

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

М. А. А. НОМАН К. С. ХОРЬКОВ П. Ю. ШАМИН

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Учебное пособие



Владимир 2014

УДК 621.382
ББК 32.852
М54

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой приборостроения
Ковровской государственной технологической
академии им. В. А. Дегтярева
А. Л. Симаков

Доктор технических наук, профессор
проректор по научной работе
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В. Н. Ланцов

Печатается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Методы исследования полупроводниковых гетероструктур-
М54 тур : учеб. пособие / М. А. А. Номан, К. С. Хорьков, П. Ю. Ша-
мин ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир :
Изд-во ВлГУ, 2014. – 80 с.

ISBN 978-5-9984-0528-0

Приведены материалы по методам исследования полупроводниковых гетероструктур, начиная от получения их РЭМ-изображений и заканчивая цифровой обработкой и анализом, в том числе автоматизированным.

Предназначено для бакалавров и магистрантов специальностей 222900 «Нанотехнологии и микросистемная техника», 200500 «Лазерная техника и лазерные технологии», 200400 «Опtotехника» очной формы обучения.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС 3-го поколения.

Ил. 51. Библиогр.: 58 назв.

УДК 621.382
ББК 32.852

ISBN 978-5-9984-0528-0

© ВлГУ, 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР	7
1.1. Методы и технологии получения полупроводниковых гетероструктур.....	7
1.2. Методы диагностики полупроводниковых гетероструктур.....	13
1.3. Полупроводниковые гетероструктуры на основе GaAs	16
Контрольные вопросы	20
ГЛАВА 2. РЭМ-ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР.....	21
2.1. Основные источники сигналов для формирования изображений в РЭМ.....	21
2.2. Формирование контраста в растровом электронном микроскопе.....	25
2.3. Формирование и калибровка изображения в РЭМ.....	26
2.4. Растровый электронный микроскоп Quanta 200 3D	28
2.5. РЭМ-изображения полупроводниковых гетероструктур.....	32
Контрольные вопросы	36
ГЛАВА 3. ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЭМ- ИЗОБРАЖЕНИЙ	37
3.1. Методы цифровой обработки изображений.....	37
3.2. Применение методов цифровой обработки изображений на примере анализа РЭМ-изображения гетероструктуры	38
3.2.1. Исследование текстурной информативности изображения.....	40

3.2.2. Текстуальный подход на основе дифференцирующих масок Фрея – Чена	42
3.2.3. Выявление структуры изображения поблочным анализом.....	45
3.2.4. Применение частотной коррекции.....	47
3.3. Автоматизированная классификация РЭМ-изображений.....	51
3.3.1. Постановка задачи	51
3.3.2. Описание подхода к решению	52
3.3.3. Улучшение разделимости классов	57
3.4. Автоматизированная сегментация РЭМ-изображений.....	59
3.4.1. Постановка задачи	59
3.4.2. Решение базовой задачи	61
3.4.3. Решение общей задачи.....	70
3.4.4. Примеры выделения полос различного типа.....	71
Контрольные вопросы	72
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	 73
 СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК	 75
 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ	 79

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире техники 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. Сегодня 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.

В настоящее время заметна тенденция к отработке технологических методик локального наноструктурирования (контролируемого формирования наноразмерных объектов на поверхности или в объеме определенных участков образца) и систематическому изучению физических особенностей наноструктурированных функциональных материалов с помощью цифровой обработки изображений. Одна из наиболее распространенных групп в технологическом плане – группа полупроводниковых соединений $Al_xGa_{1-x}As$ -GaAs, которая широко применяется для экономичного создания радиотехнических устройств нового поколения, важнейшим этапом процесса создания и работы которых является контроль толщины слоев гетероструктур и неровностей рельефа поверхности.

Растровая электронная микроскопия (РЭМ) – один из современных методов исследования изделий полупроводниковой электроники и фотоники. Электронный микроскоп позволяет оценить и измерить размеры элементов в микро- и наномасштабе. Сканирование по исследуемому образцу позволяет получить информацию о структуре объекта. В данном пособии в качестве примера рассматриваются матрицы лазерных диодов, область которых открыта для прямого наблюдения. Однако исследования с помощью растровой электронной микроскопии могут быть проведены и на других изделиях и объектах, для этого необходима пробоподготовка, например изготовление шлифов области гетероструктуры.

Цифровая обработка и дальнейший анализ РЭМ-изображений поверхностей современных полупроводниковых изделий позволяют автоматизированно выделить текстуры определённого типа в результате сравнения специфических гистограмм фрагмента изображения, что можно применить в задачах машинного зрения, автоматизированного анализа и сегментации изображений.

Глава 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Сегодня в технологии микроэлектроники все большее внимание уделяется электронно-лучевым и зондовым методам. На стыке новейших направлений техники происходит постепенное уменьшение структурных элементов микросхем. Так, в 2012 г. поступили в продажу процессоры, изготовленные по 22-нм технологическому процессу. Развитие современной радио- и микроэлектроники сопровождается повышением степени интеграции и функциональной сложности микросхем, увеличением числа структурных элементов на одном кристалле и уменьшением их характерных размеров [1 – 3]. Таким образом, использование элементов таких размеров требует специальных средств диагностики в соответствующем масштабе. Главными устройствами диагностики и контроля микросхем являются неразрушающие методы сканирующей микроскопии. К таким приборам относят сканирующие электронные и зондовые микроскопы, которые позволяют оценить размеры исследуемых структур с разрешающей способностью до нескольких нанометров, провести химический анализ различных областей микросхемы при поэтапном изготовлении устройства [4, 5].

1.1. Методы и технологии получения полупроводниковых гетероструктур

Изготовление полупроводниковых изделий в большинстве случаев требует создания гетероструктур с необходимыми свойствами. Главным требованием для получения заданного типа структур является поиск подходящей пары полупроводниковых материалов [6, 7]. Также для создания гетероструктур необходимо выполнить следующие требования.

Во-первых, вещества, составляющие гетеропару, должны быть химическими аналогами, т.е. если с одной стороны гетероперехода находится полупроводник $A_{III}B_V$, то с другой стороны также должен

быть полупроводник $A_{III}B_V$. Иначе происходит взаимное легирование в районе перехода, так как отдельные элементы являются легирующими примесями друг для друга. Существует три типа химических аналогов для гетеропар (по числу структурных формул полупроводников) – это $A_{III}B_V$, A_{IV} и $A_{II}B_{VI}$.

Во-вторых, для создания гетероструктур основное требование – выполнение условия равенства постоянных решетки у обоих полупроводников. Невыполнение этого условия приводит к образованию высокой плотности дислокаций несоответствия вблизи гетерограницы, что резко ухудшает свойства переходов и делает невозможным наблюдение эффектов размерного квантования.

Гетеропереход $GaAs-Al_xGa_{1-x}As$ наиболее часто используется для изготовления квантово-размерных структур, так как составляющие вещества обладают хорошим согласием решеток при любом составе твердого раствора и потому позволяют создавать гетеропереходы с различными разрывами зон на границе.

В-третьих, важным условием создания квантовых гетероструктур является необходимость получения очень резких гетеропереходов с переходным слоем промежуточного состава, имеющим толщину всего в несколько постоянных решетки. Есть некоторые особенности выращивания гетероструктуры: так, при росте твердого раствора на чистом веществе гетерограница получается лучше, чем при обратном сочетании. Данная особенность связана с сильными различиями объемной и поверхностной диффузии. При послойном росте вещества атомы растущего и первого слоя имеют вокруг себя свободные позиции, из-за чего их диффузия превосходит объемную.

Описание методов получения гетероструктур позволяет понять основные проблемы исследования и определения параметров материалов, которые используются при разработке полупроводниковых изделий.

Для создания гетероструктур и выращивания тонких пленок применяют методы молекулярно-лучевой, твердофазной эпитаксии, газофазной эпитаксии и газофазной эпитаксии металлоорганических соединений, химической лучевой и жидкофазной эпитаксии, а также магнетронного распыления и методы импульсного лазерного напыления [8, 9].

Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) представляет собой усовершенствованную разновидность методики термического напыления в условиях сверхвысокого вакуума. Давление остаточных газов в вакуумной камере поддерживается ниже 10^{-8} Па [10, 11].

Идею метода МЛЭ можно пояснить с помощью блок-схемы, изображенной на рис. 1. Потoki атомов или молекул создаются в зоне генерации (*A*) за счет испарения жидких или сублимации твердых материалов, помещенных в эффузионные ячейки (источники), являющиеся тиглями с диафрагмами. Тигли обычно изготавливают из высококачистого пиролитического графита или из нитрида бора (*BN*).

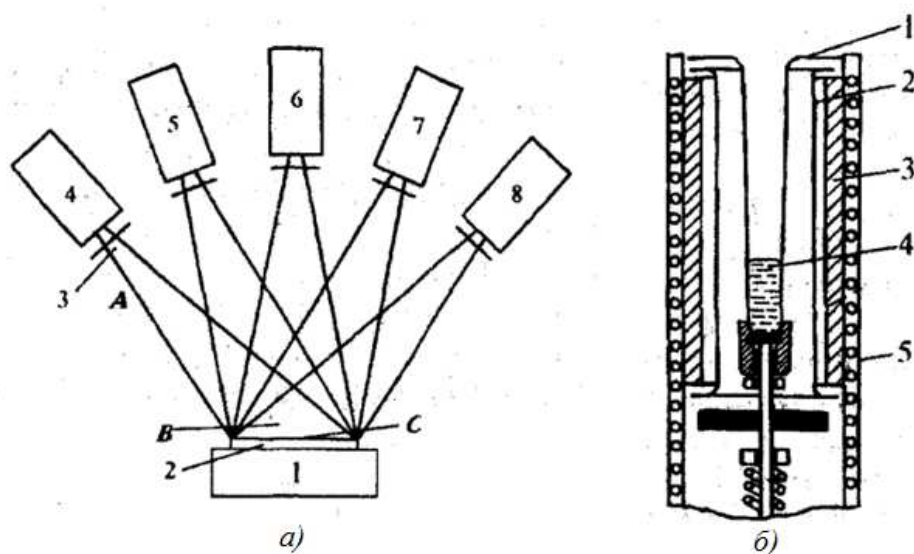


Рис. 1. Схема установки молекулярно-лучевой эпитаксии (а): *A* – зона генерации молекулярных пучков; *B* – зона смешивания; *C* – зона кристаллизации; 1 – нагреватель с прикрепленной подложкой; 2, 3 – заслонка измерительной ячейки; 4 – 8 – эффузионные ячейки (5 – 7 – основных компонентов, 4 – 8 – легирующих примесей); схема эффузионной ячейки (б): 1 – тигель; 2 – градиентный нагреватель; 3 – тепловые экраны; 4 – испаряемое вещество; 5 – водяное охлаждение [12]

Потоки испаренных веществ направляются на подложку, проходя зону смешивания (*B*), и осаждаются на ней в зоне роста (*C*), образуя пленку из вещества требуемого состава. Зону роста разделяют на три области: подложку, или выросший слой, газовую смесь компонентов гетероструктуры в приповерхностной области и переходный слой.

Выращивание пленки необходимого состава с легирующими примесями определяется количеством эффузионных ячеек [12, 13].

Метод МЛЭ включает в себя следующие элементарные процессы, протекающие в зоне роста (рис. 2):

- адсорбцию (прилипание) оседающих на подложку атомов или молекул;
- миграцию (поверхностную диффузию) адсорбированных атомов по поверхности подложки, которая может являться причиной диссоциации (распада) молекул выращиваемого соединения;
- встраивание атомов гетероструктуры в кристаллическую решетку подложки или растущий моноатомный слой;
- термическую десорбцию (отрыв) атомов, не встроившихся в кристаллическую решетку [13].

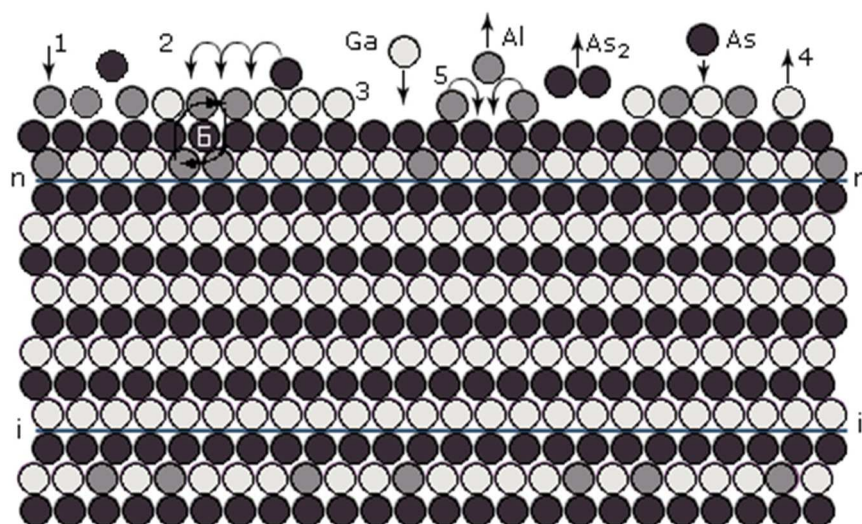


Рис. 2. Элементарные процессы в зоне роста: 1 – адсорбция атомов из зоны смешивания на поверхности, 2 – миграция адсорбированных атомов по поверхности, 3 – встраивание адсорбированных атомов в кристаллическую решетку, 4 – термическая десорбция, 5 – образование поверхностных зародышей, 6 – взаимная диффузия [13]

Нанолитография позволяет сформировать заданный рисунок на поверхности полупроводниковой пластины. Данный метод является естественным развитием методов фотолитографии, применяемых в микроэлектронике. Современный уровень фотолитографии предопределяет технические и производственные возможности предприятий,

разрабатывающих и выпускающих интегральные схемы и другие полупроводниковые электронные приборы. Благодаря волновому характеру оптических процессов главным преимуществом нанолитографии является возможность одновременного и параллельного переноса изображения, состоящего из многих миллионов элементарных фрагментов [14].

Волновой характер переноса изображения топологического слоя интегральной схемы, задаваемого фотошаблоном, показан на рис. 3 [15].

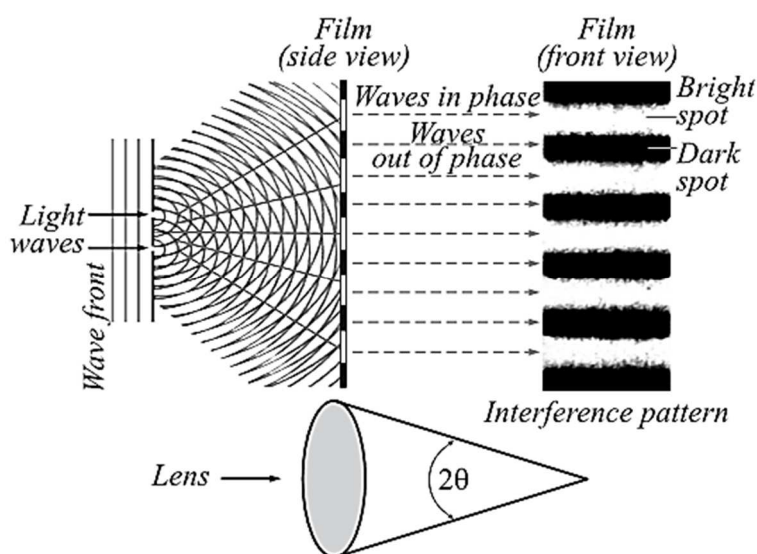


Рис. 3. Процесс формирования изображения в оптической литографии

Вначале фотолитография обеспечивалась контактным методом переноса изображения (рис. 4, а, б), который уступил проекционному методу (рис. 4, в), оказавшемуся более эффективным для достижения меньших размеров. В этом методе минимальный размер, ограниченный дифракционным пределом оптической системы, описываемым критерием Рэля – Аббе, пропорционален длине волны актиничного излучения (т. е. излучения, обеспечивающего фотохимическую регистрацию изображения), тогда как в контактном методе – только корню квадратному длины волны [16].

Проводимые исследования на современных установках показывают, что при использовании интерференсной технологии оптическая литография применима вплоть до 12-нм техпроцессов (ограничение составляет неравномерность поверхности материала).

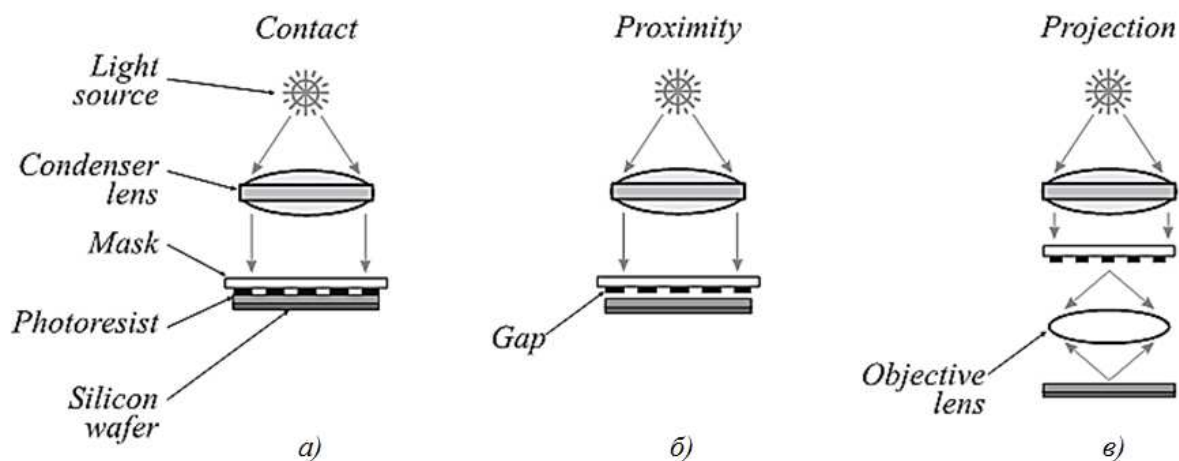


Рис. 4. Схематичное изображение оптической литографии: а – контактная, или тневая, печать; б – контактная печать с зазором; в – проекционная печать

Метод импульсного лазерного напыления (ИЛН) выгодно отличается от таких методов, как МЛЭ, благодаря своей универсальности, почти полному исключению посторонних примесей, контролируемому процессу роста пленочных наноструктур [17, 18].

Возбужденные атомы и ионы позволяют понизить температуру эпитаксиального роста, а высокая скорость зародышеобразования, благодаря высокой степени ионизации факела, позволяет напылять тонкие сплошные пленки (порядка 1 нм) при сохранении исходного состава мишени. Другая особенность ИЛН заключается в том, что в первый момент действия лазерного импульса плазма экранирует мишень, т. е. основная доля излучения поглощается в плазме или отражается, тем самым ионизируя эрозионный факел. Причем масса испаренного за один импульс вещества слабо зависит от заряда. Средняя толщина пленок, осажденных за один импульс – порядка 0,1 моно-слоя за импульс, и слабая зависимость испаренного вещества от заряда делают лазерное напыление методом, позволяющим контролировать толщину пленки по количеству импульсов.

Для реализации потенциальных возможностей полупроводниковых элементов необходимым условием является создание высококачественных тонкопленочных и многослойных структур. На сегодняшний день различают три режима роста тонких пленок и наноструктур, схематически изображенных на рис. 5 [19, 20].

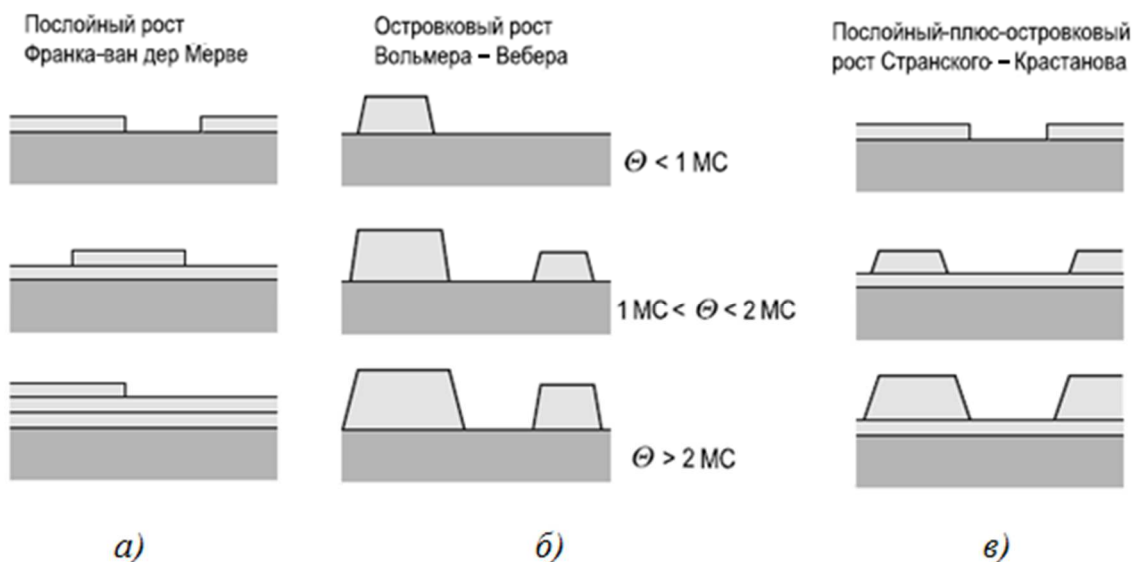


Рис. 5. Механизмы роста тонких пленок и наноструктур [18]

1. Послойный рост по механизму Франка-ван дер Мерве (Frank-van der Merwe) осуществляется, когда атомы пленки сильнее связаны с подложкой, чем друг с другом. При этом если осаждаемый материал и материал подложки согласованы по постоянной решетки, происходит строго двумерный рост пленки (рис. 5, *a*).

