

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

С.Г. Еханин

## **МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР**

Методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Методы диагностики полупроводниковых структур»

Томск  
2022

**УДК 53.097; 537.9**  
**ББК 22.35**  
**Е 930**

**Рецензент**

**Романовский М.Н.**, доцент кафедры конструирования узлов и деталей  
РЭА, канд. техн. наук

**Еханин Сергей Георгиевич**

**Е 930** Методы диагностики полупроводниковых структур: методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Методы диагностики полупроводниковых структур» / С.Г. Еханин. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022. – 21 с.

В методических указаниях кратко изложены теоретические обоснования тем практических занятий и самостоятельной работы по дисциплине «Методы диагностики полупроводниковых структур». Рассмотрены виды дефектов, электрическая деградация и основные методы диагностики полупроводниковых гетероструктур. На основе анализа содержания дисциплины формулируются темы практических занятий и самостоятельной работы. Приводится методика проведения практических занятий. Дается описание интерактивных методов обучения при выполнении самостоятельной работы.

Предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов, интересующихся проблемами диагностики полупроводниковых гетероструктур.

Одобрено на заседании каф. КУДР протокол № 233 от 17 февраля 2022 г.

**УДК 53.097; 537.9**  
**ББК 22.35**

© Еханин С.Г., 2022  
© Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2022

## Оглавление

1 ВВЕДЕНИЕ .....	4
2 ОБОСНОВАНИЕ ТЕМ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ .....	5
<b>2.1 Устройства на полупроводниковых гетероструктурах</b> .....	5
<b>2.2 Дефекты структуры и электрическая деградация полупроводниковых гетероструктур в процессе работы</b> .....	5
<b>2.3 Электрические методы диагностики</b> .....	7
<b>2.4 Оптические методы диагностики</b> .....	9
<b>2.5 Структурные методы диагностики: зондовые методы исследования</b>	11
3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ.....	15
<b>3.1 Темы практических занятий</b> .....	15
Таким образом, предлагаемые темы практических занятий расширят кругозор студентов, позволят закрепить знания по данной дисциплине и будут способствовать формированию необходимых компетенций. ....	15
<b>3.2 Сценарий проведения практического занятия</b> .....	15
4 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ .....	18
<b>4.1 Темы самостоятельной работы</b> .....	19
5 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	20

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Методы диагностики полупроводниковых структур» (Б1.В.05) – входит в учебный план набора 2021 года в блок 1 (вариативная часть) магистратуры специальности 11.04.04 – Электроника и нанoeлектроника (приборы, технологии контроля качества и диагностики).

В рабочей программе «Методы диагностики полупроводниковых структур» курса сформулирована следующая цель преподавания данной дисциплины: Сформировать у студентов знания по физическим основам методов исследования и диагностики полупроводниковых структур микро и нанoeлектроники.

### *Задачи изучения дисциплины:*

- изучение основных методов измерения электрофизических параметров полупроводниковых гетероструктур;
- изучение процессов электрической деградации полупроводниковых гетероструктур;
- изучение методов электронной микроскопии и сканирующей зондовой микроскопии.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 144 часа (4з.е.), а число аудиторных занятий составляет 56 часов (из них 22 часа практические занятия) и 88 часов самостоятельной работы.

Таким образом, чтобы обеспечить в дальнейшем высокое качество прохождения практических, лабораторных занятий и самостоятельной работы студентов, необходимо обратить основное внимание на изложение основополагающего материала. Т.е. ознакомить студентов с основными физическими закономерностями электрической деградации полупроводниковых структур и фундаментальными знаниями, лежащими в основе современных методов исследования полупроводниковых структур микро- и нанoeлектроники. Изучить принципы и режимы работы зондовых микроскопов, их конструкцию и технические характеристики, общую методику физических экспериментов с использованием современных методов диагностики полупроводниковых гетероструктур.

Эти знания, несомненно, расширят кругозор студентов, помогут глубже понять проблемы стоящие перед разработчиками аппаратуры и должны помочь приобрести следующие компетенции:

ПКР-13 – Способность к организации и проведению экспериментальных исследований с применением современных средств и методов

ПКС-1 – Способность планировать проведение работ по измерению параметров электронных средств и их компонентов

## 2 ОБОСНОВАНИЕ ТЕМ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ И САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Темы практических занятий и самостоятельной работы посвящены таким тенденциям в развитии методов диагностики полупроводниковых структур, как новые возможности электрических методов, оптической микро- и спектроскопии и другим методам неразрушающего контроля структуры твердых тел, тонких пленок и гетероструктур.

### **2.1 Устройства на полупроводниковых гетероструктурах**

Практически вся современная микро- и нано-электроника построена на полупроводниковых гетероструктурах: сверхъяркие светоизлучающие диоды, квантовые каскадные лазеры, микропиксельные лавинные фотодиоды, резонансно-туннельные приборы (диоды и транзисторы), транзисторы для СВЧ-электроники и др.

