

Министерство образования и науки РФ

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра конструирования узлов и деталей РЭА (КУДР)

## **Методы диагностики в планарных технологиях**

Методические указания к самостоятельной работе и  
курсовому проектированию

Для студентов академической магистратуры «Проектирование и технология  
наноэлектронных средств»

Разработчик:  
проф. каф. КУДР  
\_\_\_\_\_ Еханин С.Г.

**2016**

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Обоснование тем самостоятельной работы и курсового проектирования.....	4
2 Предлагаемые темы курсового проектирования.....	11
3 Методические указания к курсовому проектированию (курсовой работе).....	11
Литература.....	20

## ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Методы диагностики в планарных технологиях» является дисциплиной по выбору вариативной части Блока 1 (Б1.В.ДВ.2) основной образовательной программы и учебного плана магистратуры «Проектирование и технология микро- и нанoeлектронных средств» направления подготовки 11.04.04 «Электроника и нанoeлектроника».

В рабочей программе сформулирована следующая цель преподавания данной дисциплины:

### **Цели и задачи дисциплины:**

**Целью** освоения дисциплины является получение систематизированного представления о современных методах анализа полупроводниковых и других материалов, используемых в виде тонких пленок и многослойных структур. **Задачами** освоения данной дисциплины является ознакомление студентов с принципами электронной микроскопии, сканирующей зондовой микроскопии, рентгеновскими методами и другими методами диагностики в планарной технологии.

В результате изучения дисциплины студенты должны:

**Знать:** теоретические основы различных методов изучения структуры материалов электронной техники и определения параметров субмикронных и наноструктур; физические основы работы оборудования для диагностики материалов электронной техники.

**Уметь:** применять изученные методы для решения конкретных практических задач диагностики приборных структур.

**Владеть:** представлениями о современном научно-техническом уровне исследований в области субмикронных и наноразмерных планарных технологий; навыками использования диагностических методов для отработки и контроля технологических процессов.

## 1 ОБОСНОВАНИЕ ТЕМ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ И КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Темы самостоятельной работы и курсового проектирования посвящены таким тенденциям в развитии методов диагностики в планарных технологиях, как новые возможности оптической микро- и спектроскопии и другим методам неразрушающего контроля структуры твердых тел, тонких пленок и гетероструктур.

1. Для получения изображения наночастиц и анализа структуры и свойств их компонентов используются различные методы, включая флуоресцентную и электронную микроскопии в сочетании с энергодисперсионным рентгеноспектральным анализом и электронным микронзондированием.

2. Часто это разрушающие методы анализа, которые требуют значительных трудозатрат по подготовке образца. Важно и то, что для реализации упомянутых методов, как правило, необходим вакуум, в том числе глубокий, что накладывает серьезные ограничения при исследовании, например, влажных или дегазированных образцов.

3. Иногда эти методы сами вызывают структурные изменения.

Методы ближнепольной оптической микроскопии, конфокальной рамановской (КР) и/или атомно-силовой микроскопии (АСМ) позволяют выполнять измерения при обычных условиях и дают возможность преодолеть вышеназванные недостатки и провести структурный и композиционный анализ образца перед возможным применением разрушающих аналитических методов. Далее будут рассмотрены эти методы и другие методы неразрушающего контроля и 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 [1,2]. 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** [3,4] — 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** [5,6] (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 [7].**

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-фотодектором. 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.

### **Методы неразрушающего контроля и диагностики светоизлучающих гетероструктур.**

Светодиоды (СД) на основе GaN являются перспективными элементами приборов твердотельного освещения. По сравнению с лампами накаливания светодиоды способны обеспечить более высокий квантовый выход и долговременную стабильность [8]. 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 условиях завышенных плотностей рабочих токов.

Вследствие этого, чрезвычайно актуальными являются применений методов неразрушающего контроля и диагностики оптической и электрической деградации СД в ходе испытаний, которые проводятся при повышенных плотностях рабочего тока.

#### Прецизионные измерения интенсивности и спектров свечения СД.

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 [9,10].

