Учреждение Российской академии наук
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

На правах рукописи

СВИРИДОВ Дмитрий Евгеньевич

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ МИКРОСКОПИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА, 2011 г.

Работа выполнена в Лаборатории лазеров с катодно-лучевой накачкой Нейтронно-физического отдела Учреждения Российской академии наук Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук В. И. Козловский

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук В. Б. Ошурко

кандидат физико-математических наук И. П. Казаков

Ведущая организация:

Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума

Защита диссертации состоится “ 23 ” мая 2011 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 Учреждения Российской академии наук Физического института им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан “____” _____ 2011 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03

доктор физико-математических наук А.С. Шиканов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность. Современное развитие полупроводниковых приборов основывается на использовании наноразмерных гетероструктур, получаемых эпитаксиальными методами роста. Для совершенствования технологии их создания и улучшения рабочих характеристик приборов на их основе необходимо точно, и по возможности быстро определить такие параметры гетероструктур как, шероховатость ростовой поверхности, толщины слоев, их химический состав и концентрацию носителей в них.

В работах [1-3] было показано, что в определенных случаях эти задачи могут быть решены на основе атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью таких методов как контактная и полуконтактная атомно-силовая микроскопия (КАСМ и ПАСМ), позволяющих измерять рельеф поверхности [4], а также метода сканирующей микроскопии сопротивления растекания (СМСР), измеряющего проводящие свойства поверхности [5].

Тем не менее, некоторые из этих параметров могут быть измерены и другими, более известными методами, такими, например, как сканирующая и просвечивающая электронная микроскопия. Однако, АСМ является более простым в применении методом, не требующим сложной процедуры приготовления образца и проведения измерений в вакууме.

Другие методы, такие как фотолюминесценция и рентгеноструктурный анализ, в отличие от АСМ, позволяют измерять усредненные по всей структуре свойства, и неспособны предоставить информацию с высоким пространственным разрешением о токах, носителях и потенциалах на нанометровом уровне, присущем современным квантово-размерным гетероструктурам.

Несмотря на огромное число работ по использованию атомно-силовой микроскопии в различных областях науки, относительно малое число работ посвящено исследованию данным методом полупроводниковых лазерных гетероструктур. В работах [2,6] метод СМСР применялся для определения концентрации носителей n и дрейфовой подвижности μ в квантовых ямах (КЯ) легиро-

ванных гетероструктур. Для этого, однако, необходимо было использовать калибровочные измерения. Было показано, что визуализация слоев в этом режиме в основном определяется различием в концентрации носителей в КЯ и барьерах. Однако, полученные результаты справедливы лишь для сильно легированных структур.

КАСМ и ПАСМ также применялись при исследовании гетероструктур с КЯ. В работах [1,7] было показано, что визуализация различных слоев происходит за счет релаксации внутренних упругих напряжений на поверхности скола и окисления. Кроме этого в работе [8] был развит метод, позволяющий предоставлять количественную информацию о величине упругих напряжений в КЯ и их химическом составе.

Большинство работ выполнено для легированных структур на основе кремния и соединений A3B5. Практически не исследованы нелегированные гетероструктуры на основе соединений A3B5 и A2B6. Все вышесказанное определяет актуальность задачи исследования методами КАСМ, ПАСМ и СМСР нелегированных гетероструктур на основе соединений A3B5 и A2B6, применяемых при создании полупроводниковых лазеров с электронным и оптическим возбуждением.

Цель работы. Целью данной диссертационной работы являлось развитие методов КАСМ, ПАСМ и СМСР для определения различных параметров нелегированных полупроводниковых гетероструктур на основе материалов A3B5 и A2B6, таких как толщины слоев, химический состав и концентрация носителей.

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие **основные задачи**:

- исследовать механизм формирования рельефа на сколах гетероструктур с квантовыми ямами GaInP/AlGaInP, ZnCdS/ZnSSe и CdS/ZnSSe, а также на сколах гетероструктур со слоями AlAs/AlGaAs с большим содержанием алюминия методами КАСМ и ПАСМ;

- смоделировать рельеф, образующийся на поверхности сколов гетероструктур с квантовыми ямами;
- исследовать механизм визуализации слоев нелегированных полупроводниковых гетероструктур в режиме СМСР и его зависимость от излучения встроенного в АСМ лазера и внешней подсветки;
- изучить механизм токопереноса в контакте зонда с нелегированными слоями гетероструктур в режиме сканирующей микроскопии сопротивления растекания, посредством измерения и моделирования вольтамперных характеристик (ВАХ).

Научная новизна и практическая значимость работы состоит в том, что впервые методами атомно-силовой микроскопии исследовались нелегированные квантово-размерные гетероструктуры для лазеров с продольным оптическим и электронным возбуждением на основе соединений А3В5 и А2В6, излучающих в видимой области спектра. Наиболее значимыми результатами являются:

- результаты, полученные при исследовании процессов формирования нанорельефа и механизма визуализации слоев на сколах гетероструктур с КЯ $Ga_{0.46}In_{0.54}P/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P$, $Zn_{0.4}Cd_{0.6}S/ZnS_{0.07}Se_{0.93}$ и $CdS/ZnS_{0.07}Se_{0.93}$ в контактном и полуконтактном режиме АСМ, позволяющие определять такие параметры структур как толщины слоев и их химический состав;

- объяснение механизма формирования рельефа поверхности скола гетероструктур с распределенными брэгговскими зеркалами (РБЗ) AlAs/AlGaAs, и определение толщин слоев, что, в частности, позволило уточнить характеристики зеркал и лазера, изготовленного на основе одной из таких гетероструктур;

- объяснение механизма визуализации квантовых ям на сколах нелегированных гетероструктур в режиме сканирующей микроскопии сопротивления растекания и особенностей механизма токопереноса в контакте зонда со слоями гетероструктур;

- предложение теоретического описания процесса растекания тока в области контакта зонда со слоями гетероструктур, учитывающего формирование барьера Шоттки вблизи контакта зонда с поверхностью скола и наличие сопротивления растекания, позволяющего оценить концентрацию носителей в квантовых ямах.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Визуализация слоев на сколах гетероструктур с КЯ $Ga_{0.46}In_{0.54}P/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P$, и $CdS/ZnS_{0.07}Se_{0.93}$ в контактном и полуконтактном режиме сканирования преимущественно происходит за счет релаксации внутренних упругих напряжений, вызванных рассогласованием кристаллических решеток квантовых ям и барьеров.

