

УДК 621.315.592

PACS: 68.65.Fg, 73.21.Fg,
73.40.Cg, 81.07.St

Исследование РНЕМТ-структур с квантовыми ямами AlGaAs/InGaAs/GaAs, выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией

А. Л. Дудин, М. С. Миронова, Г. Е. Яковлев, Д. С. Фролов, И. В. Коган,
И. В. Шуков, В. И. Зубков, Г. Ф. Глинский

Проведены исследования серии образцов РНЕМТ-гетероструктур различного дизайна на основе твердых растворов GaAs методами электрохимического вольт-фарадного профилирования и фотолюминесценции при разных температурах. На основе построенной математической модели для РНЕМТ-гетероструктур с квантовой ямой AlGaAs/InGaAs/GaAs смоделированы пространственный профиль потенциала зоны проводимости, положение уровней размерного квантования и огибающие волновые функции носителей заряда. Результаты расчётов сопоставлены с экспериментальными данными. Из сравнительного анализа расчётных и экспериментальных спектров фотолюминесценции сделаны выводы о качестве выращиваемых слоев и гетерограниц.

Ключевые слова: РНЕМТ-гетероструктура, фотолюминесценция, квантовая яма, твердые растворы InGaAs-AlGaAs, электрохимическое профилирование, самосогласованное моделирование.

Введение

Развитие современной микроэлектроники постоянно требует улучшения характеристик элементной базы, в частности, повышения удельной мощности и рабочей частоты как отдельно изготавливаемых элементов, так и интегральных микросхем. При этом цена полупроводниковых компонентов должна оставаться достаточно низкой. Оптимальным решением для элементной базы СВЧ-микроэлектроники на данный момент является изготовление приборов на основе гетеро-

структур Ga(Al)As/InGa(Al)As. Такие гетероструктуры сочетают в себе относительную дешевизну подложек GaAs, развитость технологии получения соединений Ga,Al,In-As и использование материалов (таких как InAs) с повышенной подвижностью электронов, вплоть до $20000 \text{ см}^2/(\text{В с})$. В отечественной и зарубежной литературе такие приборы часто обозначают РНЕМТ (от англ. Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) или просто НЕМТ.

При современном промышленном производстве полупроводниковых приборов основное внимание уделяется повышению воспроизводимости и однородности характеристик получаемых эпитаксиальных пластин. Технологически для достижения высокой степени однородности необходимо тщательно контролировать различные параметры гетероструктур на всех этапах ростового процесса. В то время как in-situ контроль ростовых параметров, таких как толщина и состав слоёв структуры, даёт моментальный результат, позволяющий корректировать ростовой процесс, измерение электрофизических и оптических параметров гетероструктуры требует как продолжительного времени, так и специальных тестовых структур для проведения анализа. При этом поточный характер производства задаёт жесткие временные и экономические рамки, что требует минимизации количества вспомогательных структур и чётко согласованных действий при различных измерениях.

Дудин Анатолий Леонидович¹, начальник отдела.

Миронова Мария Сергеевна², ассистент, к.ф.-м.н.

Яковлев Георгий Евгеньевич², аспирант.

Фролов Дмитрий Сергеевич², аспирант.

Коган Илья Владимирович¹, старший инженер-технолог.

Шуков Иван Викторович¹, инженер-физик.

Зубков Василий Иванович², профессор, д.ф.-м.н.

Глинский Геннадий Федорович², профессор, д.ф.-м.н.

¹ ЗАО «Светлана-Рост».

Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27.

Тел. (812) 313-54-51.

E-mail: a.dudin@svrost.ru; i.kogan@svrost.ru

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ».

Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

Тел. (812) 234-31-64.

E-mail: vzubkovspb@mail.ru; genaglinskii@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 февраля 2017 г.

© Дудин А. Л., Миронова М. С., Яковлев Г. Е., Фролов Д. С., Коган И. В., Шуков И. В., Зубков В. И., Глинский Г. Ф., 2017

Важным здесь является не только обнаружение отклонения физических параметров структуры от заданных, но и установление причин отклонения, с последующим внесением корректировки в ростовой процесс.

В настоящей работе проведены исследования серии образцов РНЕМТ-гетероструктур различного дизайна на основе твердых растворов арсенида галлия рядом взаимодополняющих методов: измерения вольт-фарадных характеристик и спектров фотолюминесценции при разных температурах. Далее выполнено численное моделирование распределения потенциала и концентрации основных носителей заряда по гетероструктуре. На основе разработанной расчётной модели были рассчитаны спектры фотолюминесценции гетероструктур, которые сравнивались с экспериментальными данными.