Во многих литературных источниках отмечается, что в результате деградации СД 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



инжекционные компоненты токов одного порядка. Интенсивность ЭЛ уменьшалась, но доля туннельного излучения увеличивалась [11]. Интенсивность пробойной ЭЛ также уменьшалась по мере старения, при этом относительная доля желтой полосы увеличивалась. Известно, что желтая полоса обусловлена комплексами с участием дефектов структуры, которые образуются при пропускании прямого тока на границах области пространственного заряда [12].

*Измерение величины локального перегрева в активной области.*

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. 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 [13]. 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 [13].

*Изучение изменений вольт-амперной, вольтфарадной 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 [14]. По мнению многих авторов, при работе сверхъярких светодиодов в реальных условиях наибольшее изменение электрофизических характеристик происходит в области микротоков. 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 р-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 [14]. 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 вольт-амперной, вольтфарадной и других электрических и оптических характеристик может дать дополнительную информацию по диагностике состояния гетероструктуры после испытаний.

## ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ТЕМЫ КУРСОВЫХ ПРОЕКТОВ (РАБОТ):

1. Определение температуры активной зоны СД при различных режимах работы методом спектральных измерений.
2. Определение температуры активной зоны СД при различных режимах работы методом прямого падения напряжения.
3. Определение ресурса работы СД при повышенных рабочем токе и температуре окружающей среды.

Количество вариантов заданий увеличивается при установлении конкретного режима работы СД (испытания).

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ (КУРСОВОЙ РАБОТЕ)

### **Определение температуры активной зоны СД при различных режимах работы**

Существуют различные методы определения температуры р-п перехода. Есть методы непосредственного измерения температуры поверхности кристалла [15]. Но с помощью этих методов невозможно измерить температуру активной области светодиодной гетероструктуры, т.к. ее размеры могут составлять всего несколько сотен атомных слоев. И градиент температуры вблизи этой зоны велик, соответственно там велики температурные перепады.

Также существуют косвенные методы измерения температуры р-п перехода с помощью термочувствительного параметра. В качестве термочувствительного параметра можно принять прямое падение напряжения на светодиоде [8,15]. Преимущество этого параметра в том, что прямое напряжение линейно зависит от температуры в широком интервале изменения. Процедура измерения зависимости прямого падения напряжения от температуры состоит из двух этапов: калибровочного измерения прямого напряжения на светодиоде в импульсном (негреющем) режиме и измерения этого напряжения в режиме постоянного тока. Этот принцип положен в

основу всех косвенных методов измерения температуры в полупроводниковых приборах [8,15]. Из калибровочных измерений определяется зависимость между прямым напряжением и температурой р-п перехода в заданном интервале токов.

Спектр свечения СИД также является термочувствительным параметром. Сущность данного метода [8,15,16] заключается в том, что при температурной градуировке светодиода получают ряд зависимостей длины волны от температуры для выбранных точек в заданной длинноволновой части спектра излучения светодиода. Затем проводят измерение спектра светодиода при определенном значении прямого тока, и из этого спектра определяют значение длин волн в выбранных точках в заданной длинноволновой области спектра, после чего по градуировочным зависимостям определяют температуру для каждой выбранной точки и для расчета точной температуры активной области светодиода получают ее среднее значение [16].

Особенностью способа является анализ длинноволновой области спектра для определения температуры активной области светодиода, где влияния шумов на точность расчетов мало, что приводит к снижению погрешности. Сдвиг длинноволнового края хорошо аппроксимируется линейной функцией температуры, а также величина градуировочного коэффициента  $K = \Delta\lambda / \Delta T$  не зависит от типа корпуса светодиода, а определяется только материалом и структурой гетероперехода. При анализе зависимости длины волны в максимуме излучения от температуры в спектрах некоторых светодиодов может также наблюдаться характерная структура, вызванная интерференционными эффектами [16]. С изменением температуры интерференционные максимумы и минимумы смещаются непредсказуемым образом, что значительно затрудняет интерпретацию полученных результатов и приводит к нежелательным ошибкам в процессе исследования [16]. Также, при проведении температурной градуировки, можно пропускать через светодиод, как импульсный ток, так и постоянный,

но не превышающий определенной величины. При значениях постоянного тока не больше 10 мА воздействие на кристалл светодиода минимально, из-за чего самонагрев кристалла практически отсутствует. Кроме того, представленный способ рекомендует производить температурную градуировку каждого образца отдельно, что исключает возможность неверного определения температуры активной области из-за использования градуировочных характеристик некачественного эталона.