2. Рельеф поверхности сколов гетероструктур с квантовыми ямами $Ga_{0.46}In_{0.54}P/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P$, и $CdS/ZnS_{0.07}Se_{0.93}$, формируемый за счет релаксации упругих напряжений, может быть смоделирован с помощью аналитического выражения, полученного в линейном и изотропном приближении теории упругости, что позволяет оценить химический состав слоев квантовых ям.

3. Формирование рельефа поверхности сколов гетероструктур со слоями AlAs и AlGaAs происходит за счет различий в скоростях окисления этих слоев.

4. Визуализация слоев на сколах нелегированных гетероструктур в режиме сканирующей микроскопии сопротивления растекания происходит за счет различий в величине их удельного сопротивления и высоте барьера Шоттки, формирующегося при контакте зонда с ними.

5. Предложенная теоретическая модель растекания тока в точечном контакте с барьером Шоттки, учитывающая сопротивление растекания, хорошо описывает измеряемые на слоях структур вольтамперные характеристики, позволяя, таким образом, оценить концентрацию носителей в квантовых ямах.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы докладывались на следующих российских и международных конференциях:

- 14-th Int. Conf. on II-VI Compounds, St. Petersburg, 2009;
- 17-th Int. Symp. Nanostructures: Physics and Technology, Minsk, 2009;
- I и III Всероссийских школах–семинарах “Наноматериалы”, г. Рязань 2008 и 2009 гг.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 4 научные статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 96 страниц, включая 67 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 89 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** обоснована актуальность темы, отражена новизна и практическая значимость работы, сформулирована цель и задачи диссертации.

В **первой главе** дается обзор современного состояния исследований различных полупроводниковых гетероструктур тремя методами атомно-силовой микроскопии: контактным, полуконтактным, и методом сканирующей микроскопии сопротивления растекания. Рассмотрены теоретические и практические основы применения данных методов для получения изображений, представляющих собой распределение различных физических свойств по поверхности исследуемых структур. Даны представления о латеральном (в плоскости сканирования) разрешении. Рассмотрены предложенные в литературе механизмы визуализации слоев на сколах гетероструктур GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$, $In_xGa_{1-x}As$/ InP, $In_xGa_{1-x}As$/GaAs и их зависимость от таких факторов как окисление, релаксация упругих напряжений и различие в проводимости. Анализируются работы, в которых изучалось влияние встроенного в АСМ лазера (ВЛ) на результаты измерений электрических характеристик полупроводниковых структур и рассмотрены способы минимизации этого влияния. Обсуждается возможность приме-

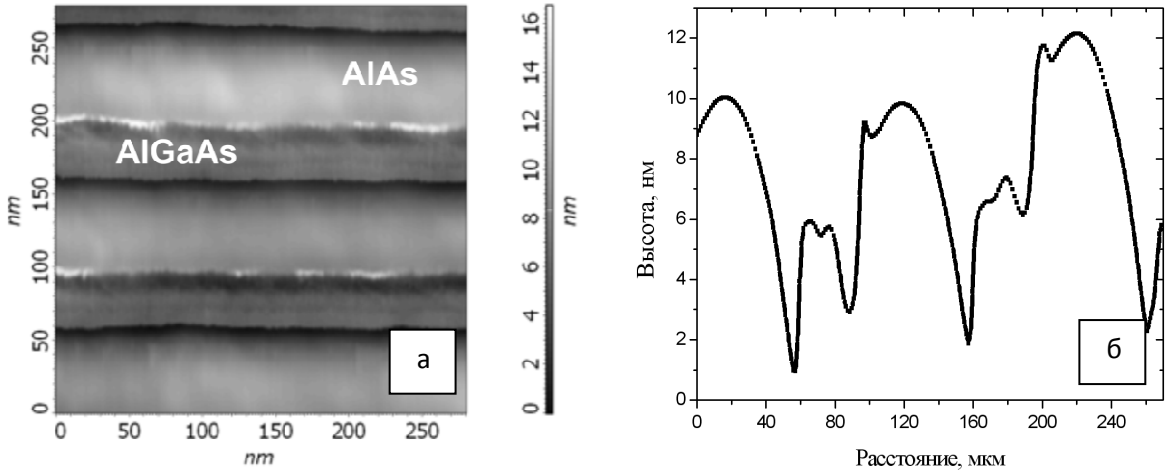


Рис. 1. Топографическое изображение распределенного брэгговского зеркала AlAs/$Al_{0.45}Ga_{0.55}As$ (а) и усредненный профиль в направлении нормали к ростовой поверхности гетероструктуры (б).

нения методов КАСМ, ПАСМ и СМСР для определения таких параметров гетероструктур как химический состав слоев, концентрация носителей тока, и их подвижность.

Вторая глава посвящена исследованию механизмов образования рельефа на сколотых поверхностях гетероструктур с КЯ на основе соединений A2B6 и A3B5. Дано описание структуры исследуемых образцов и методики измерений в режимах ПАСМ и КАСМ. В частности было показано, что рельеф в области выхода слоев AlAs/$Al_{0.45}Ga_{0.55}As$ на поверхность скола определяется, в основном, процессами окисления, которые протекают более интенсивно для слоёв с большим содержанием Al. Типичное изображение такого участка поверхности с усредненным профилем в направлении нормали к ростовой поверхности гетероструктуры представлено на рис. 1.

