

*На правах рукописи*



**Номан Мустафа Абдулла Али**

**МОНИТОРИНГ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
ИХ ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность 05.12.04– Радиотехника, в том числе системы и устройства  
телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владимир 2013

Работа выполнена на кафедре «Физики и прикладной математики» (ФиПМ) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования (ФГБОУ ВПО) «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

**Научный руководитель**

**ПРОКОШЕВ Валерий Григорьевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика и прикладная математика» ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), г. Владимир

**Официальные оппоненты:**

**СУШКОВА Людмила Тихоновна**, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Биомедицинская инженерия» ВлГУ, г. Владимир;

**ОСИН Алексей Викторович**, кандидат технических наук, заместитель главного конструктора, ведущий инженер ООО "РУСАЛОКС", г. Владимир

**Ведущая организация**

ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия имени В. А. Дегтярева», г. Ковров, Владимирская область

Защита диссертации состоится «29» октября 2013 г. в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при ВлГУ по адресу: г. Владимир, ул. Горького, д. 87., корп. 3, ФРЭМТ, ауд. 301-3.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ.

Автореферат диссертации разослан «20» сентября 2013 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, направлять по адресу совета университета: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.025.04 А. Г. Самойлову.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор



А. Г. Самойлов

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В современном мире техника и технологии изготовления радиосистем бурно развиваются, и все большее внимание уделяется разработкам с использованием последних достижений микро- и нанoeлектроники. Технология создания полупроводниковых изделий является важнейшей составляющей стремительно развивающихся нанотехнологий, одним из главных аспектов которых служит разработка методик формирования локальных наноструктурированных областей. На сегодняшний день оптические полупроводниковые устройства находят применение в области записи и чтения информации, в средствах печати, телекоммуникаций и медицины. Миниатюризация основных элементов микроэлектроники предопределяет специфику требований к изготовлению радиотехнических устройств. Поэтому диагностика и мониторинг конструкторско-технологических параметров полупроводниковых изделий в микро- и наномасштабе является актуальной задачей.

В качестве объектов исследования выбраны изделия полупроводниковой электроники, область гетероструктуры которых открыта для прямого наблюдения методами оптической, электронной и сканирующей микроскопии. Это могут быть, например, матрицы лазерных диодов, светодиодов и фотодиодов. Разработанные в диссертационном исследовании подходы могут быть распространены и на другие радиотехнические изделия, но для этого необходима пробоподготовка, например, изготовление шлифов области гетероструктуры.

Цифровая обработка и анализ изображений поверхностей современных контролируемых полупроводниковых изделий осуществляется на изображениях, полученных при помощи сканирующей электронной и зондовой микроскопии. В настоящее время этой проблеме посвящено много работ, в том числе Бухараева А.А., Леденцова Н.Н., Воротилова К.А., Хмеленина Д.Н., Швейкина Г.П. Цифровая обработка изображений достаточно полно рассматривается в работах Гонсалеса Р. и Вудса Р., Сойфера В.А., а также в работах Претта У., Приорова А.Л., Грузмана И.С.

Хорошо заметной тенденцией в настоящее время является отработка технологических методик локального наноструктурирования (контролируемого формирования наноразмерных объектов на поверхности или в объеме

определенных участков образца) и систематическое изучение физических особенностей наноструктурированных функциональных материалов с помощью цифровой обработки изображений. Одной из наиболее распространенных в технологическом плане является группа полупроводниковых соединений  $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$ , которая имеет огромные перспективы практического применения для экономичного создания радиотехнических устройств нового поколения, важнейшим этапом процесса создания и работы которых является мониторинг и контроль конструкторско-технологических параметров изделий (толщины слоев гетероструктур и неровности рельефа поверхности).

**Целью работы** является создание методики мониторинга конструкторско-технологических параметров изделий радиотехнического производства с использованием цифровой обработки изображений их поверхности.

Для достижения поставленной цели обозначены следующие **задачи**:

1. Анализ возможности применения высокоразрешающей микроскопии для исследования параметров радиотехнических изделий.

2. Определение рабочей области полупроводниковых изделий с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) и выявление размеров основных слоев гетероструктур.

3. Цифровая обработка, анализ и классификация РЭМ-изображений с помощью комплекса дифференцирующих масок, частотной фильтрации и анализа градиентов яркости.

4. Исследование характеристик поверхности полупроводниковых гетероструктур с использованием атомно-силовой (АСМ) и сканирующей зондовой микроскопией (СЗМ).

5. Сопоставительный анализ спектров комбинационного рассеяния (СКР) света областей полупроводниковых гетероструктур с результатами обработки изображений.

6. Разработка методики и алгоритма мониторинга конструкторско-технологических параметров полупроводниковых изделий радиотехнических устройств, с помощью обработки изображений их поверхности.

**Объект исследования** – система мониторинга конструкторско-технологических параметров радиотехнических изделий.

**Предмет исследования** – методическое обеспечение средств мониторинга конструкторско-технологических параметров устройств.

### **Методы исследования.**

В работе использовались современные методы цифровой обработки изображений, методы дифференцирующих масок, методы текстурных особенностей по базису Фрея-Чена, гистограммные методы, методы сканирующей электронной и зондовой микроскопии, спектрального анализа комбинационного рассеяния.

### **Научная новизна работы:**

1. Предложена методика и алгоритм мониторинга конструкторско-технологических параметров радиотехнических устройств фотоники и оптоэлектроники при помощи комплекса установок микроскопии высокого разрешения.

2. Разработана методика мониторинга конструкторско-технологических параметров радиотехнических изделий фотоники и оптоэлектроники на основе спектрального анализа оптических сигналов комбинационного рассеяния.

3. Предложена методика цифровой обработки изображений, полученных с помощью сканирующей электронной и зондовой микроскопии, основанная на сравнении специфических (порядковых) гистограмм изображения, несущих информацию о преобладании в нём текстуры определённого типа.

### **Практическая ценность работы**

1. Разработаны схемы модели и алгоритма методики мониторинга и диагностики изделий фотоники и оптоэлектроники. Созданная диагностическая система обеспечивает контроль качества конструкторско-технологических параметров радиотехнических устройств.