2. Островковый рост по механизму Вольмера – Вебера (Volmer – Weber) осуществляется, когда атомы пленки сильнее связаны между собой, чем с подложкой. Происходит островковый (трехмерный) рост материала на подложке (рис. 5, *б*).

3. Послойно-островковый рост по механизму Странского – Крастанова (Stranski – Krastanow). Этот механизм является промежуточным между послойным и островковым ростом. После формирования двумерного (смачивающего) слоя происходит рост трехмерных островков (рис. 5, *в*). Параметры промежуточного слоя зависят от конкретного случая.

1.2. Методы диагностики полупроводниковых гетероструктур

Развитие принципиально новых методов диагностики поверхности открывает новые возможности определения основных конструкторско-технологических параметров изделий, в том числе полупроводниковых устройств.

При производстве полупроводниковых элементов возникает необходимость контроля технологических операций [21]. Правильно организованный контроль параметров обеспечивает высокий процент выходной продукции должного качества. Начиная с изготовления подложки, которая в дальнейшем станет основой для элементов микросхемы или гетероструктур, проводятся исследования на непараллельность и степень изогнутости. Для получения объективных данных об изогнутости пластин используют методы широкопольной панорамной интерференции, а для определения шероховатости поверхности изделия применяют методы профилографии и эллипсометрии [22]. Зондовая микроскопия позволяет оценить неровности поверхности в наномасштабе. Для определения кристаллографической ориентации пластин используют метод рентгеноструктурного анализа [23, 24].

Важная задача – определение распределения концентрации примесных атомов по глубине образца [25]. При малой концентрации примесей возникает сложность химического анализа из-за недостаточной чувствительности оборудования. Поэтому используют методы, основанные на облучении поверхности остросфокусированным электронным или ионным лучом. Результатом такого воздействия является испускание вторичных электронов или ионов, а также характеристического рентгеновского излучения. Анализ энергии или длины волны испускаемых частиц позволяет определить тип и концентрацию примесных атомов [26]. Среди методов, решающих задачу определения химического состава поверхностного слоя объекта, можно выделить вторичную ионную масс-спектроскопию, Оже-спектроскопию, электронную микроскопию, фотоэлектронную спектроскопию для химического анализа и др. [27, 28].

Поскольку энергетический спектр гетероструктур определяется в первую очередь геометрическими размерами слоев, из которых они состоят, определение морфологии – необходимый элемент исследований [29]. Самыми распространенными методами для определения поверхности элементов являются методы электронной и зондовой микроскопий [24, 30]. Важная особенность этих методов – неразрушаемость образца при исследовании.

Сканирующая зондовая микроскопия включает широкий спектр методов исследования поверхности. Сканирующие зондовые микроскопы подразделяются на следующие основные типы: сканирующий

туннельный микроскоп, предназначенный для измерения рельефа проводящих поверхностей с высоким пространственным разрешением; ближнепольный оптический микроскоп, который позволяет получать растровые изображения поверхностей и объектов с разрешением ниже дифракционного предела; сканирующий атомно-силовой микроскоп, который используется для определения рельефа поверхности с разрешением от десятков ангстрем вплоть до атомарного и, в отличие от сканирующего туннельного микроскопа, позволяет исследовать как проводящие, так и непроводящие поверхности [31].

В качестве одного из методов диагностики гетероструктур может использоваться комбинационное рассеяние света, которое представляет собой неупругое рассеяние фотонов на различных квазичастицах (фононах, плазмонах, магнонах) и элементарных электронных возбуждениях в твердом теле. На основе этого физического явления реализована неразрушающая (однако, при значительной мощности возбуждающего лазерного излучения могут происходить локальные изменения) методика исследования для анализа химического и фазового состава веществ, структуры различных материалов, а также механических напряжений в твердом теле. Метод комбинационного рассеяния нашел широкое применение в различных областях физики, химии, биологии и геологии [32].

Комбинационным называется всякое мгновенное неупругое рассеяние. Большая часть рассеянного света появляется в результате упругого, или релеевского, рассеяния. В процессе комбинационного рассеяния энергия падающего фотона либо уменьшается, либо увеличивается. Разность энергии падающего и рассеянного фотонов, наблюдаемая в спектре, соответствует какому-то энергетическому переходу в веществе. В основе спектрального анализа лежит совокупность методов качественного и количественного определения состава объекта, основанная на изучении спектров взаимодействия материи с излучением [33].

При изготовлении оптоэлектронных волноводных структур особое внимание уделяется шумовым и модуляционным характеристикам, на которые заметно влияют технологические погрешности производства активных структур. В зависимости от технологии изготовления поверхность изделия всегда характеризуется в той или иной степени выраженным случайным полем локальных микроскопиче-

ских неровностей от среднего уровня [28]. Такие неровности рельефа оказывают влияние на выходные параметры, например лазерного диода, и приводят к дополнительным радиационным потерям энергии в резонаторе и к соответствующему увеличению порогового тока лазера.

Наибольшее распространение имеют полупроводниковые диоды на двойной гетероструктуре (ДГС) $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$ с различной шириной запрещенной зоны в p- и n-областях. В данных системах возможно получение эффективной генерации при малых значениях порогового тока. Таким образом, для контроля качества и определения причин разброса параметров полупроводниковых лазеров используют современные методы и средства сканирующей зондовой микроскопии и сканирующей электронной микроскопии.

1.3. Полупроводниковые гетероструктуры на основе GaAs

Для современного полупроводникового приборостроения при переходе на нанотехнологии актуально контролируемое, эффективное и экономичное производство наноструктур. В настоящее время выделяют две альтернативные концепции формирования наноструктур: «bottom-up» и «top-down». К первой группе относятся методы молекулярно-лучевой, газофазной и жидкофазной эпитаксии, лазерного импульсного осаждения, синтеза коллоидных частиц и другие методы, при применении которых формирование наноструктур происходит при особых условиях осаждения материала. При использовании данной группы методов успешно формируются наноструктуры, квантовые точки GaAs [34].

Ко второй группе относят эффекты и явления самоформирования наноструктур на поверхности. Такие эффекты были обнаружены при обработке поверхности низкоэнергетичными ионами для целого ряда полупроводниковых кристаллических материалов: GaAs, GaSb, Si, InP, Ge и пр. В результате за последнее десятилетие сложилось новое перспективное направление развития технологии полупроводников, основанное на использовании явления самоформирования полупроводниковых наноструктур при ионном воздействии или обработке в плазме. Данная область исследований особенно привлекательна тем, что представляет возможность интеграции наноструктур в традиционную кремниевую технологию.

Анализ современного состояния проблемы получения наноструктурированных полупроводников показывает необходимость изучения процессов роста, а также полученных характеристик наноструктур GaAs. Предназначенные для разработки и производства нано- и оптоэлектронных устройств пленочные кристаллические полупроводниковые структуры GaAs требуют проведения мониторинга поверхности.

Полупроводниковые узкозонные материалы GaAs активно применяются при производстве оптоэлектронных устройств ИК-диапазона (3 – 30 мкм), систем телекоммуникаций, термоэлектрических преобразователей [35]. Интерес к полупроводникам GaAs особенно стал расти с получением их высококачественных эпитаксиальных слоев на монокристаллических подложках, прежде всего, кремнии. Использование GaAs позволяет осуществить переход к размерному квантованию при довольно протяженных размерах кристаллических структур – 18 – 50 нм (для сравнения: для Si боровский радиус экситона составляет ~5 нм), что делает данные материалы особенно интересными для наноструктурирования и дает возможность наблюдать уникальные квантовые эффекты, недостижимые для других полупроводников. Низкоразмерные наноструктурированные материалы GaAs предлагают уникальный доступ к режиму сильного квантования. Наиболее актуальной областью является включение тонких пленок, МЭМС-, меза- и наноструктур GaAs в интегральные устройства на кремниевых чипах для создания оптоэлектронных приборов нового поколения [36].

Современные лазерные диоды – это сложные многослойные полупроводниковые структуры, которые выращиваются в дорогостоящих установках методами полупроводниковой технологии, например методом эпитаксии. Первый низкопороговый лазер на двойной гетероструктуре $Al_xGa_{1-x}As$, работающий при комнатной температуре, был разработан в конце 1970-х гг. группой Ж.И. Алферова [35]. Схематично типовая лазерная гетероструктура (полосковый лазер с p- и n-областями различного химического состава) показана на рис. 6. Активный слой представляет собой полосу толщиной несколько микрометров, шириной несколько десятков микрометров и длиной несколько сотен микрометров. Длина волны лазерного излучения λ определяется материалом активного слоя. В случае, если активный

слой выполнен из GaAs, то при комнатной температуре длина волны составляет $\lambda = 800$ нм. Если материал активного слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs}$, то длина волны составляет $\lambda = 600 \div 900$ нм в зависимости от молярной концентрации Al в структуре x [37].

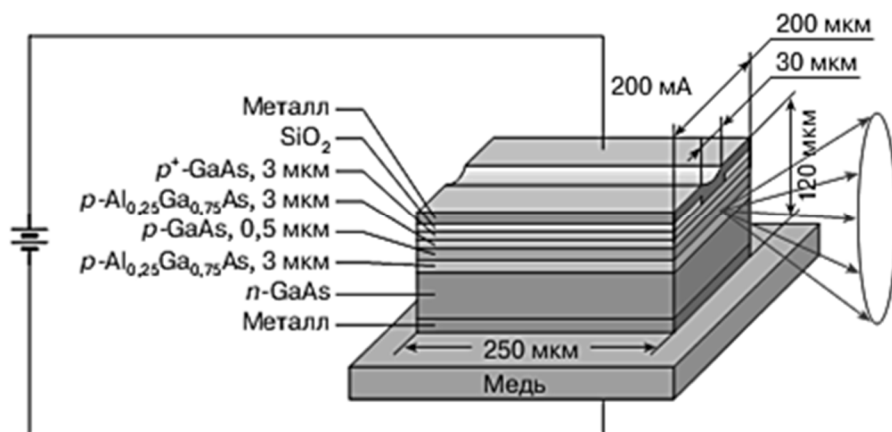


Рис. 6. Схематическое изображение структуры первого инжекционного ДГС-лазера, работающего в непрерывном режиме при комнатной температуре (взято из [35])

Кроме основных слоев, приведенных на рис. 6, в полупроводниковом лазере могут создаваться и дополнительные слои. Толщина основных и дополнительных слоев, наряду с их химическим составом и степенью легирования (концентрацией носителей заряда), определяет характеристики лазерного диода: оптические потери, срок службы диода, величину порогового и рабочего тока, коэффициент полезного действия и диаграмму направленности излучения. Этот параметр становится особенно важен при выполнении слоев в наноструктурном исполнении.

Примером использования лазерных диодов в телевидении являются лазерные мониторы, или проекторы (рис. 7). Такие телевизоры могут поддерживать частоту обновления экрана от 120 Гц, поэтому вместе со стереочками позволяют воспроизводить стереоизображения. Причем пиксели лазерных дисплеев не подвержены выгоранию и деградации, что увеличивает срок службы таких приборов. При уменьшенном энергопотреблении обладают большей толщиной, что вызвано конструктивными особенностями.



Рис. 7. Схематичный пример работы лазерного телевизора

В работе [38] приведено описание инжекционного полупроводникового лазера с активной областью толщиной 10 нм, дополнительными слоями с толщиной от 70 до 300 нм и волноводными слоями с толщиной от 1500 до 1800 нм. В указанной работе представлено, что отклонение от заданных значений в любую сторону приводит к ухудшению характеристик лазерного диода.

В качестве объекта исследования была выбрана матрица лазерных диодов ЛЛД-20 (изготовитель – ОАО «Научно-производственное предприятие «Инжект»», г. Саратов, Россия). Лазерные диоды в линейке ЛЛД-20 основаны на двойной гетероструктуре $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs [39]. Общий вид линейки ЛЛД-20 и схематичный вид структур GaAs показан на рис. 8.

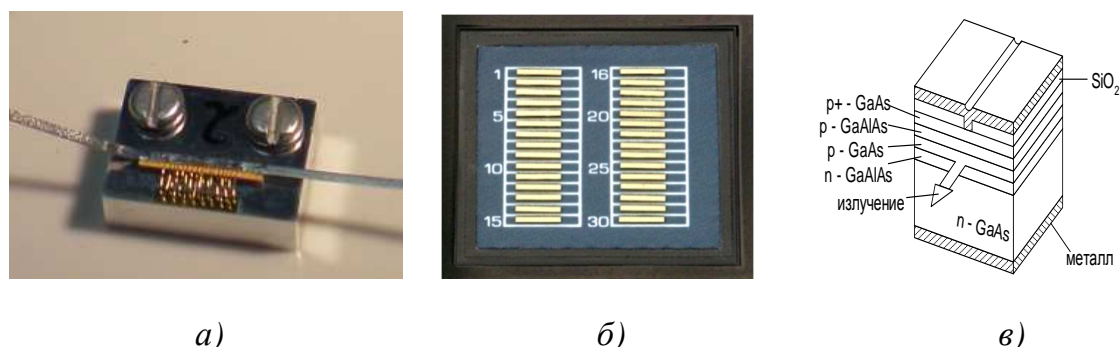


Рис. 8. Линейка (а), матрица (б) лазерных диодов и схематичный вид полупроводниковых гетероструктур (в)

На металлической основе располагается подложка, на которую нанесены буферные, волноводные слои, слои эмиттера, в центре рас-

полагается активный слой. Линейки лазерных диодов производятся на основе гетероструктур, полученных методом эпитаксии. Данная технология позволяет очень точно контролировать толщину выращиваемых слоев и соответственно воспроизводимость параметров изготавливаемых излучателей. Применение гетероструктур с квантовыми ямами позволяет снизить плотность порогового тока и увеличить выходную оптическую мощность. Лазеры напаяются на теплоотвод эпитаксиальными слоями вниз, улучшая отвод тепла и обеспечивая более высокую выходную оптическую мощность.

Линейки лазерных диодов поставляются на открытом теплоотводе, обеспечивая доступ непосредственно к лазерному кристаллу. Размер излучающей площадки лазерной линейки занимает более 90 % ширины теплоотвода, что позволяет использовать несколько лазерных линеек одновременно для накачки твердотельных лазеров. Так как длина волны ЛЛД-20 составляет 808 нм и при КПД 30 %, возможными областями применения являются ИК-лазерные осветители с высокой оптической выходной мощностью и лазерные медицинские терапевтические приборы и приборы фотодинамической терапии.

Контрольные вопросы

1. Основные методы и технологии получения полупроводниковых гетероструктур.
2. Главные требования и условия выращивания гетероструктур.
3. Основные принципы метода молекулярно-лучевой эпитаксии и процессы, протекающие при росте гетероструктур.
4. Фото- и нанолитография как методы получения наноустройств.
5. Импульсное лазерное осаждение и режимы роста тонких пленок и наноструктур.
6. Методы исследования полупроводниковых гетероструктур.
7. Принцип работы сканирующих зондовых микроскопов.
8. Комбинационное рассеяние света как метод исследования гетероструктур.
9. Полупроводниковые гетероструктуры на основе GaAs. Многослойные полупроводниковые лазеры.
10. Линейки лазерных диодов: структура, слои, применение.

Глава 2

РЭМ-ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Электронная микроскопия на сегодняшний день является одним из самых распространенных методов исследования поверхности материалов. Использование в качестве зонда остросфокусированного пучка электронов или ионов предполагает минимальный размер области воздействия на образец, что в сочетании со сканированием по поверхности позволяет получить изображение объекта с высоким пространственным разрешением. При определенных значениях тока и энергии сфокусированного пучка электронов исследуемый объект не претерпевает каких-либо физико-химических или структурных изменений, поэтому данный вид исследований можно отнести к неразрушающим методам исследования. Фокусируемый ионный пучок в качестве зонда может применяться не только для локального анализа, но и для напыления и травления материала [40].

Растровый электронный микроскоп – высокотехнологичная установка, предназначенная для получения изображения исследуемого образца с высоким (до 0,4 нм) пространственным разрешением, а также, при использовании дополнительных приставок, информации о химическом составе, строении и других свойствах поверхности материала [41].

2.1. Основные источники сигналов для формирования изображений в РЭМ

Инструментом работы электронного микроскопа является сфокусированный пучок заряженных частиц. С помощью отклоняющих систем и сканирующих катушек электронный луч, сфокусированный с помощью электронной (объектной) линзы в пятно, проходит по параллельным линиям, отстоящим друга от друга на диаметр пятна [42].

При попадании электронов сфокусированного зонда на поверхность образца происходит ряд явлений, связанных с передачей энергии электронов пучка веществу мишени (рис. 9). Такие явления в широком смысле можно разделить на две группы: упругое и неупругое рассеяние. Основными параметрами для описания взаимодействия

частиц с веществом являются сечение взаимодействия и длина свободного пробега частиц. Сечение взаимодействия определяется:

$$\sigma = \frac{n}{n_m n_o}, \quad (1)$$

длина свободного пробега частиц

$$\lambda = \frac{A}{N_0 \rho \sigma}, \quad (2)$$

где n – число столкновений в единице объема; n_m – число атомов в единице объема мишени; n_o – число падающих частиц в единицу времени; A – атомный вес; ρ – плотность; N_0 – число Авогадро [43].



Рис. 9. Общий вид области взаимодействия [43]

Упругое рассеяние электронов (резерфордовское рассеяние) обычно происходит в результате кулоновского взаимодействия электронов с полем ядра. Сечение рассеяния зависит от угла рассеяния φ и атомного номера Z и описывается формулой Резерфорда:

$$\sigma_r = 1,62 \cdot 10^{-20} \left(\frac{Z}{E} \cdot \text{ctg} \frac{\varphi}{2} \right)^2. \quad (3)$$

Существуют и другие процессы, возникающие при взаимодействии электронов. Например, процесс многократного рассеяния на малые углы. Таким образом, при многократном рассеянии электрон может изменить направление движения на обратное. Вероятности таких процессов зависят от конкретного типа вещества и энергии сфокусированного пучка [28].

Неупругое рассеяние электронов при взаимодействии с веществом может происходить в результате множества механизмов. Основными такими механизмами являются: возбуждение электронного газа решетки (плазмоны), электронов проводимости (вторичные электроны, наведенный ток), ионизация внутренних электронных оболочек атома (оже-электроны и характеристическое рентгеновское излучение), возбуждение тормозного рентгеновского излучения, возбуждение фотонов (катодоллюминесценция) и пр. Выражение для скорости потерь энергии электронов имеет вид [27]:

$$-\frac{dE_m}{dx} = 2\pi e^4 N_0 \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{\rho}{E_m} \ln\left(\frac{1,166E_m}{J}\right), \quad (4)$$

где E_m – средняя энергия электронов; e – заряд электрона; N_0 – число Авогадро; ρ – плотность вещества; Z – атомный номер; A – атомный вес; J – средний потенциал ионизации элемента:

$$J = (9,76Z + 58,5Z^{-0,19})10^{-3}. \quad (5)$$

Средние потери энергии на единицу длины и единицу плотности представляют собой среднюю тормозную способность:

$$S = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE_m}{dx}. \quad (6)$$

Таким образом, зная средние потери энергии, можно рассчитать полную длину пробега электрона в образце, складывающуюся из участков траекторий между каждыми двумя соседними по времени актами взаимодействия.

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:

$$\eta = -0,0254 + 0,0016Z - 1,86 \cdot 10^{-4}Z^2 + 8,3 \cdot 10^{-7}Z^3 + \dots \quad (7)$$

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;

η_j – элемент в мишени), с хорошим приближением можно считать, что средний коэффициент отражения

$$\bar{\eta} = \sum_{j=1}^Z \eta_j C_j. \quad (8)$$

Такая связь между током отраженных электронов и атомным номером элемента позволяет при выбранных условиях качественно оценить элементный состав приповерхностного слоя мишени [25].

Вторичные электроны образуются при бомбардировке мишени первичным электронным пучком. Могут состоять из упругоотраженных и неупругоотраженных электронов и истинных вторичных электронов, которые образуются при взаимодействии электронов зонда с электронами зоны проводимости. На рис. 10 показано распределение по энергии электронов, покидающих поверхность мишени в результате воздействия на нее электронов зонда [1].