### **Определение ресурса работы СД при повышенных рабочем токе и температуре окружающей среды.**

ВАХ маломощных коммерческих светодиодов в постоянном режиме измерялись в диапазоне от долей мкА до 100мА следующим образом [17]. С помощью источника питания (изменением напряжения) выставлялось определенное значение тока (от 0,1мкА до 100мА) которое определялось А2, каждому значению тока сопоставлялось соответствующее значение напряжения на светодиоде, которое определялось с помощью вольтметра с высокоомным входом V1 от 0 до максимального значения соответствующего рабочему току светоизлучающего диода (СИД).

Измерение яркостотоковых характеристик происходит одновременно с измерением ВАХ при помощи фотодиода. С миллиамперметра А1, подключенного к фотодиоду, снимается значение тока который пропорционален яркости СИД.

Данные измерений заносят в редактор Microsoft Excel и по ним строят вольтамперные характеристики светодиодов в координатах  $I=f(U)$ , яркостотоковые характеристики в координатах  $L=f(I)$ , а так же данные испытаний на долговечность при повышенном значении рабочего тока в координатах  $L=f(t)$ .

Для испытания светодиодов при различных рабочих токах имеется стенд. На стенде расположены разъемы для подключения светодиодов со сменным держателем. Переменные резисторы на стенде служат для регулировки тока, который контролируется миллиамперметром. Ручкой

регулировки выставляем необходимый рабочий ток от 20 до 100 мА и оставляем светодиод на испытание на заданный временной промежуток.

Экспериментальные измерения проводились в два этапа [17]. Первый этап заключался в определении рабочего тока при котором проявлялись первые признаки деградации. На втором этапе определялся срок службы при ускоренных испытаниях (при повышенных значениях тока и температуре саморазогрева).

Таблица 1 – Параметры мало мощного СИД

Цвет	марка	материал	$I_{пр}$ , мА	$U_{пр}$ , В	$\lambda_{max}$ , нм
Синий	FYL-5013UBC	InGaN	20	3,5	470

Перед началом испытаний измеряются вольтамперные и яркостнотокковые характеристики светодиодов при номинальном режиме работы. Далее образец ставили на испытание (от 2 до 6 часов) и после производили повторное снятие характеристик. После каждого испытания и снятия характеристик (ВАХ и яркостнотокковых) рабочий ток светодиода увеличивают на 20 мА. В нашем случае испытания проходят до установления рабочего тока от 60 до 80 мА (с появлением первых признаков деградации). Первые признаки деградации определялись с помощью ВАХ в области микротоков с помощью обратной ВАХ и прецизионных измерений спектра.

После установления определенного рабочего тока, дальнейшей задачей является проведение испытаний на долговечность, т.е. определение срока службы СИД. Для этого проводятся повторные снятия характеристик от времени наработки.

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]. Проблема состоит в том, что даже при токе 80 мА снижение интенсивности свечения происходит очень медленно, поэтому срок службы прогнозируется на основании измеряемой зависимости  $L=f(t)$ . Окончательный срок службы высчитывается с помощью коэффициента ускорения, который определяется по формуле Аррениуса [18].

$$K = \left( \frac{J_{\text{исп}}}{J_{\text{ном}}} \right)^m \exp \left[ \frac{\Delta E}{K_B} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right],$$

где  $K$  – коэффициент ускорения механизма отказа;

$m$  – постоянная для конкретного типа полупроводниковой светоизлучающей структуры ( $m = 1$ , если  $J_{\text{пот}} < 2 \cdot 10^5 \text{ А/см}^2$ );

$\Delta E$  – энергия активации доминирующего механизма деградации СД;

$K_B$  – постоянная Больцмана, равная  $8,617 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$ ;

$J_{\text{ном}}$  – номинальная плотность прямого тока через  $p$ - $n$ -переход,  $\text{А/см}^2$ ;

$J_{\text{исп}}$  – плотность прямого тока при испытаниях;

$T_1$  – рабочая температура кристалла, К;

Как указано в работе [18], энергия активации механизма деградации  $\Delta E$  равна 0,6 эВ, что связано с процессами диффузии в активной области кристалла и электрических контактах.

