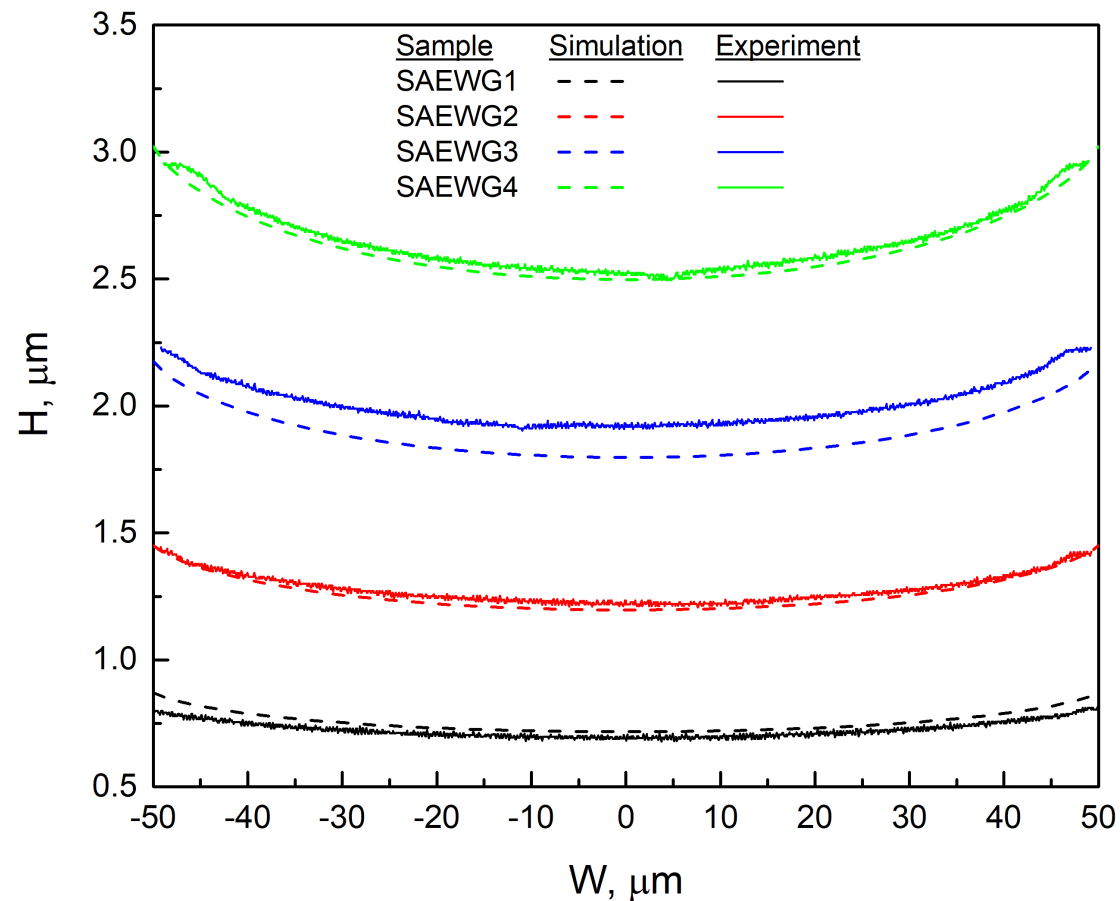


Рисунок 2 – Измеренные (сплошные линии) и рассчитанные (пунктирные линии) толщины образцов по ширине окна

Исследование спектров фотолюминесценции

Для изучения люминесцентных характеристик КЯ использовалась микрофотолюминесценция с пространственным разрешением. Измерения проводились при комнатной температуре при помощи спектрометра T64000, оснащённого конфокальным микроскопом. Спектры были получены с использованием непрерывного возбуждения на длине волны 532 нм Nd:YAG лазером, с мощностью порядка 40 мкВ. Шаг между измеряемыми точками составлял 1 мкм.

Для образцов SAEWG1 и SAEWG2 наблюдалось увеличение длины волны от центра к краям. Для образца SAEWG3 длина волны в центральной области окна изменяется незначительно, а затем резко возрастает вблизи краев. Для образца SAEWG 4 длина волны непрерывно уменьшается от центра окна к краям, после чего значительно возрастает вблизи краев.