Наиболее яркими представителями устройств на полупроводниковых гетероструктурах являются современные светоизлучающие диоды (СИД). СИД на основе GaN являются перспективными элементами приборов твердотельного освещения. По сравнению с лампами накаливания светодиоды способны обеспечить более высокий квантовый выход и долговременную стабильность [1]. Однако, процессы деградации продолжают оставаться важной проблемой для светодиодов. Многие производители светодиодных приборов намеренно завышают рабочие токи для увеличения яркости свечения и улучшения соотношения цена/люмен, однако чрезмерное завышение рабочих токов может привести к тому, что срок службы прибора окажется меньше заявленного. Скрытые дефекты, возникающие как в процессе изготовления светодиода, так и в процессе его эксплуатации могут значительно сократить срок службы прибора, особенно в условии завышенных плотностей рабочих токов. Вследствие этого, чрезвычайно актуальными являются применения методов неразрушающего контроля и диагностики оптической и электрической деградации СД в ходе испытаний, которые проводятся при повышенных плотностях рабочего тока [2].

### **2.2 Дефекты структуры и электрическая деградация полупроводниковых гетероструктур в процессе работы**

Известно, что нитрид галлия является одним из перспективных широкозонных полупроводниковых материалов, которые используются для создания светодиодных источников света, эффективных коротковолновых лазеров, высокочастотных мощных транзисторов, систем с оптической памятью и др. Однако серьезным препятствием на пути совершенствования таких приборов, является отсутствие достаточно совершенных подложек, пригодных для создания на их основе разнообразных эпитаксиальных структур [3]. Это приводит к тому, что еще до работы таких устройств в реальных схемах и рабочих электрических режимах, гетероструктура уже имеет значительные

нарушения, которые ухудшают эксплуатационные свойства приборов на их основе. Достаточно привести значения плотности выходов линейных дефектов на поверхность гетероструктуры на основе GaN, которая составляет  $10^{10}$  1/см<sup>2</sup>, что очень много [4].

Что касается точечных дефектов, то даже при низкотемпературных методах эпитаксии выявлено методами люминесцентного анализа наличие достаточно интенсивной желто-зеленой люминесценции, причина которой связана с отклонением состава пленки от стехиометрического состава [5]. Это отклонение связано с обогащением ростовой поверхности избытком галлия из-за дефицита активного азота в зоне роста. Как известно, желто-зеленая полоса люминесценции поверхности гетероструктуры связана с точечными дефектами, включающими в себя вакансии азота [5,6].

При испытаниях полупроводниковых гетероструктур даже в номинальных рабочих режимах было показано [6], что даже при комнатной температуре наблюдалось образование точечных дефектов, за счет взаимодействий горячих электронов с кристаллической решеткой гетероструктуры. При этом предполагалось, что, что атомы смещались при передаче избыточной кинетической энергии электронами, пересекающими гетерограницу с разрывом зон проводимости (из широкозонной части в узкозонную). Кинетическая энергия горячих электронов может быть передана решетке за время порядка времени релаксации на диффузионной длине не только за счет рассеяния на фононах, но и за счет подпорогового образования дефектов. При теоретическом анализе подпорогового образования дефектов рассуждения аналогичны с теорией радиационной физике твердого тела, в которой рассматривается взаимодействие атомов кристалла с быстрыми частицами. Отличие заключается в том, что энергия горячих электронов значительно меньше пороговой энергии смещения атомов и процесс взаимодействия идет через возбуждение электронной подсистемы. Смещение атомов в решетке горячими электронами будет происходить с некоторой вероятностью, но при больших плотностях тока такое смещение будет существенно.

Показано [6], что спектры люминесценции и электрические свойства голубых и зеленых светодиодов из InGaN/AlGaN/GaN с одиночными квантовыми ямами заметно изменяются в течение  $100 \div 2000$  ч работы при токе 80 мА. Возрастание интенсивности люминесценции при токах  $\sim 15$  мА и увеличение концентрации заряженных акцепторов в области пространственного заряда в первый период старения объясняется дополнительной активацией акцепторов Mg из-за выхода атомов Н из остаточных комплексов Mg–Н. Медленное падение интенсивности люминесценции и падение концентрации заряженных акцепторов во второй период может быть объяснено созданием донорных дефектов при длительной инжекции горячих электронов в квантовую яму. Первый период для голубых диодов ( $70 \div 100$  ч) короче, чем для зеленых ( $800 \div 1000$  ч), что обусловлено большей компенсацией акцепторов и меньшими электрическими полями в зеленых диодах.

Предложенная модель инжекционно-стимулированного подпорогового образования дефектов [6] может объяснить эффекты электрического старения (разрыв связей Mg–N или связей Ga–N горячими электронами, инжектируемыми в квантовую яму).

### 2.3 Электрические методы диагностики

*Изучение изменений вольтамперной, вольт-фарадной и других электрических характеристик.* Основным механизмом деградации при протекании больших прямых токов через светодиод является диффузионное перераспределение примесей в гетеропереходах и неустойчивости в области контактов [2]. По мнению многих авторов, после длительной работы сверхъярких светодиодов в реальных условиях наибольшее изменение электрофизических характеристик происходит в области микротоков [6,7]. Увеличение микротока, протекающего через светодиод при диагностике, по-видимому, обусловлено тем, что возникает дополнительный ток, проходящий через область с повышенной электропроводностью, вызванной диффузией примесей в некоторые локальные области перехода с нарушенной структурой. Локальный перегрев при испытаниях возникает из-за: неоднородности протекания тока (за счет эффекта растекания тока); неоднородности инжекции; неоднородности структуры. Локальный перегрев ведет к дополнительному нарушению структуры p-n-перехода и образованию в нем участков с повышенной электропроводностью. Кроме того, в процессе деградации увеличивается плотность состояний на гетерограницах InGaN/GaN и формируется электрический диполь [8]. При формировании диполя потенциальные барьеры в n- и p-слоях GaN изменяются, изменяется и емкость. Это приводит к возрастанию токов утечки, а также к временной задержке растекания инжекционного тока и распределения интенсивности ЭЛ по площади. Поэтому изучение изменений вольтамперной, вольтфарадной и других электрических и оптических характеристик может дать дополнительную информацию по диагностике состояния гетероструктуры после испытаний.