Целью исследования было объяснение возможных отклонений экспериментальных данных от расчётных и выявление параметров, по которым конструкция реальной структуры отличается от заданной по спецификации. Кроме того, проведена оценка влияния резкости гетерограниц, которые могут размываться вследствие сегрегации индия, на форму спектра фотолюминесценции.

Контроль характеристик гетероструктур по спектрам фотолюминесценции: эксперимент и моделирование

Полупроводниковые твердые растворы на основе арсенида галлия, используемые для создания СВЧ НЕМТ-приборов, имеют прямую структуру энергетических зон и характерные энергетические зазоры, соответствующие ближней ИК-области электромагнитного спектра. Это обуславливает при их изучении высокую информативность и эффективность применения оптических методов контроля, в первую очередь, фотолюминесценции (ФЛ). Этот неразрушающий и оперативный метод анализа полупроводниковых структур не требует специальной подготовки образцов и широко используется для определения состава выращенных слоёв, оценки кристаллического качества гетероструктуры и многих других параметров [1, 2] (наряду с естественными электрическими измерениями характеристик таких структур).

В случае с квантовыми ямами НЕМТ-структур, возбужденных источником излучения, неравновесные носители заряда будут рекомбинировать из 1-й и 2-й электронных подзон в подзоны тяжелых и легких дырок валентной зоны. Анализ положения пиков фотолюминесценции, сопровождаемый соответствующим квантово-механическим расчетом вероятности оптических переходов,

позволяет уточнить информацию о зонной структуре полупроводниковых гетероструктур, энергии электронных и дырочных состояний и степени их заполнения.

Заметим, что особенности постростовой технологии, диктуемые конечным потребителем продукции, ведут к появлению большой номенклатуры модификаций базовой конструкции РНЕМТ-структуры. При росте каждой новой модификации необходимо учитывать изменение толщин каждого слоя, наличие упругих механических напряжений в псевдоморфных квантовых ямах, а также изменение в легировании слоёв. Как показано в работах [3, 4], даже небольшое изменение толщины слоя или его уровня легирования приводит к серьёзному изменению спектров фотолюминесценции гетероструктуры. В то же время до сих пор не выявлены и не сформулированы критерии, по которым на этапе производственного контроля по спектрам фотолюминесценции можно принимать однозначное решение о соответствии исследуемой гетероструктуры заданным техническим требованиям. Прежде всего, это касается тех параметров гетероструктуры, которые не задаются непосредственно, а определяются совокупностью ряда ростовых параметров. Так, например, проблема нерезкости гетерограниц, обусловленная, прежде всего сегрегацией индия, описана во множестве статей [5, 6]. К сожалению, в большинстве из них сегрегация изучается как отдельное явление, не связанное с производством реальных структур. Некоторые авторы сопровождают свои наблюдения теоретическими расчётами и предлагают методы предотвращения сегрегации индия во время роста [7, 8]. Однако применяемые ими методики определения резкости гетерограниц и состава слоёв являются разрушающими и слишком длительными для корректировки параметров в ходе ростовой серии.

Спектры фотолюминесценции в данной работе измерялись при температурах 77 и 300 К по стандартной методике синхронного детектирования с помощью «lock-in» селективного усилителя, монохроматора и приемника излучения. В качестве источника возбуждающего излучения использовался твердотельный одномодовый лазерный модуль видимого диапазона с мощностью непрерывного излучения 40 мВт на длине волны 532 нм. Излучение лазера модулировалось и фокусировалось на поверхности образца в пятно диаметром 100 мкм. Сигнал приемника на базе фотоэлектронного умножителя ФЭУ-62, установленного у выходной щели монохроматора, усиливался селективным нановольтметром и регистрировался обрабатывающим блоком.