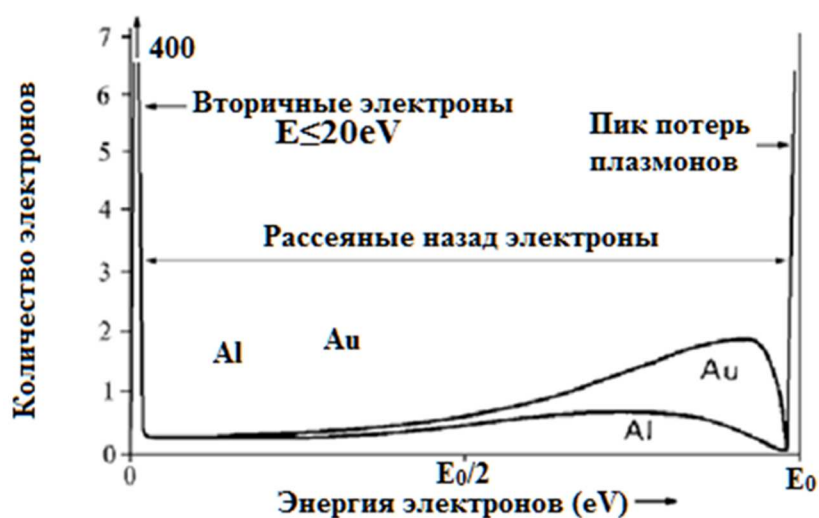


Рис. 10. Энергетический спектр электронов, покидающих поверхность мишени под действием электронов зонда

Вторичные электроны образуются во всей области воздействия заряженного пучка на мишень, но покинуть поверхность могут лишь электроны, возникшие в тонком приповерхностном слое.

В процессе воздействия на образец сфокусированным пучком, кроме возникновения отраженных и вторичных электронов, за счет неупругих потерь возникает рентгеновское излучение и оже-электроны, а также возникают такие явления, как катодолюминесценция и наведенный ток.

2.2. Формирование контраста в растровом электронном микроскопе

Формирование изображений в растровом электронном микроскопе отличается от оптического или просвечивающего электронного микроскопов, в которых формирование контраста носит дифракционный характер, так как используются линзы. Изображение в РЭМ является результатом отображения изменений от точки к точке в характере взаимодействия потока заряженных частиц с поверхностью образца. Если в точке A_1 вторичный сигнал имеет величину S_1 , а в соседней точке A_2 – соответственно S_2 , то существует контрастность между этими точками, которая характеризуется коэффициентом контраста [44]:

$$C = 2 \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \frac{\Delta S}{\bar{S}}. \quad (9)$$

Контраст между двумя точками на изображении может отличаться из-за различий во взаимодействии электронов зонда с материалом мишени. Существует несколько типов формирования контраста на электронном микроскопе.

Отличающиеся по атомному составу образцы имеют различные коэффициенты отражения электронов и при формировании изображения области с элементами более высокого атомного номера будут иметь более светлый контраст, чем более легкие элементы.

Главное достоинство электронного микроскопа – быстрое исследование поверхностного рельефа исследуемого образца без его предварительной подготовки. Топологический контраст возникает из-за влияния рельефа поверхности на отраженные и вторичные электроны. Коэффициент вторичной эмиссии значительно зависит от положения мишени по отношению к падающему электронному лучу. При увеличении угла падения увеличивается коэффициент вторичной эмиссии. Изображения поверхности, полученные с помощью электронного микроскопа, достаточно просты для анализа. При необходимости предметный столик с закрепленным образцом можно повернуть под нужным углом, что позволяет заглянуть в места, недоступные при нормальном падении электронного пучка.

Количество покинувших мишень электронов стремительно уменьшается с увеличением глубины, на которой произошел последний перед выходом электрона акт взаимодействия. Но электроны при

определенных углах падения могут быть «захвачены» каналами, образованными системами кристаллографических плоскостей. Угол входа электронов определяется отклонением пучка от его оси распространения и в процессе сканирования изменяется. Поэтому в этой точке поверхности кристалла происходит резкое уменьшение выхода электронов, что соответствует уменьшению её контраста на изображении. Такой контраст называется контрастом каналирования и обычно используется для определения пространственного ориентирования кристалла или отдельных его участков.

Существует также магнитный контраст, который представляет собой воздействие магнитного поля образца или рядом с его поверхностью на траекторию движения электронов. Данный тип контраста особенно эффективно используется для наблюдения интегральных схем разной степени сложности в процессе их работы и позволяет наблюдать за изменениями потенциального рельефа, происходящими при разнообразных переключениях в схеме [24].

2.3. Формирование и калибровка изображения в РЭМ

Для получения целостного изображения необходимо сканировать сфокусированным пучком заряженных частиц по поверхности исследуемого образца непосредственно в каждой точке. При этом

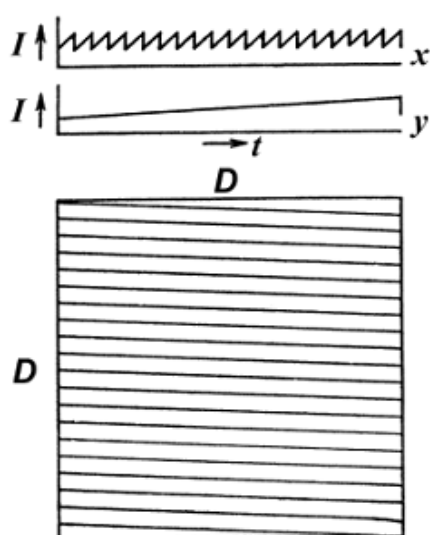


Рис. 11. Схематичное изображение сформированного растра

электроны, попавшие на детектор микроскопа, формируют через значения координат и интенсивности растровое изображение, которое выводится на экран.

Сфокусированный пучок отклоняется от точки к точке с помощью пары электромагнитных катушек, которые находятся перед последней (объектной) электронной линзой (рис. 11). Катушки создают магнитное поле перпендикулярно зонду, и пучок немного «заворачивает» вокруг силовых линий. Подавая на электромагниты пилообразное напряжение развертки, зонд двигается по поверхности мишени [45].

Детекторы электронов получают усиленный сигнал, который формирует яркость точки раstra получаемого изображения. Частоту сканирования и число строк может изменять оператор для получения оптимального изображения. На монитор выводится черно-белое изображение, на котором градациям серого цвета соответствуют градации интенсивности потока истинно вторичных или упругоотраженных электронов.

Для того чтобы результаты измерений обладали метрологической значимостью, необходимо проводить калибровку РЭМ с помощью рельефных мер, обеспечивающих передачу первичного эталона длины в нанометровый диапазон (рис. 12).

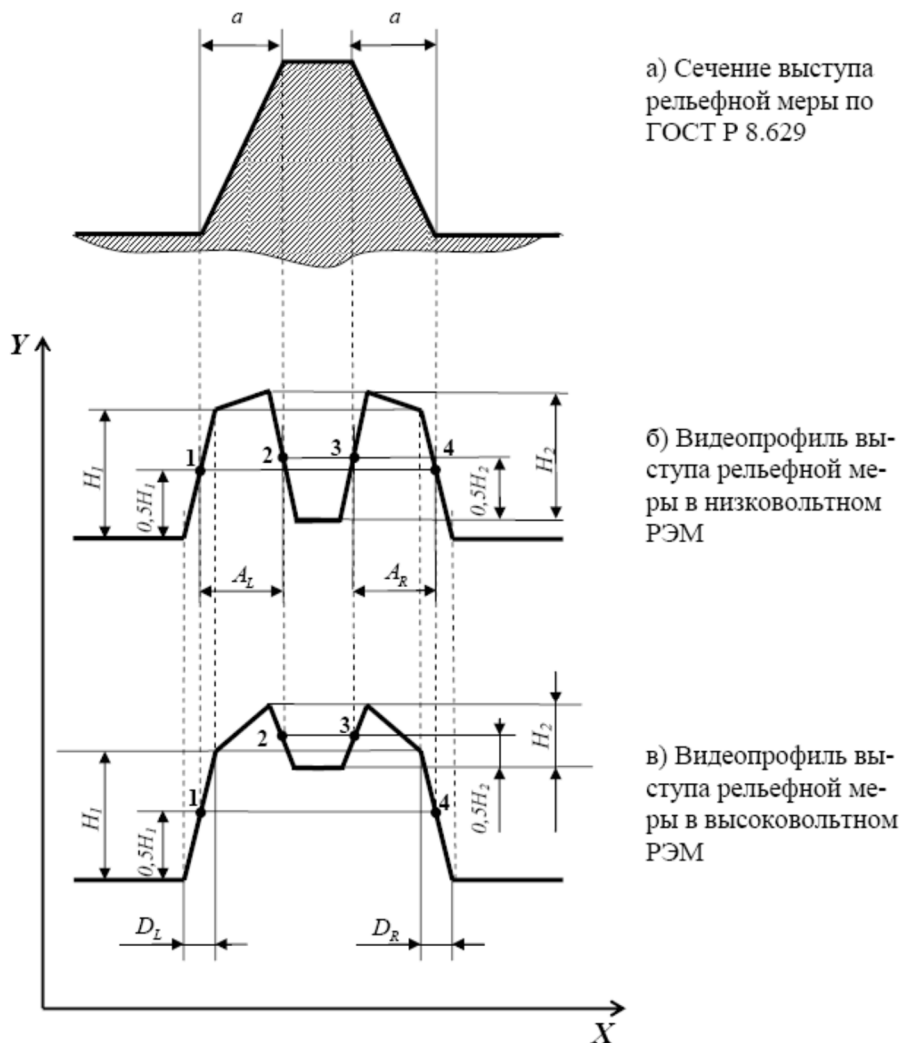


Рис. 12. Сечение выступа рельефной меры и его видеопрофили, полученные с помощью РЭМ различных типов

В качестве рельефной меры может выступать эталонная мера ширины и периода МШПС-2.0К (рис. 13), получаемая с заданными параметрами шага и периода трапецевидной рельефной структуры путем анизотропного травления кремния [46].

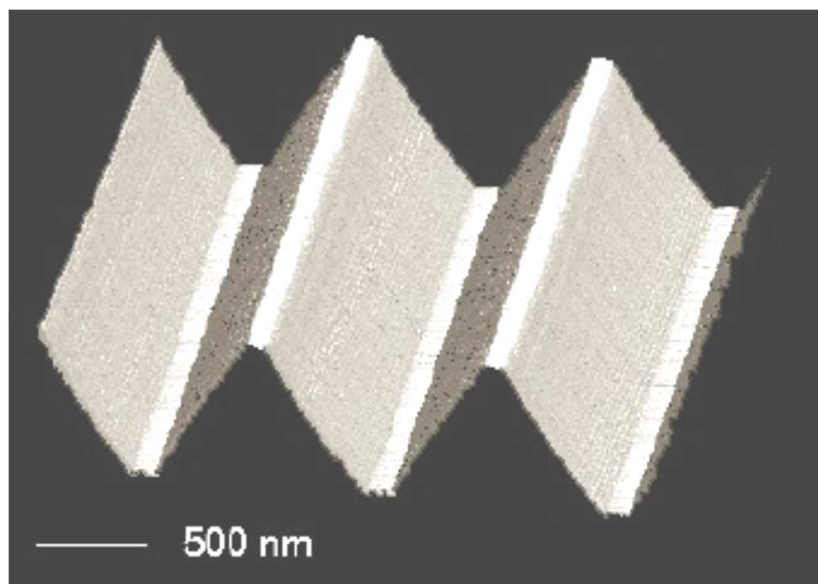


Рис. 13. Мера ширины и периода, специальная, кремниевая

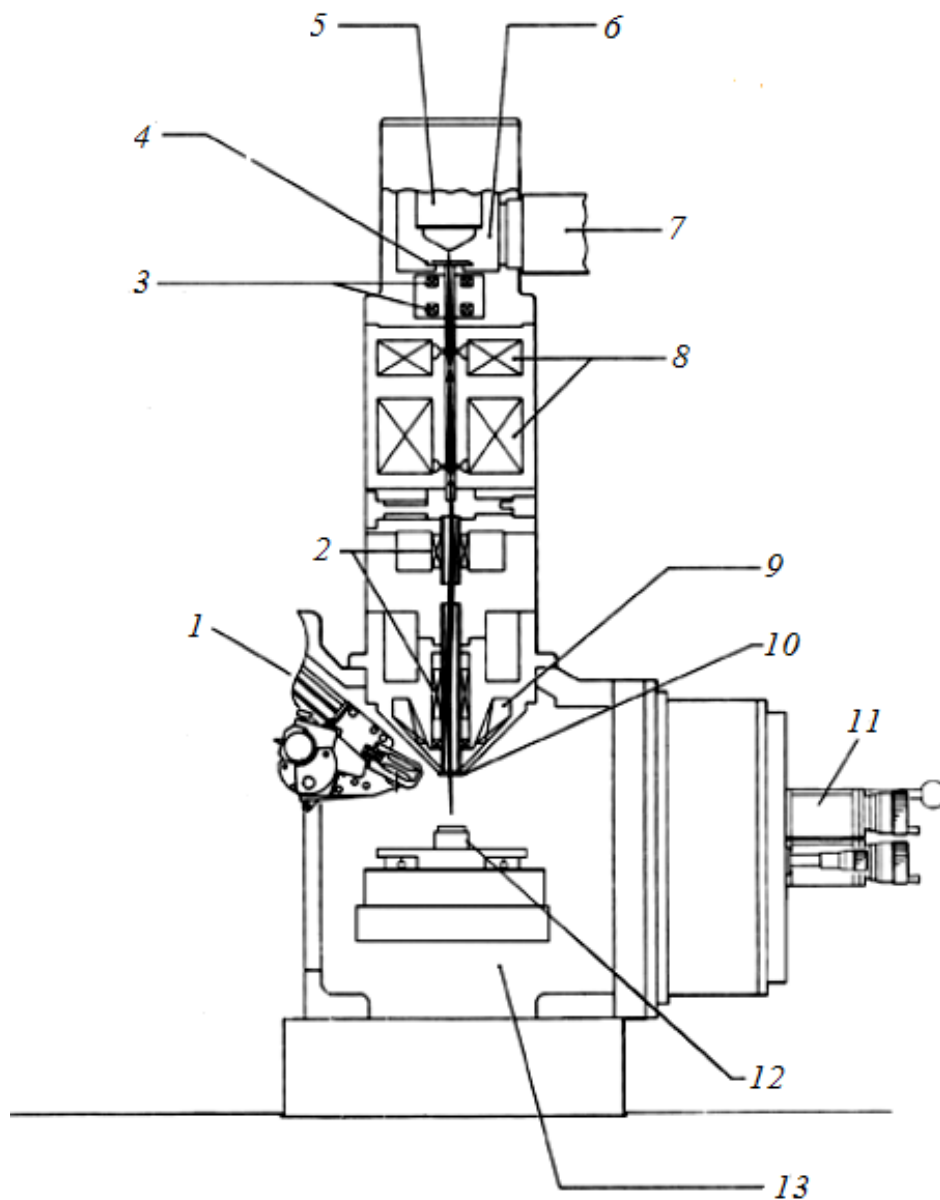
2.4. Растровый электронный микроскоп Quanta 200 3D

Растровый электронный микроскоп Quanta 200 (FEI) является базовым элементом для проведения экспериментальных исследований микро- и наноструктур, изделий радиотехнического производства, в том числе матриц лазерных диодов. Данный прибор представляет собой комбинацию двух систем растрового электронного микроскопа (РЭМ), дающего изображения разнообразных образцов в цифровой форме с увеличением более 100 000 крат и фокусированного ионного пучка (ФИП), способного быстро и прецизионно удалить слой материала образца, подготовить к рассмотрению структуры под поверхностным слоем, создать сечение, осадить слой материала и т.п. Кроме того, ионный пучок, так же как и электронный, может создать изображение с высоким разрешением. Интеграция обеих систем в од-

ном приборе образует мощный аналитический инструмент, способный анализировать самые разные образцы в трёхмерном пространстве. Источником электронов в данном микроскопе является термоэмиссионный вольфрамовый катод. Ускоряющее напряжение электронов может регулироваться в пределах от 200 В до 30 кВ с шагом 100 В [2]. Данное оборудование включено в Государственный реестр средств измерений и проходит периодическую калибровку и аттестацию в соответствии с законом Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений». На рис. 14 показан внешний вид прибора, на рис. 15 – принципиальная схема. Для получения оптимального изображения следует воспользоваться специальным алгоритмом, показанным на рис. 16.



Рис. 14. Внешний вид РЭМ Quanta 200 (FEI)



*Рис. 15. Общая схема растрового электронного микроскопа:
 1 – рентгеновский спектрометр; 2 – сканирующие катушки;
 3 – юстировочные катушки; 4 – анод; 5 – электронная пушка;
 6 – камера электронной пушки; 7 – вакуумная магистраль;
 8 – конденсорные линзы; 9 – объектная линза; 10 – детектор
 упругоотраженных электронов; 11 – система позиционирования
 образцов; 12 – держатель образцов; 13 – основная вакуумная
 камера*

Камера РЭМ Quanta 200 (FEI) позволяет исследовать объекты с линейными размерами до 20 см. Кроме стандартного держателя для образцов, на который можно помещать для исследования до семи различных объектов, имеется специальный термостол.

Микроскоп позволяет вести наблюдение образца в четырех основных режимах: во вторичных электронах (SE), в отраженных электронах (BSE), в рентгеновских лучах (X-ray) и видимом диапазоне (КЛ). Каждый из сигналов обрабатывается определенным детектором. Использование одновременно нескольких типов детекторов позволяет получать более полную информацию об объекте.

Пошаговая схема получения оптимального качества изображения



Рис. 16. Алгоритм получения оптимального РЭМ-изображения

2.5. РЭМ-изображения полупроводниковых гетероструктур

Для определения области перехода гетероструктур лазерного диода были проведены исследования при помощи растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D (изготовитель – FEI Company) [47]. Пространственное разрешение данного растрового электронного микроскопа не превышает 3 нм, что значительно хуже, чем у атомно-силового микроскопа. Однако большое поле сканирования и быстрое и удобное управление увеличением получаемых изображений позволяют эффективно провести предварительные исследования. На рис. 17 приведено изображение, полученное при помощи растрового электронного микроскопа (РЭМ-изображение), общего вида лазерного диода [48].

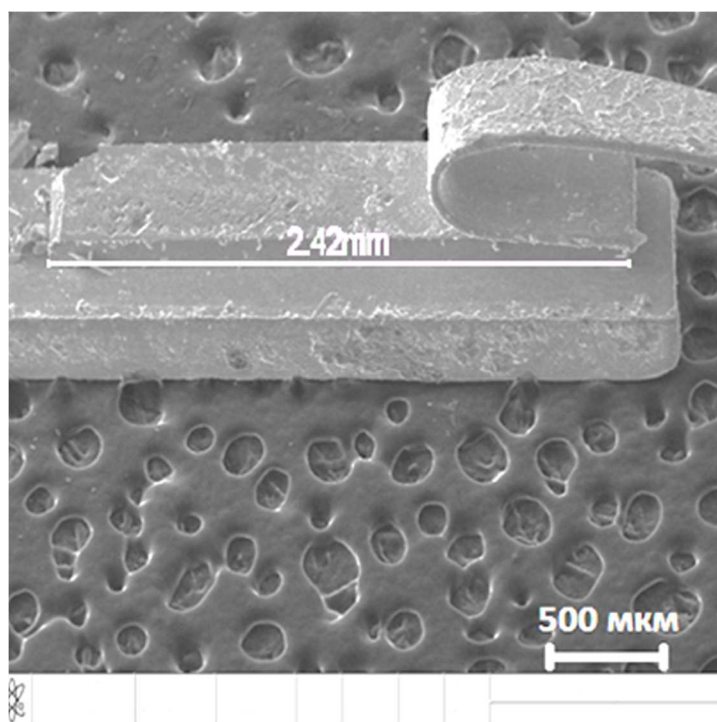


Рис. 17. РЭМ-изображение лазерного диода при увеличении 78×

Полупроводниковый диод устанавливается на углеродный скотч, который позволяет стекать заряду. Подложка имеет значительные размеры по отношению к рабочей области. Постепенное увеличение позволяет определить интересующую область для дальнейшего изучения на зондовом микроскопе.

На рис. 18 представлены основные размеры исследуемого образца. Размеры между выемками резонаторов составляют 136 мкм, ширина области, в которой располагаются рабочие слои, – 80 мкм, причем видно, что присутствует загрязненность подложки и защитного слоя.