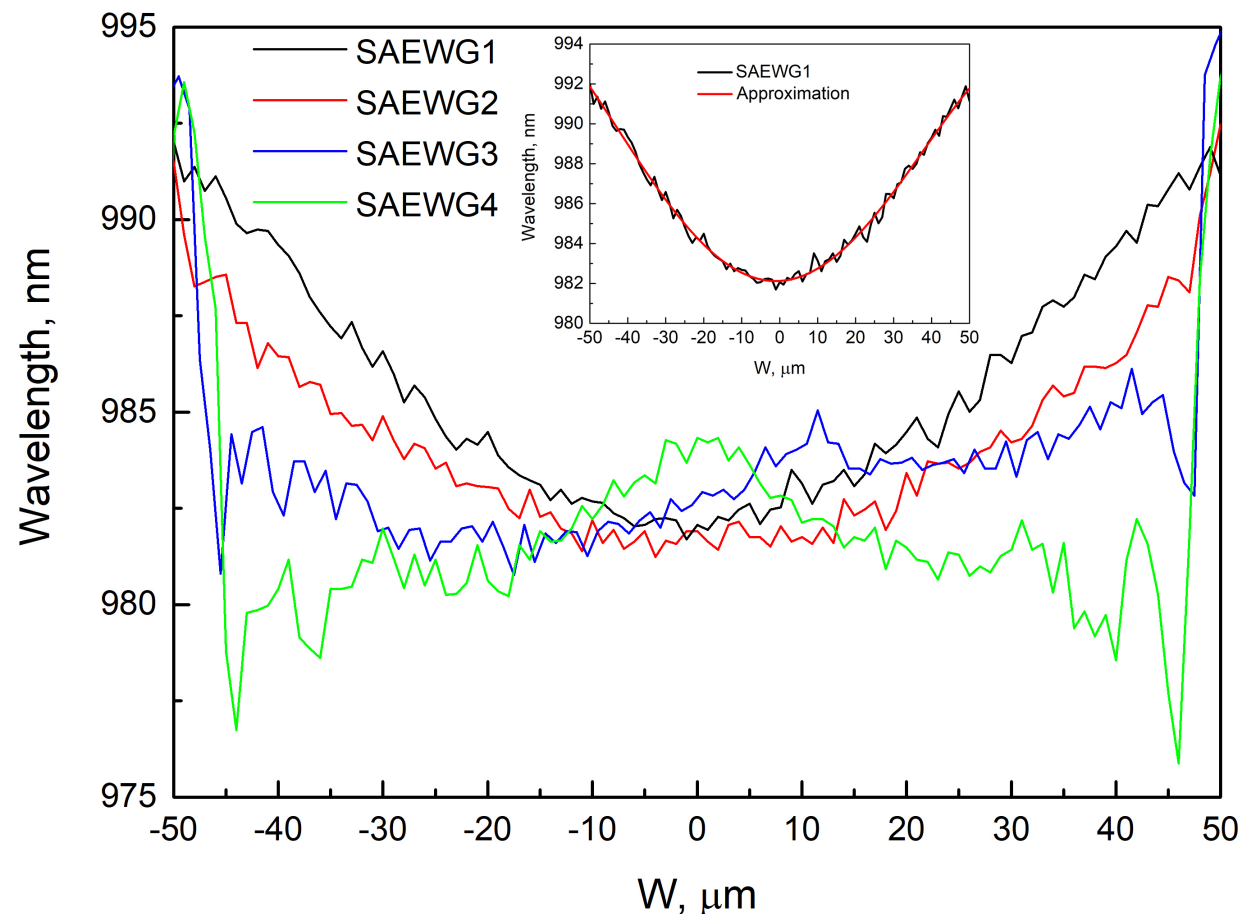


Рисунок 3 – Измеренные значения длин волн, соответствующих пикам микрофотолюминесценции, по ширине окна для различных образцов

Расчет состава и толщины квантовых ям в рамках диффузионной газовой модели

Наиболее важной характеристикой слоев, выращенных SAE, является GRE по ширине окна. GRE тройного твердого раствора можно получить, зная величины GRE для бинарных компонент:

$$GRE_{InGaAs} = x_0 \cdot GRE_{InAs} + (1 - x_0) \cdot GRE_{GaAs},$$

где x_0 - мольная доля In в твердом растворе InGaAs, полученном SE при тех же условиях роста. В нашем случае $x_0 = 0.34$.

Используя диффузионную газовую модель, можно рассчитать состав x и толщину d КЯ, выращенной SAE:

$$d = GRE_{InGaAs} \cdot d_0,$$

$$x = \frac{x_0 \cdot GRE_{InAs}}{GRE_{InGaAs}},$$

где d_0 - толщина КЯ полученной SE при тех же условиях роста. В нашем случае $d_0 = 16 \text{ \AA}$.

Решая уравнения Шредингера для прямоугольной КЯ конечной глубины рассчитываются длины волн по ширине окна.