*Прецизионные измерения интенсивности и спектров свечения СИД.* Стандарт LM-80 [9] предписывает измерять, насколько снижается световой поток светодиодного источника через определенное количество часов его работы. Это значение описывает термин «спад светового потока». Обратным по отношению к спаду светового потока является понятие стабильности светового потока. Термин «стабильность светового потока» является промышленным стандартом для обозначения доли светового потока, сохраняемой источником света в течение указанного времени, выраженной в процентах от исходного светового потока. Поэтому для исследуемых полупроводниковых источников света основным результатом деградации является уменьшение значения светоотдачи. Допустимо его снижение не более чем на 50%. Поэтому срок службы определяется как время, за которое световой поток снизится до 50% от начального значения [9]. Во многих литературных источниках [1] отмечается,

что в результате деградации СИД до выхода светодиода из строя наблюдается смещение спектральных характеристик в длинноволновую область, так называемое красное смещение, что связано с уменьшением ширины запрещенной зоны. Это можно объяснить появлением в ней во время деградации дополнительных акцепторных локальных уровней. Основная полоса излучения уширялась с длинноволновой стороны. Сильные изменения спектров были обнаружены при малых токах, когда туннельная и инжекционная компоненты токов одного порядка. Интенсивность ЭЛ уменьшалась, но доля туннельного излучения увеличивалась [6]. Интенсивность пробойной ЭЛ также уменьшалась по мере старения, при этом относительная доля желто-зеленой полосы увеличивалась. Известно, что желто-зеленая полоса обусловлена комплексами с участием дефектов структуры, которые образуются при пропускании прямого тока на границах области пространственного заряда [5,6].

**Оценка локального перегрева в активной области СИД.** При анализе тепловых свойств мощных СИД обычно полагают, что температура и плотность мощности однородно распределены в плоскости гетероперехода. Однако даже при однородном распределении источников тепла в структуре в результате неравномерного отвода тепла от ее различных частей распределение температуры будет неоднородным [10]. Экспоненциальная зависимость плотности тока от температуры приводит к перераспределению плотности мощности в структуре и увеличению этой неоднородности. Внутренняя квантовая эффективность гетеропереходных СИД с ростом температуры уменьшается, что приводит к увеличению положительной тепловой обратной связи, поэтому полная электрическая мощность, преобразуемая в гетероструктуре в тепло, и плотность греющей мощности в более нагретых областях структуры будут возрастать [10]. В результате действия указанных механизмов положительной тепловой обратной связи зависимость максимальной температуры гетероперехода от полного тока СИД будет нелинейной. Степень нелинейности может служить мерой неоднородности плотности мощности и температуры в приборной структуре в качестве оценки ее качества. Перегрев активной области гетероструктуры появляется и зависит от: джоулева разогрева пассивных областей гетероструктуры протекающим прямым током и его растеканием в зависимости от сложных геометрий контактных площадок; зависимости квантовой эффективности светодиода от рабочего тока светодиода, его температуры, размеров и материала теплоотвода; температурной зависимости коэффициентов теплопроводности материалов структуры и конструкции СИД [10].

Непосредственно измерить температуру активной области СИД невозможно, т. к. ее размеры очень малы и составляют менее 100 нм. Кроме того, градиент температуры вблизи этой зоны велик, что резко снижает точность измерений. На практических занятиях по данной дисциплине рассматриваются два косвенных метода определения температуры активной области СИД: метод прямого напряжения [1, 11] и спектральный метод бесконтактного определения

температуры активной области СИД [1, 12]. Следует отметить, что бесконтактные методы измерения температуры полупроводниковых источников света являются весьма перспективными для осуществления контроля температуры как отдельных изделий, так и в составе светотехнических устройств, например в лампах освещения.

## **2.4 Оптические методы диагностики**

**Ближнепольная оптическая микроскопия (БОМ)** — оптическая микроскопия, обеспечивающая разрешение лучшее, чем у обычного оптического микроскопа. Повышение разрешения БОМа достигается детектированием рассеяния света от изучаемого объекта на расстояниях меньших, чем длина волны света [13]. В случае, если зонд (детектор) микроскопа ближнего поля снабжен устройством пространственного сканирования, то такой прибор называют сканирующим оптическим микроскопом ближнего поля. Такой микроскоп позволяет получать растровые изображения поверхностей и объектов с разрешением ниже дифракционного предела. Если в качестве зонда взять миниатюрную диафрагму с отверстием в несколько нанометров - апертуру, то в соответствии с законами волновой оптики, видимый свет (с длиной волны несколько сот нанометров) проникает в такое маленькое отверстие, но не далеко, а на расстояние, сопоставимое с размерами отверстия. Если в пределах этого расстояния, в так называемом «ближнем поле», поставить образец, рассеянный от него свет будет регистрироваться. Перемещая диафрагму в непосредственной близости от образца, как в туннельном микроскопе, получим растровое изображение поверхности. Уникальность ближнепольной оптической микроскопии по сравнению с другими сканирующими методами состоит в том, что изображение строится непосредственно в оптическом диапазоне, в том числе видимого света, однако разрешение многократно превышает разрешение традиционных оптических систем.