Аппроксимируя зависимость спада яркости от времени наработки можно определить срок службы СИД при данном режиме эксплуатации. Как только спад аппроксимированной кривой яркости СИД достигнет 50%, получим время, равное сроку службы СИД.

Исходя из этого, с помощью коэффициента ускорения механизма отказа, посчитанное с помощью формулы Аррениуса [18] можно определить срок

службы СИД при номинальном значении плотности тока и сравнить с заявленным производителями сроком.

### **Краткое описание экспериментальной установки**

Установка включает в себя следующие компоненты [19]:

- блок измерения ВАХ – позволяет проводить изучение прямой и обратной ветви ВАХ СИД в ручном и автоматическом режиме;
- оптический блок – позволяет получать увеличенные цифровые изображения поверхности кристалла СИД, картин свечения с коэффициентом увеличения до 5000 раз и возможностью УФ-подсветки (для выявления распределения дефектов по поверхности) с выводом изображения на монитор ПК.
- Блок измерения спектральных характеристик свечения СИД.

Измерение яркостотоковых характеристик происходит вручную одновременно с измерением ВАХ при помощи фотодиода установленного на максимально близком к светодиоду расстоянии. С милливольтметра V1, подключенного к фотодиоду, снимается значение яркости СИД, соответствующее установившемуся прямому току.

Данные измерений заносят в редактор Microsoft Excel и по ним строят вольтамперные характеристики светодиодов в координатах  $I=f(U)$ , яркостотоковые характеристики в координатах  $L=f(I)$ , а так же данные испытаний на долговечность при повышенном значении рабочего тока в координатах  $L=f(t)$ .

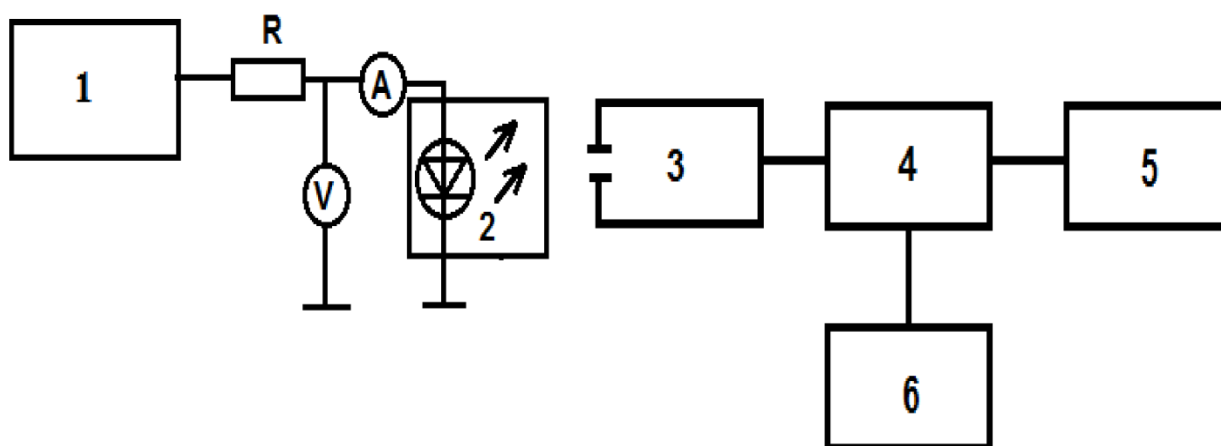
В электрический блок входят также автоматизированный построитель ВАХ, в том числе области микротоков [20]. Измерения в области микротоков необходимы для определения степени деградации гетероструктур СИД, так как в этой области изменения проявляются быстрее, чем при других значениях токов. Причиной такого изменения становятся сквозные дефекты, проходящие через весь кристалл, «закоротки».

Автоматизированный построитель ВАХ позволяет построить семейство ВАХ во всём диапазоне рабочих токов. При этом есть



возможность строить характеристики, когда кристалл нагрет до определенной температуры. Появляется возможность построить семейство калибровочных ВАХ при разных температурах и потом, во время работы СИД в номинальном режиме или при повышенных токах, определить температуру активной зоны кристалла [8, 15, 16, 21].

Измерения спектральных характеристик проведены на малогабаритном универсальном монохроматоре (МУМ-01) [19]. Рабочий диапазон длин волн: 200...800 нм. Погрешность показаний счетчика длин волн:  $\pm 0,2$  нм.