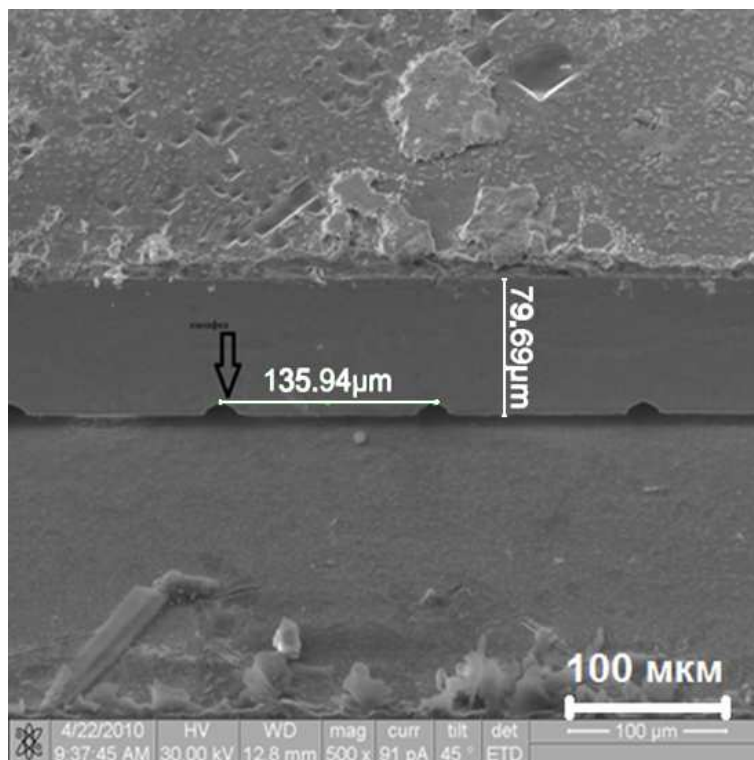
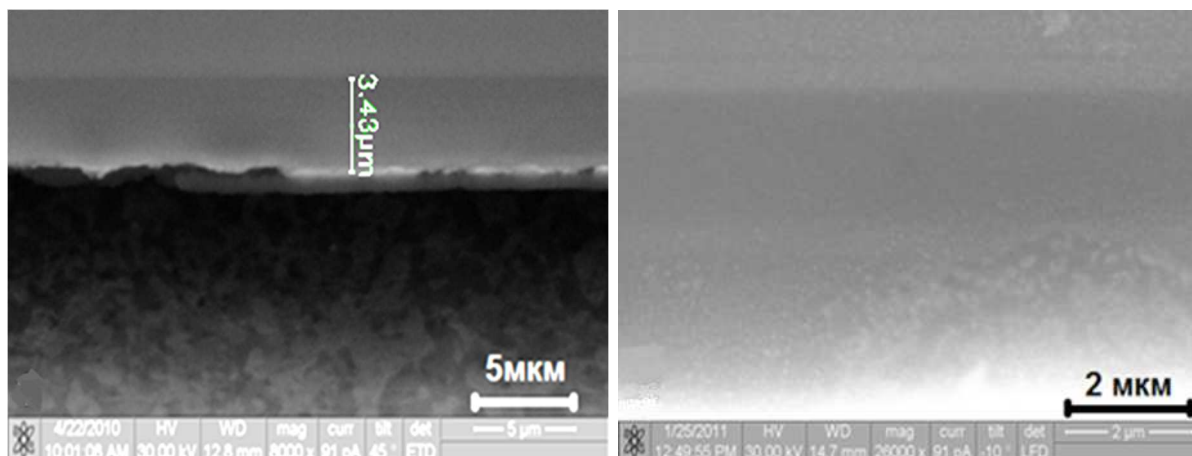


Рис. 18. РЭМ-изображение лазерного диода при увеличении 500×

На основании РЭМ-изображений определено, что рабочая область лазерного диода, которая подлежит исследованию методами зондовой микроскопии, располагается на расстоянии около 3,5 мкм от края кристалла с положительным контактом (рис. 19, а). Поверхность рабочей области лазерного диода имеет хорошее качество в отличие от поверхности подложки и буферного слоя (рис. 19, б). Последний факт подтверждает как качественное изготовление диагностируемого элемента, так и возможность применения более точных методов для его дальнейшего исследования.



а)

б)

Рис. 19. РЭМ-изображения изучаемой рабочей области диода, входящего в состав ЛЛД-20: а – увеличение в 8 000 крат; б – увеличение в 26 000 крат

Регистрация рабочей области лазерного диода облегчается тем, что она в основном выполнена из $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, т. е. материала, отличающегося от материала подложки (GaAs), хотя и близкого к нему. Возможность выделения отдельных структурных слоев полупроводникового лазера, изготовленного из материалов, отличающихся только молярной концентрацией Al и степенью легирования, вызывала сомнение. Разность концентраций Al в соседних слоях гетероструктуры составляла 20 %, а концентрация легирующей примеси не превышала 10^{19} см^{-3} и отличалась в соседних слоях на один порядок. Однако

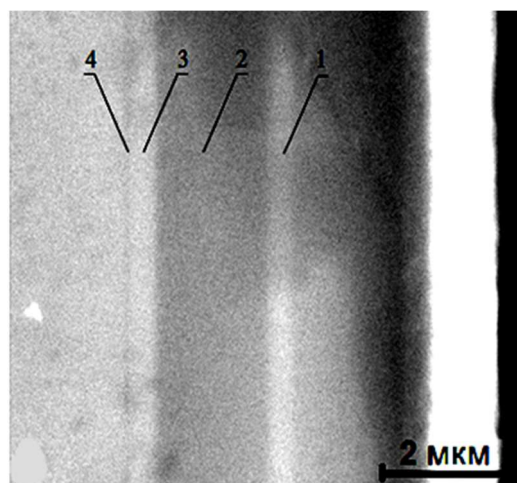


Рис. 20. РЭМ-изображение структурных слоев лазерного диода линейки ЛЛД-20

экспериментальная проверка показала возможность таких исследований.

На рис. 20 представлены зарегистрированные структурные слои матрицы лазерных диодов ЛЛД-20. Для оценки результатов исследования использовалась информация о составе и структуре слоя полупроводникового лазера из работы [39]. Правый край зарегистрированной полупроводниковой структуры примыкает к положительному контакту диода, который удален перед исследованиями, и представляет буферный слой, перехо-

дящий в контактный слой из GaAs p+-типа (1). Контактный слой легирован Zn. Следует отметить, что возможно получение РЭМ-изображений и при использовании в качестве исследуемого образца других изделий. Длительность получения изображений зависит от выбранного электронного микроскопа и навыка оператора.

Концентрация легирующей примеси – 10^{19} см⁻³, толщина слоя – 300 нм. Далее расположен p-эмиттер (2) из Al_{0,5}Ga_{0,5}As:Zn толщиной 1500 нм. Концентрация легирующей примеси – 10^{18} см⁻³. За p-эмиттером следует волноводный слой (3) из нелегированного Al_{0,3}Ga_{0,7}As толщиной 300 нм. Активная область (4) из нелегированного Al_{0,1}Ga_{0,9}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, обусловленного, вероятно, их повышенным относительно отрицательного зарядом.

Исследования гетерогенной структуры могут быть продолжены с использованием атомно-силовой микроскопии. Изменение локальных высот поверхности отдельных слоев гетероструктуры позволяет сказать о качестве поверхности. Отклонение от заданного диапазона говорит о дефекте структуры и некачественном изготовлении изделия.

Проведенные исследования показали большие возможности применения различных методов электронно-ионного сканирующего микроскопа Quanta 3D в диагностике полупроводниковых приборных структур. Для исследуемой в работе лазерной гетероструктуры применение методов позволило выявить на ее сколах все характерные слои структуры, определить положение и протяженность p-n-перехода.

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 элементов, в том числе по методу текстурных масок, медианной фильтрации или среза частот.

Контрольные вопросы

1. Принцип работы сканирующего электронного микроскопа.
2. Формирование изображений в электронном микроскопе.
3. Взаимодействие электронного пучка с исследуемым веществом.
4. Формирование контраста в растровом электронном микроскопе.
5. Методы калибровки электронного микроскопа.
6. Растровый электронный микроскоп Quanta 200 3D. Основные особенности и принцип работы.
7. Алгоритм получения оптимального РЭМ-изображения.
8. Пробоподготовка исследуемых образцов для растрового электронного микроскопа.
9. Выделение и анализ слоев гетероструктур с помощью растрового электронного микроскопа.
10. Использование метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии в электронной микроскопии.

Глава 3

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЭМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

3.1. Методы цифровой обработки изображений

На сегодняшний день существует огромное число методов обработки изображений. Обработка изображений подразумевает проведение комплекса операций, нацеленных на визуальное улучшение изображения, либо на приведение изображения к форме, более удовлетворяющей визуальному или машинному анализу [49].

На рис. 21 представлены основные стадии цифровой обработки изображений. Его можно представить в виде функции двух переменных, заданной в области двумерного пространства. Значение функции задаёт интенсивность (яркость) изображения в конкретной точке [50].



Рис. 21. Основные стадии цифровой обработки изображений [49]

Регистрация изображения – начальная стадия обработки изображений. Для их получения может быть использована, например, растровая электронная, зондовая микроскопия, а также спектроскопия

комбинационного рассеяния. Регистрация оптических сигналов позволяет получить общую картину спектров исследуемой области объекта.

Улучшение изображений, полученных с помощью микроскопии, заключается в выделении более четких границ и областей структур, составляющих объект.

Комбинирование некоторых стадий цифровой обработки позволяет получить результат, оптимально подходящий для дальнейшей работы. Полезные данные можно извлечь, обратившись к усреднённой яркостной информации: поблочное усреднение яркости изображения, в результате которого шум переходит в яркостную информацию. Усложняя алгоритм, можно ещё улучшить результат. Например, для выделения границ гетероструктуры можно предварительно понизить разрешение изображения, применить усредняющую (медианную) фильтрацию, а затем провести обратное масштабирование, размыть границы блоков и выровнять гистограмму.

Точечному шуму соответствуют высокие частоты в спектральном образе изображения. Можно в значительной степени элиминировать шум, осуществив частотную фильтрацию изображения. При этом можно одновременно усилить проявление структур, соответствующих низким частотам, которые представляют интерес. Для этого используются алгоритмы, основанные на двумерном дискретном преобразовании Фурье исходного изображения, дающие комплексное изображение (Фурье-образ исходного изображения), для последующего выделения и усиления определенных коэффициентов и выполнения обратного преобразования Фурье. В результате получается скорректированное изображение [51].

Использование алгоритма по автоматизированному выявлению элементов с оптимальными параметрами позволяет, например, автоматизировать оценку качества изготовления исследуемых структур. Для этого используют методы сегментирования и распознавания изображений.

3.2. Применение методов цифровой обработки изображений на примере анализа РЭМ-изображения гетероструктуры

Для демонстрации методов цифровой обработки изображений в качестве исходного используется РЭМ-изображение части матрицы лазерных диодов, полученное с использованием методов электронной

микроскопии (рис. 22). На данном изображении можно заметить вертикальные полосы, соответствующие различным слоям полупроводниковой гетероструктуры, являющейся частью лазерного диода.

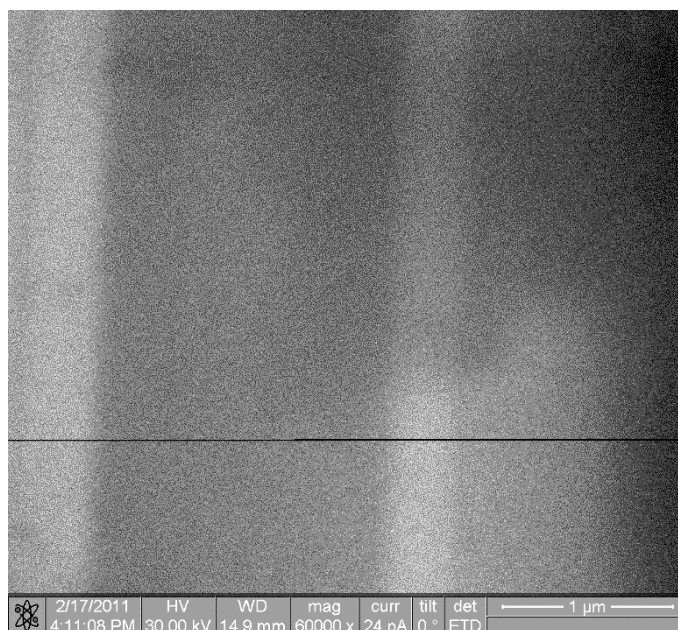


Рис. 22. Исходное изображение

Приведённое на рис. 22 изображение является серым полутоновым растровым изображением с максимальным числом градаций серого, равным 256, и разрешением по горизонтали 1024 пиксела. Изображение достаточно сильно зашумлено, что видно по его фрагменту в оригинальном масштабе, представленному на рис. 23.

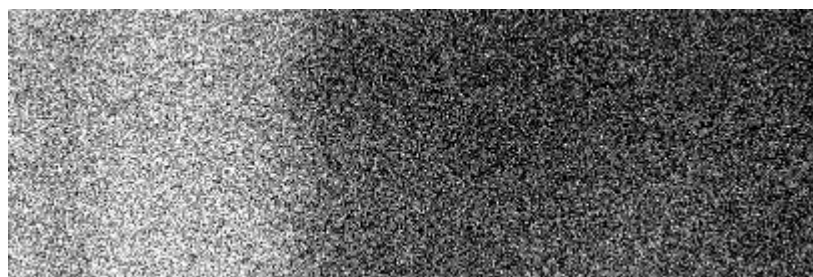


Рис. 23. Фрагмент изображения в масштабе 1:1

Покажем, какую информацию можно извлечь из этого изображения с помощью различных методов цифровой обработки изображений.

3.2.1. Исследование текстурной информативности изображения

Рассматривая серое полутоновое изображение как карту интенсивностей (яркостей), каждому пикселу можно сопоставить величину, которую будем называть «показатель ровности». Выбор размера окрестностей может быть произвольным, но её размер не должен быть слишком большим¹, так как рассматриваемое свойство является локальным, а значит, для окрестности большого размера его смысл искажается. Показатель ровности может быть получен как отношение квадрата суммы яркостей пикселей окрестности к сумме квадратов яркостей с соответствующим нормировочным коэффициентом. Обе суммы понимаются в смысле «суммы по окрестности». В частности, для окрестности 3×3 пиксела $n = 9$:

$$R = \frac{\left(\sum_{k=1}^n I_k \right)^2}{n^2 \cdot \sum_{i=1}^n I_k^2}, \quad (10)$$

где I_k – яркости пикселей изображения.

Вычислив величину R для всех пикселей исходного изображения, получим новое изображение, в котором чем больше яркость пиксела, тем более «ровным», т. е. неинформативным с текстурной точки зрения, является окрестность данного пиксела. Напротив, чем яркость пиксела ниже, тем более неоднородна, а значит, информативна и различима его окрестность. Новое «псевдоизображение», представляющее собой своего рода «карту информативности», или «карту однородности», можно визуализировать. Результат для исходного изображения (см. рис. 22) представлен на рис. 24.

¹ В частности, результаты, приведённые в этом пункте, получены для размера окрестности 3×3 пиксела.



Рис. 24. Визуализация карты информативности

Как видно из рис. 24, изображение имеет очень мало характерных текстурных деталей, за которые можно было бы «уцепиться» при его анализе текстурными методами (даже имеющиеся детали на самом деле – артефакты: линии таблицы, надписи и т. п.). Однако незначительные неоднородности, вызванные, очевидно, не информацией, а шумом, всё же имеются, в чём можно убедиться, выполнив выравнивание гистограммы для карты информативности (рис. 25).

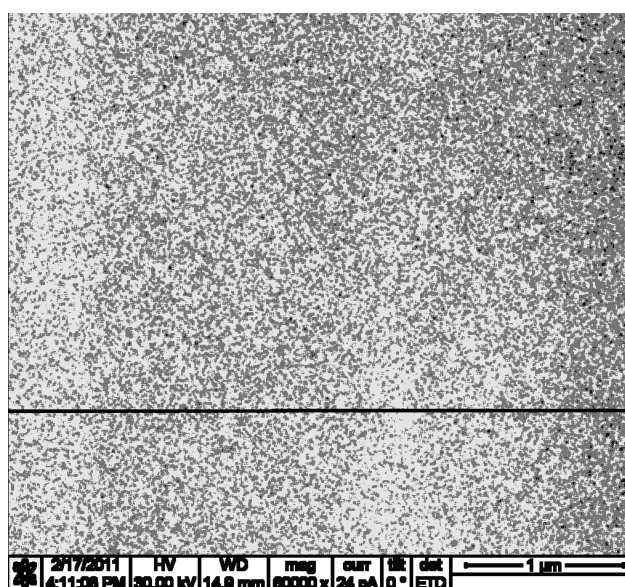


Рис. 25. Эквиализованное изображение карты информативности

Для того чтобы устранить участие изолированных точечных шумов в формировании карты информативности (ведь, на самом деле, точечные шумы полезной информации не несут), можно предварительно применить к исходному изображению медианный фильтр. В этом случае эквализованное изображение карты информативности для нашего тестового изображения примет следующий вид (рис. 26). Как видим, никаких информативных текстурных деталей помимо упомянутых артефактов на изображении действительно нет.

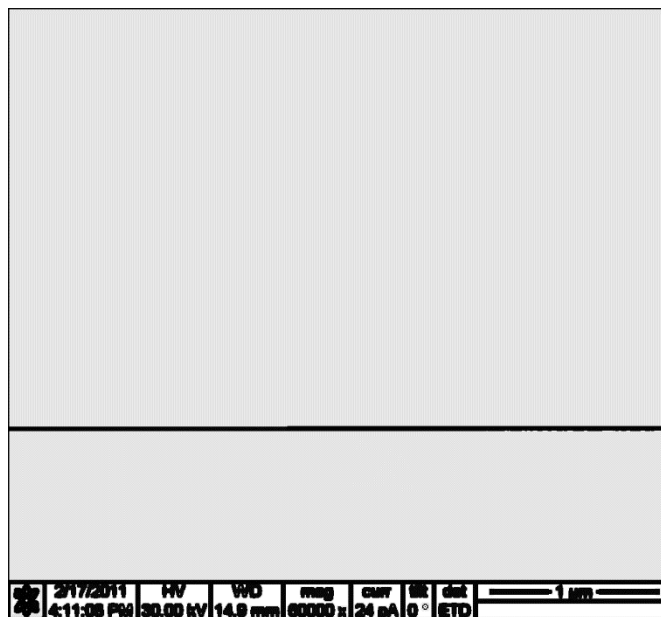


Рис. 26. Эквализованное изображение карты информативности для изображения, обработанного медианным фильтром

3.2.2. Текстуальный подход на основе дифференцирующих масок Фрея – Чена

Для того чтобы ещё раз показать неэффективность текстурных фильтров на РЭМ-изображениях, попробуем применить к нему текстурный фильтр на основе дифференцирующих масок Фрея – Чена (подробнее см. [56]). Поскольку необходимо найти полосы различной яркости, то важен перепад яркости, который в наборе текстурных масок Фрея – Чена выделяет фильтр, отвечающий за так называемую «энергию градиента» (карта A^1).

¹ Используемые в п. 3.2.2 обозначения см. в [55].

Применив данный фильтр, получим «псевдоизображение», яркость элементов которого пропорциональна величине перепада яркости исходного изображения в окрестности данного пиксела. Полученное изображение представлено на рис. 27.

Как и следовало ожидать, существенный перепад яркости дают только артефакты. Но, может, для выявления нужной информации достаточно просто усилить слабый сигнал, имеющийся в «чёрных» зонах? Выполнив выравнивание гистограммы, легко убедиться, что это не так: на эквализованном изображении дополнительно проявляется только перепад яркости от шума, имевшегося на исходном изображении (рис. 28), а если предварительно от него избавиться, то выравнивание гистограммы и вовсе не выявит на карте А ничего интересного, кроме уже известных артефактов (рис. 29).



Рис. 27. Визуализация карты «энергии градиента» базиса Фрея – Чена для тестового изображения

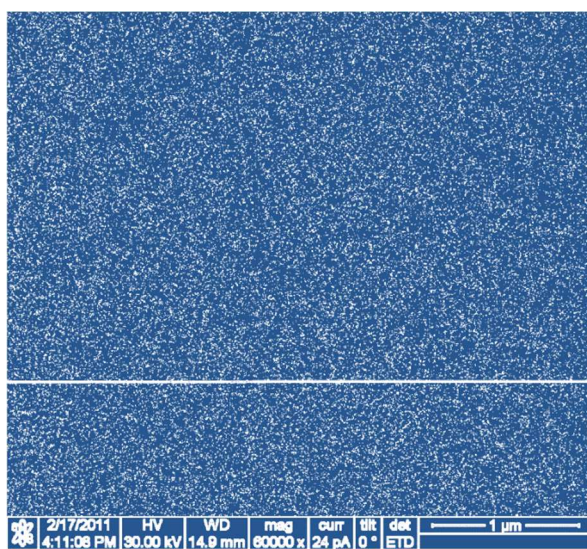


Рис. 28. Эквализованная карта «энергии градиента»



Рис. 29. Эквализованная карта «энергии градиента» от изображения, обработанного медианной фильтрацией

Заметим, что поскольку нас интересует выявление на изображении вертикальных полос (так как рассматриваемая гетероструктура

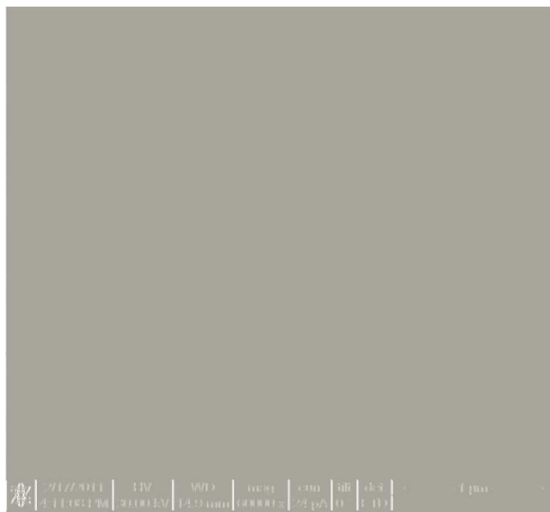


Рис. 30. Визуализация горизонтальной составляющей «энергии градиента»

имеет вертикальные слои), то вместо маски А базиса Фрея – Чена можно использовать только её компонент W_2 , отвечающий за перепад яркости («энергию градиента») в горизонтальном направлении, или его квадрат (в каждой точке значение карты умножается само на себя). Используя квадрат W_2 вместо карты А, можно получить псевдоизображение, как на рис. 30. Его эквализация имеет вид рис. 31, а эквализованная карта квадрата W_2 от изображения, подвергнутого усредняющей филь-

трации, представлена на рис. 32. Как видим, результат принципиально не отличается от полной карты «энергии градиента» А, за исключением устранения горизонтальных линий.