Исследуемые в работе образцы были выращены на полуизолирующих подложках GaAs (100) методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Все они представляют собой одностороннюю РНЕМТ-гетероструктуру с объёмным легированием эмиттерного слоя. При выращивании образцов незначительно варьировались ширина квантовой ямы

(КЯ) и толщина спейсерного слоя. Главным отличием образцов между собой было различное легирование эмиттерного слоя. Прочие слои и параметры роста одинаковы для всех исследуемых образцов. Детали конструкции гетероструктуры и экспериментальных образцов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Конструкция исследуемой гетероструктуры

Состав слоя	Обозначение	Толщина слоя, нм	Тип легирования, концентрация, см ⁻³
GaAs	Контактный слой	85	$n, 4 \times 10^{18}$
Al _{0,9} Ga _{0,1} As	Стопорный слой	20	$n, 2 \times 10^{18}$
GaAs	Обкладочный слой	50	$n, 5 \times 10^{16}$
Al _{0,22} Ga _{0,78} As	Барьерный слой	150	n , градиент до 5×10^{16}
Al _{0,22} Ga _{0,78} As	Эмиттерный слой	125	$n, 1,0 \times 10^{18} - 5,0 \times 10^{18}$
Al _{0,22} Ga _{0,78} As	Спейсерный слой	0–3	–
In _{0,22} Ga _{0,78} As	Квантовая яма	12–14	–
GaAs	Буферный слой	800	1×10^{14}
GaAs подложка			

Таблица 2

Различия конструкций экспериментальных образцов

Образец №	Толщина КЯ, нм	Толщина спейсерного слоя, нм	Концентрация кремния в эмиттерном слое, см ⁻³
1	14	30	$2,0 \times 10^{18}$
2	12	25	$2,0 \times 10^{18}$
3	14	30	$3,0 \times 10^{18}$
4	14	30	$5,0 \times 10^{18}$

В экспериментальных спектрах фотолюминесценции РНЕМТ-гетероструктур с КЯ AlGaAs/InGaAs/GaAs, выращенных при разной температуре, как правило, наблюдаются два пика различной интенсивности в области 1000 нм (см. рис. 1). Эти пики формируются вследствие рекомбинации электронов из первой и второй подзоны размерного квантования зоны проводимости с дырками валентной зоны. Введение изменений в конструкцию гетероструктуры (в первую очередь, концентрация примеси в эмиттерном слое), в совокупности с изменением условий роста, приводило к изменению амплитуды и положения максимумов спектров ФЛ. Так, уменьшение ширины квантовой ямы с 14 до 12 нм сопровождалось преобладанием длинноволнового пика (образец 2), что можно объяснить слабой степенью заполнения второй подзоны квантования в относительно узкой квантовой яме. В то же время расстояние между пиками ФЛ в меньшей степени зависело от параметров роста и составляло примерно 40 нм.

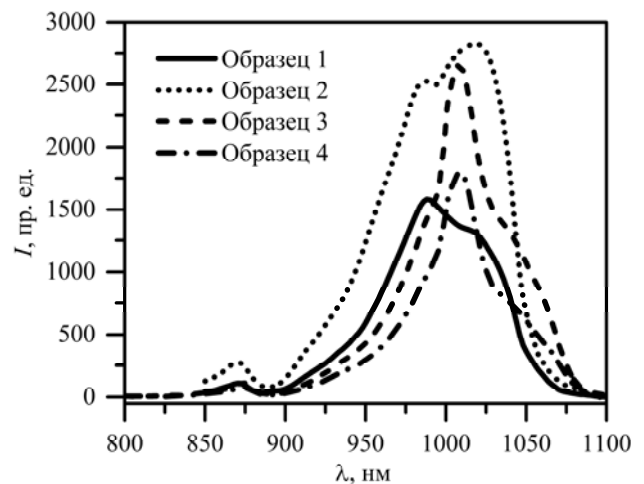


Рис. 1. Экспериментальные спектры ФЛ образцов РНЕМТ-гетероструктур с КЯ AlGaAs/In_{0,22}Ga_{0,78}As/GaAs ($T = 300$ К). Ширина ямы: образцы 1, 3, 4 – 14 нм, образец 2 – 12 нм.

Для детального анализа спектров ФЛ рассматриваемых структур было проведено числен-

ное совместное решение системы уравнений Шредингера и Пуассона [9]. Законы дисперсии носителей заряда в зоне проводимости и валентной зоне предполагались параболическими и определялись эффективными массами электрона и тяжелой дырки соответственно. Учёт механических напряжений, возникающих вследствие псевдоморфного роста структуры, проводился в рамках теории деформационного потенциала с использованием данных [4]. С помощью самосогласованного решения были 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. Расчёт энергетического спектра данной гетероструктуры показывает, что в асимметричной квантовой яме зоны проводимости наблюдаются два связанных состояния, отстоящих друг от друга примерно на 70 мэВ. В то же время энергетический зазор между связанными состояниями тяжелых дырок в валентной зоне в несколько раз меньше (~20 мэВ).