2. Проведен анализ параметров и характеристик слоев гетероструктуры полупроводниковых изделий с помощью цифровой обработки изображений, полученных средствами электронной и зондовой микроскопии, спектроскопии комбинационного рассеяния.

3. Полученные результаты найдут применение при создании современных радиотехнических устройствах приема и передачи информации на основе полупроводниковых гетероструктур.

4. Создана система автоматизированного анализа электронного изображения полупроводниковой гетероструктуры для мониторинга конструкторско-технологических параметров.

**Личный вклад автора** заключается в выполнении всех этапов диссертационной работы: постановке цели и задач исследований, разработке

программы и методики их выполнения, изучении и анализе литературы, сборе и обработке фактического материала, формулировании научных положений и выводов.

**Результаты работы внедрены и реализованы** в ФГБОУ ВПО ВлГУ использованы в учебном процессе при подготовке специалистов по направлению «Радиотехника», «Нанотехнология», «Лазерная техника и технология» и «Оптитехника»; в ООО "РУСАЛОКС".

**Апробация работы:** Основные результаты работы опубликованы в научных журналах, по теме диссертации опубликовано 9 работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 в зарубежных изданиях.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм и методика мониторинга конструкторско-технологических параметров полупроводниковых изделий с помощью цифровой обработки изображений их поверхности.

2. Методика цифровой обработки РЭМ-изображений исследуемых областей радиотехнических элементов на основе комплекса дифференцирующих масок для классификации и автоматизированного анализа.

3. Диагностическая система мониторинга и определения причин разброса конструкторско-технологических параметров изделий полупроводниковой электроники (матриц лазерных диодов, светодиодов и других устройств фотоники и оптоэлектроники) на микро- и наноуровне для отработки и развития перспектив технологий их производства.

4. Результаты систематических экспериментальных и теоретических исследований полупроводниковых изделий, позволившие сформулировать оптимальные требования к конструкции, а также к технологическим процессам и нормам, обеспечивающие воспроизводимое изготовление современных радиотехнических устройств.

5. Результаты исследования структуры и характеристики слоев изделий полупроводниковой электроники типа ЛЛД-20 с помощью разработанной методики.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 105 наименования, в том числе 9 работ автора. Материал диссертации изложен на 121 странице, сопровождается 62 рисунками и 10 таблицами.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, определена методическая основа исследований, изложена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, и дано краткое содержание работы по главам.

В первой главе «Современное состояние диагностики полупроводниковых материалов изделий фотоники и оптоэлектроники и цифровой обработки изображений их поверхности» дается краткий обзор научной литературы по основным процессам, развивающимся при исследовании изделий радиотехнических устройств (РТУ). Представлено описание методики, предназначенной для получения изображений поверхностей материалов при помощи комплекса установок растровой электронной (РЭМ) и зондовой микроскопии (АСМ), спектроскопии комбинационного рассеяния (СКР). Приведено описание экспериментальной установки для мониторинга конструкторско-технологических параметров.

На примере матрицы лазерных диодов, рис. 1, рассмотрены рабочие области многослойных полупроводниковых гетероструктур. Для обеспечения контроля высококачественных эпитаксиальных слоев на монокристаллических подложках требуется использование высокоразрешающих устройств.

Схематичный вид исследуемых структур показан на рис. 1в. На металлической основе располагается подложка, на которую нанесены буферные, волноводные слои, слои эмиттера, в центре располагается активный слой.

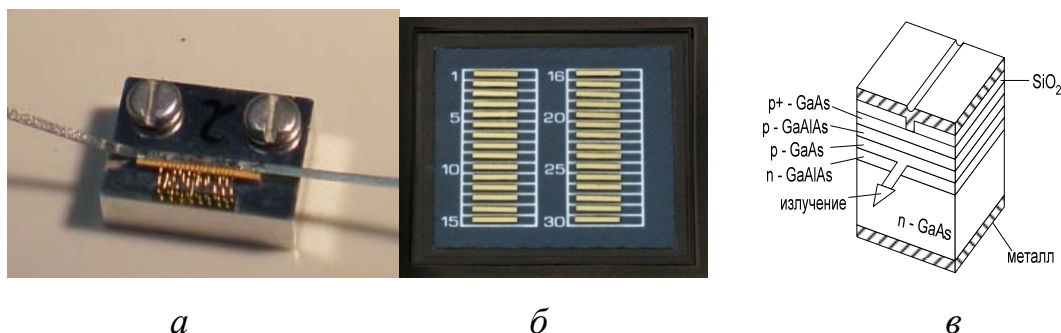
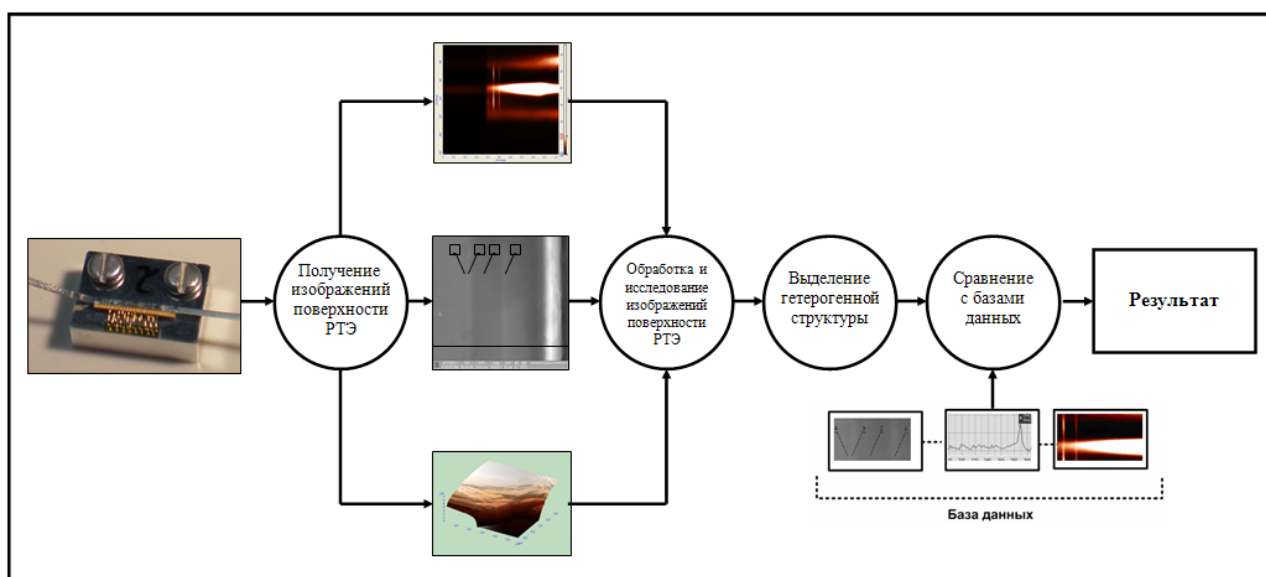