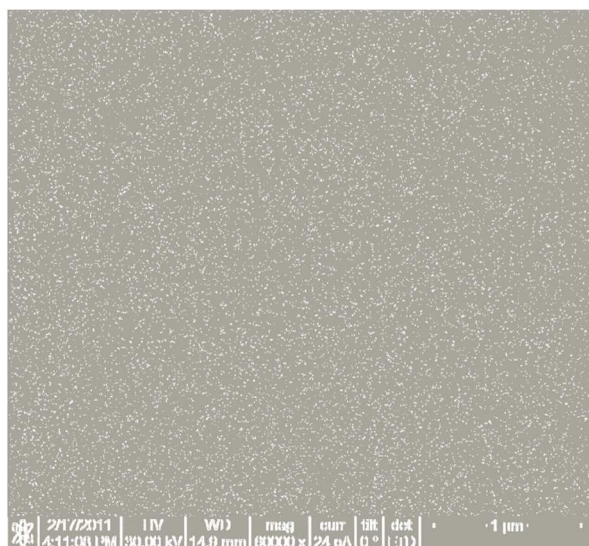


Рис. 31. Эквализация горизонтальной составляющей «энергии градиента»



Рис. 32. Эквализация горизонтальной составляющей «энергии градиента» с устранением шума исходного изображения усредняющим фильтром

Подведя промежуточный итог, можно констатировать, что, как и ожидалось, рассматриваемое изображение малопригодно для анализа его с использованием текстурных методов.

3.2.3. Выявление структуры изображения поблочным анализом

Одной из проблем, затрудняющих работу с исходным изображением, является его зашумлённость. Как выявлено в п. 3.2.2, в точечном шуме не скрывается полезная текстурная информация. Однако полезные данные в нём всё же есть и их можно извлечь, обратившись к усреднённой яркостной информации. Один из способов это сделать – поблочное усреднение яркости изображения, в результате которого шум (его плотность и интенсивность) переходит в агрегированную яркостную информацию. На рис. 33 представлен результат усреднения яркости по блокам 64×64 , 32×32 и 16×16 пикселей (три изображения рядом), что эквивалентно понижению разрешения изображения с 1024×1024 до 16×16 , 32×32 и 64×64 пиксела соответственно, а на рис. 34 приведены те же изображения после выравнивания гистограммы.



Рис. 33. Усреднение яркости по блокам 64×64 , 32×32 и 16×16 пикселей

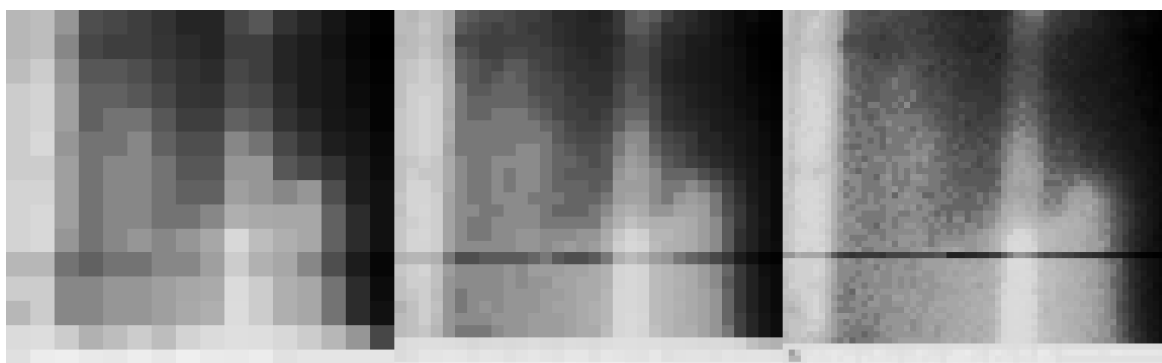


Рис. 34. То же с последующим выравниванием гистограммы

Можно заметить, что вертикальные полосы, соответствующие различным слоям гетероструктуры (см. рис. 33, 34), стали видны значительно отчётливее, чем на исходном изображении.

Несколько усложнив данный алгоритм, можно ещё улучшить результат. В частности, результаты, приведённые на рис. 35, получены в результате следующих действий:

- Понижение разрешения изображения с 1024×1024 до 16×16 , 32×32 и 64×64 пиксела соответственно.
- Усредняющая / медианная фильтрация.
- Обратное масштабирование без интерполяции (замена пикселей блоками того же цвета размером 64×64 , 32×32 и 16×16 пикселей соответственно).
- Размытие для «смягчения» границ блоков.
- Выравнивание гистограммы.

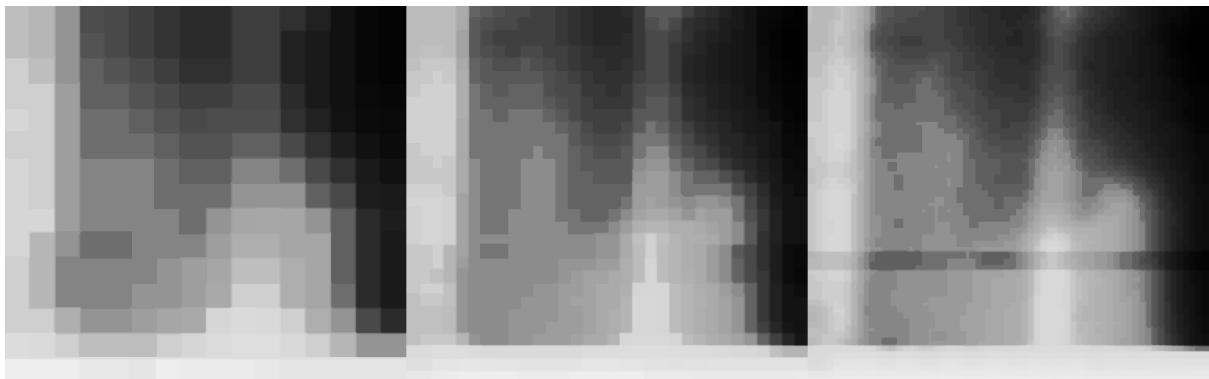


Рис. 35. Модифицированная обработка с понижением разрешения

Преимуществом поблочного анализа является снижение проявления артефакта от горизонтальной чёрной полосы (на рис. 22 – примерно $1/3$ расстояния от нижнего края). Особенно это заметно на среднем снимке рис. 35, где вместо обычной усредняющей фильтрации (Mean filter) применена медианная фильтрация (Median filter).

3.2.4. Применение частотной коррекции

Как известно, точечному шуму соответствуют высокие частоты в спектральном образе изображения. Так, его можно в значительной степени элиминировать, осуществив частотную фильтрацию изображения. При этом можно одновременно усилить проявление структур, соответствующих низким частотам (полосы, соответствующие слоям гетероструктуры, – относительно крупные объекты).

Для реализации этого подхода можно предложить следующий алгоритм:

- Выполняем двумерное дискретное преобразование Фурье исходного изображения, получая комплексное изображение (Фурье-образ исходного изображения).
- Обнуляем в Фурье-образе все коэффициенты, соответствующие частотам выше некоторого порога F .
- Остальные коэффициенты (их действительную и мнимую части) умножаем на заданную константу N (за исключением нулевого коэффициента, соответствующего просто средней яркости изображения).
- Выполняем обратное преобразование Фурье, получая скорректированное изображение.

При выборе порога отсечения частот нужно соблюдать баланс между лучшим устранением высокочастотных шумов (понижение порога – убираем не только самые высокие частоты, но и более низкие) и сохранением детализации изображения (повышение порога). Результаты для различного порога представлены на рис. 36, а их эквализованные варианты – на рис. 37. Во всех случаях $N = 2$.

Как видим, при слишком больших значениях F шум практически не устраняется, а при слишком малых – сильно теряется информация о структуре изображения.

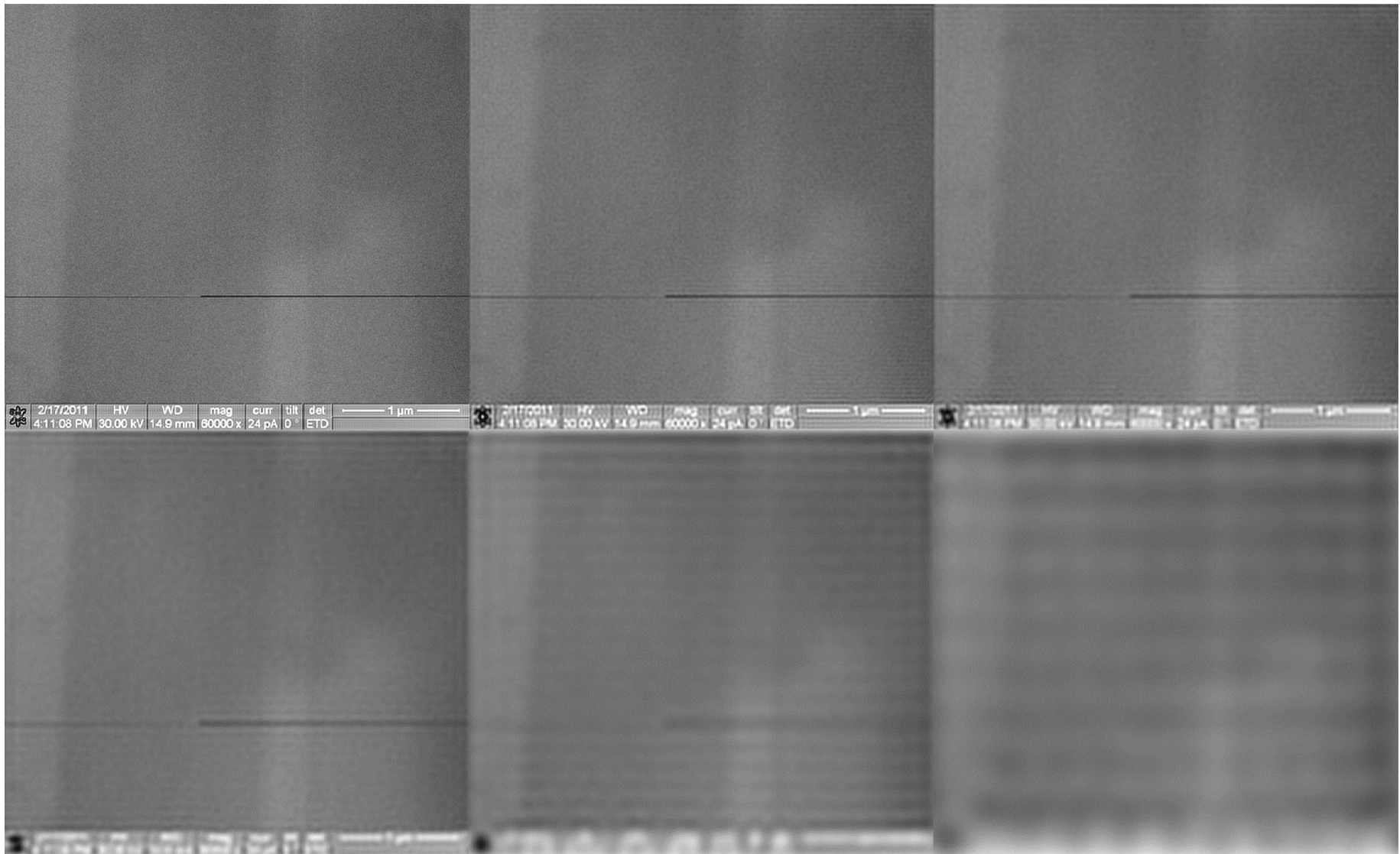


Рис. 36. Результат частотной коррекции для $N = 2$, $F = 200, 100, 75, 50, 25$ и 10

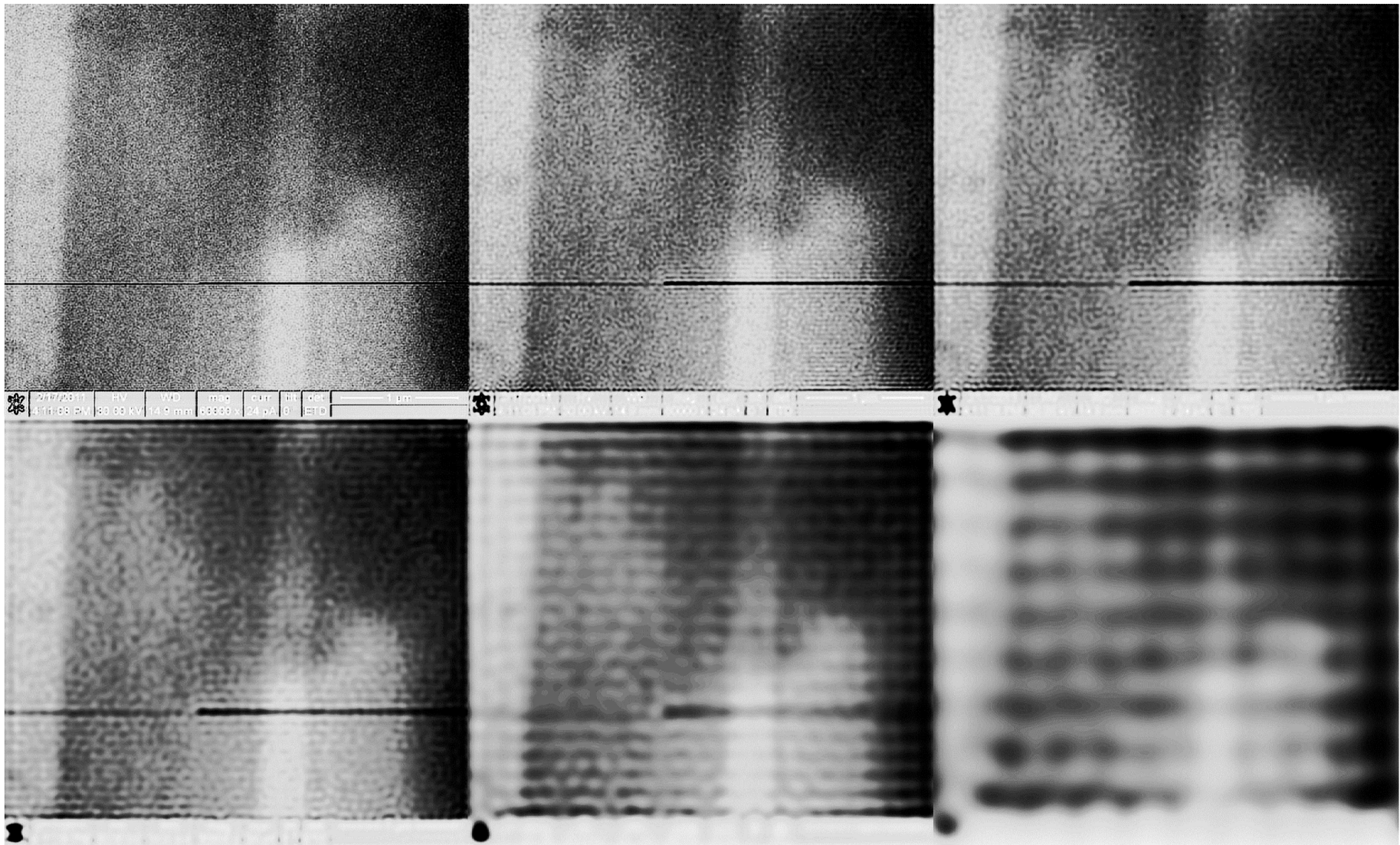


Рис. 37. Эквилизация частотной коррекции для $N = 2$, $F = 200, 100, 75, 50, 25$ и 10

На рис. 38 показано изменение вида скорректированного изображения при изменении константы-множителя N . Значение F во всех случаях равно 200. Как видно, слишком малое значение константы даёт малоконтрастное изображение (что можно частично устранить выравниванием гистограммы). Для достаточно больших значений N эквализация не требуется, но при слишком больших значениях изображение «вырождается», на нём появляются артефакты.

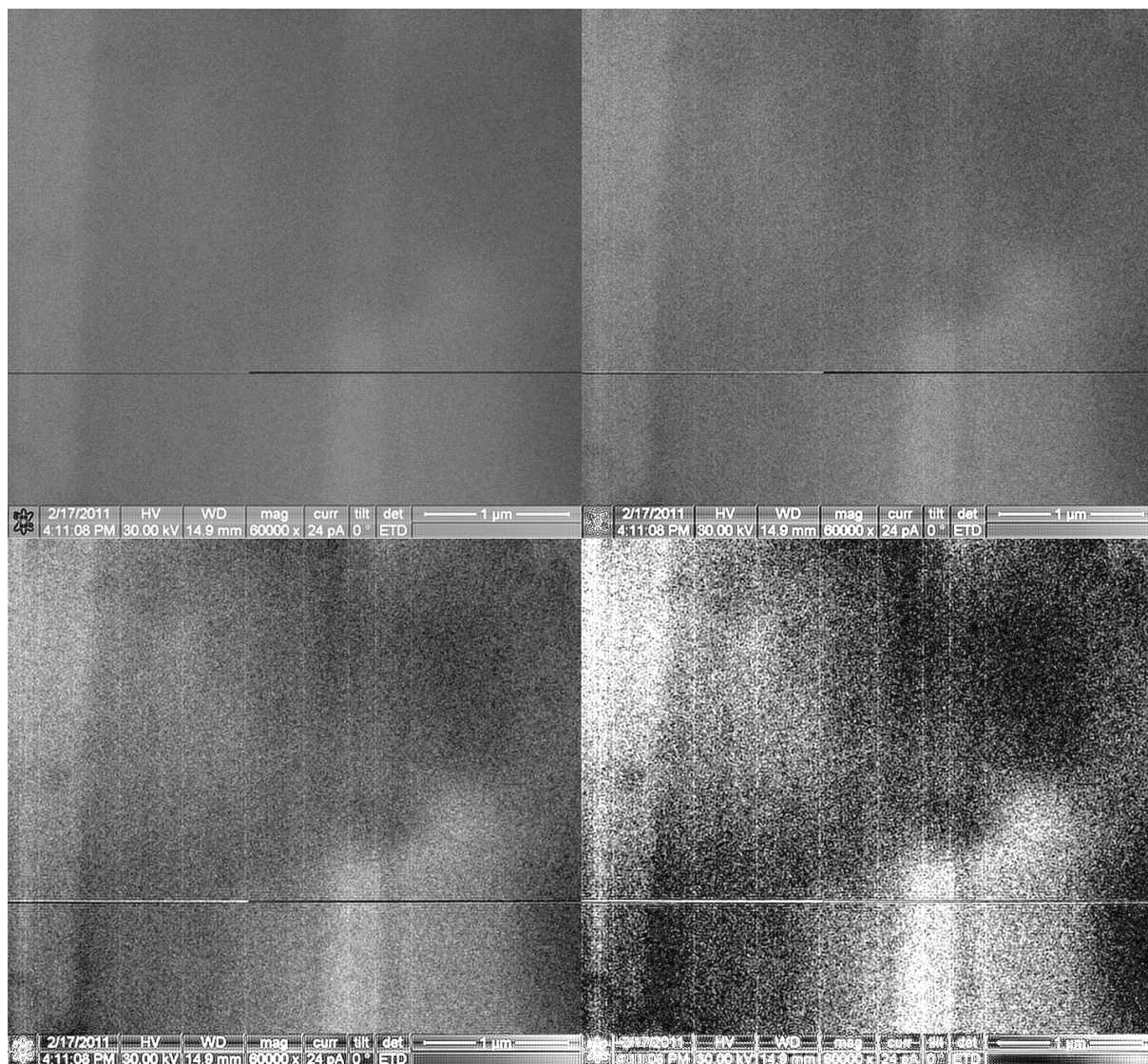


Рис. 38. Результат частотной коррекции для $F = 200$, $N = 2, 4, 8$ и 20

Таким образом, из приведённых изображений очевидно, что залогом получения качественного изображения с помощью метода частотной коррекции является разумный выбор параметров F и N .

3.3. Автоматизированная классификация РЭМ-изображений

Для решения многих практических задач, таких, например, как контроль качества изготовления полупроводниковых гетероструктур, большой интерес представляет автоматизация классификации фрагментов РЭМ-изображения. Рассмотрим, как такая классификация может быть осуществлена на практике.