По результатам расчётов были построены зонные диаграммы и волновые функции для электронов и дырок. На рис. 2 показан энергетический спектр образца № 1 вблизи квантовой ямы.

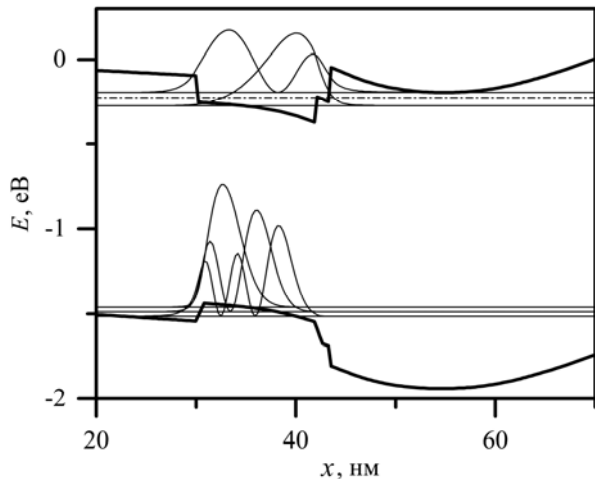


Рис. 2. Зонная диаграмма (жирная линия) и квадраты модулей огибающих волновых функций электронов и дырок (тонкие линии) для образца № 1. Горизонтальные линии — энергетические уровни. Штрих-пунктирной линией отмечен уровень Ферми.

Далее на основе теоретических данных рассчитывались спектры ФЛ гетероструктур с различным профилем легирования примеси, а также с различными толщинами спейсера GaAs между квантовой ямой и барьером. Для примера моделировалась структура, экспериментальный спектр ФЛ которой приведен на рис. 1 (образец 1), в которой варьировалась концентрация примеси в

эмиттерном слое. Из анализа расчетных зависимостей (рис. 3) можно сделать вывод о том, что при низком уровне легирования эмиттерной области ($N_D < 1,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) преобладает люминесценция, обусловленная переходами с основного электронного уровня E1 в квантовой яме на несколько уровней тяжелых и легких дырок (рис. 3, кривая 1). Увеличение степени легирования эмиттерного слоя ($N_D > 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) приводит к эффективному заполнению второй подзоны квантования E2 зоны проводимости и, соответственно, к доминированию связанного с ним коротковолнового (вблизи 980 нм) пика в фотолюминесценции (рис. 3, кривая 2).

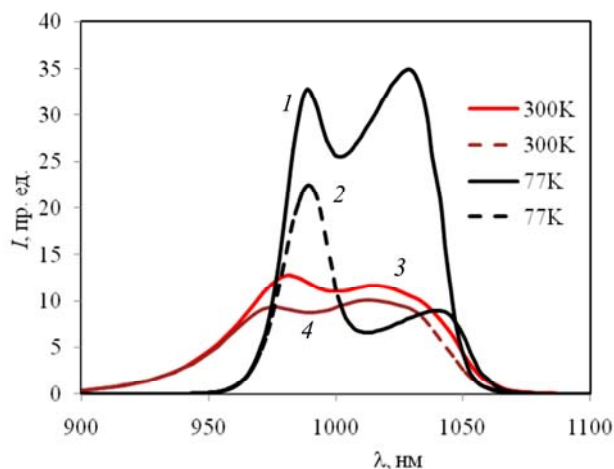


Рис. 3. Результаты численного моделирования спектров ФЛ РНЕМТ-гетероструктур с КЯ AlGaAs/InGaAs/GaAs с различной концентрацией примеси в эмиттере. 1 – низкая ($< 1,5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) (расчет для 77 К), 2 – оптимальная ($\sim 3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) (расчет для 77 К); 3 – промежуточная ($\sim 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) (расчет для 300 К), 4 – промежуточная ($\sim 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) спейсер AlGaAs отсутствует (расчет для 300 К).