Рис 1. Линейка (а), матрица (б) лазерных диодов и схематичный вид исследуемых структур (в)

Для современного радиотехнического приборостроения при переходе на производство с использованием нанотехнологий актуальным является контролируемое, эффективное и экономичное производство наноструктур. Контроль качества РТУ представляет собой комплексные исследования, обеспечивающие определение состава гетероструктур и их конструкторско-технологических параметров.

На рис. 2. представлено описание поэтапного выполнения мониторинга конструкторско-технологических параметров РТУ на основе полупроводниковых гетероструктур. Мониторинг осуществляется на готовом изделии, поэтому начальной стадии является получение изображения с помощью электронной микроскопии. Интересующая область оценивается относительно размеров образца, выделяются зоны с различными свойствами, определяется размер области для дальнейшего исследования и цифровой обработки изображений.



**Рис. 2.** Система мониторинга конструкторско-технологических параметров радиотехнических изделий

На каждом этапе определяются параметры радиотехнического изделия. При цифровой обработке изображений, полученных с помощью РЭМ, определяются размеры слоев и контрастные характеристики; с помощью АСМ исследуется неровность рельефа поверхности, граница перехода между подложкой; с помощью спектрального анализа оптических сигналов комбинационного рассеяния определяются параметры слоев гетероструктур. Схема алгоритма методики мониторинга представлена на рис. 3.





*Рис. 3. Схема алгоритма методики мониторинга конструкторско-технологических параметров радиотехнических изделий*

**Во второй главе** «РЭМ-изображения гетероструктур изделий фотоники и оптоэлектроники» представлено описание получения изображений гетероструктур р-п перехода изделий полупроводниковой электроники методами растровой электронной микроскопии.

Вкратце рассмотрены физические и технические основы работы растровых электронных микроскопов, методы обработки сигналов, схемы получения изображения, методы формирования контраста, используемые в дальнейшем для анализа и цифровой обработки изображений. Основой получения РЭМ изображений является детектирование электронов, рассеянных на рельефе поверхности мишени-образца, и последующая обработка полученной информации. При этом происходит ряд достаточно сложных явлений, связанных с передачей энергии электронов пучка веществу мишени, которые в первом приближении можно разделить на две большие группы: упругое и неупругое рассеяние.

Коэффициент отражения электронов является частным деления количества отраженных и падающих электронов, соответственно (тока отраженных электронов и тока зонда) и зависит от атомного номера атомов мишени. Эта полуэмпирическая зависимость имеет вид [1]:

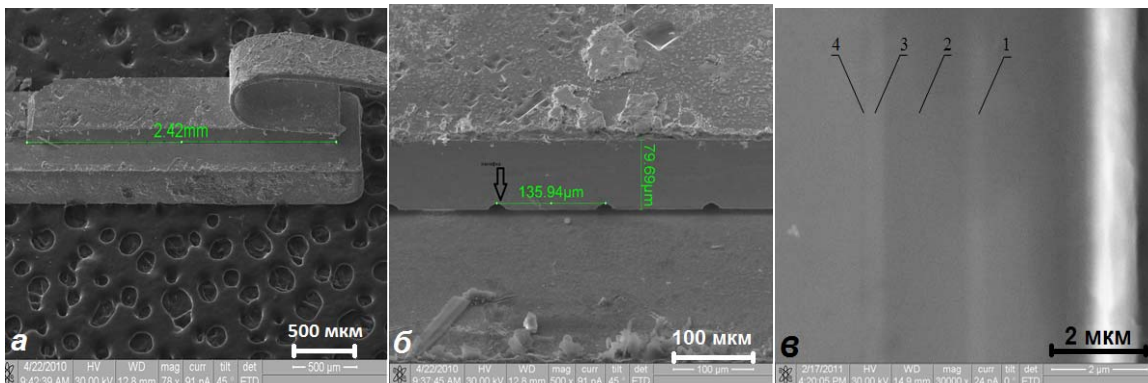
$$\eta = -0.0254 + 0.0016Z - 1.86 \cdot 10^{-4}Z^2 + 8.3 \cdot 10^{-7}Z^3 + \dots \quad (1)$$

Для сложных мишеней, содержащих атомы разных элементов ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$  - атомные номера элементов;  $C_1, C_2, \dots, C_N$  - концентрации,  $\eta_j$  - элемент в мишени), с хорошим приближением можно считать, что средний коэффициент отражения равен [1]:

$$\bar{\eta} = \sum_{j=1}^Z \eta_j C_j \quad (2)$$

Наличие такой связи между током отраженных электронов и атомным номером элемента позволяет при определенных условиях качественно оценивать элементный состав приповерхностного слоя образца.

На рис.4а представлены основные размеры исследуемого образца. Размеры между выемками резонаторов составляют 136 мкм. Ширина области, в которой располагаются рабочие слои, составляет 80 мкм.



*Рис. 4. РЭМ-изображение изделия ЛЛД-20*

На рис. 4в представлены зарегистрированные структурные слои ЛЛД-20. Правый край зарегистрированной полупроводниковой структуры примыкает к положительному контакту диода, который удален перед исследованиями, и представляет буферный слой, переходящий в контактный слой из GaAsp+-типа (1). Контактный слой легирован Zn. Концентрация легирующей примеси  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Толщина слоя 300 нм. Далее расположен p-эмиттер (2) из  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}:\text{Zn}$  толщиной 1500 нм. Концентрация легирующей примеси  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . За p-эмиттером следует волноводный слой (3) из нелегированного  $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  толщиной 300 нм. Активная область (4) из нелегированного  $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$  толщиной 10 нм регистрируется на РЭМ изображении как тонкая темная полоса. Симметричные относительно активной области слои n-типа не регистрируются как отдельные структуры из-за низкого контраста.