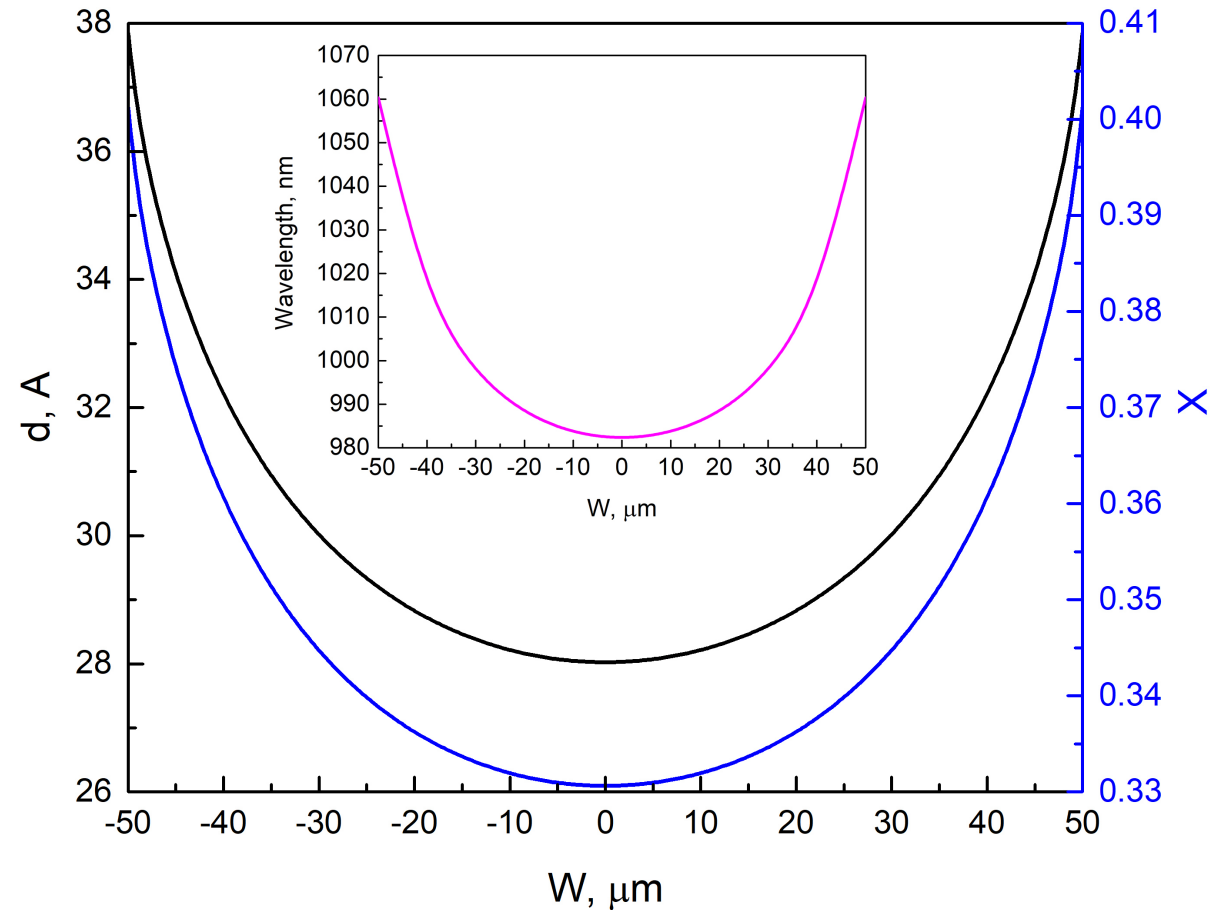


Рисунок 4 – Рассчитанные значения толщины (d) и состава (x) квантовой ямы $In_xGa_{1-x}As$, выращенных SAE

Расчет параметров КЯ на основе спектра фотолюминесценции

Мы предполагаем, что различие между измеренными и расчетными длинами волн КЯ связано с изменением состава и толщины квантовой ямы по ширине окна. Исходя из значений длин волн, полученных экспериментально (рисунок 3, вставка), двумя различными способами были построены зависимости толщины и состава КЯ по ширине окна. В первом способе для расчёта толщины использовалась зависимость GRE для GaAs, исходя из того, что КЯ содержит больше Ga, чем In. Во втором способе была использована зависимость GRE, полученная для слоя $\text{In}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{As}$.

Видно, что для обеспечения экспериментально полученного изменения длины волны по ширине окна содержание In в КЯ должно уменьшаться от центра к краю окна.