В спектрах ФЛ структуры с промежуточным уровнем легирования эмиттерной области ($N_D \sim 2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) соотношение интенсивностей полос зависит от геометрии активной области. Так, при толщине спейсера 1,5 нм более интенсивным является коротковолновый пик (рис. 3, кривая 3), соответствующий переходам из второй подзоны размерного квантования электронов на всевозможные энергетические уровни дырок. В то же время для подобной структуры, но в которой спейсер отсутствует, более интенсивным оказывается длинноволновый пик (рис. 3, кривая 4). Как видно, даже небольшое изменение симметрии квантовой ямы (толщина вводимого в расчет одностороннего спейсера всего 1,5 нм) существенно влияет на соотношение интенсивностей пиков ФЛ. Отметим, что роль наличия/отсутствия спейсера может играть также и область сегрегации индия вблизи квантовой ямы.

Сравнение измеренных спектров ФЛ и результатов моделирования показало хорошее совпадение эксперимента с расчётом. Небольшие отклонения в соотношении между пиками расчётных и экспериментальных спектров обусловлены, по-видимому, размытием гетерограниц квантовой ямы и, как следствие, уменьшением спейсерного слоя.

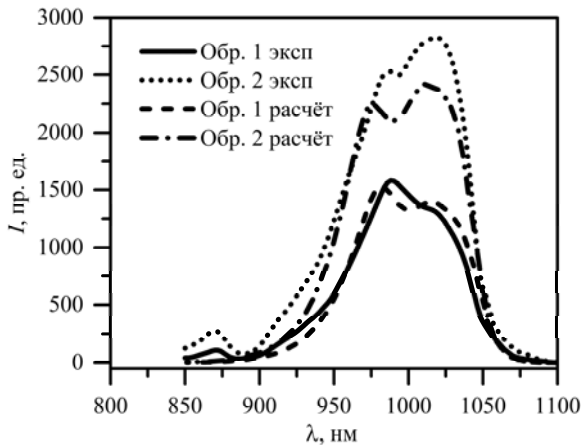


Рис. 4. Сравнение спектров ФЛ РНЕМТ-гетероструктур с КЯ $AlGaAs/InGaAs/GaAs$, полученных экспериментально ($T = 300\text{ K}$) и в результате численного моделирования для образцов 1 и 2.

Таким образом, анализ спектров ФЛ оказывается весьма чувствительным методом характеристики электронного спектра квантовой ямы НЕМТ-приборов и возможного отклонения технологического процесса их изготовления от оптимальных ростовых параметров.

Электрохимическое вольт-фарадное профилирование гетероструктур

Измерения распределения концентрации основных носителей заряда по глубине структуры проводились с помощью электрохимического вольт-фарадного (ECV) метода. В ECV, как и в обычном C–V-методе, концентрация свободных носителей заряда рассчитывается из производной измеренной емкости C по напряжению V , а глубина травления определяется по количеству удаленного вещества, полученного из выражения для электрохимического закона Фарадея.

Измерения концентрации проводились при комнатной температуре с использованием профилометра ECVPro компании Nanometrics. Раствор 0,2M NaOH использовался для образования электролитического выпрямляющего контакта площадью $0,1\text{ cm}^2$. При ECV-профилировании шаг травления составлял 1 нм. Частота и амплитуда

переменного тестового сигнала составляли 300 Гц и 10 мВ соответственно [10].

На рис. 5 приведены измеренные профили концентрации подвижных носителей заряда. Профилирование относительно толстых поверхностных слоев проводилось методом постепенного стравливания поверхности в режиме «etching» (сплошная линия в левой части профиля), в то время как измерение концентрации электронов в области квантоворазмерных слоев эмиттера и квантовой ямы метода велось в режиме «depletion» (сканированием границей области объемного заряда). Такая технология позволяет увеличить разрешение метода ECV [10]. Первый наблюдаемый пик соответствует концентрации в эмиттерной области РНЕМТ-структуры. Второй – соответствует квантовой яме. Пик концентрации, соответствующий эмиттерному слою, варьируется в диапазоне значений $(2,5\text{--}3,5)\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$, причем для КЯ он составляет $1,6\times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$. Отметим, что по результатам холловских измерений плотность двумерного электронного газа в КЯ данного образца равнялась $2,14\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$. Это близко коррелирует с приведенными результатами. Заметим, что пик, соответствующий эмиттерному слою, удастся зарегистрировать только в электрохимическом C–V-профилировании. Это возникает вследствие того, что жидкий электролит создает на поверхности меньший выпрямляющий барьер, нежели металлический контакт при обычном C–V-профилировании, поэтому исходная ширина обедненной области оказывается меньше.