3.3.1. Постановка задачи

Пусть имеется растровое полутоновое двумерное изображение, полученное методом электронной микроскопии. Пример такого изображения приведён на рис. 39. Данное РЭМ-изображение является типичным для электронного микроскопа. Поэтому используемый подход может применяться не только для матриц лазерных диодов, но и других радиотехнических изделий, имеющих различную текстуру. Особенно интересен данный метод для изучения наноструктурированных покрытий, где стоит задача различия определенных областей без использования дополнительных приставок и устройств как в микро-, так и в наномасштабе.

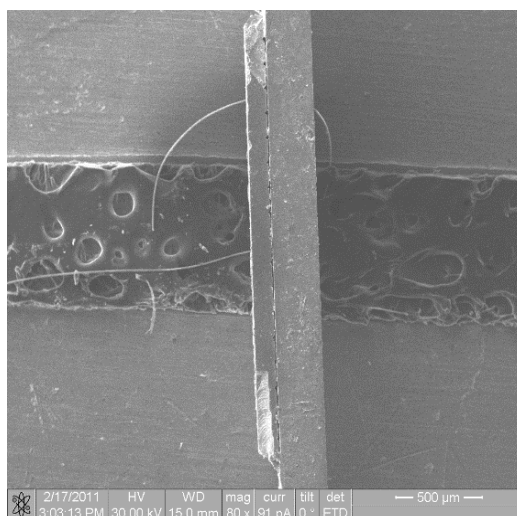
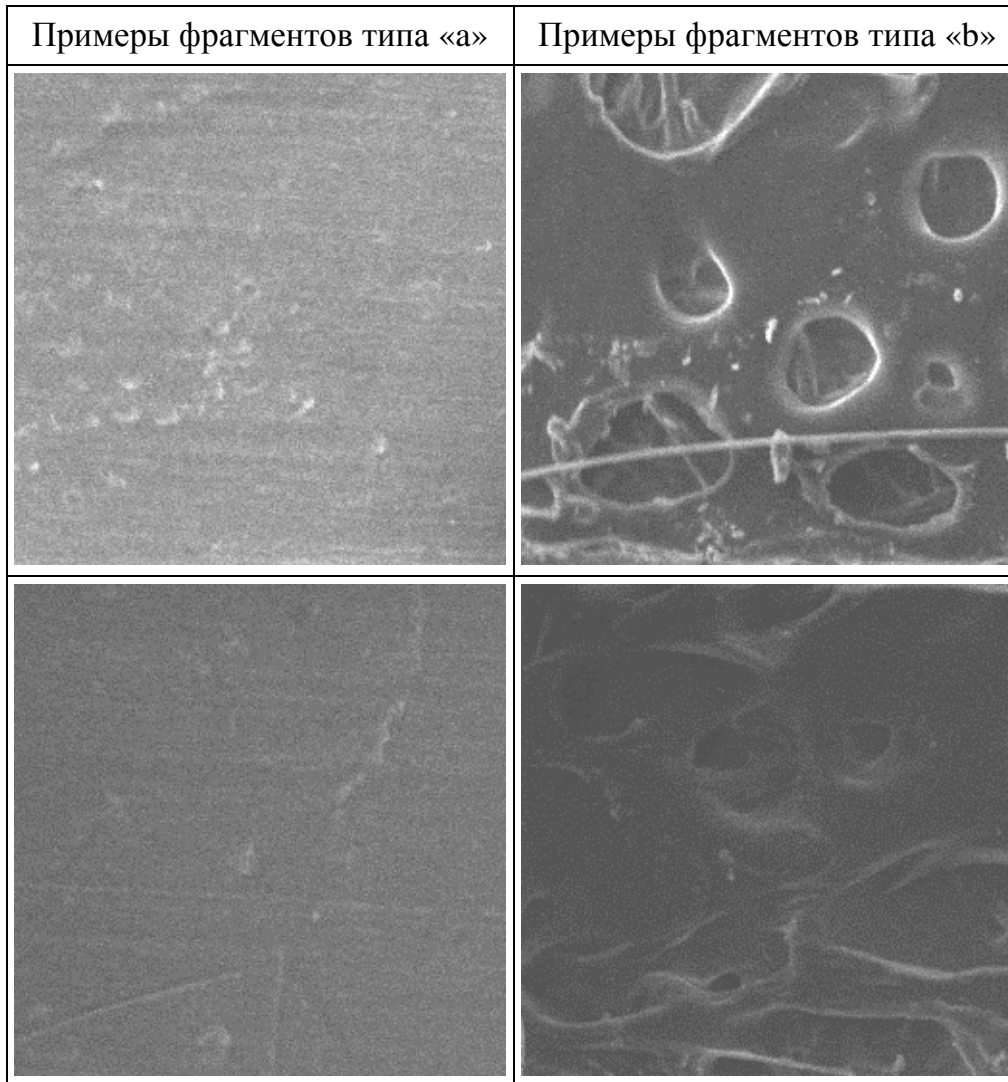


Рис. 39. Изображение участка изделия, полученное с использованием электронного микроскопа

На изображении (см. рис. 39) имеются различные по текстуре области, соответствующие различным объектам (например, как в табл. 1). Из практических соображений, например, в целях автоматической сегментации изображения, представляет интерес разработка способа, позволяющего классифицировать произвольные участки изображения с точки зрения текстуры их поверхности. В частности, весьма востребован алгоритм, позволяющий ответить на вопрос, относятся ли два фрагмента изображения к поверхности «одного типа» или же «различных типов» [52, 53].

Таблица 1

Фрагменты тестового изображения с различной текстурой



3.3.2. Описание подхода к решению

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

Перед применением метода фрагмент изображения предварительно обрабатывают, размывая 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 3×3 , в результате чего получается набор матриц $W_1 \dots W_9$ (табл. 2) [54]. При применении фильтров на границе матрицы яркости W полагаем значения яркости в точках, выходящих за пределы матрицы, равными нулю, либо не учитываются граничные точки вообще, выполняя отступ от границы в 1 пиксел [55].

Таблица 2

Используемые текстурные фильтры (базис 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	$\frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$	–	–

Результатами применения фильтров $W_1 \dots W_9$ к матрице Y являются матрицы $W_1(Y) \dots W_9(Y)$, которые имеют ту же размерность, что и исходная матрица Y .

Вводятся следующие матрицы:

$$\begin{aligned}
 A &= A(Y) = W_1(Y) \oplus W_2(Y) \\
 B &= B(Y) = W_3(Y) \oplus W_4(Y) \\
 C &= C(Y) = W_5(Y) \oplus W_6(Y) \\
 D &= D(Y) = W_7(Y) \oplus W_8(Y) \\
 E &= E(Y) = \frac{W_9(Y) \oplus W_9(Y)}{2},
 \end{aligned}$$

где \oplus – операция поэлементной суммы квадратов.

Полученные матрицы имеют смысл энергий различных примитивов:

– A – энергия градиента;

– B – энергия пульсации;

– C – энергия линии;

– D – энергия лапласиана;

– E – энергия константы (в дальнейшем не используется, так как не несёт полезной информации о неоднородностях текстуры изображения).

При рассмотрении соотношений между элементами матриц $\bar{A}_{i,j}$, $\bar{B}_{i,j}$, $\bar{C}_{i,j}$ и $\bar{D}_{i,j}$ в каждой точке (i, j) возможны 24 различные ситуации, от $\bar{A}_{i,j} \geq \bar{B}_{i,j} \geq \bar{C}_{i,j} \geq \bar{D}_{i,j}$ до $\bar{D}_{i,j} \geq \bar{C}_{i,j} \geq \bar{B}_{i,j} \geq \bar{A}_{i,j}$.

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. Сравнить такие гистограммы можно, например, с помощью метрики L_1 [55, 56]:

$$d(H, H') = \sum_{i=1}^{24} |h_i - h_i'|, \quad (11)$$

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 рассмотрены на примере изображения на рис. 39, на котором выделены несколько участков с текстурой типа «а» (верхняя и нижняя часть)

и типа «b» (центральная часть). Примеры фрагментов обоих типов приведены в табл. 1. Всего использовалось по 4 изображения каждого типа.

В результате применения описанной методики к данным изображениям получены гистограммы, приведённые на рис. 40 (для удобства – в виде комбинированной гистограммы). Тёмные тона соответствуют изображениям типа «a», светлые – типа «b».

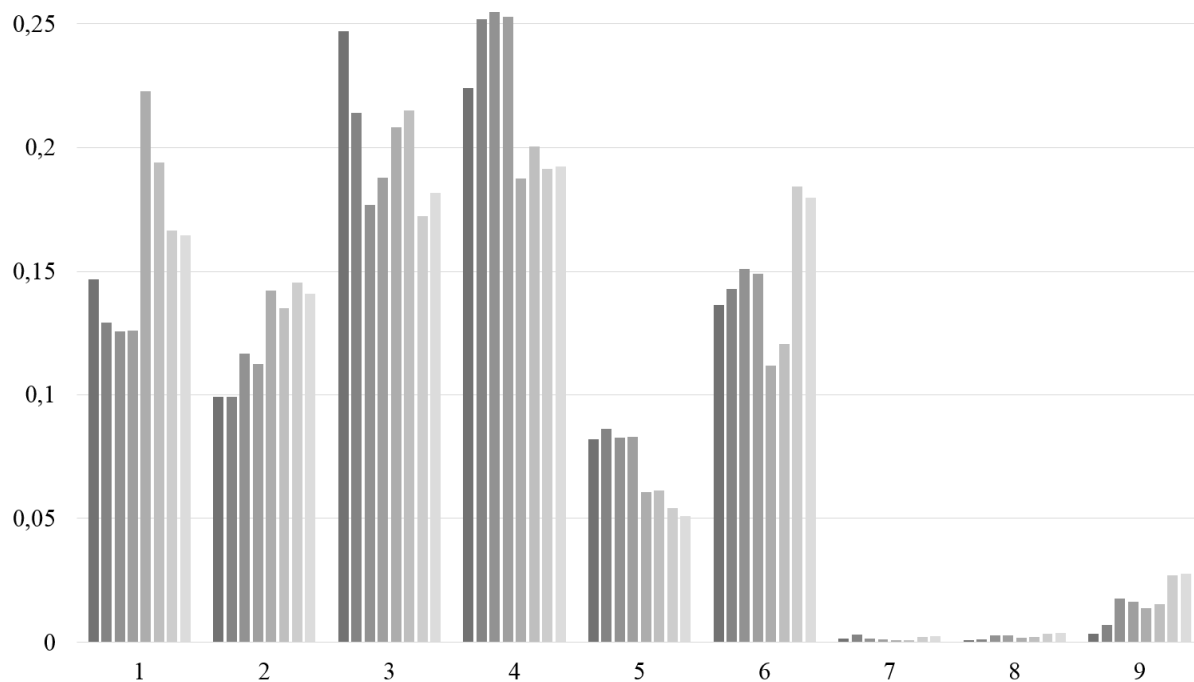


Рис. 40. Гистограммы для тестовых фрагментов изображения (первые 9 столбцов из 24)

Результаты вычисления расстояния по метрике L_1 между парами тестовых изображений приведены в табл. 3. Как видно, существует порог, который позволяет разделить по величине внутриклассовые и межклассовые расстояния (т. е. расстояния между парой изображений одного класса, таких как, например, два фрагмента типа «a», и различных классов (фрагмент типа «a» и фрагмент типа «b»). 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 цветом в табл. 3), что важно для выделения областей различной структуры на поверхности образца. Ряд параметров, косвенно характеризующих качество различения, приведён также в табл. 4.

Таблица 3

Расстояния между тестовыми изображениями по метрике L_1

Фрагмент изображения	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4
a1	0	0,111	0,206	0,182	0,289	0,227	0,319	0,3
a2	0,111	0	0,109	0,086	0,305	0,245	0,32	0,298
a3	0,206	0,109	0	0,027	0,318	0,267	0,242	0,232
a4	0,182	0,086	0,027	0	0,304	0,252	0,257	0,236
b1	0,289	0,305	0,318	0,304	0	0,072	0,212	0,202
b2	0,227	0,245	0,267	0,252	0,072	0	0,190	0,173
b3	0,319	0,32	0,242	0,257	0,212	0,189	0	0,033
b4	0,3	0,298	0,232	0,236	0,202	0,173	0,033	0

Таблица 4

Полученные соотношения между расстояниями

Параметр	Значение
Среднее внутриклассовое расстояние	0,134
Среднее межклассовое расстояние	0,276
Среднее отношение межклассового расстояния к внутриклассовому	2,064
Максимальное внутриклассовое расстояние	0,212
Минимальное межклассовое расстояние	0,227
Наихудшее отношение межклассового расстояния к внутриклассовому	1,071

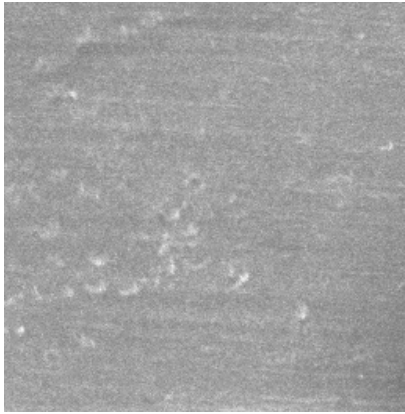
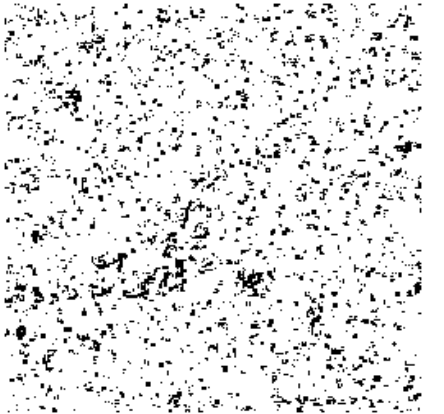
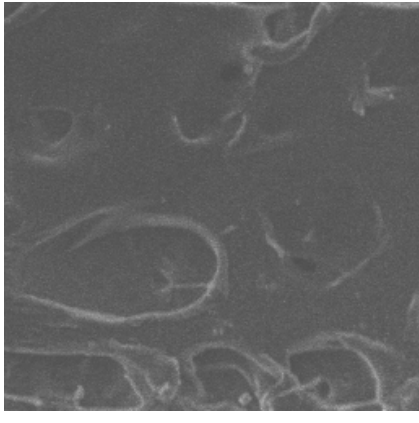

Как видно из табл. 4, в среднем межклассовое расстояние оказывается более чем в два раза больше, чем внутриклассовое, что позволяет предполагать, что и на других тестовых изображениях подобного типа метод позволит проводить классификацию достаточно уверенно (хотя и необязательно с нулевой ошибкой, как в рассмотренном случае).

С учётом полученных результатов можно рекомендовать данный подход (в том числе с другими наборами дифференцирующих масок) для применения в различных методиках мониторинга конструкторско-технологических параметров изделий, решающих задачи компьютерного зрения, анализа изображений и сигналов, например, для сегментации, выделения специфических областей изображения, автоматического позиционирования по изображению и т.д. [57, 58].

3.3.3. Улучшение разделимости классов

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. В табл. 5 в правой колонке чёрным цветом показаны области тестовых изображений, признанные информативными для $d = 0,995$, а на рис. 41 – вид порядковых гистограмм, построенных с учётом только этих областей.

Таблица 5
Фрагменты тестовых изображений и их «области информативности»

Примеры фрагментов изображения	Матрицы «информативных областей»
	
	

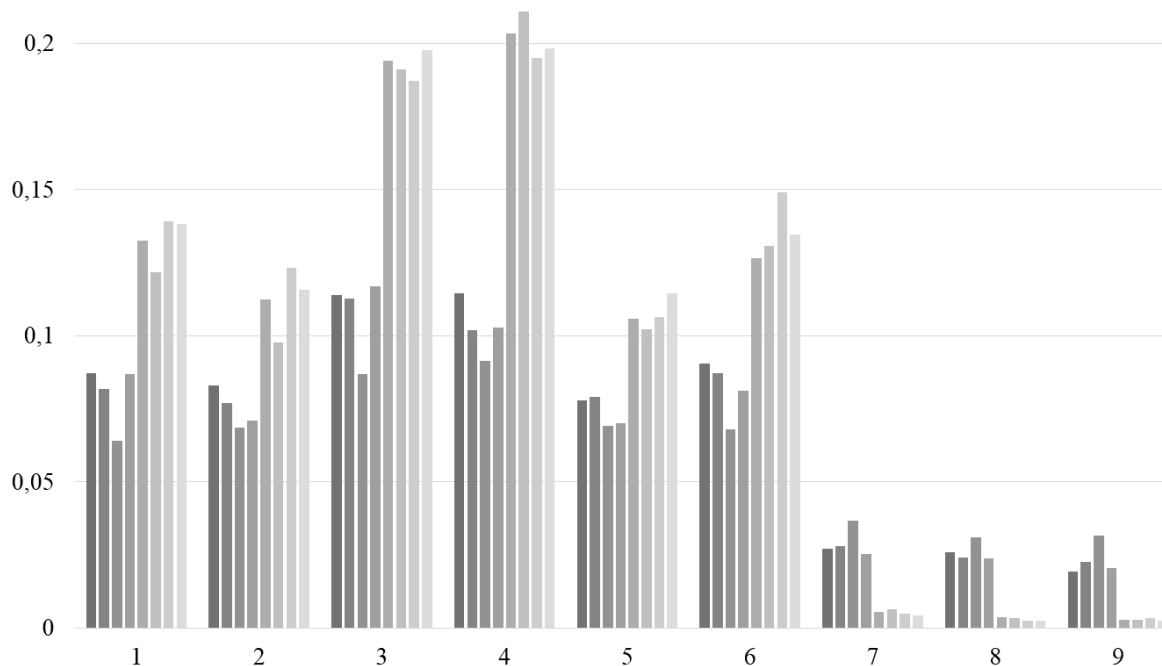


Рис. 41. Гистограммы для тестовых фрагментов изображения с учётом только «информативных областей» для $d = 0,995$ (первые 9 столбцов из 24)

Сравнительная эффективность данного подхода (с исключением «неинформативных областей») относительно исходной методики (без такого исключения) с точки зрения качества разделения классов изображений проиллюстрирована в табл. 6.

Таблица 6

Соотношения между расстояниями для двух типов методики

Параметр	Без фильтрации ($d = 1$)	С фильтрацией ($d = 0,995$)
Среднее внутриклассовое расстояние	0,134	0,12
Среднее межклассовое расстояние	0,276	0,722
Среднее отношение межклассового расстояния к внутриклассовому	2,064	6,042
Максимальное внутриклассовое расстояние	0,212	0,239
Минимальное межклассовое расстояние	0,227	0,574
Наихудшее отношение межклассового расстояния к внутриклассовому	1,071	2,405

С учётом полученных результатов такой подход, по сравнению с исходным, позволил улучшить разделение среднего отношения межклассового расстояния к внутриклассовому почти в три раза, наихуд-

шее отношение межклассового расстояния к внутриклассовому – примерно в два раза. Использование подхода с исключением «неинформативных областей» позволяет более точно определить принадлежность выбранной области изображения к одному из специфических фрагментов изображения.

3.4. Автоматизированная сегментация РЭМ-изображений

Ещё одним типом широко востребованных задач автоматизированной обработки изображений является автоматическая сегментация изображений, т. е. выявление их структурных элементов. Рассмотрим вариант решения данной задачи для РЭМ-изображения полупроводниковой гетероструктуры.

3.4.1. Постановка задачи

Постановка задачи в терминах предметной области

В результате съёмки с использованием растрового электронного микроскопа поверхности среза образца полупроводниковой гетероструктуры, например лазерной диодной, получается изображение, содержащее набор слабоконтрастных полос на фоне точечного шума (рис. 42).

Относительная ширина полос на изображении соответствует соотношению толщины различных слоёв исследуемого образца, а различная яркость полос характеризует различия в электронной плотности материала, из которого изготовлены полосы. Следует заметить, что различная яркость полос не связана с геометрией поверхности образца, поскольку анализируется его плоский срез. Случаи, когда это не так, связаны с дефектами среза и в дальнейшем исключаются из рассмотрения.



Рис. 42. Электронное изображение полупроводниковой гетероструктуры

Представляет интерес автоматизация анализа такого рода изображений с целью автоматического определения параметров образца, в частности автоматизированное определение геометрии слоёв и их электронной плотности (последнее может быть полезно для определения состава слоёв образца).

