

*Миронова М.С., Яковлев Г.Е., Зубков В.И.,  
Глинский Г.Ф.  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ»*

## **Развитие неразрушающего метода диагностики рНЕМТ структур с квантовыми ямами AlGaAs/InGaAs/GaAs на основе анализа спектров фотолюминесценции**

*Проведено численное моделирование спектров ФЛ рНЕМТ структур с квантовыми ямами AlGaAs/InGaAs/GaAs. С помощью самосогласованного решения системы уравнений Шрёдингера и Пуассона рассчитаны и проанализированы пространственный профиль потенциала в зоне проводимости, уровни размерного квантования и огибающие волновые функции носителей заряда, а также получено распределение электронной плотности в области квантовой ямы. Разработанная расчетная модель дает возможность прогнозировать степень локализации носителей заряда и заполнения ими КЯ, что позволяет использовать ее при оптимизации выращиваемых гетероструктур.*

**Ключевые слова:** НЕМТ-структуры, квантовые ямы, фотолюминесценция, самосогласованное решение уравнений Шрёдингера и Пуассона, InGaAs/GaAs

В настоящее время транзисторы на гетероструктурах относятся к самым быстродействующим активным элементам микроэлектроники. Регулярно публикуются сведения о всё новых рекордных результатах, связанных с совершенствованием технологии и использованием новых материалов. Так, измеренные частоты отсечки на различных модификациях полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (High Electron Mobility Transistor – НЕМТ) уже превышают значения 400 ГГц [1, 2]. При этом свою важную нишу занимают транзисторы, работающие на более низких частотах. В настоящей работе сообщается о результатах исследования структур отечественных арсенидгаллиевых рНЕМТ-транзисторов, предназначенных для работы на частотах до 18 ГГц. В данном частотном диапазоне отечественные рНЕМТ разработки не уступают зарубежным, и в то же время решают проблему недоступности СВЧ приборов для разработчиков и производителей РЭА, возникшую, во-первых, в силу эмбарго на экспорт высококачественных микросхем со стороны основных зарубежных производителей, а во-вторых, в силу нарастающей тенденции производства изделий специального применения.

Полупроводниковые гетероструктуры для современных рНЕМТ приборов представляют собой набор эпитаксиальных слоев из неоднородно легированных материалов различного состава. Совершенствование таких приборов с целью увеличения рабочих частот и токов неуклонно приводит к ужесточению требований к точности воспроизводства последовательности слоев, их состава и степени легирования; кроме того, для удовлетворения определенных приборных требований возникает необходимость создания резких скачков концентрации примеси.

Для совершенствования приборных гетероструктур, помимо их диагностики, важное значение имеет моделирование их оптических и электрических характеристик. Численное моделирование обеспечивает получение комплексной информации, которая представляет

интерес как с практической точки зрения для совершенствования и улучшения параметров существующего класса электронных приборов и компонентов, так и с теоретической – для анализа физических свойств и явлений в полупроводниковых приборах электроники, использующих квантоворазмерные слои. Сравнение результатов моделирования с данными экспериментального исследования позволяет судить о качестве структуры и делать выводы о возможных путях улучшения её параметров (к которым относятся подвижность носителей заряда, концентрация носителей заряда в квантовой яме и др.).

Как известно, фотолюминесценция (ФЛ) является одним из самых информативных и широко используемых методов исследования свойств гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) [3, 4]. В частности, к настоящему времени фотолюминесценция серийно выпускаемых НЕМТ гетероструктур с псевдоморфными ямами достаточно хорошо исследована. На спектрах ФЛ рНЕМТ структур с КЯ AlGaAs/InGaAs/GaAs с несимметричным легированием обычно присутствуют два пика, связанных с рекомбинацией электронов из первой и второй подзон размерного квантования с дырками. Введение любых изменений в конструкцию гетероструктуры в совокупности с изменением условий роста, должно приводить к модификации спектров ФЛ (количество пиков, их амплитуда и положение максимумов). Так, по изменению отношения интенсивностей пиков ФЛ при изменении уровня легирования, при прочих равных условиях, можно судить о симметрии профиля потенциала и степени заполнения электронами КЯ. В данной работе методами ФЛ и численного моделирования проводится анализ электронной системы рНЕМТ гетероструктур.

С помощью самосогласованного решения системы уравнений Шрёдингера и Пуассона рассчитаны и проанализированы пространственный профиль потенциала зоны проводимости, уровни размерного квантования и огибающие волновые функции носителей заряда, а также распределение электронной плотности в области квантовой ямы. Приведены результаты моделирования спектров фотолюминесценции рНЕМТ структур на основе КЯ AlGaAs/In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs и сделаны предположения по оптимизации выращиваемых гетероструктур, направленные на усиление локализации носителей заряда и степени заполнения ими КЯ.

Исследуемые в работе образцы были выращены в ЗАО «Светлана-Рост» на полуизолирующих подложках GaAs (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Послойная структура исследованных образцов (без учета контактных слоев) представлена на рис. 1. Квантовая яма AlGaAs/In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs располагалась на глубине 54.5 нм и имела ширину 12 нм. Образцы отличаются температурой роста.