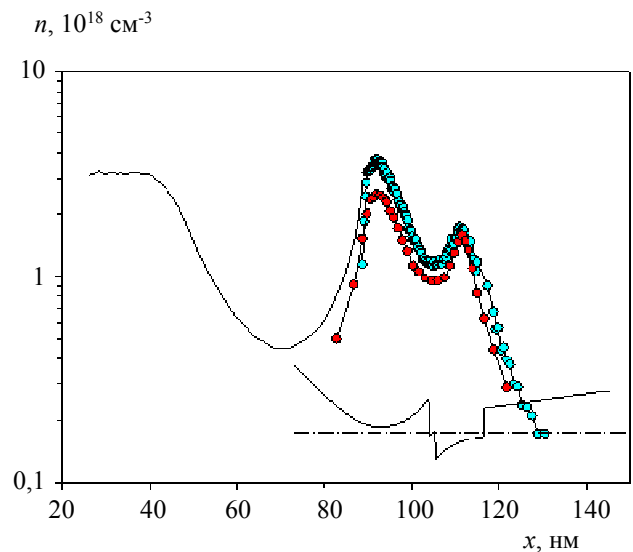


Рис. 5. Координатная зависимость профиля концентрации носителей заряда и дна зоны проводимости (для структуры с вытравленной мезой) в РНЕМТ-гетероструктурах $AlGaAs/InGaAs/GaAs$. Штрих-пунктир – положение уровня Ферми.

Анализ представленных результатов дает основания заключить, что ECV является эффективным методом измерения распределения носителей заряда в НЕМТ-гетероструктуре, но оказывается менее информативным, по сравнению с ФЛ при контроле электронного спектра собственно квантовой ямы.

Заключение

В данной работе экспериментальными методами фотолюминесценции, электрохимического вольт-фарадного профилирования и методами численного моделирования проведен анализ распределения концентрации носителей заряда и электронного спектра РНЕМТ-гетероструктур на основе КЯ AlGaAs/In_{0,22}Ga_{0,78}As/GaAs.

Приведены результаты моделирования спектров фотолюминесценции РНЕМТ-структур на основе КЯ AlGaAs/In_{0,22}Ga_{0,78}As/GaAs и сделаны предположения по оптимизации выращиваемых гетероструктур, направленные на усиление локализации носителей заряда и степени заполнения ими КЯ.

Методом электрохимического вольт-фарадного профилирования получены аккуратные значения концентрации свободных носителей заряда в приповерхностных и эмиттерных слоях РНЕМТ-гетероструктуры.

В ходе работы установлены зависимости между формой, положением, величиной пиков спектра фотолюминесценции, с одной стороны, и составом слоёв, формой квантовой ямы и профилем легирования, с другой стороны. Полученные зависимости позволяют в большинстве случаев конкретизировать отличия реальной структуры от желаемой. Наблюдается хорошее согласие экспериментальных спектров фотолюминесценции с их численным моделированием, что позволяет сделать вывод о том, что в ходе эпитаксиального роста авторам удалось избежать сегрегации как индия, так и кремния, а также вызываемых ими искажений формы квантовой ямы.

Отметим, что в работе при помощи расчётов удалось показать, что энергетическая структура квантовой ямы не может приводить к некоторым наблюдаемым на спектрах фотолюминесценции особенностям, которые требуют дальнейшего изучения.