После получения общей информации о структуре и размерах рабочей области следует рассматривать границы переходов с помощью зондового микроскопа, имеющего более высокую разрешающую способность. Также обработанные изображения, полученные с помощью электронного микроскопа, могут быть использованы для методики идентификации различных частей радиотехнических изделий, в том числе по методу текстурных масок, медианной фильтрации или среза частот.

В третьей главе «Методика цифровой обработки РЭМ-изображений для определения конструкторско-технологических параметров изделий РТУ» рассматриваются методы и подходы обработки изображений для определения структур и рабочих областей изделий радиотехнических устройств.

Представлено применение оригинального подхода, основанного на комбинации определённым образом согласованных дифференцирующих масок, выделяющих наличие в области изображения текстурных особенностей различного типа, и гистограммных методов.

С целью решения данной задачи был разработан и апробирован подход, основанный на сравнении специфических (порядковых) гистограмм фрагмента изображения, несущих информацию о преобладании в нём текстуры определённого типа, получающей наибольший отклик соответствующего текстурного фильтра.

Перед применением метода к фрагменту изображения осуществляется его предварительная обработка, состоящая в размытии с помощью фильтра Гаусса (Gaussianfilter). Данная процедура позволяет нивелировать влияние изолированного точечного шума и различной степени фокусировки различных областей изображения.

После предобработки выполняется вычисление матриц фильтров  $W_1 \dots W_9$ . К копиям матриц яркости пикселей изображения применяется набор текстурных фильтров базиса Фрея-Чена с матрицами  $3 \times 3$ , в результате чего получается набор матриц  $W_1 \dots W_9$ . (Таблица 1). При применении фильтров на границе матрицы яркости  $W$  полагаются значения яркости в точках, выходящих за пределы матрицы, равными нулю, либо не учитываются граничные точки вообще, выполняя отступ от границы в 1 пиксел.

**Таблица 1.** Матрицы фильтров по базису Фрея-Чена

Обозначение	Матрица фильтра	Обозначение	Матрица фильтра
$W_1$	$\frac{1}{\sqrt{8}} \begin{pmatrix} 1 & \sqrt{2} & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -\sqrt{2} & -1 \end{pmatrix}$	$W_2$	$\frac{1}{\sqrt{8}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{2} \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}$
$W_3$	$\frac{1}{\sqrt{8}} \begin{pmatrix} 0 & -1 & \sqrt{2} \\ 1 & 0 & -1 \\ -\sqrt{2} & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$W_4$	$\frac{1}{\sqrt{8}} \begin{pmatrix} \sqrt{2} & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -\sqrt{2} \end{pmatrix}$
$W_5$	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$W_6$	$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}$
$W_7$	$\frac{1}{6} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -2 & 4 & -2 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}$	$W_8$	$\frac{1}{6} \begin{pmatrix} -2 & 1 & -2 \\ 1 & 4 & 1 \\ -2 & 1 & -2 \end{pmatrix}$
$W_9$	$\frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$		

После предобработки выполняется вычисление матриц фильтров  $W_1 \dots W_9$ . К копиям матриц яркости пикселей изображения применяется набор текстурных фильтров базиса Фрея-Чена с матрицами  $3 \times 3$ , в результате чего получается набор матриц  $W_1 \dots W_9$ . (Таблица 1). При применении фильтров на границе матрицы яркости  $W$  полагаются значения яркости в точках, выходящих за пределы матрицы, равными нулю, либо не учитываются граничные точки вообще, выполняя отступ от границы в 1 пиксел.

Далее вычисляются матрицы текстурного отклика  $A, B, C, D, E$  путём поэлементного сложения матриц  $W_1 \dots W_9$ ; причем полученные матрицы имеют смысл энергий различных примитивов:

$$\begin{array}{ll}
 A = W_1 \oplus W_2 & \text{энергия градиента} \\
 B = W_3 \oplus W_4 & \text{энергия пульсации} \\
 C = W_5 \oplus W_6 & \text{энергия линии} \\
 D = W_7 \oplus W_8 & \text{энергия лапласиана} \\
 E = (W_9 \oplus W_9) / 2 & \text{энергия константы}
 \end{array}$$

При рассмотрении соотношений между элементами матриц  $A, B, C, D$  соответствующих некоторому пикселу фрагмента изображения возможны 24 ситуации (от  $a \geq b \geq c \geq d$  до  $d \geq c \geq b \geq a$ ).

Пронумеровав эти ситуации от 1 до 24, и вычисляя долю пикселей изображения, в которых наблюдается каждая из них, получается гистограмма  $H$ , состоящая из 24 столбцов  $h_1 \dots h_{24}$ . Полученная гистограмма части изображения  $H$ , описывает свойства текстуры фрагмента. Сравнение таких гистограмм можно осуществлять, например, с помощью метрики  $L_1[2]$ :

$$d(H, H') = \sum_{i=1}^{24} |h_i - h'_i| \quad (3)$$

где  $h_i, h'_i$  – значение компонент гистограммы,  $h_i, h'_i \geq 0, \sum_{i=1}^{24} h_i = \sum_{i=1}^{24} h'_i = 1$ .

Описанная методика была апробирована на практике. Результаты представлены на примере РЭМ-изображения (рис.5). На изображении выделяется несколько участков с текстурой типа «а» и типа «б». В примере использовалось по 4 изображения каждого типа.