Такой же механизм формирования рельефа скола наблюдался и в случае гетероструктуры с квантовыми ямами $Zn_{0.4}Cd_{0.6}S/ZnS_{0.07}Se_{0.93}$, чьи слои были согласованы по периоду кристаллической решетки с подложкой GaAs. В данном случае процесс окисления проходил существенно медленнее, чем в структурах AlAs/AlGaAs. Тем не менее, слои ZnSSe окислялись сильнее, чем слои ZnCdS, что приводило к образованию впадин на месте выхода КЯ ZnCdS на поверхность скола.

В гетероструктурах $Ga_{0.46}In_{0.54}P/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P$ и $CdS/ZnS_{0.07}Se_{0.93}$ с заметным рассогласованием периодов кристаллических решеток соседних слоев формирование рельефа поверхности скола в основном определялось релаксацией внутренних упругих напряжений, вызванных различием в периодах кристаллических решеток КЯ и барьеров. Вблизи каждой квантовой ямы, испытывающей напряжение сжатия, возникало возвышение, которое хорошо описывалось аналитической моделью частичной релаксации внутренних упругих напряжений при образовании свободной поверхности [8].

$$u_y(z) = C + \frac{2}{\pi}(1+\nu)\cdot\varepsilon\cdot\sum_{k=0}^{12}\left\{(z-k\cdot L-a)\cdot\ln\left(\frac{|z-k\cdot L-a|}{a}\right)+(z-k\cdot L+a)\cdot\ln\left(\frac{|z-k\cdot L+a|}{a}\right)\right\} \quad (1)$$

где $u_y(z)$ - высота возвышения КЯ на сколе, измеряемая с помощью АСМ, z - направление вдоль нормали к ростовой поверхности, C – произвольная константа, ν – коэффициент Пуассона, $\varepsilon = (l_{кя} - l_б)/l_б$ - рассогласование периодов кристаллических решеток КЯ ($l_{кя}$) и барьеров ($l_б$), L - толщина барьерного слоя, a – полуширина КЯ, k – номер КЯ.

Результаты сравнения экспериментального профиля поверхности скола гетероструктуры с КЯ $Ga_{0.46}In_{0.54}P/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P$ с расчетным профилем представлены на рис. 2.

Наилучшее совпадение расчетной и измеренной зависимостей наблюдалось при рассогласовании периодов кристаллических решёток барьерных слоев и квантовых ям $\varepsilon = 0.0048$. Используя это значение и зная период кристаллической решетки барьерных слоев можно оценить постоянную решетки КЯ, которая не всегда известна, и, предполагая применимость правила Вегарда для тройного соединения GaInP, оценить его химический состав.

Полученные, таким образом, оценки состава квантовых ям в структурах $Ga_{0.46}In_{0.54}P/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P$ и $CdS/ZnS_{0.07}Se_{0.93}$, сделанные по измерению нанорельефа поверхности скола, соответствуют, с удовлетворительной точностью, составам, заданным в процессе роста гетероструктур.

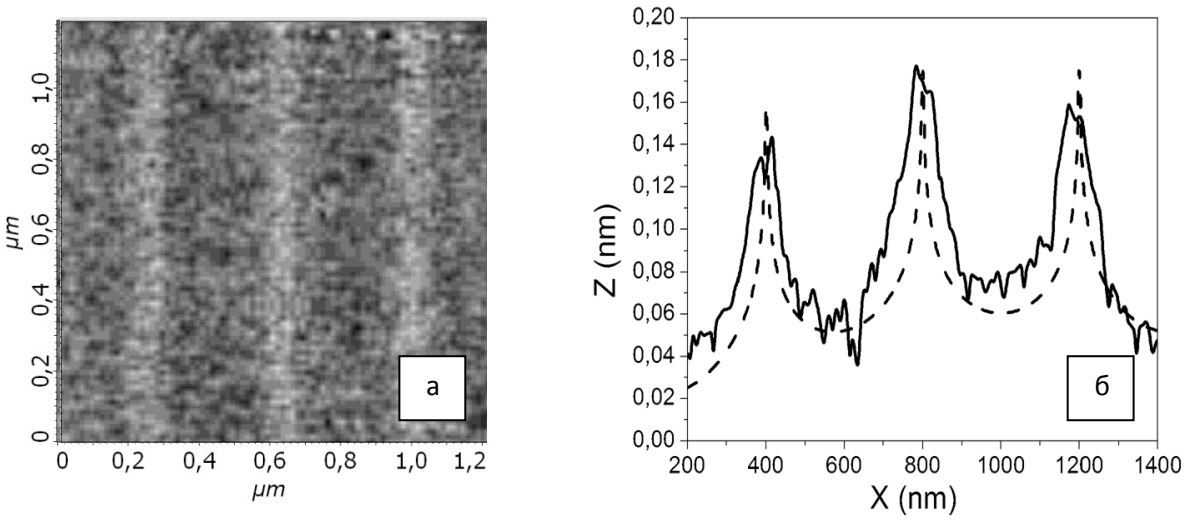


Рис. 2. Топографическое изображение участка скола гетероструктуры $Ga_{0.46}In_{0.54}P$ /$(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P$ (а). Усредненный профиль в направлении нормали к ростовой поверхности (сплошная кривая) в сравнении с расчетной кривой (пунктирная) для ε = 0.0048 (б).

В **третьей главе** представлены результаты исследований механизма визуализации слоев нелегированных гетероструктур с КЯ (A2B6 и A3B5) на сколе методом сканирующей микроскопии сопротивления растекания. Дано описание структуры исследуемых образцов и методики измерений в режиме СМСР.