Можно сделать вывод о пригодности комплекса использованных методов для производственного выходного анализа готовых пластин гетероструктур.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки по Соглашению № 14.582.21.0010 от 14.10.2015 в рамках ФЦП ИР 2014-2020, уникальный идентификатор проекта RFMEFI58215X0013.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хабибуллин Р. А., Васильевский И. С., Галиев Г. Б., Климов Е. А., Пономарев Д. С., Гладков В. П., Кульбачинский В. А., Клочков А. Н., Юзеева Н. А. // ФТП. 2011. Т. 45. Вып. 5. С. 666.
2. Галиев Г. Б., Васильевский И. С., Климов Е. А., Клочков А. Н., Лаврухин Д. В., Пушкарев С. С., Мальцев П. П. // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 2. С. 241.
3. Галиев Г. Б., Васильевский И. С., Климов Е. А., Мокеров В. Г., Черчукин А. А. // ФТП. 2006. Т. 40. Вып. 12. С. 1479.
4. Миронова М. С., Яковлев Г. Е., Зубков В. И., Глинский Г. Ф. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2016. Т. 1. № 1. С. 27.
5. Weyers M., Bhattacharya A., Bugge F., Knauer A. // Topics Appl. Phys. 2000. Vol. 78. P. 83.
6. Bugge F., Zeimer U., Sato M., et al. // J. Cryst. Growth. 1998. Vol. 183. P. 511.
7. Yamaguchi Koichi, Okada Tetsuya, Hiwatashi Fumito // Applied Surface Science. 1997. Vol. 117–118. P. 700.
8. Dehaese O., Wallart X., Mollot F. // Applied Physics Letters. 1995. Vol. 66. No. 1. P. 52.
9. Zubkov V. I., Melnik M. A., Solomonov A. V., Tselev E. O., Bugge F., Weyers M., Tränkle G. // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70. No. 7. P. 075312.
10. Фролов Д. С., Яковлев Г. Е., Зубков В. И., Дудин А. Л., Соломникова А. В., Кунашик Е. С. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 2. С. 6.

Investigation of PHEMT structures with quantum wells of AlGaAs/InGaAs/GaAs grown by molecular beam epitaxy

A. L. Dudin¹, M. S. Mironova², G. E. Yakovlev², D. S. Frolov², I. V. Kogan¹,
I. V. Shukov¹, V. I. Zubkov², and G. F. Glinskiy²

¹ Svetlana-Rost, JSC
27 Engels av., St. Petersburg, 194156, Russia
E-mail: a.dudin@svrost.ru

² Saint Petersburg State Electrotechnical University «LETI»
5 Professor Popov str., St. Petersburg, 197376, Russia
E-mail: vzubkovspb@mail.ru

Received February 20, 2017

A set of PHEMT heterostructures of different design based on GaAs solid solution has been studied by electrochemical capacitance-voltage profiling and photoluminescence at different temperatures. With the help of specially created math model for PHEMT heterostructures, containing quantum well AlGaAs/InGaAs/GaAs, the spatial lineup of conduction band bottom, quantum confined levels and wave functions were calculated. The simulated results were compared to the experimental data. From the comparative analysis of calculated and experimental photoluminescence spectra, the conclusions have been drawn about the quality of the heterojunctions and grown layers.

Keywords: PHEMT heterostructure, photoluminescence, InGaAs-AlGaAs, quantum well, ECV profiling, self-consistent modeling.

REFERENCES

1. R. A. Khabibullin, I. S. Vasil'evskii, G. B. Galiev, E. A. Klimov, D. S. Ponomarev, V. P. Gladkov, V. A. Kulbachinskii, A. N. Klochkov, and N. A. Uzeeva, *Semiconductors* **5**, 657 (2011).
2. G. B. Galiev, I. S. Vasil'evskii, E. A. Klimov, A. N. Klochkov, D. V. Lavruhin, S. S. Pushkarev, and P. P. Maltsev, *Semiconductors* **49** (2), 234 (2015).
3. G.B. Galiev, I.S. Vasil'evskii, E.A. Klimov, V.G. Mokerov, and A.A. Cherechukin, *Semiconductors* **40** (12), 1445 (2006).
4. M.S. Mironova, G.E. Yakovlev, V.I. Zubkov, and G.F. Glinskiy, *Elektronika i Mikroelektronika SVCh* **1** (1), 27 (2016).
5. M. Weyers, A. Bhattacharya, F. Bugge, and A. Knauer, *Topics Appl. Phys* **78**, 83 (2000).
6. F. Bugge, U. Zeimer, M. Sato, et al., *J. Cryst. Growth* **183**, 511 (1998).
7. Koichi Yamaguchi; Tetsuya Okada, and Fumito Hiwatashi, *Applied Surface Science*. **117-118**, 700 (1997).
8. O. Dehaese, X. Wallart, and F. Mollet, *Applied Physics Letters* **66** (1), 52 (1995).
9. V. I. Zubkov, M. A. Melnik, A. V. Solomonov, E. O. Tsvelev, F. Bugge, M. Weyers, and G. Tränkle, *Phys. Rev. B* **70** (7), 075312 (2004).
10. D. S. Frolov, G. E. Yakovlev, V. I. Zubkov, A. L. Dudin, A. V. Solomnikova, and E. S. Kunashic. *Izvestiya SpbGETU «LETI»*, No. 2, 6 (2016).