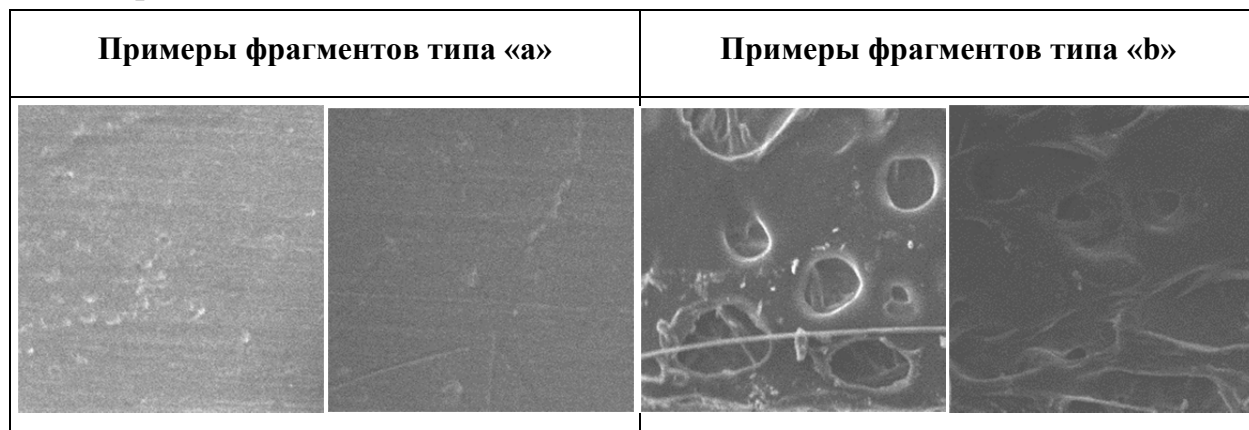


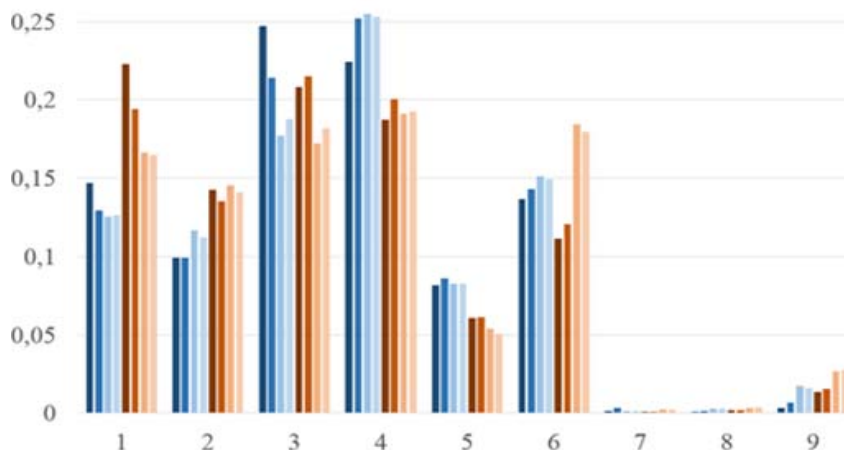
Рис 5. Фрагменты РЭМ-изображения различных частей изделия

Результаты вычисления расстояния по метрике  $L_1$  между парами тестовых изображений приведены в таблице 2. Существует порог, который позволяет разделить по величине внутриклассовые и межклассовые расстояния (рис. 6). В частности, если выбрать порог принятия решения о принадлежности фрагментов изображения к одному классу равным 0,22, то ниже него окажутся только внутриклассовые расстояния (выделены зелёным в таблице 2).

**Таблица 2.** Расстояния между тестовыми изображениями по метрике  $L_1$ .

-	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4
a1	0	0,111115	0,20636	0,182098	0,288971	0,226929	0,318756	0,299835
a2	0,111115	0	0,108521	0,086151	0,304779	0,244781	0,319885	0,298187
a3	0,20636	0,108521	0	0,026733	0,318359	0,26709	0,24176	0,23172
a4	0,182098	0,086151	0,026733	0	0,303772	0,252228	0,256653	0,23642
b1	0,288971	0,304779	0,318359	0,303772	0	0,072296	0,211853	0,201935
b2	0,226929	0,244781	0,26709	0,252228	0,072296	0	0,189575	0,173065
b3	0,318756	0,319885	0,24176	0,256653	0,211853	0,189575	0	0,033142
b4	0,299835	0,298187	0,23172	0,23642	0,201935	0,173065	0,033142	0

С учётом полученных результатов можно рекомендовать данный подход (в том числе с другими наборами дифференцирующих масок) для применения в различных радиотехнических системах, решающих задачи компьютерного зрения, анализа изображений и сигналов, например для целей сегментации, выделения специфических областей изображения, автоматического позиционирования по изображению и т.д.



**Рис. 6.** Гистограммы для тестовых фрагментов изображения (первые 9 столбцов из 24)

Для улучшения разделимости классов предложен следующий подход: исключать из рассмотрения часть пикселей изображения, на которых энергия константы  $E$  превышает заданную долю  $d$  от суммы всех пяти величин. На рис. 7 в правой колонке чёрным цветом показаны области тестовых изображений, признанные информативными для  $d = 0,995$ .

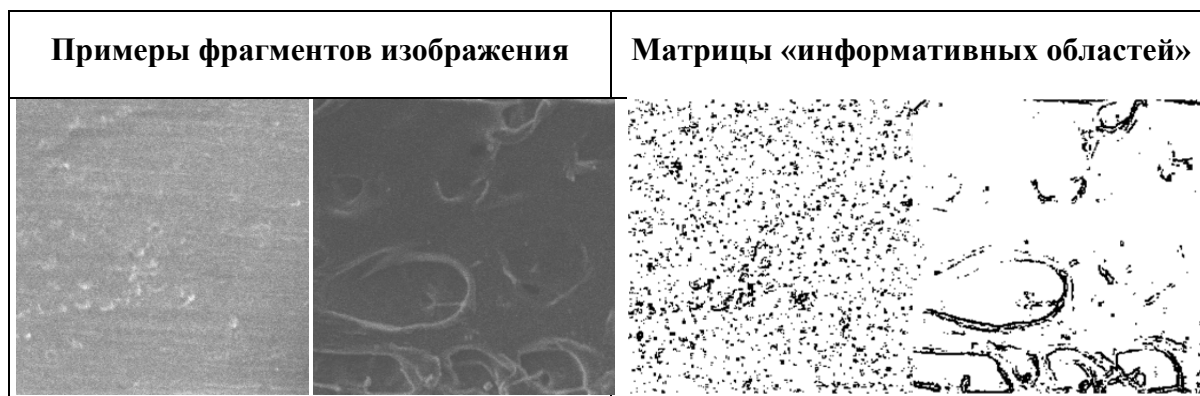


Рис 7. Фрагменты тестовых изображений и их «области информативности»

Сравнительная эффективность данного подхода (с исключением «неинформативных» областей) относительно исходной методики (без такого исключения), с точки зрения качества разделения классов изображений, проиллюстрирована в таблице 3.