Было показано, что визуализация КЯ на сколах нелегированных гетероструктур возможна как при положительных, так и при отрицательных потенциалах, прикладываемых к структуре за счет того, что при контакте зонда с КЯ величина тока оказывалась больше, чем при контакте зонда с барьерными слоями. На рис. 3 в качестве примера представлено токовое изображение участка скола одной из гетероструктур с КЯ $CdS/ZnS_{0.07}Se_{0.93}$, полученное в режиме СМСР при U = -2 В (а) и усредненный профиль в направлении нормали к ростовой поверхности гетероструктуры (б).

Чтобы узнать, влияет ли излучение встроенного в АСМ лазера (λ = 653 нм) на визуализацию слоев исследуемых гетероструктур в режиме СМСР, в ряде экспериментов лазер выключался на время измерения тока. В этом случае для предотвращения автоматического втягивания пьезосканера коэффициент усиления обратной связи (КУОС) приравнивался к нулю. Для дополнительного

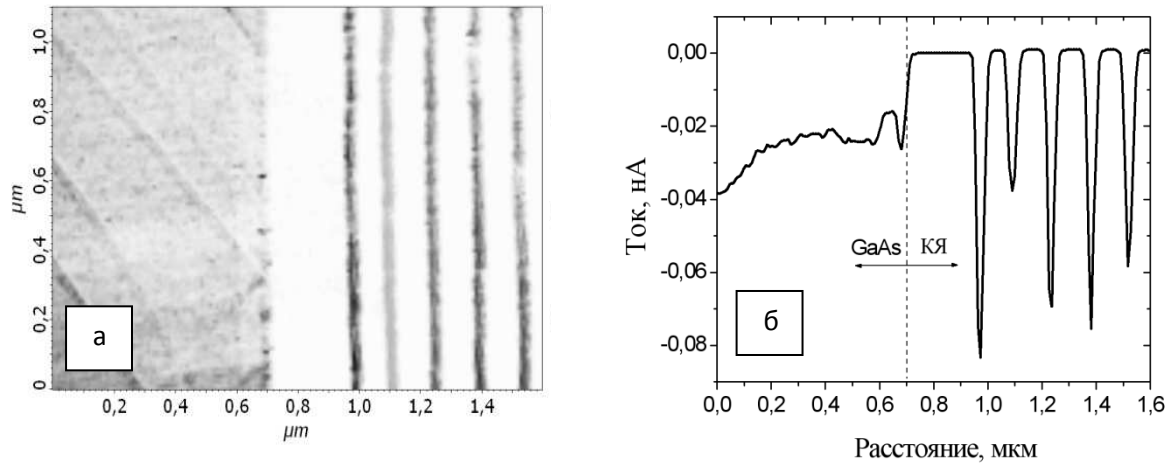


Рис. 3. СМСР изображение участка скола гетероструктуры с КЯ CdS/ZnSSe, полученное при ***U*** = -2 В (а) и усредненный профиль в направлении нормали к ростовой поверхности гетероструктуры (б).

внешнего освещения поверхности скола вблизи точечного контакта использовалось излучение галогеновой лампы (ГЛ), имеющей непрерывный спектр в диапазоне (350-1400 нм). На рис. 4 представлено полученное таким образом СМСР изображение скола гетероструктуры с КЯ $Ga_{0.51}In_{0.49}P/(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$ и РБЗ AlAs /$Al_{0.5}Ga_{0.5}As$ при U = -1.4 В. Было установлено, что излучение ВЛ способно оказывать существенное влияние на результаты измерений в режиме СМСР за счет генерации неравновесных носителей в слоях структур и подложке, что приводило к увеличению величины тока, протекающего через точечный контакт.

Для того чтобы разобраться в механизме визуализации КЯ на сколах нелегированных гетероструктур, необходимо было провести детальное исследование механизма токопереноса в контакте зонд-образец. Для этих целей были проведены измерения вольтамперных характеристик точечных контактов зонда с различными слоями гетероструктур в темноте и при подсветке излучением встроенного лазера. Было установлено, что вольтамперные характеристики, полученные на всех слоях исследуемых структур имеют выпрямляющий характер. Экспоненциальное возрастание тока наблюдалось при отрицательных потенциалах на втором контакте. При положительных потенциалах происходило насыщение тока. Исключение составляли слои распределенных брэгговских

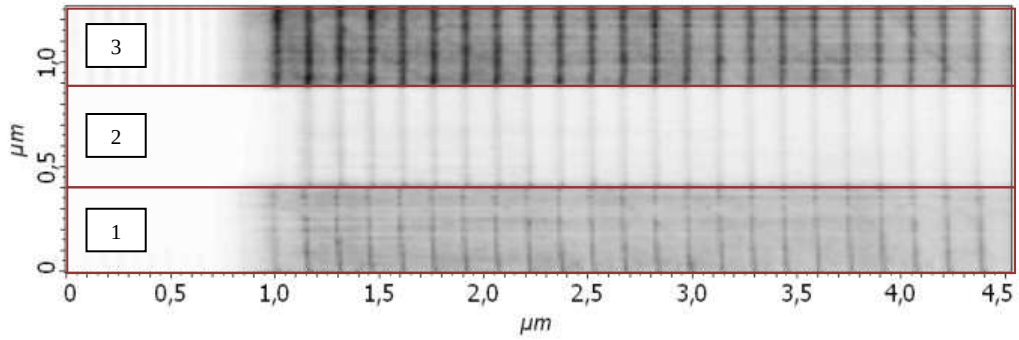


Рис. 4. СМСР изображение участка скола структуры с КЯ $Ga_{0.51}In_{0.49}P$ /$(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$ и РБЗ AlAs/AlGaAs, полученное в режиме СМСР при $\boldsymbol{U}$ = –1.4 В. Секция 1 - ВЛ вкл., КУОС = 2; секция 2 - ВЛ выкл., КУОС = 0; секция 3 - ВЛ выкл., КУОС = 0, ГЛ вкл.