1–блок питания, 2–светодиод в держателе, 3–монохроматор, 4–приемник излучения (фотоэлектронный умножитель), 5– вольтметр, 6– блок питания к приемнику излучения.

Рисунок 1 – Структурная схема экспериментальной установки для измерения спектральных характеристик

Через светодиод (2), установленный в держатель, пропускается прямой ток. Светодиод устанавливают перед входной щелью монохроматора (3) и настраивают монохроматор на длину волны излучения светодиода. После того, как будет зафиксирован отклик приемника (4) излучения на свечение диода, проводят подстройку положения светодиода перед входной щелью монохроматора, добиваясь максимальных показаний индикатора (5) фотоприемника (4).

После установки светодиода на оптической оси монохроматора измеряют зависимость выходного сигнала фотоприемника от длины волны

излучения, при этом в окрестности максимума излучения длину волны, пропускаемой монохроматором, изменяют через 1-10 нм. Данные измерений заносят в таблицу и по ним строят спектральную характеристику светодиода в координатах  $U_0/U_{max}=f(\lambda)$ .

Перед началом испытаний измеряются вольтамперные, вольтяркостные и спектральные характеристики светодиодов при номинальном режиме работы. После этого образец ставят на испытание на два часа, после чего производят повторное снятие характеристик. После каждого испытания и снятия характеристик рабочий ток светодиода увеличивают на 20 мА.

После установления тока 80 мА, дальнейшей задачей является проведение испытаний на долговечность, т.е. определение срока службы СИД, а для этого проводятся повторные снятия характеристик в течение времени наработки.

Следует отметить, что начальные стадии деградации СИД начинаются уже в первые 100 часов работы СИД под нагрузкой (при номинальном рабочем токе) [11]. При рабочем токе, превышающем номинальное значение деградационные явления начинаются значительно раньше. Это заметно по существенным изменениям ВАХ в области микротоков [17]. Как показано в [14], дополнительные токи утечки связаны с протяженными микродефектами, пронизывающими активную область СИД. При эксплуатации СИД под действием тока большой плотности происходит электродиффузионное перераспределение примесей в области скопления таких дефектов, что приводит к локальным изменениям, в частности, к сильному локальному нагреву, механическим напряжениям и образованию дополнительных точечных дефектов, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации [11,12,14,]. Увеличение степени безызлучательной рекомбинации, в свою очередь приведет к дополнительному локальному перегреву структуры и т.д. Такие процессы интенсивнее всего проходят под электродами и могут индуцироваться при

металлизации р-контакта, так как при этой технологической операции возникают сильные механические напряжения.

**При проведении оптических измерений** [19] исследуемый образец помещается под микроскоп МИМ-7 или МБС-10 и через Web-микроскоп изображение поверхности передаётся на персональный компьютер, где происходит дальнейшая его обработка. Перед проведением испытаний и после фотографируется поверхность неработающего светодиода и в рабочем состоянии, после чего включается ультрафиолетовая лампа, снимаются картины свечения во время фотолюминесценции поверхности кристалла без подачи внешнего питания. После этого происходит подсчёт количества образующихся дефектов в образце. Тепловизор используется во время работы СИД в номинальном режиме или при повышенных токах, для определения картины локального перегрева и уточнения тепловых расчётов и картин неоднородного планарного распределения зарядопереноса и свечения. С тепловизора изображение передаётся на компьютер, где происходит его обработка оператором [19].

**Отчетность выполнения курсового проекта** в течение семестра происходит согласно графику, приведенному в рабочей программе. Студент представляет для поэтапной проверки руководителю аккуратно выполненный компьютерный вариант с результатами расчетов в соответствии с установленным графиком. Поощряется ритмичная работа в течение семестра и рациональное применение средств автоматизации инженерного труда.

Качество курсовой работы оценивается по следующим позициям: оформление пояснительной записки, правильность и обоснованность выбора принимаемых решений, правильность выполненных расчетов.

Объем пояснительной записки - 15...20 листов формата А4. Требования к структуре и оформлению курсовой работы – по ОС ТУСУР (см. на сайте).