GaAs-AlGaAs контактные слои
AlGaAs эмиттерный слой
GaAs спейсерный слой
InGaAs КЯ
GaAs буферный слой
GaAs подложка

Рис. 1. Послойная структура исследуемых образцов с КЯ In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs/AlGaAs.

На экспериментальных спектрах ФЛ образцов, измеренных при комнатной температуре (рис. 2), наблюдаются два пика различной интенсивности при длинах волн 980 нм и 1020 нм.

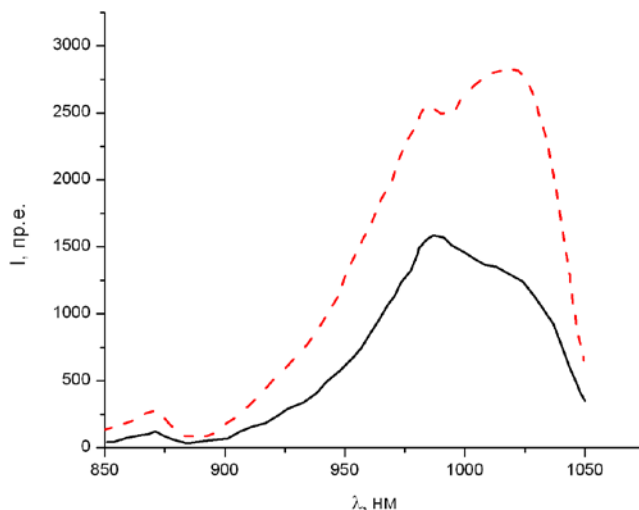


Рис. 2. Спектры ФЛ образцов с КЯ AlGaAs/In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs ( $T = 300$  К).

Для анализа спектров ФЛ рассматриваемых структур было проведено численное самосогласованное решение уравнений Шредингера и Пуассона. Законы дисперсии носителей заряда в зоне проводимости и валентной зоне предполагались параболическими и определялись эффективными массами электрона и тяжёлой дырки, соответственно. Учёт механических напряжений, возникающих вследствие псевдоморфного роста структуры, проводился в рамках теории деформационного потенциала с использованием экспериментальных данных, представленных в [5]. Как видно из результатов расчёта (рис. 3), потенциал квантовой ямы в рассматриваемых структурах является асимметричным. Расчёт энергетического спектра данной гетероструктуры показывает, что в зоне проводимости наблюдаются два связанных состояния электронов, отстоящих друг от друга на величину порядка 70 мэВ (рис. 4). В то же время энергетический зазор между связанными состояниями тяжёлых дырок в валентной зоне в несколько раз меньше (~20 мэВ).

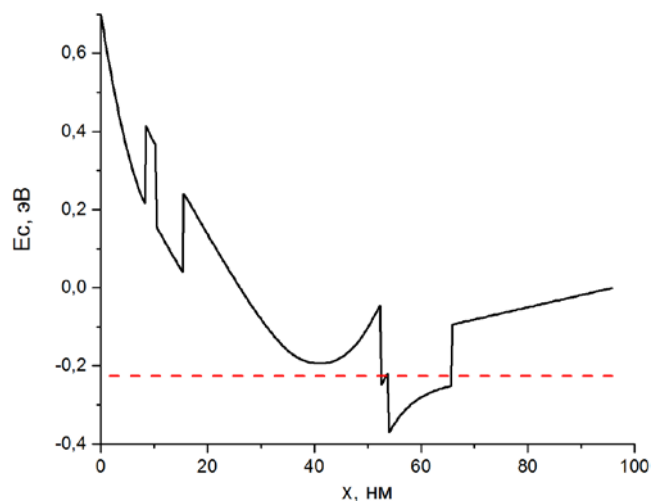


Рис. 3. Координатная зависимость дна зоны проводимости в рНЕМТ гетероструктуре AlGaAs/In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs. Пунктиром отмечено положение уровня Ферми.

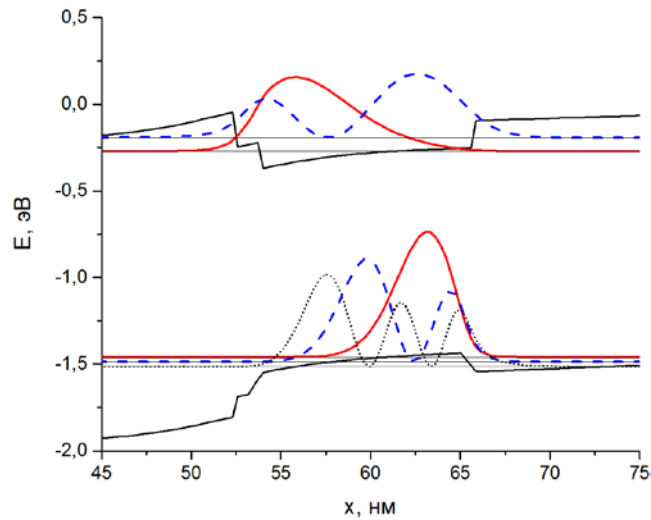


Рис.4. Положение уровней размерного квантования и квадраты модулей огибающих волновых функций связанных состояний электронов и дырок в гетероструктуре с квантовой ямой AlGaAs/In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs.