зеркал AlAs/AlGaAs, на вольтамперных характеристиках которых возрастание тока наблюдалось при положительных потенциалах, а насыщение при отрицательных. Кроме того на ВАХ слоев GaInP/AlGaInP гетероструктур с РБЗ при отрицательных потенциалах после экспоненциального возрастания тока наблюдалось его насыщение приблизительно на уровне 5 нА в темноте. Главное отличие между вольтамперными характеристиками, полученными на слоях КЯ и барьеров, состояло в величинах пороговых напряжений, которые для КЯ были меньше, и в углах наклона линейных участков на ВАХ относительно оси напряжения. При подсветке излучением встроенного в АСМ лазера пороговые напряжения уменьшались как на КЯ, так и на барьерах, угол наклона линейных участков при этом увеличивался.

Было показано, что ВАХ контактов зонда со слоями структур могут быть смоделированы на основе термоэмиссионной теории для контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки, учитывая последовательно включенное сопротивление растекания R_s.

$$I = SA^*T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_s}{kT}\right) \exp\left(\frac{-e(U - IR_s)}{\eta kT}\right) \qquad (2)$$

где U – потенциал, прикладываемый ко второму контакту, $S = \pi r_{mc}{}^2$ – площадь электрического контакта зонд-образец, A^* – эффективная постоянная Ричард-

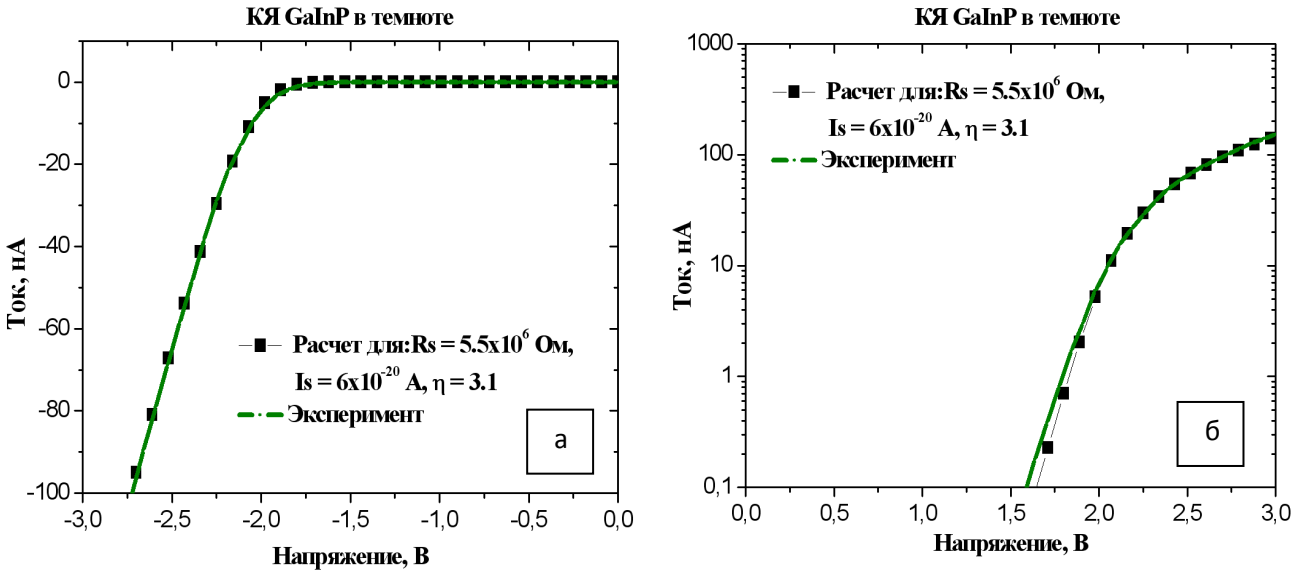


Рис. 5. Экспериментальная и теоретическая ВАХ для КЯ $Ga_{0.51}In_{0.49}P$ в линейном (а) и полулогарифмическом масштабе (знаки тока и напряжения изменены на противоположные) (б).

сона, T – абсолютная температура, Φ_s – высота барьера Шоттки, e, k, η – заряд электрона, постоянная Больцмана и параметр неидеальности диода.

Моделирование осуществлялось подбором параметров R_s, η, и $I_s = S{\cdot}A^*{\cdot}T^2{\cdot}\exp(-\Phi_s/kT)$, где I_s – ток насыщения, при которых расчетная кривая максимально совпадала с экспериментальной в области выхода зависимости тока от напряжения на линейный участок, характеризующий сопротивление растекания.

Для квантовых ям гетероструктуры $Ga_{0.51}In_{0.49}P/(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$ без РБЗ (рис. 5), таким образом, удалось оценить величину R_s. Его значение при выключенном встроенном лазере составило $5.5{\cdot}10^6$ Ом. Далее, были проведены оценки концентрации носителей в КЯ (n) с помощью выражений:

$$R_s = \theta{\cdot}\rho/4{\cdot}r_{mc},\ \rho = 1/e{\cdot}n{\cdot}\mu \qquad (3)$$

где ρ – удельное сопротивление материала КЯ, r_{mc} – радиус контакта зонд-образец, μ – дрейфовая подвижность электронов в КЯ, θ – параметр, характеризующий неоднородность проводимости слоистой структуры.