**Конфокальный микроскоп** [13,14] — оптический микроскоп, обладающий значительным контрастом по сравнению с обычным микроскопом, что достигается использованием апертурной диафрагмы, размещённой в плоскости изображения и ограничивающей поток фонового рассеянного света. Эта методика завоевала популярность в научных исследованиях в биологии, физике полупроводников и спинтронике.

**Рамановская спектроскопия** [14] (спектроскопия комбинационного рассеяния) — вид спектроскопии, в основе которой лежит способность исследуемых систем (молекул) к неупругому (рамановскому или комбинационному) рассеянию монохроматического света.

Суть метода заключается в том, что через образец исследуемого вещества пропускают луч с определенной длиной волны, который при контакте с образцом рассеивается. Полученные лучи с помощью линзы собираются в один пучок и пропускаются через светофильтр, отделяющий слабые рамановские лучи от более интенсивных рэлеевских. «Чистые» рамановские лучи усиливаются и

направляются на детектор, который фиксирует их спектр. Комбинационное рассеяние света (эффект Рамана) — неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества (твёрдого, жидкого или газообразного), сопровождающееся заметным изменением частоты излучения. В отличие от обычного (рэлеевского) рассеяния, в случае комбинационного рассеяния света в спектре рассеянного излучения появляются спектральные линии, число и расположение которых определяется молекулярным строением вещества. Преимущественно как источник возбуждающего света используют лазеры. Лазерный луч, учитывая его малый диаметр (~ 1 мм), несложно сфокусировать на образце. Рассеянные лучи направляют на светофильтр чаще с помощью системы сборных и фокусирующих линз, хотя также применяют систему зеркал. В связи с малой интенсивностью рамановского сигнала в качестве детектора применяются высокочувствительные фотодетекторы. Спектроскопия комбинационного рассеяния света (или рамановская спектроскопия) — эффективный метод химического анализа, изучения состава и строения веществ.

**Рамановский эффект и его применение в микроскопии [14].** В рамановской спектроскопии происходит возбуждение молекулы и переход из ее основного квантового состояния в колебательное квантовое с последующим возвращением в исходное. При этом возникает энергетический сдвиг между падающим и рассеянным светом, являющийся уникальной характеристикой каждой молекулы, что дает возможность производить химическую идентификацию соединений в образце. Совмещение рамановского спектрометра с современным конфокальным микроскопом позволяет добиться пространственного разрешения до 200 нм в поперечном направлении и до 500 нм по вертикали. Следует отметить, что в данном методе для возбуждения молекул используется видимый свет.

Важно, что детектора достигает только свет из фокальной плоскости изображения. Это позволяет значительно увеличить контраст и повысить разрешение. Для устранения влияния отраженного лазерного излучения используются специальные фильтры, а рассеянное рамановское излучение регистрируется спектрометром сочлененным с ПЗС-фотодетектором. В таком сочетании время, затрачиваемое на получение рамановского спектра для каждого пикселя изображения, варьируется от 760 мкс до 100 мс. При объединении отдельных спектров на выходе формируется рамановское изображение, состоящее из десятков тысяч отдельных спектров.

Изображение, генерируемое из мультиспектрального файла, получается совмещением отдельных спектров по одной выбранной рамановской линии или при анализе различных свойств пика, например, полуширины минимумов/максимумов или его положения. Конфокальная регулировка для прозрачных образцов позволяет осуществлять глубинный анализ и генерировать 3D-модели.

## 2.5 Структурные методы диагностики: зондовые методы исследования

**Сканирующий туннельный микроскоп** [15]. Исторически первым в семействе зондовых микроскопов появился сканирующий туннельный микроскоп. Принцип работы СТМ основан на явлении туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер между металлическим зондом и проводящим образцом во внешнем электрическом поле. В СТМ зонд подводится к поверхности образца на расстояния в несколько ангстрем. При этом образуется туннельно-прозрачный потенциальный барьер, величина которого определяется, в основном, значениями работы выхода электронов из материала зонда  $\phi_p$  и образца  $\phi_s$ . При качественном рассмотрении барьер можно считать прямоугольным с эффективной высотой, равной средней работе выхода материалов. При приложении к туннельному контакту разности потенциалов  $V$  между зондом и образцом появляется туннельный ток.

В процессе туннелирования участвуют, в основном, электроны с энергией в окрестности уровня Ферми  $E_F$ . Экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния позволяет осуществлять регулирование расстояния между зондом и образцом в туннельном микроскопе с высокой точностью. СТМ представляет собой электромеханическую систему с отрицательной обратной связью. Система обратной связи поддерживает величину туннельного тока между зондом и образцом на заданном уровне ( $I_0$ ), выбираемом оператором. Контроль величины туннельного тока, а следовательно, и расстояния зонд-поверхность осуществляется посредством перемещения зонда вдоль оси  $Z$  с помощью пьезоэлектрического элемента.

Изображение рельефа поверхности в СТМ формируется двумя методами. По методу постоянного туннельного тока зонд перемещается вдоль поверхности, осуществляя растровое сканирование; при этом изменение напряжения на  $Z$ -электроде пьезоэлемента в цепи обратной связи (с большой точностью повторяющее рельеф поверхности образца) записывается в память компьютера в виде функции  $Z = f(x, y)$ , а затем воспроизводится средствами компьютерной графики.