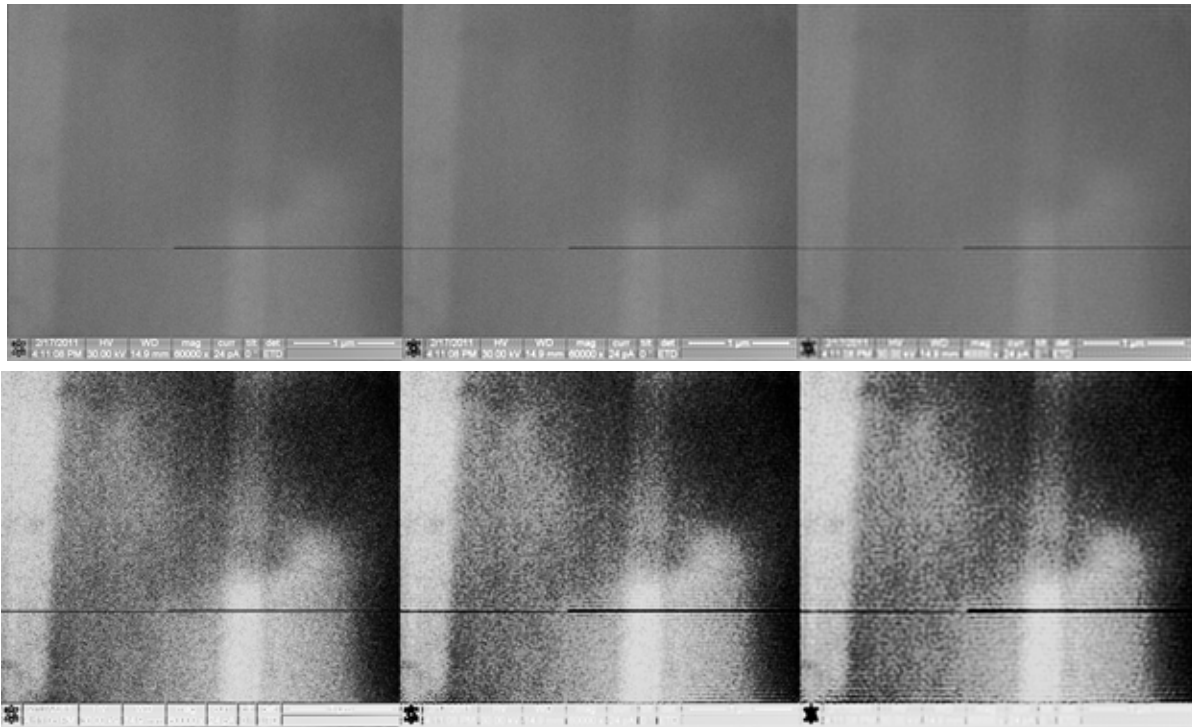
Таблица 3. Соотношения между расстояниями для двух типов методики

Параметр	Без фильтрации ( $d=1$ )	С фильтрацией ( $d=0,995$ )
Среднее внутриклассовое расстояние	0,13357	0,119539
Среднее межклассовое расстояние	0,275633	0,722243
Среднее отношение межклассового расстояния к внутриклассовому	2,063578	<b>6,041928</b>
Максимальное внутриклассовое расстояние	0,211853	0,238787
Минимальное межклассовое расстояние	0,226929	0,574167
Наихудшее отношение межклассового расстояния к внутриклассовому	1,071161	<b>2,404518</b>

**Обработка РЭМ-изображений** позволяет улучшить качество отображения отдельных участков исследуемого радиотехнического изделия, в частности, более четкого определения гетероструктурных областей. Алгоритм такого преобразования сводится к следующему:

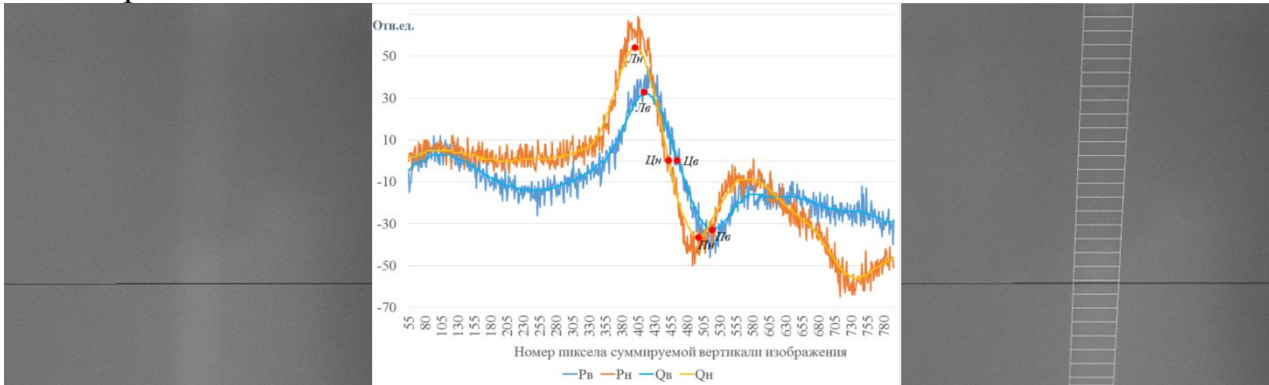
- Выполняется двумерное дискретное преобразование Фурье исходного изображения, получается комплексное изображение (Фурье-образ исходного изображения);
- В Фурье-образе обнуляются все коэффициенты, соответствующие частотам выше некоторого порога  $F$ ;
- Остальные коэффициенты (их действительная и мнимая части) умножаются на заданную константу  $N$  (за исключением нулевого коэффициента, соответствующего просто средней яркости изображения);
- Выполняется обратное преобразование Фурье – получается скорректированное изображение.

На рис.8 представлена часть результатов обработки РЭМ-изображения различных гетероструктурных областей изделия полупроводниковой электроники для различного порога. Области с различным содержанием концентрации легирующей примеси видно более отчетливо.