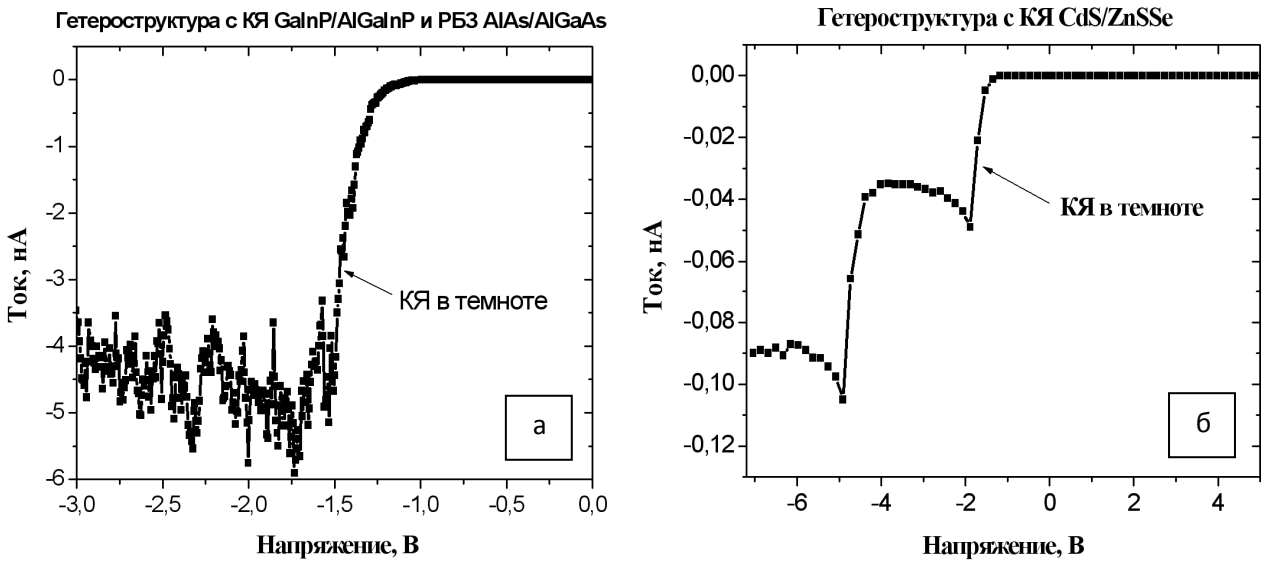


Рис. 6. Экспериментальные ВАХ контактов зонда с КЯ $Ga_{0.46}In_{0.54}P$ (а) и CdS (б), полученные при выключенном ВЛ.

Значение r_{mc} оценивалось с помощью модели Герца, описывающей упругие деформации контактирующих тел (7.6 нм). Значение подвижности бралось из литературы (2000 см^2/В·с) [9,10]. Было найдено также, что параметр θ равен примерно 20 для исследуемых структур. Полученное, таким образом, значение концентрации электронов в КЯ $n \approx 4 \cdot 10^{15}$ см$^{-3}$, совпало со значением для исследуемого материала, известного из литературы [9].

В случае гетероструктур с КЯ GaInP/AlGaInP и слоями РБЗ AlAs/AlGaAs, а также гетероструктур с КЯ CdS/ZnSSe применение такого подхода оказывается затруднительным, так как на ВАХ контактов зонда со слоями этих структур присутствуют участки с насыщением тока при отрицательных потенциалах на втором контакте (рис. 6). В этих случаях модель позволяет рассчитать лишь начальные участки экспоненциального возрастания тока на ВАХ, на которых не проявляется зависимость от параметра R_s (рис. 7). В случае гетероструктур с КЯ GaInP/AlGaInP и слоями РБЗ AlAs/AlGaAs, насыщение объясняется выпрямляющими свойствами *p-n* гетероперехода, образованного слоями РБЗ (*p* - типа) и слоями GaInP/AlGaInP (*n* - типа). В случае гетероструктур с КЯ CdS/ZnSSe участки с насыщением при отрицательном потенциале связывались с выпрямляющими свойствами гетероперехода подложка GaAs – ZnSSe и барьером