При исследовании атомарно гладких поверхностей часто более эффективным оказывается получение СТМ изображения поверхности по методу постоянной высоты  $Z = \text{const}$ . В этом случае зонд перемещается над поверхностью на расстоянии нескольких ангстрем, при этом изменения туннельного тока регистрируются в качестве СТМ изображения поверхности. Сканирование производится либо при отключенной ОС, либо со скоростями, превышающими скорость реакции ОС, так что ОС обрабатывает только плавные изменения рельефа поверхности. В данном способе реализуются очень высокие скорости сканирования и высокая частота получения СТМ изображений, что позволяет вести наблюдение за изменениями, происходящими на поверхности, практически в реальном времени. Высокое пространственное разрешение СТМ определяется экспоненциальной зависимостью туннельного тока от расстояния до поверхности. Разрешение в направлении по нормали к поверхности достигает

долей ангстрема. Латеральное же разрешение зависит от качества зонда и определяется, в основном, не макроскопическим радиусом кривизны кончика острия, а его атомарной структурой. При правильной подготовке зонда на его кончике с большой вероятностью находится либо одиночный выступающий атом, либо небольшой кластер атомов, который локализует его на размерах, много меньших, чем характерный радиус кривизны острия.

Действительно, туннельный ток протекает между поверхностными атомами образца и атомами зонда. Атом, выступающий над поверхностью зонда, находится ближе к поверхности на расстояние, равное величине периода кристаллической решетки. Поскольку зависимость туннельного тока от расстояния экспоненциальная, то ток в этом случае течет, в основном, между поверхностью образца и выступающим атомом на кончике зонда.

С помощью таких зондов удается получать пространственное разрешение вплоть до атомарного, что продемонстрировано многими исследовательскими группами на образцах из различных материалов [15].

**Атомно-силовой микроскоп (АСМ)** был изобретён в 1986 году Гердом Биннигом, Кэлвином Куэйтом и Кристофером Гербером. В основе работы АСМ лежит силовое взаимодействие между зондом и поверхностью, для регистрации которого используются специальные зондовые датчики, представляющие собой упругую консоль с острым зондом на конце. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью.

Качественно работу АСМ можно пояснить на примере сил Ван-дер-Ваальса.

В общем случае данная сила имеет как нормальную к поверхности, так и латеральную (лежащую в плоскости поверхности образца) составляющие. Реальное взаимодействие зонда с образцом имеет более сложный характер, однако основные черты данного взаимодействия сохраняются - зонд АСМ испытывает притяжение со стороны образца на больших расстояниях и отталкивание на малых. Получение АСМ изображений рельефа поверхности связано с регистрацией малых изгибов упругой консоли зондового датчика. В атомно-силовой микроскопии для этой цели широко используются оптические методы. Оптическая система АСМ юстируется таким образом, чтобы излучение полупроводникового лазера фокусировалось на консоли зондового датчика, а отраженный пучок попадал в центр чувствительной области фотоприемника. В качестве позиционно - чувствительных фотоприемников применяются четырехсекционные полупроводниковые фотодиоды.

При сканировании образца в режиме  $\Delta Z = \text{const}$  зонд перемещается вдоль поверхности, при этом напряжение на Z-электроде сканера записывается в память компьютера в качестве рельефа поверхности  $Z = f(x, y)$ . Пространственное разрешение АСМ определяется радиусом закругления зонда и чувствительностью системы, регистрирующей отклонения консоли. В

настоящее время реализованы конструкции АСМ, позволяющие получать атомарное разрешение при исследовании поверхности образцов.

Зондирование поверхности в атомно-силовом микроскопе производится с помощью специальных зондовых датчиков, представляющих собой упругую консоль – кантилевер (cantilever) с острым зондом на конце. Датчики изготавливаются методами фотолитографии и травления из кремниевых пластин. Упругие консоли формируются, в основном, из тонких слоев легированного кремния,  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Один конец кантилевера жестко закреплен на кремниевом основании - держателе. На другом конце консоли располагается собственно зонд в виде острой иглы. Радиус закругления современных АСМ зондов составляет  $1 \div 50$  нм в зависимости от типа зондов и технологии их изготовления. Угол при вершине зонда -  $10 \div 20$  °. Силу взаимодействия зонда с поверхностью  $F$  можно оценить, зная  $k$  – жесткость кантилевера;  $\Delta Z$  – величину, характеризующая его изгиб. Коэффициенты жесткости кантилеверов  $k$  варьируются в диапазоне  $10^{-3} \div 10$  Н/м в зависимости от используемых при их изготовлении материалов и геометрических размеров. При работе зондовых АСМ датчиков в колебательных режимах важны резонансные свойства кантилеверов.

Собственные частоты изгибных колебаний консоли прямоугольного сечения и резонансная частота кантилевера определяется их геометрическими размерами и свойствами материала. Частоты основных мод лежат в диапазоне  $10 \div 1000$  кГц. Добротность кантилеверов, в основном, зависит от той среды, в которой они работают.

Типичные значения добротности при работе в вакууме составляют  $10^3 - 10^4$ . На воздухе добротность снижается до  $300 - 500$ , а в жидкости падает до  $10 - 100$ . В атомно-силовой микроскопии применяются, в основном, зондовые датчики двух типов – с кантилевером в виде балки прямоугольного сечения и с треугольным кантилевером, образованным двумя балками. Иногда зондовые датчики АСМ имеют несколько кантилеверов различной длины (а значит, и различной жесткости) на одном основании. В этом случае выбор рабочей консоли осуществляется соответствующей юстировкой оптической системы атомно-силового микроскопа.