Далее, на основе теоретических данных была рассчитаны спектры ФЛ гетероструктур с различным профилем легирования примеси, а также с различными толщинами спейсера GaAs между квантовой ямой и барьером (рис. 5). Видно, что в спектре ФЛ структуры с толщиной спейсера 1.5 нм более интенсивным является коротковолновый пик, соответствующий переходам из второй подзоны размерного квантования электронов на всевозможные энергетические уровни дырок. В то же время для структуры, в которой спейсер отсутствует, более интенсивным является длинноволновый пик.

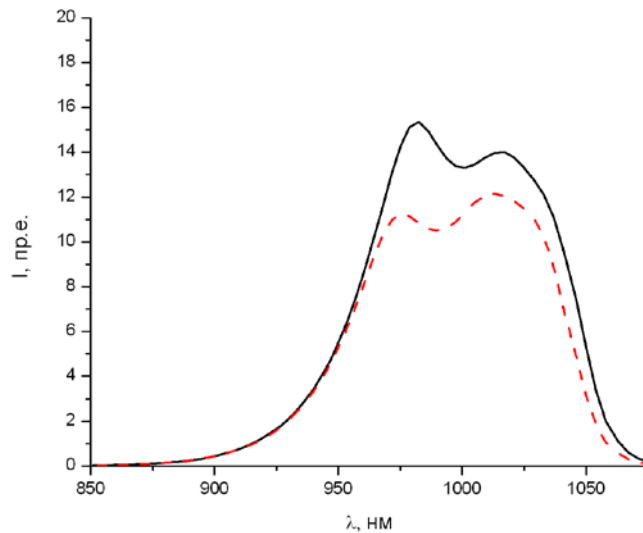


Рис. 5. Результат численного моделирования спектров ФЛ ( $T = 300$  К) рНЕМТ гетероструктур с квантовой ямой AlGaAs/In<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>As/GaAs. Сплошная линия соответствует толщине спейсера GaAs 1.5 нм, пунктирная линия – спейсер отсутствует.

Таким образом, даже небольшое изменение симметрии квантовой ямы (толщина вводимого одностороннего спейсера – всего 1.5 нм) кардинальным образом влияет на отношение интенсивностей пиков ФЛ. То есть анализ спектров ФЛ оказывается весьма чувствительным методом характеристики электронного спектра НЕМТ-приборов и

возможного отклонения технологического процесса их изготовления от оптимальных ростовых параметров.

### **Выводы**

В ходе работы методом численного самосогласованного решения уравнений Пуассона и Шредингера было проведено моделирование спектров фотолюминесценции pHEMT структур с квантовыми ямами AlGaAs/InGaAs/GaAs. Исследовано влияние параметров структуры (толщин слоёв, профиля легирования, наличия спейсеров) на форму спектра ФЛ и величину двумерной плотности носителей заряда в области квантовой ямы.

### **Библиографический список**

1. Snodgrass W. 150 nm InP HBT process with two-Level Airbridge Interconnects and MIM Capacitors for Sub-Millimeter Wave Research / W. Snodgrass, M. Stuenkel, M. Feng // CS MANTECH Conference, Florida, USA, 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.csmantech.org/Digests/2009/2009%20Papers/15.4.pdf>, свободный (дата обращения: 14.03.2016)
2. A. Hulsmann, A. Leuther, I. Kalfass, R. Weber, A. Tessmann, M. Schlechtweg, O. Ambacher. Advanced mHEMT technologies for space applications // 20-th International Symposium on Space Terahertz Technology. – Charlottesville, 2009. – P. 178–182
3. Р.А. Хабибуллин, И.С. Васильевский, Г.Б. Галиев, Е.А. Климов, Д.С. Пономарев, В.П. Гладков, В.А. Кульбачинский, А.Н. Клочков, Н.А. Юзева. Влияние встроенного электрического поля на оптические и электрофизические свойства p-HEMT наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs // Физика и техника полупроводников Т. 45. В. 5, 2011 С. 666
4. Г.Б. Галиев, И.С. Васильевский, Е.А. Климов, А.Н. Клочков, Д.В. Лаврухин, С.С. Пушкарев, П.П. Мальцев. Особенности фотолюминесценции HEMT наногетероструктур с составной квантовой ямой InAlAs/InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs // Физика и техника полупроводников Т. 49. В. 2, 2015 С. 241
5. V.I. Zubkov, M.A. Melnik, A.V. Solomonov, E.O. Tsvelev, F. Bugge, M. Weyers, G. Tränkle. Determination of band offsets in strained InGaAs/GaAs quantum wells by C-V-profiling and Schrödinger-Poisson self-consistent simulation // Phys. Rev. B Vol. 70, № 7, 2004 P.075312