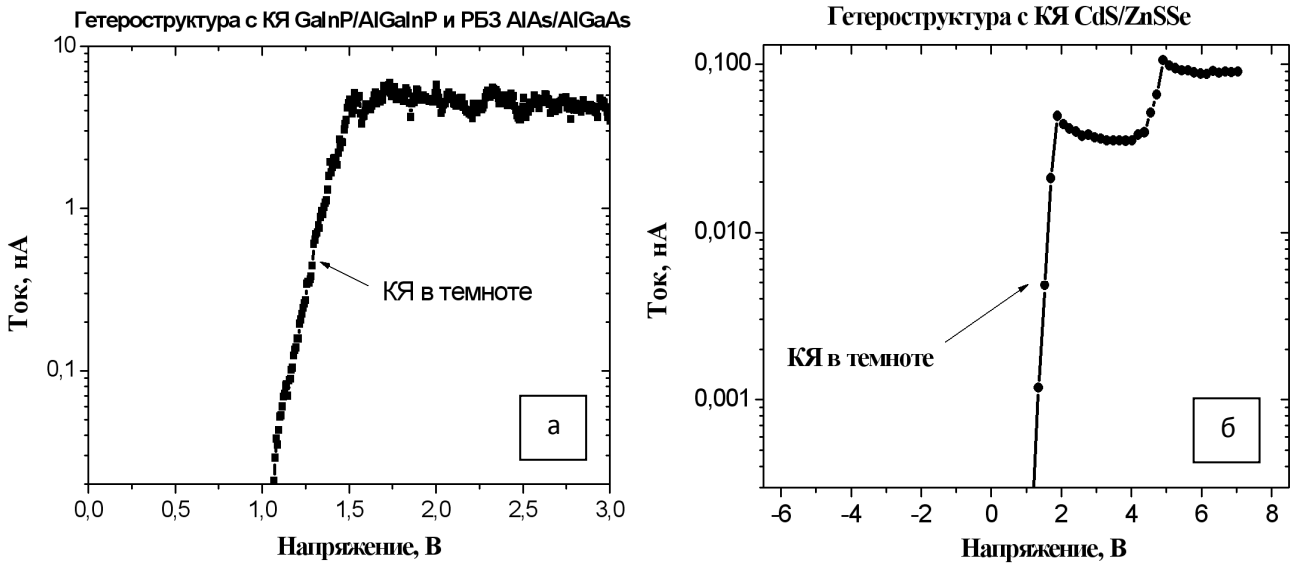


Рис. 7. Вольтамперные характеристики контактов зонда с КЯ $Ga_{0.46}In_{0.54}P$ (а) и CdS (б) из рис. 6, построенные в полулогарифмическом масштабе (знаки тока и напряжения изменены на противоположные).

Шоттки на втором контакте. Тем не менее, для некоторых структур зависимость тока на ВАХ успевала выйти на линейный участок перед насыщением, что позволяло провести оценки величины R_s и, соответственно, концентрации носителей в КЯ.

В заключение данной главы приводится рассмотрение механизма визуализации слоев нелегированных гетероструктур на сколе в режиме СМСР с помощью анализа вольтамперных характеристик. Полученные результаты свидетельствуют, что пороговые напряжения при контакте зонда со слоями КЯ для всех гетероструктур меньше, чем при контакте зонда с барьерными слоями. На рис. 8, в качестве примера, представлены экспериментальные и теоретические ВАХ для контактов зонда с КЯ $Ga_{0.51}In_{0.49}P$ и барьером $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$, полученные в темноте для гетероструктуры со слоями РБЗ. Расчетные кривые для КЯ и барьера были построены для $I_s = 3 \cdot 10^{-15}$ и $7 \cdot 10^{-18}$ А соответственно. Видно, что величина пороговых напряжений определяется значением параметра I_s, величина которого для КЯ существенно больше, чем для барьера. Параметр I_s в свою очередь зависит, согласно выражению (2), от высоты барьера Шоттки Φ_s (уменьшается с увеличением барьера). Поэтому тот факт, что пороговые напряжения при контакте зонда со слоями КЯ меньше, чем с барьерами, является

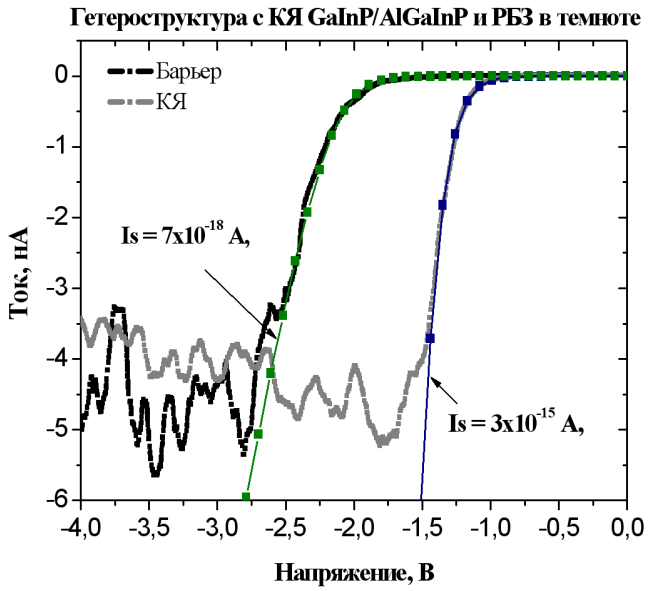


Рис. 8. Экспериментальные и теоретические ВАХ контактов зонда с КЯ $Ga_{0.51}In_{0.49}P$ и барьером $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$, полученные в темноте для гетероструктуры со слоями РБЗ. Видно, что пороговое напряжение для КЯ меньше.

следствием того, что высота барьера Шоттки для контакта зонда с КЯ меньше.

Влияние отличия в проводимости между слоями гетероструктур на визуализацию также следует из анализа экспериментальных вольтамперных характеристик для КЯ и барьеров, из которых видно, что наклон линейного участка, определяемый проводимостью, для этих слоев заметно отличается.

Что касается наилучшего условия для визуализации слоев нелегированных гетероструктур в режиме СМСР, то оно выполняется, если сканирование осуществляется при напряжении, значение которого находится между пороговыми напряжениями для барьерных слоев и КЯ.

В **заключение** приводятся основные результаты, полученные при выполнении данной работы**:**

1. На сколах гетероструктур $Ga_{0.46}In_{0.54}P/(Al_{0.6}Ga_{0.4})_{0.5}In_{0.5}P$ и $CdS/ZnS_{0.07}Se_{0.93}$, содержащих слабо окисляющиеся слои, контактным и полуконтактным методом сканирования был выявлен нанорельеф, сформированный релаксацией внутренних упругих напряжений на свободной поверхности. Проведен расчет

данного нанорельефа на основе теории упругости в линейном и изотропном приближении, позволивший оценить химический состав квантовых ям.

2. Полуконтактным методом сканирования скола лазерной гетероструктуры с распределенными брэгговскими зеркалами AlAs/$Al_{0.45}Ga_{0.55}As$ были измерены толщины слоев, что позволило уточнить оптические характеристики зеркал и объяснить температурные зависимости характеристик лазера, изготовленного на ее основе. Установлено, что визуализация слоев обусловлена разной скоростью окисления слоев AlAs и $Al_{0.45}Ga_{0.55}As$.