Зондовые датчики с треугольным кантилевером имеют при тех же размерах большую жесткость и, следовательно, более высокие резонансные частоты. Чаще всего они применяются в колебательных АСМ методиках [15]. Изготовление зондовых датчиков для АСМ представляет собой достаточно сложный технологический процесс, включающий в себя операции фотолитографии, ионной имплантации, химического и плазменного травления.

Для изготовления зондовых датчиков используются пластины кристаллического кремния ориентации (110). На поверхность пластины осаждается тонкий слой фоторезиста (этап 2). Затем фоторезист экспонируется через фотошаблон, и часть фоторезиста удаляется посредством химического травления. Далее проводится имплантация ионов бора, так что ионы проникают

на глубину порядка 10 мкм в область кремния, не защищенную фоторезистом (этап 3). После этого фоторезист смывается в специальном травителе, и затем проводится термический отжиг пластины, в результате которого атомы бора встраиваются в кристаллическую решетку кремния. Кремний, легированный бором, образует так называемый стоп-слой, который останавливает процесс травления для некоторых селективных травителей. Затем на обратной стороне пластины вновь проводится фотолитография, в результате которой формируется слой фоторезиста точно над областью, имплантированной бором. После этого пластина покрывается тонким слоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (этап 4). Затем проводится селективное травление фоторезиста, причем в процессе растворения фоторезист набухает и срывает расположенную непосредственно над ним тонкую пленку  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (этап 5).

Пластина кремния протравливается насквозь до стоп-слоя с помощью селективного травителя, который взаимодействует с кремнием и не взаимодействует с легированным кремнием и слоем  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , (этап 6). После этого  $\text{Si}_3\text{N}_4$  смывается, и на обратной стороне пластины в легированной области методом фотолитографии формируются островки из фоторезиста (этап 7,8). Затем проводится травление кремния, в результате которого получаются столбики кремния под островками фоторезиста (этап 9). Далее с помощью плазменного травления из столбиков кремния формируются иглы (этап 10,11). Для улучшения отражательных свойств кантилеверы с обратной стороны (по отношению к острию) покрываются тонким слоем металла (Al, Au) методом вакуумного осаждения.

В результате данных технологических операций изготавливается целый набор зондовых датчиков на одной кремниевой пластине. Для проведения электрических измерений на зонд наносятся проводящие покрытия из различных материалов (Au, Pt, Cr, W, Mo, Ti,  $\text{W}_2\text{C}$  и др.). В магнитных АСМ датчиках [15] зонды покрываются тонкими слоями ферромагнитных материалов, таких как Co, Fe, CoCr, FeCr, CoPt и др.

### 3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

В рабочей программе «Методы диагностики полупроводниковых структур» курса сформулирована следующая цель преподавания данной дисциплины: Сформировать у студентов знания по физическим основам методов исследования и диагностики полупроводниковых структур микро и наноэлектроники.

Однако прежде необходимо ознакомить студентов с теоретическими разделами выбранных тем практических занятий. Поэтому первые занятия посвящены проработке вопросам применения законов квантовой механики к описанию физических процессов, протекающих в полупроводниковых гетероструктурах: определение поведения электронов в прямоугольной квантовой яме с бесконечно высокими стенками с помощью уравнения Шредингера; определение величины тока утечки через прямоугольный барьер в активной области СИД; определение величины тока, при которой происходит переполнение квантовой ямы в двойной гетероструктуре и др.

#### 3.1 Темы практических занятий

1. Решение уравнения Шредингера для электрона в прямоугольной потенциальной яме.
2. Туннелирование электрона через прямоугольный барьер.
3. Определение тока утечки в активной области СИД через потенциальный барьер.
4. Определение величины тока переполнения квантовой ямы СИД.
5. Оценка паразитных сопротивлений светодиода.

Таким образом, предлагаемые темы практических занятий расширят кругозор студентов, позволят закрепить знания по данной дисциплине и будут способствовать формированию необходимых компетенций.

#### 3.2 Сценарий проведения практического занятия

В качестве примера можно привести план проведения одного из практических занятий – «Определение величины тока, при которой происходит переполнение квантовой ямы в двойной гетероструктуре».

**1. Теоретическая часть.** Тема: «Избыточная концентрация носителей заряда в активной области СИД»

Рассматривается кинетическое уравнение скоростей поступления носителей в активную область и их уменьшение из этой области за счет рекомбинационных процессов:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{e \cdot W_{DH}} - B \cdot n \cdot p, \quad (3.1)$$

где  $J$  – плотность тока, втекающая в квантовую яму;  $W_{DH}$  – ширина квантовой ямы;  $B$  – коэффициент рекомбинации;  $n, p$  – концентрации электронов и дырок.

Для стационарного случая и при высоких плотностях тока, когда  $n=p$  определяется выражение для концентрации электронов:

$$n = \sqrt{\frac{J}{e \cdot B \cdot W_{DH}}} \quad (3.2)$$

С ростом тока инжекции плотность носителей увеличивается. В результате этого растет и энергия уровня Ферми, которая может достигать величины потенциального барьера квантовой ямы:  $E_F - E_C = \Delta E_C$  (см. рис. 3.1).