Постановка задачи в терминах методологической области

Пусть дано растровое полутоновое серое изображение с набором слабоконтрастных относительно фона светлых или тёмных полос на фоне пиксельного шума. Полос

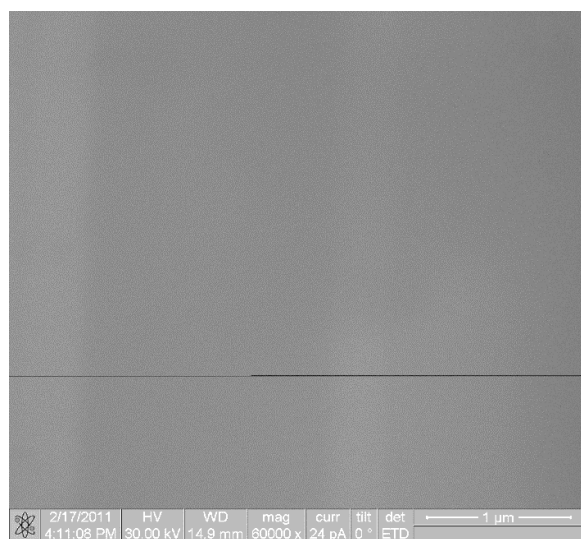


Рис. 43. Изображение с допустимым дефектом склейки и наклоном полос

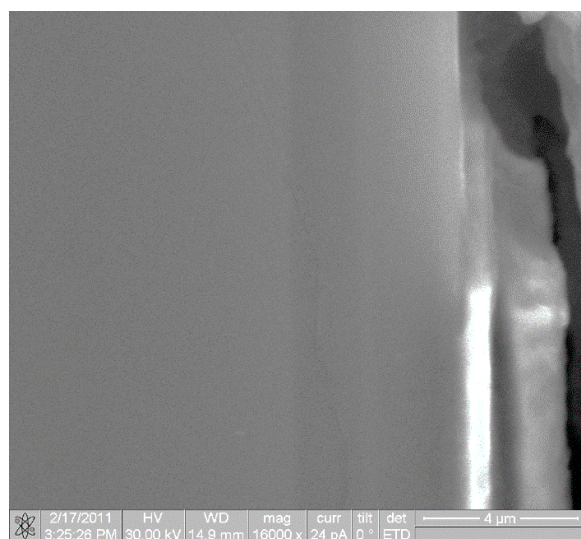


Рис. 44. Изображение с недопустимым дефектом (правый край)

может быть одна или более, полосы могут быть вертикальными или иметь наклон (не более 15 градусов), на изображении возможно наличие незначительных дефектов склейки, например, таких как горизонтальная полоса на рис. 43. Задачу в такой постановке будем называть общей задачей.

Подчеркнём, что интенсивные существенные дефекты интенсивности, протяжённые в вертикальном направлении, вызванные нарушениями плоскости геометрии образца (рис. 44), недопустимы и должны быть классифицированы как дефекты съёмки. В этом случае процесс получения снимка должен быть повторён после устранения причин дефекта, либо, если это не представляется возможным, анализируемое изображение должно быть обрезано вручную с исключением дефектной области.

Рассмотрим сначала ситуацию, когда априорно известно, что полоса на изображении одна, она не при-
 мыкает к краям (справа и слева от неё
 находится фон) и её тип (светлее фона или
 темнее фона) известен (рис. 45). Задачу в
 такой постановке будем в дальнейшем
 называть базовой задачей. После построе-
 ния алгоритма решения базовой задачи вы-
 полним сведение алгоритма решения об-
 щей задачи к решению базовой задачи.

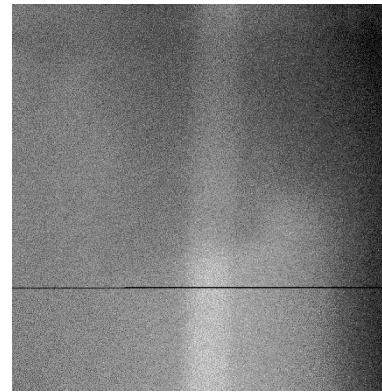


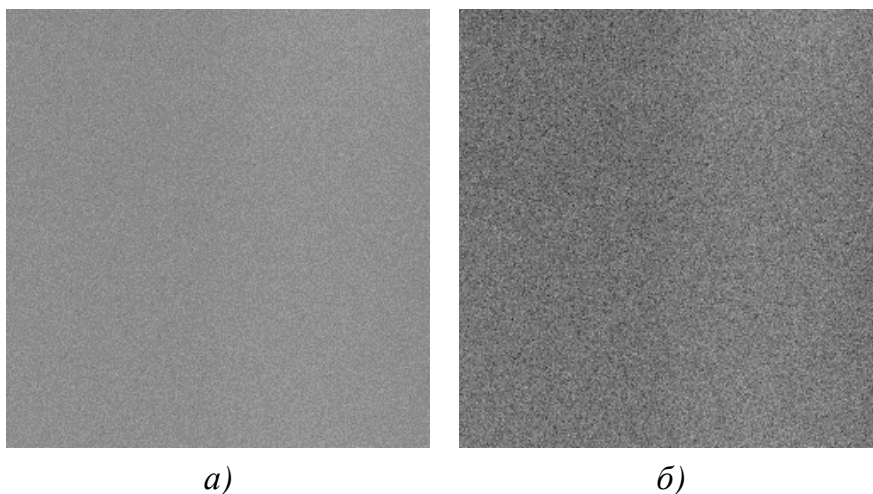
Рис. 45. Исходные данные базовой задачи

3.4.2. Решение базовой задачи

Сбор информации с изображения

Пусть дано изображение, соответствующее условиям базовой за-
 дачи. Для определённости будем считать, что на изображении имеется
 полоса, светлая относительно фона (см. рис. 45). Данное изображение
 получено из рис. 43 с сохранением только правой светлой полосы.

Заметим, что ввиду наличия на изображении интенсивного пик-
 сельного шума (рис. 46), а также слабой контрастности и флуктуаций
 яркости по вертикали выделение полосы посредством пороговой би-
 наризации невозможно.



*Рис. 46. Фрагмент изображения в масштабе 1:1 (граница полосы –
 в центре)(а); то же изображение после нормализации и выравнивания
 гистограммы (б)*

В таких условиях информативными исходными данными могут быть только результаты массивированного усреднения. При этом, чтобы не потерять в процессе усреднения полезную информацию о полосах, ввиду ориентации полос, близкой к вертикальной, усреднение следует проводить по вертикалям. При этом необходимо не потерять информацию и о наклоне полос, в противном случае наклонная узкая полоса будет воспринята как вертикальная широкая. Для того чтобы удовлетворить данным условиям, предлагается следующий алгоритм сбора информации с изображения:

- выполняется суммирование интенсивностей пикселей по вертикалям изображения, на выходе получается вектор, имеющий длину, равную горизонтальному размеру изображения, значения же его элементов пропорциональны вертикальному разрешению изображения и средней яркости данной области (фона или полосы);

- для сохранения информации о наклоне полос суммирование выполняется отдельно для нижней и верхней полос изображения;

- полученные векторы суммарных яркостей верхней и нижней частей I_v и I_n сглаживаются скользящим средним с большим окном (более 50) для подавления шума, в результате чего получаются векторы сглаженных суммарных яркостей J_v и J_n .

Пример графиков суммарных яркостей верхней и нижней частей, а также их сглаженных вариантов для исходного изображения (см. рис. 45) приведён на рис. 47. Нулевые области на сглаженных вариантах суммарных яркостей в начале и конце области соответствуют участкам, где недостаточно данных для сглаживания, так как окно скользящего среднего выходит за пределы области.

Следует отметить, что наклон полос изображения, а значит ошибка в расположении образца при снятии изображения, может быть оценена по относительному смещению основных элементов на графиках для верхней и нижней половин. В мелких же деталях соответствия может не быть, так как они существенно зависят от вертикальных флуктуаций яркости изображения.

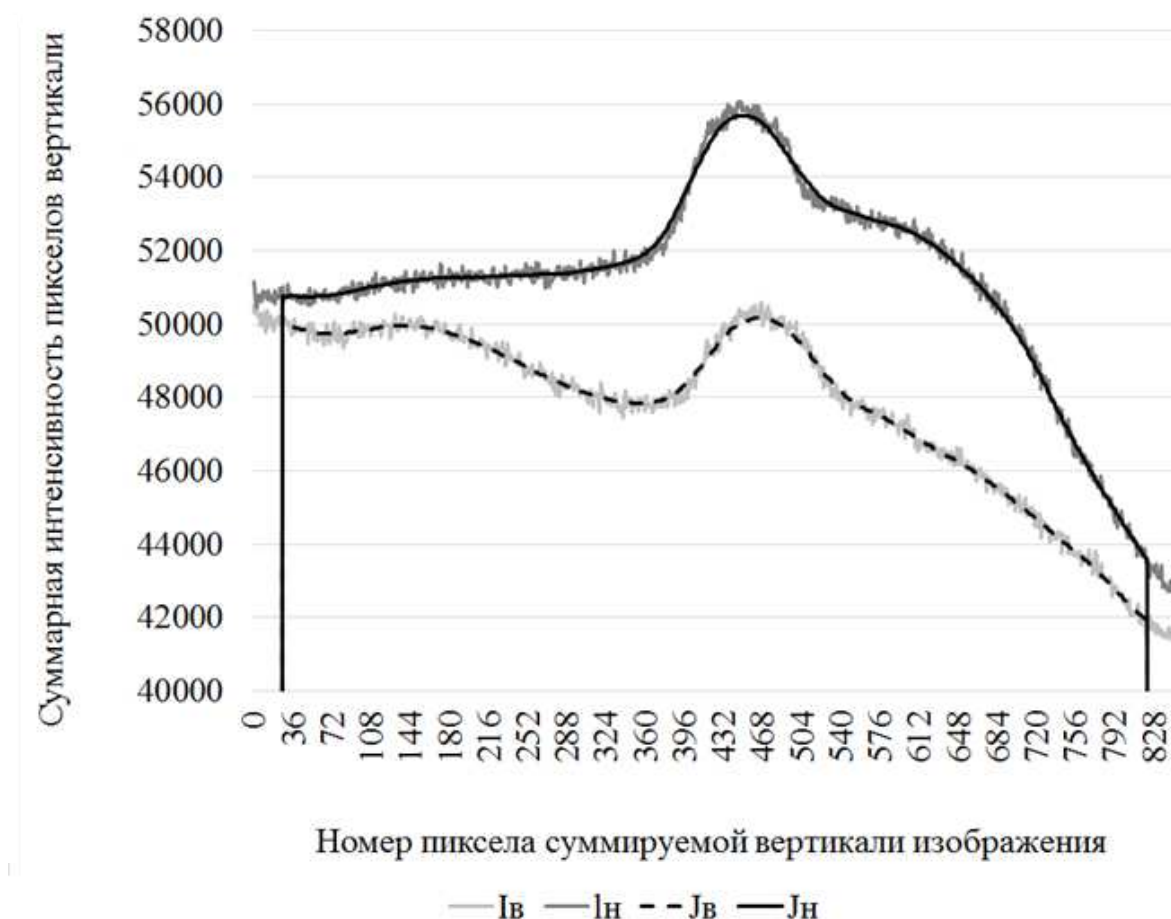


Рис. 47. Суммарные интенсивности вертикалей тестового изображения

Полученные данные описывают структуру анализируемого изображения посредством достаточно гладкой функции, что позволяет перейти к следующему этапу его анализа.

Следует заметить, что на рис. 45 обнаруживается существенный градиент на убывание яркости в правой части вплоть до границы, что свидетельствует о некотором дефекте в процессе съёмки изображения, так как в пределах одной полосы электронная плотность должна быть примерно постоянной.

Определение центра яркостной полосы

Полученные графики J_b и J_n позволяют локализовать яркостную полосу, искомую в рамках базовой задачи. Центр этой полосы соответствует для светлой/тёмной полосы середине области повышенной/пониженной яркости соответственно. С учётом наличия наклона полос можно ожидать, что центр будет соответствовать максимуму-

му/минимуму J_v и J_n , так как для наклонной полосы эффект ступеньки яркости размывается за счёт суммирования на краях полосы по вертикалям смеси фона и полосы в различных пропорциях. Только в центральной части полосы и только при хорошем отношении её ширины к наклону в суммировании по вертикалям не будет слияния пикселов фона.

С учётом вышесказанного, а также того, что по условиям базовой задачи на изображении присутствует только одна полоса известного типа, найдём положение центра верхней (ζ_v) и нижней (ζ_n) части полосы как глобальный максимум (при поиске светлой полосы) или минимум (при поиске тёмной полосы) значений J_v и J_n в пределах всей области её определения, т. е. за исключением прикраевых областей, где эти величины не определены (рис. 48).

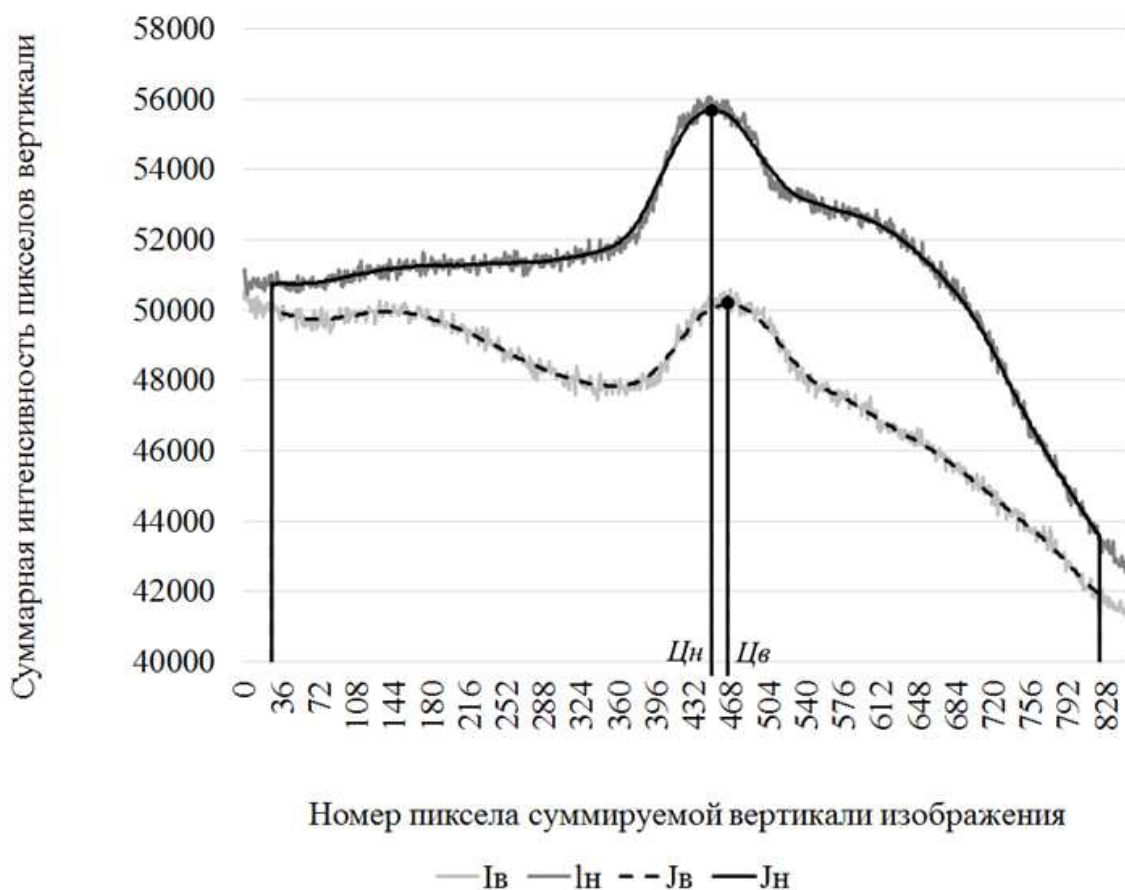


Рис. 48. Определение положения центра полосы в верхней и нижней части

Различие в положении ζ_v и ζ_n характеризует величину наклона полосы (точнее, её центра): наклон полосы соответствует наклону от-

резка с абсциссами концов, равными $\zeta_{\text{в}}$ и $\zeta_{\text{н}}$, а ординатами $\frac{3}{4}$ и $\frac{1}{4}$ высоты изображения, т. е. при высоте изображения, равной H , угол наклона α может быть найден по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left(2 \frac{(\zeta_{\text{в}} - \zeta_{\text{н}})}{H} \right). \quad (12)$$

Теперь, имея информацию о положении полосы на изображении, определим её границы.

Определение границ полосы

Границы полосы, светлой/тёмной относительно фона, характеризуются снижением/повышением значений $J_{\text{в}}$ и $J_{\text{н}}$. Это изменение было бы скачкообразным, если бы на изображении имелась вертикальная полоса с чёткой границей и без наклона. Однако в действительности в условиях базовой задачи имеется наклонная полоса с размытой границей, зачастую имеющая к тому же переменную ширину от низа к верху изображения. Очевидно, что в этих условиях бессмысленно пытаться отыскать скачок значений $J_{\text{в}}$ и $J_{\text{н}}$, соответствующий границе. Также бессмысленно пытаться найти область, где убывание величин $J_{\text{в}}$ и $J_{\text{н}}$ прекратится: как показывает рис. 48, для нашего тестового изображения в правой части имеется градиент фона по яркости к правой границе, в результате чего убывание величин $J_{\text{в}}$ и $J_{\text{н}}$ продолжается до самой правой границы изображения.

Однако в качестве критерия границы полосы, как видно из рис. 48, можно использовать смену характера выпуклости графиков $J_{\text{в}}$ и $J_{\text{н}}$, т. е. переход от выпуклости вверх к выпуклости вниз и наоборот (в зависимости от типа полосы – светлая или тёмная).

Для анализа выпуклости можно было бы определить вторые производные, однако на практике по имеющимся зашумлённым и дискретным данным численное их определение с приемлемой для анализа точностью не может быть выполнено. Поэтому придётся ограничиться анализом первой производной на экстремум переборным путём. Для этого по значениям $J_{\text{в}}$ и $J_{\text{н}}$ определим значения производных сглаженных суммарных яркостей $P_{\text{в}}$ и $P_{\text{н}}$ и их сглаженных скользящим средним версий $Q_{\text{в}}$ и $Q_{\text{н}}$. Вид графиков этих производных для тестового изображения приведён на рис. 49.



Рис. 49. Графики производных суммарных яркостей тестового изображения

Артефакты в начале и конце, соответствующие отсутствию значений J_v и J_n (ближние к краям изображения артефакты) и отсутствию данных для окна скользящего среднего (дальние от краёв изображения артефакты), обрезаны, поэтому на графике приведены данные, соответствующие только около 87 % ширины тестового изображения.

В данном случае для определения производных использован самый простой вариант разностного аналога, вычисляемый просто как разность соседних значений сглаженной суммарной яркости, т. е.

$$P_{H/V}^i = J_{H/V}^{i+1} - J_{H/V}^i. \quad (13)$$

Заметим, что в принципе по графикам Q_v и Q_n (см. рис. 49) возможно было выполнение и предыдущего этапа, для чего достаточно было найти пересечения графика с осью ординат, однако, во-первых,

для поиска центра полосы был нужен экстремум определённого типа (максимум или минимум в зависимости от типа полосы), а во-вторых, двукратное сглаживание (при определении J_v/J_n и Q_v/Q_n) вносит существенную погрешность в данные, так что на этапе локализации центра полосы лучше было бы всё же действовать так, как описано выше.

Для поиска же границ полосы нужно, двигаясь вправо и влево от \mathcal{C}_v и \mathcal{C}_n , найти точки, в которых меняется характер выпуклости значения сглаженной суммарной яркости. Для этого будем двигаться вправо и влево от $\mathcal{C}_v/\mathcal{C}_n$, пока Q_v/Q_n не перестанет расти/убывать. Для этого можно перебирать значения вектора значений сглаженной производной, начиная от точки центра полосы, пока соотношение между соседними значениями не поменяет знак. В результате будут получены левая и правая границы полосы для нижней и верхней части изображения (соответственно L_n , P_n , L_v и P_v на рис. 50).

Анализ изображения после выявления структуры

Имея абсциссы всех точек, отмеченных на рис. 50, можно считать задачу локализации полосы в постановке базовой задачи выполненной и переходить к этапу её визуализации и измерения параметров изображения. В частности, для анализа соотношения электронной плотности необходимо выполнить вычисление средних арифметических значений яркости пикселей отдельно по всем пикселям, лежащим слева от полосы, в пределах самой полосы и справа от полосы. Вычисление средней яркости пикселей отдельно для левой и правой части фона может быть необходимо ввиду того, что слои, лежащие слева и справа от слоя, представляющего анализируемую полосу, могут состоять из различного материала с различной электронной плотностью.