3. Впервые методом сканирующей микроскопии сопротивления растекания было получено контрастное изображение квантовых ям на сколах нелегированных гетероструктур GaInP/AlGaInP и CdS/$ZnS_{0.07}Se_{0.93}$. Показано, что визуализация слоев происходит за счет различий в величине их удельного сопротивления и высоте барьера Шоттки, формирующегося при контакте зонда с ними.

4. Предложена модель растекания тока вблизи точечного контакта зонда с поверхностью скола гетероструктуры, учитывающая образование барьера Шоттки в области контакта зонда, и величину последовательного сопротивления растекания. Показано, что на вольтамперные характеристики точечного контакта оказывают влияние электрические характеристики второго контакта и гетероперехода между подложкой и активной областью гетероструктуры. Данная модель позволила оценить концентрацию носителей в КЯ $Ga_{0.51}In_{0.49}P$ /$(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.51}In_{0.49}P$ значением $4 \cdot 10^{15}$ $см^{-3}$.

<u>Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах</u>:

1. **Д.Е. Свиридов**, В.И. Козловский, Н.В. Забавин. Сканирующая зондовая микроскопия сколов нелегированных гетероструктур GaInP/AlGaInP и CdS/ZnSSe. // Краткие сообщения по физике, ФИАН, **38(2)**, с.19-29 (2011).
2. **D.E. Sviridov**, V.I. Kozlovsky, and D.A. Sannikov. Scanning spreading resistance microscopy of undoped CdS/ZnSSe multiple quantum well heterostructure. // Phys. Stat. Sol. B, **247**(6), p. 1420-1423 (2010).

3. В.И. Козловский, Д.А. Санников, **Д.Е. Свиридов**. Наноразмерные гетроструктуры ZnCdS/ZnSSe для полупроводниковых лазеров. // Краткие сообщения по физике ФИАН, **35**(2), с. 3-10 (2008).
4. В.Ю. Бондарев, В.И. Козловский, А.Б. Крыса, Ю.М. Попов, **Д.Е. Свиридов**, Я.К. Скасырский. Лазерная электронно-лучевая трубка с монолитным лазерным экраном. // Квантовая электроника, **37**(9), с. 853 – 856 (2007).
5. V.G. Litvinov, V.I. Kozlovsky, D.A. Sannikov, **D.E. Sviridov**, O.A. Milovanova, and N.B. Rybin. Local measurement of conduction band offset for ZnCdS/ZnSSe nanostructure by Laplace current DLTS cooperated with AFM technique. // Phys. Stat. Sol. C, **7**(6), p. 1536-1538 (2010).
6. Н.В. Забавин, **Д.Е. Свиридов**. Выращивание квантоворазмерных гетероструктур CdS/ZnSe/ZnSSe//GaAs методом парофазной эпитаксии из металлоорганических соединений и их исследование. // Труды III Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноматериалы», Рязань, РГРУ, Т.1, с.42-46, 27 сент. – 2 окт. (2010).
7. **D.E. Sviridov**, V.I. Kozlovsky. Illumination effect on multiple quantum well heterostructure visualization with scanning spreading resistance microscopy. // Proceeding of 17-th Int. Symp. “Nanostructures: Physics and Technology”, p. 46, Minsk, Belarus (2009).
8. **D.E. Sviridov**, V.I. Kozlovsky, and D.A. Sannikov. Scanning spreading resistance microscopy of undoped CdS/ZnSSe multiple quantum well heterostructure. // Proceeding of 14-th Int. Conf. “II-VI Compounds”, p. 116, St. Petersburg, Russia (2009).
9. В.И. Козловский, **Д.Е. Свиридов**, Д.А. Санников. Исследование скола наноразмерной гетероструктуры CdS/ZnSSe методом сканирующей микроскопии сопротивления растекания. // Тезисы докладов IX Российской конференции по физике полупроводников «Полупроводники 2009», Новосибирск-Томск, с. 54, 28 сентября – 3 октября 2009 г.

10. **Д.Е. Свиридов**. Влияние подсветки на визуализацию слоев гетероструктуры GaInP/AlGaInP с 25 квантовыми ямами методом сканирующей микроскопии сопротивления растекания. // Труды I Всероссийской школы–семинара студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Наноматериалы», г. Рязань, РГРУ, с. 206-209, 1-6 дек. (2008).

Список цитируемой литературы.

1. F. Lelarge, O. Dehaese, E. Kapon, C. Priester, Appl. Phys. A, **69**, 347 (1999).
2. K. Maknys, O. Douheret, and S. Anand, Appl. Phys. Lett., **83**(11), 2184 (2003).
3. H. Dumont, L. Auvray, J. Dazord, V. Souliere, Y. Monteil, and J. Bouix, J. Appl. Phys., **85** (10), 7185 (1999).
4. А. А. Бухараев, Д. В. Овчинников, А. А. Бухараева, Заводская лаборатория, **5**, 10 (1997).
5. M. Meuris, W. Vandervorst, and P. De Wolf, European Patent No. 90,201,853, filed July 9, 1990. U.S. Patent No. 5,585,734, filed December 17, 1996.
6. F. Giannazzo, V. Raineri, and F. Priolo, Appl. Phys. Lett. **88**, 043177 (2006).
7. T. M. Smeeton, V. Bousquet, S. E. Hooper, M. Kauer, and J. Heffernan, Appl. Phys. Lett., **88**, 041910 (2006).
8. J. H. Davies, D.M. Bruls, J.W.A.M Vugs, and, P.M. Koenraad, Journal of Appl. Phys, **91**(7), 4171 (2002).
9. S. F. Yoon, K. W. Mah and H. Q. Zheng, J. Appl. Phys., **85** (10) 7374 (1999).
10. C. Besikci and M. Razeghi, IEEE Transactions on electron devices, **41**(6), 1066 (1994).
11. Adachi Sadao, Properties of group – IV, III-V and II-VI semiconductors (John Willey & Sons, LTD, Chichester, 2005).