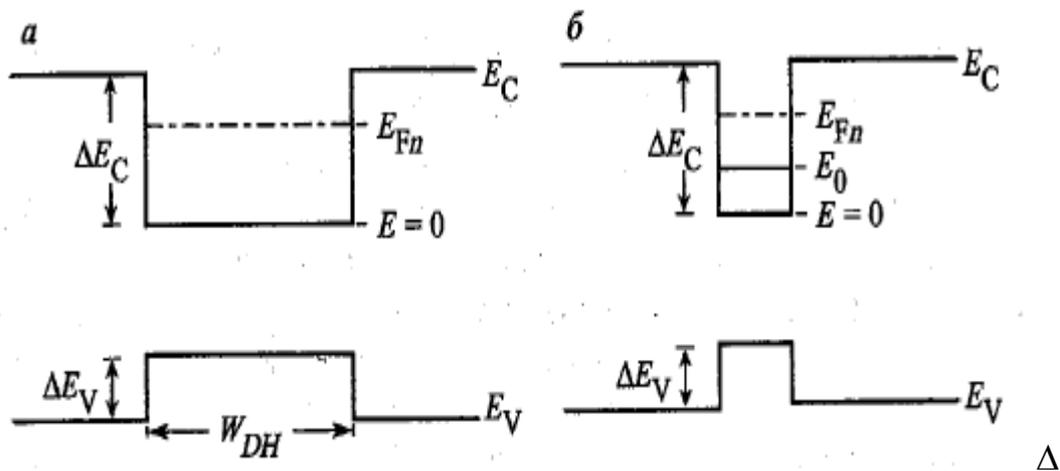


Рисунок 3.1 – Уровень Ферми ( $E_{Fn}$ ) и уровень размерного квантования ( $E_0$ ) в двойной гетероструктуре (а) и в структуре с квантовой ямой (б).

Используя это условие и уравнение (3.2) можно найти плотность тока, при которой происходит заполнение активной области носителями зарядов:

$$J = \left(\frac{4N_c}{3\sqrt{\pi}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\Delta E_C}{kT}\right)^3 \cdot e \cdot B \cdot W_{DH} \quad (3.3)$$

Что переполнится вначале – зона проводимости или валентная зона квантовой ямы зависит от эффективной плотности состояний ( $N_c, N_v$ ) и от разрывов зон ( $\Delta E_C, \Delta E_V$ ).

Таблица 3.1 - Схема расположения и толщины слоев стандартной светодиодной гетероструктуры.

p-GaN:Mg $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (0,1 мкм)	
p-GaN	Токоограничивающий слой 2 периода
p-Al <sub>0,02</sub> Ga <sub>0,98</sub> N	
u-GaN – барьер (8 нм)	Активная область 5 периодов
u-In <sub>0,12</sub> Ga <sub>0,88</sub> N – яма (3 нм)	
n-GaN – барьер (4,5 нм)	Буферная сверхрешетка 10 периодов
n-InGaN – яма (3,5 нм)	
n-GaN: Si $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (4,5 мкм)	
u-GaN (0,5 мкм)	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> подложка (500 мкм)	

При решении задачи требуется рассмотреть и проанализировать схему расположения слоев стандартной светодиодной гетероструктуры, см. Табл.3.1.

**2. Практическая часть.** Во второй части практического занятия решается следующая задача.

**Задача.** Определить величину тока, при котором происходит полное заполнение носителями заряда активной области двойной гетероструктуры. В задаче рассматривается поведение электронов в ДГС с высотой потенциального барьера  $\Delta E_c = 200 \text{ мэВ}$  и толщиной активной области  $W_{\text{ДН}} = 5 \text{ нм}$ . При этом  $N_c = 4,4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $V = 10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ .

Требуется рассчитать величину тока через СИД с площадью  $1 \text{ мм}^2$ , при котором произойдет заполнение квантовой ямы.

**Решение.** В уравнение (3.3) подставляются значения необходимых параметров из условия задачи. При решении этой задачи следует обратить внимание на размерность значений этих параметров.

После определения плотности тока при которой происходит переполнение квантовой ямы следует определить величину тока для светодиода, площадь кристалла которого равна  $1 \text{ мм}^2$ .

Далее следует сравнить полученную величину с номинальным значением рабочего тока для этого светодиода (номинальную величину тока узнать у преподавателя).

Дать объяснение, если эти величины будут значительно различаться.

## 4 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Как известно, рабочие программы подготовки магистров составлены так, что объем лекционных часов незначителен, так как большую часть времени отводится на практические (семинарские) занятия и на самостоятельную работу. Таким образом, необходимо для выравнивания неоднородной подготовки магистрантов и освоения всего объема курса:

1. Обязать студентов в рамках своей самостоятельной работы подтянуть свои знания до условного базового уровня.
2. Распределить неохваченный в лекциях материал на проработку во время самостоятельной работы.

Кроме того, следует учесть, что некоторые магистранты во время обучения поступают на работу. Это становится возможным, поскольку в стандарте предлагается сократить количество академических часов в неделю до 16.

Таким образом, магистранты имеют возможность совмещать работу и образование, в результате чего уровень образования безусловно будет падать. Есть еще проблема: поступая в академическую магистратуру студент часто не связывает свою дальнейшую деятельность с научно-исследовательской или педагогической работой. Или наоборот, поступая в прикладную магистратуру студент не думает заниматься в дальнейшем профессиональной деятельностью на производстве.

Суть индивидуальной домашней работы — каждому студенту предлагается проработать литературные источники по предложенным преподавателем темам. Примерный перечень тем самостоятельной работы приведен в разделе 4.1.