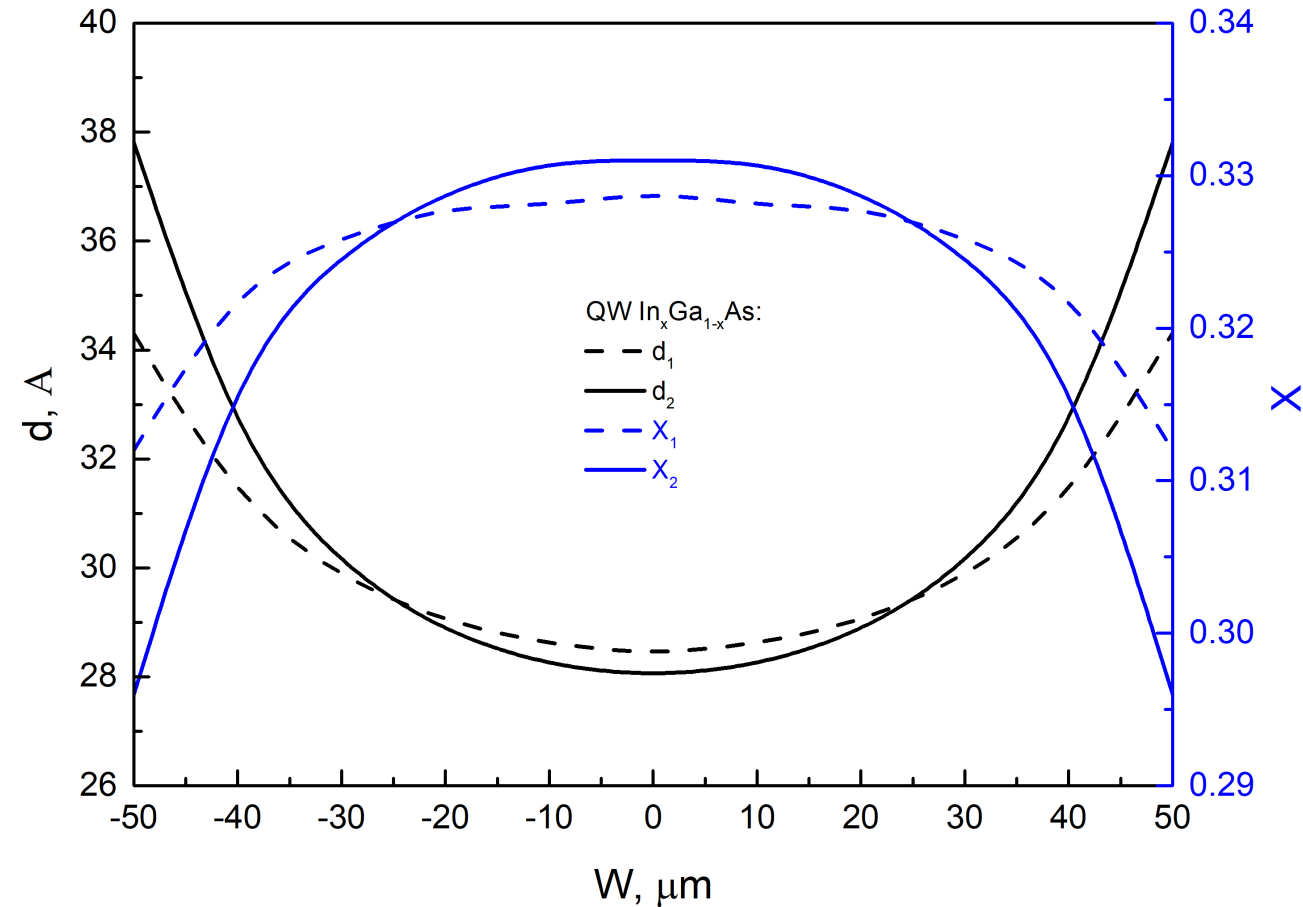


Рисунок 5 – Значения толщины (d) и состава (x) квантовой ямы $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, выращенной SAE, полученной при помощи первого (пунктирная) и второго (сплошная) способов

Выводы

1. Характер изменения длины волны по ширине окна зависит от кривизны профиля слоя.
2. Для сильнонапряженных квантовых ям зависимость состава по ширине окна носит нетривиальный характер: состав уменьшается от центра окна к краям. Это может быть связано с образованием ненапряженных островков InAs, в которые In может встраиваться без барьера, вызванного деформацией.

Более подробно с результатами можно ознакомиться в статье:

V. Shamakhov et al. *Nanomaterials* 2023, 13(17), 2386; <https://doi.org/10.3390/nano13172386>