*Рис 8. Результат частотной коррекции РЭМ-изображений для различных параметров NiF*

Предложен метод автоматизированного анализа изображений, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, с целью автоматического определения параметров образца, в частности определение геометрии слоёв и их электронной плотности.



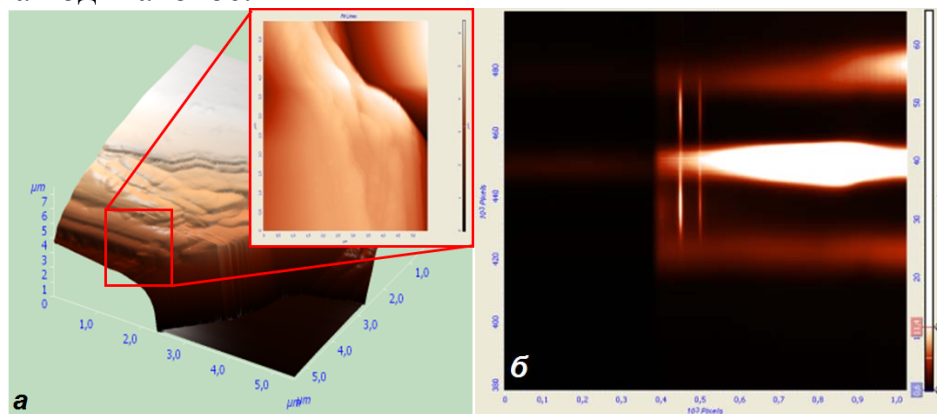
*Рис. 9. Автоматизированное выделение полосы программой-анализатором, реализованной с использованием разработанного алгоритма*

Параметры областей изображения могут быть сопоставлены с параметрами образца. Таким образом, ширина области представляет собой толщину слоя гетероструктуры, а средняя яркость - электронную плотность. На рис. 9 приведены примеры поиска области для тестового изображения.

**В четвертой главе** «Спектральный анализ оптических сигналов комбинационного рассеяния полупроводниковых гетероструктур и цифровая обработка изображений зондовой микроскопии» представлено описание методики мониторинга на основе спектров комбинационного рассеяния радиотехнических изделий на примере полупроводниковых гетероструктур.

Рассмотрены вопросы цифровой обработки изображений, полученных с помощью сканирующей зондовой микроскопии.

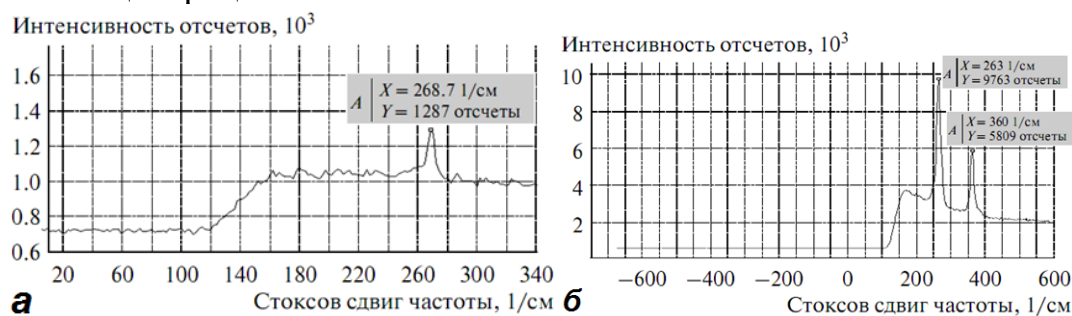
На рис. 10а приведено изображение рабочей области элемента, полученное методом сканирующей зондовой микроскопии. Общее ее расположение регистрируется по изменению высоты шероховатостей поверхности, но отдельные слои гетероструктуры не выделяются, так как качество поверхности в их пределах одинаковое.



**Рис. 10.** Исследуемая гетероструктура: а - СТМ-изображение, б – картина оптических сигналов комбинационного рассеяния

Сканирование начинается со свободного пространства, прилегающего к границе кристалла линейки диодов. Начало исследования собственно полупроводниковой структуры идентифицируется по переходу от регистрации шума к выделению характерного  $TO$  пика комбинационного рассеяния GaAs с частотой  $268 \text{ см}^{-1}$  (рис. 11а).

С 225 линии сканирования регистрируются пики комбинационного рассеяния  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  (рис. 11б), что соответствует переходу к области р-эмиттера. Появляется характерный AlAs пик на частоте  $360 \text{ см}^{-1}$ , а пик, обусловленный GaAs фонами, сместился на частоту  $263 \text{ см}^{-1}$ . Смещение объясняется появлением в структуре полупроводника алюминия и зависит от его молярной концентрации  $x$ .



**Рис. 11.** Характерные пики оптических сигналов КР: а – GaAs, б -  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Слой р-эмиттера из  $\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}:\text{Zn}$  регистрируется до 299 строки сканирования. Таким образом, его ширина равна  $1480 \text{ нм}$ , что с учетом погрешности соответствует информации от производителя ЛЛД-20. Общая область  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  регистрируется до 517 строки сканирования, когда пик AlAs фононов пропадает, а пик комбинационного рассеяния GaAs возвращается на частоту  $268 \text{ см}^{-1}$ . Данный факт показывает переход от гетероструктуры полупроводникового лазера к буферному слою и далее к подложке.



### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали возможность диагностики радиотехнических устройств (в частности, изделий полупроводниковой электроники на гетероструктурах) при помощи обработки изображений, полученных на комплексе установок микроскопии высокого разрешения входящие в состав комплекса установки растровой электронной микроскопии, сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния, имея определенные задачи и области применения, успешно дополняют друг друга. Выполнен анализ структуры и характеристик слоев элементов матрицы лазерных диодов. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали возможности контроля и диагностики конструкторско-технологических параметров изделий по предложенной модели и алгоритму. Полученные результаты позволяют оценить качество и соблюдение технологии изготовления радиотехнических устройств и, как следствие определить перспективы ее использования при последующем производстве. По указанному научному направлению приведены результаты, которые представлены ниже:

1. Разработана методика и алгоритм мониторинга конструкторско-технологических параметров изделий полупроводниковой электроники. Создана диагностическая система для мониторинга технологических параметров радиотехнических элементов.