Для решения этой задачи студентам необходимо выполнить следующие действия:

- Провести поиск литературных источников (статьи из отечественных и зарубежных журналов, патенты т. д.).
- Изучить и структурировать полученную информацию.
- Подготовить и выполнить научный доклад с презентацией по данной теме.
- Подготовить и провести практическое занятие с решением практических задач.
- Провести оценку степени усвоения полученных знаний студентами-одногогруппниками, их активность на занятии.

Такие отчеты по индивидуальной самостоятельной работе выполняются каждым магистрантом в часы, выделенные на практические занятия по учебному плану.

Таким образом, практические занятия проводятся в интерактивной форме, что значительно повышает эффективность усвоения материала студентами. Кроме того, магистранты получают дополнительные компетенции, повышающие их конкурентоспособность на рынке труда.

#### 4.1 Темы самостоятельной работы

1. Туннельные эффекты в светодиодных гетероструктурах.
2. Прыжковый транспорт в области объемного заряда структур с квантовыми ямами InGaN/GaN.
3. Особенности конструкции светодиодов. Сравнение характеристик СИД «lift-off» и «flip-chip» технологий.
4. Выбор оптимального режима работы светодиодных излучателей.
5. Электрическая деградация светоизлучающих диодов высокой мощности.
6. Определение температуры активной области гетероструктур СИД методом падения напряжения.
7. Фотолюминесценция квантово-размерных структур.
8. Модель подпорогового инжекционного образования дефектов
9. Дефекты роста в полупроводниковых гетероструктурах
10. Неоднородность тока в кристаллах СИД. Причины.
11. Тепловые процессы в СИД.
12. Оценка температуры перегрева активной области СИД спектральным методом.

## 5 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Шуберт Ф.Е. Светодиоды / Ф.Е. Шуберт // М.: Физматлит, 2008. – 496 с.
- 2 Полищук А. Дegradaция полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов / А. Полищук, А. Туркин // Компоненты и технологии. – 2008. – №2. – С. 25–28.
- 3 Анисимова Л.Л. Образование дефектов в эпитаксиальных слоях GaAs и InGaAs, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низких температурах/ Анисимова Л.Л., Гутаковский А.К., И.В. Ивонин [и др.] // Журнал структурной химии. – 2004. – Т. – 45. – С. 96-101.
- 4 Бессолов В.Н. Фотолюминесценция GaN: зависимость от интенсивности возбуждения / Бессолов В.Н., Евстропов В.В., Компан М.Е. [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. – 36. – Вып. – 10. – С. 1207-1210.
- 5 Вольфсон А.А. Влияние продолжительности процесса роста на свойства GaN, выращенного методом сублимации / Вольфсон А.А., Мохов Е.Н. // Физика и техника полупроводников. – 2009. – Т. – 43. – Вып. 3. – С. 418-421.
- 6 Ковалев А.Н. Изменения люминесцентных электрических свойств светодиодов из гетероструктур InGaN/AlGaInN/GaN при длительной работе / А.Н. Ковалев, Ф.И. Маняхин // Физика и техника полупроводников. – 1999. – Т.33. – №2. – С. 224–232.
- 7 Сушков В. Метод контроля потенциальной степени деградации характеристик светодиодов на основе твердых растворов AlGaInN / В. Сушков, С. Никифоров // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – №3. – С. 10–13.
- 8 Бочкарева Н.И. Неоднородность инжекции носителей заряда и деградация голубых светодиодов / Н.И. Бочкарева, А.А. Ефремов // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т.40. – №1. – С. 122–127.
- 9 Долин Е. Стандартизация–путь к успеху светодиодных средств освещения // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – №6. – С. 38-44.
- 10 Сергеев В.А. Расчет и анализ распределений плотности тока и температуры по площади структуры InGaInN/GaN мощных светодиодов / В.А. Сергеев, А.М. Ходаков // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т.40. – №1. – С. 122–127.
- 11 Сокольников А.В. Определение температуры перехода в гетероструктуре сверхъяркого светодиода / А.В. Сокольников, С.О. Игошев // Электроника и информационные технологии. – 2010. – №2. – С. 34–39.
- 12 Пат. 2538070 РФ, МПК G01 R31/265 G01 K 7/00 Способ бесконтактного определения неравномерности температурного поля в полупроводниковых источниках света / С.В. Смирнов (РФ), Е.В. Саврук (РФ), Ю.С. Гончарова (РФ). – № 2013133512/28; заявл. 18.07.2013; опублик. 10.01.2015. Бюл. № 1.
- 13 Дряхлушин В.Ф. Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия и ближнепольные оптические зонды: свойства, изготовление и контроль параметров» / Дряхлушин В.Ф., Вейко В. П., Вознесенский Н. Б. // Квант. Электроника. – 2007. – Т. – 37. – Вып. 2 – С. 193-203.

14 Фишер Х. Конфокальная рамановская спектроскопия и атомно-силовая микроскопия для анализа гетерогенных материалов / Фишер Х., Шмит У., Диинг Ч. // Наноиндустрия – научно-технический журнал. Контроль и измерения. – URL: [https://www.nanoindustry.su/files/article\\_pdf/1/article\\_1815\\_699.pdf](https://www.nanoindustry.su/files/article_pdf/1/article_1815_699.pdf) (дата обращения: 04.02.2022). – Режим доступа: свободный.

15 Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. – Нижний Новгород: Изд-во ИФМ РАН, 2004. – 114 с.