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Дряхлушин В.Ф., Вейко В. П., Вознесенский Н. Б. «Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия и ближнепольные оптические зонды: свойства, изготовление и контроль параметров» / Квант. электроника, 2007, 37 (2), 193—203.
- 2 Ближнепольная оптическая микроскопия (материал из Википедии) - [https://ru.wikipedia.org/wiki/Ближнепольная\\_оптическая\\_микроскопия](https://ru.wikipedia.org/wiki/Ближнепольная_оптическая_микроскопия)
- 3 Handbook of Biological Confocal Microscopy / J.V. Pawley. — 3rd ed. — Berlin : Springer, 2006. — 985 p.
- 4 Конфокальный микроскоп (материал из Википедии) - [https://ru.wikipedia.org/wiki/конфокальный\\_микроскоп](https://ru.wikipedia.org/wiki/конфокальный_микроскоп)
- 5 Рамановская спектроскопия (материал из Википедии) - [https://ru.wikipedia.org/wiki/Рамановская\\_спктроскопия](https://ru.wikipedia.org/wiki/Рамановская_спктроскопия)
- 6 Комбинационное рассеяние (материал из Википедии) - [https://ru.wikipedia.org/wiki/Комбинационное\\_рассеяние\\_света](https://ru.wikipedia.org/wiki/Комбинационное_рассеяние_света)
- 7 Х.Фишер, У.Шмит, Ч.Диинг, О.Холрихер Конфокальная рамановская спектроскопия и атомно-силовая микроскопия для анализа гетерогенных материалов/ Наноиндустрия – научно-технический журнал - [www.nanoindustry.su/files/article\\_pdf/1/article\\_1815\\_699.pdf](http://www.nanoindustry.su/files/article_pdf/1/article_1815_699.pdf)
- 8 Шуберт Ф.Е. Светодиоды / Ф.Е. Шуберт // М.: Физматлит, 2008.
- 9 Е.Долин, А.Мохнаткин Стандартизация – путь к успеху светодиодных средств освещения/ ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес 6/2010 С. 38-44.
- 10 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.
- 11 Полищук А. Деградация полупроводниковых светодиодов на основе нитрида галлия и его твердых растворов / А. Полищук, А. Туркин // Компоненты и технологии. 2008. №2. С. 25–28.
- 12 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.

- 13 Сергеев В.А. Расчет и анализ распределений плотности тока и температуры по площади структуры InGaN/GaN мощных светодиодов / В.А. Сергеев, А.М. Ходаков // Физика и техника полупроводников. 2010. Т.44, №2. С. 230–234.
- 14 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.
- 15 Сокольников А.В. Определение температуры перехода в гетероструктуре сверхъяркого светодиода / А.В. Сокольников, С.О. Игошев, В.В. Траксова // Электроника и информационные технологии. 2010. №2. С. 34–39.
- 16 Пат. 2473149 Российская Федерация, МПК7 H 01 L21/66. Способ определения температуры активной области светодиода / Пихтин А.Н., Тарасов С.А., Менькович Е.А.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский Государственный электротехнический университет им. В.И. Ульянова. №2011147653/04; заявл. 15.09.11; опубл. 23.11.11, Бюл. №3. – 5с.
- 17 Богатырева Д.В. Изучение деградации светодиодных гетероструктур методом измерения ВАХ в области микротоков / Д.В. Богатырева, Н.В. Сапегина, М.А. Тимохина // Научная сессия ТУСУР. 2011. Т.1. С. 150–152.
- 18 Солдаткин В.С. Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность/ Ю.С. Гончарова, И.Ф. Гарипов // Ускоренные испытания полупроводниковых источников. 2012. Т.40, №4. С. 51–58.
- 19 Ермолаев А.В. Установка для комплексных исследований СИД / А.В. Ермолаев, Н.В. Сапегина, А.Н. Коровкин // Научная сессия ТУСУР. 2012. Т.1. С. 140–142.
- 20 Головизин А.И. Автоматический построитель ВАХ СИД / А.И. Головизин, Д.П. Матвеев // Научная сессия ТУСУР. 2012. Т.1. С. 143–145.
- 21 Новоселов В.В. Измерение температуры активных областей полупроводниковых приборов / В.В. Новоселов, С.В. Морозов – Саратов: 2007. – 21 с.