Рис. 50. Графики производных суммарных яркостей тестового изображения с выделением точек, соответствующих левой и правой границе полосы, для верхней и нижней части тестового изображения

Основным критерием при определении принадлежности произвольного пикселя изображения полосы является расположение его между левой и правой границами полосы на данной высоте (полоса не вертикальна и имеет наклон). В координатах пикселей изображения левая и правая границы полосы будут ограничены прямыми с уравнениями вида

$$x = ky + b. \quad (14)$$

При этом для левой границы

$$k_{л} = 2 \frac{Л_{в} - Л_{н}}{H}, \quad (15)$$

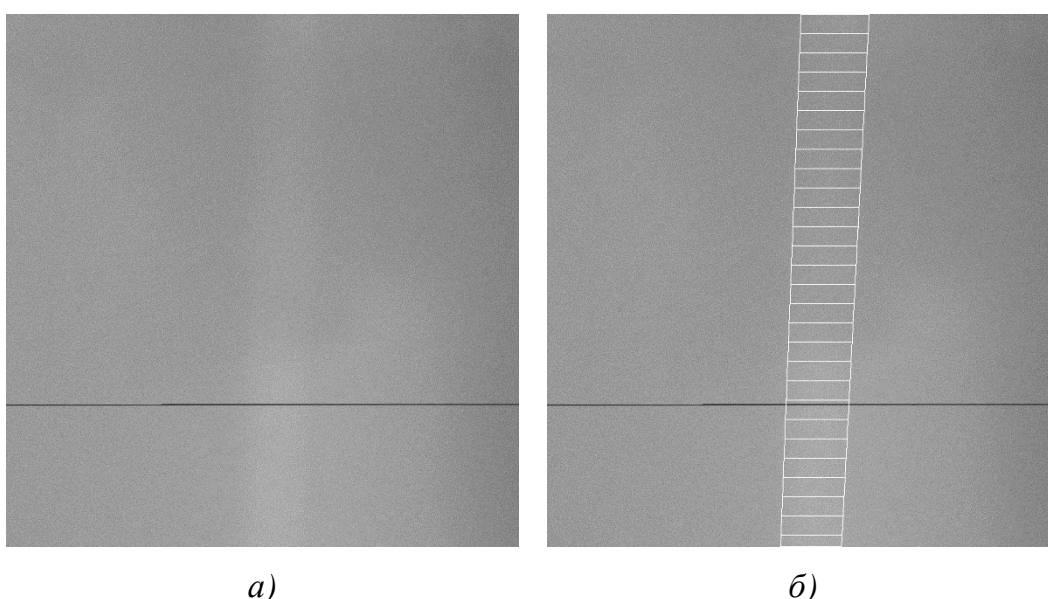
$$b_{л} = \frac{3Л_{н} - Л_{в}}{2}. \quad (16)$$

Для правой границы

$$k_{л} = 2 \frac{\Pi_{в} - \Pi_{н}}{H}, \quad (17)$$

$$b_{л} = \frac{3 \cdot \Pi_{н} - \Pi_{в}}{2}. \quad (18)$$

Имея уравнения для границ, можно автоматизированно отметить их на изображении. Например, на рис. 51 показан результат автоматизированного выделения полосы программой-анализатором, реализованной с использованием разработанного алгоритма.



*Рис. 51. Исходное тестовое изображение (а);
изображение с полосой, заштрихованной программой-анализатором (б)*

Кроме того, можно рассчитать параметры областей изображения, сопоставляемые с параметрами образца (ширину областей – с толщинами слоёв гетероструктуры, среднюю яркость – с электронной плотностью). Например, в табл. 7 приведены значения этих параметров для тестового изображения. Обозначение областей в этой таблице следующее:

- область 1 – область фона слева от полосы;
- область 2 – полоса;
- область 3 – область фона справа от полосы.

Таблица 8

Значения параметров областей, автоматизированно определённые по тестовому изображению

Область	Средняя толщина ¹ , %	Средняя яркость ² , %
Область 1	47,5	44,3
Область 2	12,6	46,3
Область 3	39,8	42

3.4.3. Решение общей задачи

Сведём решение общей задачи к вышеописанному решению базовой задачи, последовательно снимая установленные ограничения.

Случай неопределённости типа полосы

Пусть тип полосы на изображении изначально неизвестен. Предположим, что полоса не примыкает к краям и выполним при поиске центра полосы поиск обоих экстремумов. В случае если один из экстремумов окажется примыкающим к одному из краёв изображения, очевидно, что полоса имеет тип и положение центра, соответствующие другому экстремуму. В противном случае (наличие на фоне градиента от края) тип полосы соответствует тому экстремуму, значение которого (по ординате) окажется сильнее отличающимся от значения на ближайшем к нему краю.

Случай примыкания полосы к краю

Алгоритм действий принципиально не отличается от вышеприведённого. В данном случае непринципально, какой из экстремумов будет признан алгоритмом центром полосы, поскольку непринципально, что считать полосой, а что фоном.

Случай наличия нескольких полос

Алгоритм действий на первом этапе аналогичен алгоритму для случая одной полосы. В результате выделится наиболее интенсивная полоса. Выделенная полоса разбивает изображение на две части (слева и справа от неё), к каждой из которых впоследствии применяется

¹ Ширина всего изображения принята за 100 %.

² 0 % – черный цвет, 100 % – белый цвет.

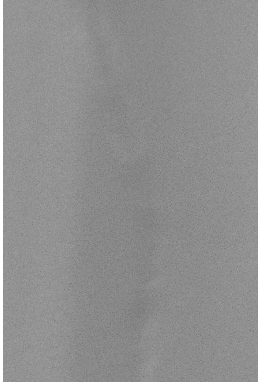
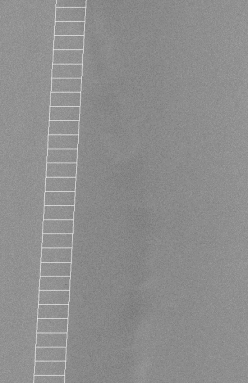
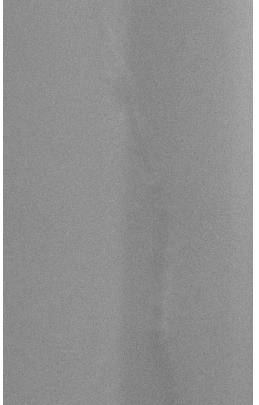
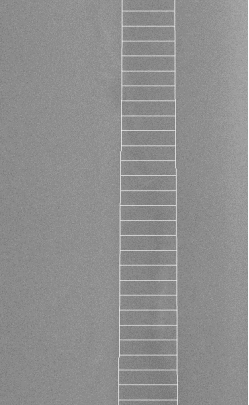
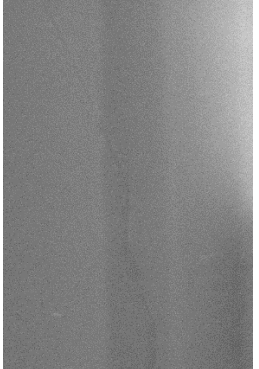
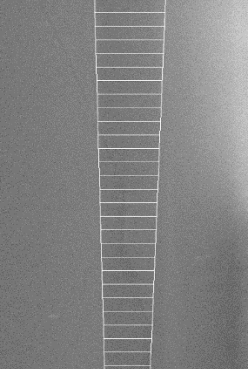
тот же алгоритм. Процесс продолжается, пока на изображениях удаётся найти полосу с шириной, превышающей некоторый минимум, априорно заданный исходя из предметной области.

3.4.4. Примеры выделения полос различного типа

В табл. 8 приведены изображения с полосами различного типа и результаты их автоматического выделения и штриховки.

Таблица 8

Примеры выделения полос

Исходное изображение	Результат работы алгоритма	Комментарий
		Задан поиск светлой полосы, найдена светлая полоса вдоль левого края тёмной области
		Задан поиск тёмной полосы, найдена тёмная область в центре
		Задан поиск тёмной полосы, найдена тёмная полоса в центре

Контрольные вопросы

1. Классификация методов цифровой обработки изображений.
2. Цифровая линейная фильтрация изображений.
3. Применение цифровой линейной фильтрации при анализе РЭМ-изображений полупроводниковых гетероструктур.
4. Цифровая частотная фильтрация изображений. Устранение высокочастотных шумов.
5. Применение цифровой частотной фильтрации при анализе РЭМ-изображений полупроводниковых гетероструктур.
6. Состав набора дифференцирующих масок Фрея – Чена и текстурные примитивы, соответствующие различным маскам набора.
7. Применение набора дифференцирующих масок Фрея – Чена для анализа текстуры изображения с использованием гистограммного подхода.
8. Оценка информативности текстуры по соотношению энергий текстурных примитивов на основе масок Фрея – Чена.
9. Задача сегментации изображений и её применение при анализе полупроводниковых гетероструктур.
10. Задача выделения слоёв гетероструктуры на РЭМ-изображении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для современного радиотехнического приборостроения при переходе на производство с использованием нанотехнологий актуально контролируемое, эффективное и экономичное производство наноструктур. Для обеспечения этих требований необходим контроль конструкторско-технологических параметров радиотехнических изделий, который представляет собой комплексные исследования, определяющие состав гетероструктур и их геометрические характеристики.

Как правило, контроль осуществляется на готовом изделии, поэтому начальной стадией является получение изображения с помощью электронной микроскопии. Интересующая область перехода оценивается относительно размеров образца, выделяются зоны с различными свойствами, определяется размер области для дальнейшего исследования и обработки изображений.

На каждом этапе контроля определяются параметры изделия: при исследовании с помощью РЭМ – размеры слоев и контрастные характеристики; с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследуются рельеф поверхности, граница перехода между подложкой, высоты структур; с помощью комбинационного рассеяния света (КРС) определяются параметры слоев гетероструктур.

После получения общей информации о структуре и размерах рабочей области следует рассматривать границы переходов с помощью зондового микроскопа, имеющего более высокую разрешающую способность.

В настоящее время задача обработки и анализа изображений в значительной степени автоматизирована на основе группы подходов, объединяемых под общим термином машинное (или техническое) зрение. В частности, обработанные изображения, полученные с по-

мощью электронного микроскопа, могут быть использованы для идентификации различных частей радиотехнических элементов. Например, использование метода, основанного на комбинации согласованных дифференцирующих масок, выделяющих наличие в области изображения текстурных особенностей различного типа, и гистограммных методов, позволяет классифицировать различные фрагменты изображения.

Данный подход (в том числе с другими наборами дифференцирующих масок) может применяться для анализа изображений и сигналов, например для сегментации, выделения специфических областей изображения, автоматического позиционирования по изображению и т.д.

Однако для решения задачи сегментации, в частности выделения слоёв полупроводниковых гетероструктур, в значительно большей мере подходят специализированные методы.

СПИСОК БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК

1. Алферов Ж. И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии // Успехи физических наук. – 2002. – Т. 172, № 9. – С. 1068.
2. Марголин В. И., Жабрев В. А., Тупик В. А. Физические основы микроэлектроники. – М. : Академия, 2008. – 400 с.
3. Yao N., Wang Z. Handbook of microscopy for nanotechnology. – New York : Kluwer academic publishers, 2005. – 743 p.
4. Задорин А. С., Марципака Е. Ю., Шибельгут А. А. Характеристики лазерного диода с микронеоднородностями активного слоя // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 95 – 99.
5. Ge/Si-фотодиоды и фототранзисторы со встроенными слоями квантовых точек Ge для волоконно-оптических линий связи / А. И. Якимов [и др.] // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 1. – С. 37 – 40.
6. Киселев В. Ф., Козлов С. Н., Зотеев А. В. Основы физики поверхности твердого тела. – М. : Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 1999. – 287 с.
7. Физика низкоразмерных систем / А. Я. Шик и [и др.]. – СПб. : Наука, 2001. – 160 с.
8. Фотопреобразователи на основе GaAs/Ge гетероструктур, полученных методом низкотемпературной ЖФЭ / В. П. Хвостиков [и др.] // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 29, № 14. – С. 46 – 49.
9. Chow P. P. Molecular beam epitaxy / Kern W., Vossen J.L // Thin Film Processes II. – Academic Press, Inc., (USA), 1991. – P. 133 – 175.
10. Пчеляков О. П. Молекулярно-лучевая эпитаксия: оборудование, приборы, технология // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 170, № 9. – С. 993 – 995.
11. Huang W., Dai J. Y., Hao J. H. Structural and resistance switching properties of ZnO/SrTiO₃/GaAs heterostructure grown by laser molecular beam epitaxy // Applied physics letters. – 2010. – Т. 97. – P. 162905.
12. Дубровский В. Г. Теория формирования эпитаксиальных наноструктур. – М. : Физматлит, 2009. – 352 с.
13. Федоров А. В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 195 с.
14. Ивин В. В., Махвиладзе Т. М., Валиев К. А. Теоретическое рассмотрение вопросов выбора оптимальной формы источника в оптической нанолитографии // Микроэлектроника. – 2004. – Т. 33, № 3. – С. 163 – 185.

15. Сейсян Р. П. Нанолитография в микроэлектронике (обзор) // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 8. – С. 1 – 14.
16. Ginger D. S., Zhang H., Mirkin C. A. The Evolution of Dip-Pen Nanolithography // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2004. – Т. 43, № 1. – Р. 30 – 45.
17. Панченко В. Я., Новодворский О. А., Голубев В. С. Технология лазерно-плазменного напыления пленок нанометровых толщин // Наука и технологии в промышленности. – 2006. – № 4. – С. 39 – 51.
18. Chrisey D. B., Hubler G. K. Pulsed laser deposition of thin. – Wiley-VCH., 2003. – Р. 648.
19. Native oxide top-and bottom-confined narrow stripe p-n $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As-GaAs-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ quantum well heterostructure laser / S. A. Maranowski [et al.] // *Applied physics letters*. – 1993. – Т. 63, № 12. – Р. 1660 – 1662.
20. Morinaga H., Suyama M., Ohmi T. Mechanism of Metallic Particle Growth and Metal-Induced Pitting on Si Wafer Surface in Wet Chemical Processing // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1994. – Т. 141, № 10. – Р. 2834 – 2841.
21. Зубков В. И. Диагностика гетероструктур с квантовыми ямами $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As/GaAs}$ методом вольт-фарадных характеристик: разрывы зон, уровни квантования, волновые функции // Физика и техника полупроводников. – 2007. – Т. 41, № 3. – С. 331 – 337.
22. Эллипсометрия – прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением / В. А. Швец [и др.] // *Российские нанотехнологии*. – 2009. – Т. 4, № 3. – С. 72.
23. Исследование особенностей формирования гетероструктур с квантовыми точками методами рентгеновской диагностики / А. А. Зайцев [и др.] // *Микроэлектроника*. – 2004. – Т. 33, № 1. – С. 35 – 41.
24. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М. : Техносфера, 2004. – 384 с.
25. Проблемы измерения геометрических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа / Ч. П. Волк [и др.] // *Труды ИОФАН*. – 2006. – Т. 62. – С. 77 – 120.
26. Фотодиоды с расширенным спектральным диапазоном 1.5 – 4.8 μm на основе гетероструктур $\text{InAs/InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$, работающие при комнатной температуре / Д. А. Старостенко [и др.] // *Письма в ЖТФ*. – 2011. – Т. 37, № 19. – С. 95 – 103.
27. Николичев Д. Е., Боряков А. В. Локальная диагностика состава полупроводниковых наносистем методом сканирующей оже-микроскопии. – Н. Новгород : Изд-во Нижегород. ун-та, 2011. – 110 с.

28. Смирнов В. И. Неразрушающие методы контроля параметров полупроводниковых материалов и структур. – Ульяновск : УЛГТУ, 2012. – 75 с.
29. Асеев А. Л. Нанотехнологии в полупроводниковой электронике // Вестник Российской академии наук. – 2006. – Т. 76, № 7. – С. 603 – 611.
30. Спивак Г. В., Сапарин Г. В., Быков М. В. Растровая электронная микроскопия // Успехи физических наук. – 1969. – Т. 99, № 12. – С. 635 – 672.
31. Гетероструктуры с квантовыми точками: Получение, свойства, лазеры (обзор) / Н. Н. Леденцов [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, № 4. – С. 385 – 410.
32. Raman spectroscopy on transition metals / В. Ren [et al.] // Analytical and bioanalytical chemistry. – 2007. – Т. 388, № 1. – Р. 29 – 45.
33. Raman scattering study of residual strain in GaAs/InP heterostructures / G. Attolini [et al.] // Journal of applied physics. – 1994. – Т. 75, № 8. – Р. 4156 – 4160.
34. Гребнев А. К., Гридин В. Н., Дмитриев В. П. Оптоэлектронные элементы и устройства. – М. : Радио и связь, 1998. – 336 с.
35. Алферов Ж. И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // Физика и техника полупроводников. – 1998. – Т. 32, № 1. – С. 3 – 18.
36. Сорокин П. Б., Чернозатонский Л. А. Полупроводниковые наноструктуры на основе графена // Успехи физических наук. – 2013. – Т. 183, № 2. – С. 113 – 132.
37. Структурные и оптические свойства гетероструктур на основе GaAs с квантовыми ямами Ge и Ge/InGaAs / В. Я. Алешкин [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, № 5. – С. 621 – 625.
38. Патент 2309501 Российская Федерация, МПК H01S5/32. Инжекционный полупроводниковый лазер / Д. М. Демидов [и др.]. – 2007. – № 30.
39. Научно-производственное предприятие «Инжект» : [сайт]. – URL: <http://www.inject-laser.ru/products/oscillators> (дата обращения: 15.04.2014).
40. Измерение глубоких микрорельефов и стереосъемка в растровой электронной микроскопии / Д. А. Саксеев [и др.] // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 1. – С. 131 – 136.
41. Электронная микроскопия структур на основе GaAs с квантовыми точками InAs и As, разделенными барьером AlAs / В. Н. Неве-

домский [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, № 9. – С. 1196 – 1203.

42. Новые возможности растровой электронной микроскопии для исследования лазеров на основе InAsSb/InAsSbP / В. А. Соловьев [и др.] // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23, № 6. – С. 54 – 60.

43. Суворов Э. В. Физические основы экспериментальных методов исследования реальной структуры кристаллов [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.physchem.msu.ru> (дата обращения: 10.09.2011).

44. Спивак Г. В., Сапарин Г. В., Антошин М. К. Цветной контраст в растровой электронной микроскопии // Успехи физических наук. – 1974. – Т. 113, № 8. – С. 695 – 699.

45. Быков В. А. Разработка и освоение производства приборов и оборудования для нанотехнологии // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2, № 1 – 2. – С. 32 – 36.

46. Новиков Ю. А., Тодуа П. А. Метрология линейных измерений нанометрового диапазона – основа микроэлектроники и нанотехнологии // Мир измерений. – 2005. – № 8. – С. 4 – 9.

47. Диагностика слоистых наноразмерных компонент полупроводниковой оптоэлектроники при помощи комплекса установок микроскопии высокого разрешения / М. А. А. Номан [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2011. – № 4. – С. 2 – 7.

48. Исследование полупроводниковых слоистых систем фотоники / Д. В. Абрамов [и др.] // Известия РАН. Серия физическая. – 2012. – Т. 76, № 6. – С. 694 – 697.

49. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

50. Сойфер В. А. Компьютерная обработка изображений. Ч. 2. Методы и алгоритмы // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 3. – С. 110 – 121.

51. Прэтт У. Цифровая обработка изображений : в 2 кн. – М. : Мир, 1982. – 311 с.

52. Шамин П. Ю., Номан М. А. А., Хорьков К. С. Классификация текстурных свойств сегментов растрового изображения с помощью набора дифференцирующих масок // International Journal of Open Information Technologies. – 2013. – Т. 1, № 2. – С. 1 – 7.

53. Шамин П. Ю., Номан М. А. А., Хорьков К. С. Распознавание изображений комплексом дифференцирующих масок // Естественные и математические науки : материалы междунар. заоч. науч.-практ. конф., 1 апр. 2013 г. – Новосибирск : СибАК, 2013. – С. 42 – 48.

54. Park R. H. A Fourier interpretation of the Frei-Chen edge masks // Pattern Recognition Letters. – 1990. – Т. 11, № 9. – Р. 631 – 636.

55. Распознавание людей по изображению лица с использованием текстурных характеристик / М. Ю. Звягин [и др.] // Труды XVII Всерос. науч.-метод. конф. «Телематика'2010», 21 – 24 июня 2010 г. – Т. 1. – Секция А. – СПб. : Университетские коммуникации, 2010. – С. 257 – 259. – ISBN 978-5-7577-0354-1.

56. Шапиро Л., Стокман Дж. Компьютерное зрение : пер. с англ. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с. – ISBN 0-13-030796-3 (англ.). – ISBN 5-94774-384-1 (рус.).

57. Еременко В. Т., Тютякин А. В., Кондрашин А. А. Методологические аспекты обработки изображений в автоматизированных системах диагностики // Информационные системы и технологии. – 2011. – Т. 64, № 2. – С. 19 – 26.

58. Kurada S., Bradley C. A machine vision system for tool wear assessment // Tribology International. – 1997. – Т. 30, № 4. – Р. 295 – 304.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

1. Марголин, В. И. Физические основы микроэлектроники / В. И. Марголин, В. А. Жабрев, В. А. Тупик. – М. : Академия, 2008. – 400 с.

2. Федоров, А. В. Физика и технология гетероструктур, оптика квантовых наноструктур / А. В. Федоров. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2009. – 195 с.

3. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М. : Техносфера, 2004. – 384 с.

4. Смирнов, В. И. Неразрушающие методы контроля параметров полупроводниковых материалов и структур / В. И. Смирнов. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – 75 с.

5. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

6. Сойфер, В. А. Компьютерная обработка изображений. Ч. 2. Методы и алгоритмы / В. А. Сойфер // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 3. – С. 110 – 121.

7. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений : в 2 кн. – М. : Мир, 1982.

8. Шапиро, Л. Компьютерное зрение : пер. с англ. / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М. : Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с. – ISBN 0-13-030796-3 (англ.). – ISBN 5-94774-384-1 (рус.).

Учебное издание

НОМАН Мустафа Абдулла Али
ХОРЬКОВ Кирилл Сергеевич
ШАМИН Павел Юрьевич

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Учебное пособие

Подписано в печать 31.10.14.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 4,65. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

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