2. Предложен метод диагностики радиотехнических изделий фотоники и оптоэлектроники при помощи спектрального анализа оптических сигналов комбинационного рассеяния, позволяющий оценить качество и соблюдение технологии изготовления устройств на основе гетероструктур и, как следствие, определить перспективы ее использования при последующем производстве изделий радиотехники.

3. Разработан и апробирован оригинальный подход для классификации, сегментации и выделения структуры областей изображения изделий полупроводниковой электроники, основанный на сравнении специфических (порядковых) гистограмм изображения, несущих информацию о преобладании в нём текстуры определённого типа, которая получает наибольший отклик соответствующего текстурного фильтра.

4. Разработана методика цифровой обработки изображений для более детального анализа исследуемых областей полупроводниковых гетероструктур методом распознавания различных областей.

5. Создана система автоматизированного анализа РЭМ-изображения полупроводниковой гетероструктуры для мониторинга конструкторско-технологических параметров.

6. Представлены результаты исследования современных изделий полупроводниковой электроники, а также матриц лазерных диодов. Результаты показали возможности контроля и диагностики слоистых систем

микроэлектроники (в частности, полупроводниковых изделий на гетероструктурах) при помощи комплекса установок микроскопии высокого разрешения. Входящие в состав комплекса установки растровой электронной микроскопии, сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния, имея определенные задачи и области применения, успешно дополняют друг друга.

7. Приведены результаты комплексных экспериментальных исследований, являющихся основой диагностики и мониторинга технологических параметров, технологии изготовления радиотехнических элементов. Произведен анализ структуры и характеристик слоев полупроводниковых изделий.

8. Результаты исследований позволили сформулировать требования к конструкции, а также к технологическим процессам и нормам, обеспечивающие воспроизводимое изготовление современных изделий фотоники и оптоэлектроники.

#### **IV. СПИСОК РАБОТ, В КОТОРЫХ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **В изданиях из перечня ВАК:**

1. Номан, М.А.А. Диагностика слоистых наноразмерных компонент полупроводниковой оптоэлектроники при помощи комплекса установок микроскопии высокого разрешения / М.А.А. Номан, В.Г. Прокошев, С.М. Аракелян, Д.В. Абрамов, С.В. Кутровская, К.С. Хорьков // «Проектирование и технология электронных средств». – 2011. – № 4. – С. 2-7 (соискатель - 30%).

2. Номан, М.А.А. Исследование полупроводниковых слоистых систем фотоники / Д.В. Абрамов, К.С. Хорьков, С.В. Кутровская, М. А. А. Номан, В.Г. Прокошев // «Известия РАН. Серия физическая» – 2012. – Т. 76. – № 6. – С. 694–697 (соискатель - 25%).

3. Noman, Mustafa A. A. Investigation Semiconductor Layered Systems of Photonics / D.V. Abramov, K.S. Khorkov, S.V. Kutrovskaya, Mustafa A.A. Noman, V.G. Prokoshev // «Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics» – 2012. – V.76. – № 6. – P.618-621 (соискатель - 25%).

##### **В прочих изданиях:**

4. Номан, М. А. А. Классификация текстурных свойств сегментов растрового изображения с помощью набора дифференцирующих масок / П. Ю. Шамин, М. А. А. Номан, К. С. Хорьков // «International Journal of Open Information Technologies» – 2013. – Т. 1. – №. 2. – С. 1-7 (соискатель - 35%).

5. Номан, М. А. А. Распознавание изображений комплексом дифференцирующих масок / П. Ю. Шамин, М. А. А. Номан, К. С. Хорьков // «Естественные и математические науки: материалы международной заочной научно-практической конференции. (01 апреля 2013 г.) – Новосибирск: Изд. «СибАК» – 2013. – С.42-48 (соискатель - 35%).

6. Noman, Mustafa A. A. Investigation of titanium thin films produced by femtosecond laser ablation. / M.N. Gerke, K.S. Khorkov, Mustafa A.A. Noman, V.G. Prokoshev, S.M. Arakelian // «Book of Abstracts 19th International Conference on Advanced Laser Technologies – ALT'11, Golden Sands, Bulgaria, 3 – 8 September 2011» –2011. – p.80 (соискатель - 25%).

7. Noman, Mustafa A.A. Research of the semi-conductor laser on heterostructures by means of a complex of the precision microscopes / Mustafa A.A. Noman, V.G. Prokoshev, D.V. Abramov, C.V. Kutrovskaya, K.S. Khorkov // «Book of Abstracts 19th International Conference on Advanced Laser Technologies – ALT'11, Golden Sands, Bulgaria, 3 – 8 September 2011» – 2011. – p.136-137 (соискатель - 25%).

8. Noman, Mustafa A.A. Research of the semiconductor layered systems of photonics / D.V. Abramov, K.S. Khorkov, S.V. Kutrovskaya, Mustafa A.A. Noman, V.G. Prokoshev // «Book of abstracts 1-st International Russian-Chinese conference / youth school-workshop «Modern laser physics and laser-information technologies for science and manufacture», September 23-28.2011, Suzdal/Vladimir». – 2011. – pp. 151-152 (соискатель - 25%).

9. Номан, М.А.А. Исследование титановых тонких пленок образованных при фемтосекундной лазерной абляции / М.Н. Герке, К.С. Хорьков, М. А.А. Номан, В.Г. Прокошев, С.М. Аракелян // «Труды Владимирского государственного университета» – 2011. – Вып. 9. – С. 115-119 (соискатель - 25%).

#### **Используемая литература:**

1. Суворов, Э.В. Физические основы экспериментальных методов исследования реальной структуры кристаллов [Электронный ресурс] <http://www.physchem.msu.ru>. Дата обращения: 10.09.2011.

2. Звягин, М.Ю., Прокошев, В.Г., Новикова, О.А., Шамин, П.Ю. Распознавание людей по изображению лица с использованием текстурных характеристик / Труды XVII Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2010» Том 1. Секция А. — 21—24 июня 2010 года, СПб. — С. 257—259. — ISBN 978-5-7577-0354-1.

Подписано в печать 18.09.13.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
600000, г. Владимир, ул. Горького, 87.