

На правах рукописи.

**Никифоров Сергей Григорьевич**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИК КОНТРОЛЯ ДЕГРАДАЦИИ  
ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ НА ОСНОВЕ ТВЁРДЫХ  
РАСТВОРОВ AlGaInP и AlGaInN.**

Специальность 05.27.01. – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

**Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук**

Москва 2006

Работа выполнена на кафедре «Технология материалов электроники» факультета полупроводниковых материалов и приборов Московского государственного института стали и сплавов (технологического университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор МГИСиС  
Сушков Валерий Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор МГАПИ  
Вигдорович Евгений Наумович  
кандидат физико-математических наук, ассистент МГУ  
Туркин Андрей Николаевич.

Ведущая организация: Научно – производственный центр оптико -  
электронных приборов «Оптэл».

Защита состоится “ 22 ” марта 2007 г. в 17 ч. 00 мин. На заседании диссертационного совета Д212.123.06 при Московском государственном институте стали и сплавов по адресу: 119049, Москва, В-49, Крымский Вал, д. 3, ауд. К-421.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного института стали и сплавов.

Автореферат разослан “ ” 2007 г.

Учёный секретарь диссертационного совета:  
доктор физико-математических наук, профессор

Гераськин В. В.

## Общая характеристика работы.

### Актуальность темы.

Стремительное развитие технологии производства излучающих структур в последние годы привело к значительным успехам в области повышения качества приборов на их основе. Существенно увеличилось число различных конструкций и типов серийно производимых кристаллов, изготовленных на основе эпитаксиальных гетероструктур твёрдых растворов  $\text{AlGaInP}$  и  $\text{AlGaInN}$ , позволяющих создавать источники излучения с любыми необходимыми характеристиками для различных сфер применения. Однако, имеет место ряд проблем при изготовлении как самих гетероструктур (обеспечение равномерности распределения легирующих примесей в материале структуры, формирование омических контактов, обеспечивающих одинаковую плотность тока через всю площадь p-n-перехода, присутствие дислокаций и центров безизлучательной рекомбинации), так и светодиодов на их основе (соблюдение технологии монтажа излучающего кристалла: посадка на основание, приварка контактных проводников, обеспечение теплового режима, формирование оптики и т. д.), которые недостаточно исследованы, а отсутствие методов их комплексного решения на стадии производства излучающих кристаллов и технологии их сборки в светодиодах существенно ограничивает применение готовых приборов в большинстве устройств специальной сигнализации (светофоры, световая сигнализация), в устройствах ответственного применения с повышенной степенью надёжности (судовое, шахтное и аварийное освещение) и в устройствах стратегического назначения (военная и космическая техника). Наиболее значимой из всего спектра существующих проблем является проблема изменения (деградации) всего комплекса первоначальных параметров излучающих структур и светодиодов в процессе эксплуатации. На практике это проявляется в виде изменения значений ряда характеристик устройств с исполнительной частью на светодиодах, приводящее к искажению визуального восприятия информации человеком.

Актуальным является установление причин деградации параметров светодиодов в процессе наработки и разработка методов их устранения, необходимых для увеличения срока службы и надёжности. На производстве уже сейчас всё больше требуется достоверная оценка не только параметров произведённых светодиодов, но и прогнозирование их надёжности и срока службы: лишь только выполнение этого условия является гарантией качества поставляемых потребителю приборов. Эта тенденция требует необходимости проведения новых исследований не только физических причин изменения различных параметров гетероструктур на основе твёрдых растворов  $\text{AlGaInP}$  и  $\text{AlGaInN}$  во время наработки светодиодов, но и разработки методик применения результатов этих исследований при конструировании и производстве светодиодов и устройств на их основе. Анализ известных результатов по деградации светодиодов и методик её определения, а также особенности современного производства привели к идее проведения комплексного эксперимента, в котором проводятся измерения максимально возможного количества характеристик и параметров светодиодов с целью установления их взаимосвязи в процессе наработки. При этом для определения степени влияния конструкций и технологий изготовления гетероструктур  $\text{AlGaInP}$  и  $\text{AlGaInN}$  и кристаллов на их основе на скорость

деградации важнейших параметров приборов исследуемые светодиоды должны иметь идентичные конструкции и технологии сборки. Это позволит с большой достоверностью прогнозировать стабильность эксплуатационных характеристик светоизлучающих устройств.

К важнейшим параметрам светодиодов относятся световой поток, сила света и падение прямого напряжения при рабочей величине прямого тока. В современном производстве эти параметры измеряются у каждого выпускаемого прибора с помощью автоматизированных установок, а светодиоды сортируются по группам, имеющим определённые типичные значения этих параметров в пределах от их минимальных до их максимальных значений. Если удаётся установить связь между скоростью деградации важнейших параметров светодиодов в процессе наработки с величинами этих параметров до наработки, то появляется возможность количественно предсказывать срок службы светодиодов ещё на стадии производства.

### **Цель работы.**

Разработка методик измерения базовых светотехнических и электрических характеристик светодиодов на основе закономерностей изменения параметров в процессе деградации электрических и излучающих свойств светодиодов с различной конструкцией кристаллов, изготовленных из эпитаксиальных гетероструктур твёрдых растворов AlGaInP и AlGaInN и разработка методик производственной квалификации светодиодов по сроку службы, позволяющих существенно повысить долю выхода качественной продукции к потребителю.

### **Научная новизна.**

1. Предложена модель, описывающая электрические и излучающие свойства AlGaInN кристаллов светодиодов, в которой учтено неоднородное распределение атомов индия в активной области гетероструктуры. Согласно этой модели, кристалл светодиода представляет собой совокупность параллельно включённых микродиодов, имеющих одинаковые параметры широкозонных n-GaN и p-GaN эмиттеров, но отличающихся друг от друга содержанием индия (X) в квантовых ямах и величиной площади p-n перехода  $S(X)$ .
2. Показано, что при различных значениях X зависимости плотности тока от напряжения у микродиодов сильно отличаются. Рассчитанные суммарные вольт-амперные характеристики (ВАХ) и спектры излучения AlGaInN кристаллов в целом хорошо согласуются с экспериментальными данными при принятом в настоящей работе гауссовском распределении значений  $S(X)$ .
3. В большей степени деградации подвержены области структуры с малым содержанием индия в активном слое (формирующие наиболее коротковолновую часть спектрального распределения излучения), через которые протекают токи с существенно большей плотностью, что приводит в процессе наработки к смещению спектров излучения в длинноволновую область.
4. Предложен метод расчёта светового потока  $\Phi(t)$ , для любого времени наработки светодиода  $t$ , учитывающий плотность тока через излучающую структуру.

5. Установлено, что деградация величины светового потока у гетероструктур AlGaInP жёлтого цвета свечения на Si-подложках (в среднем –48% за 10000 часов), существенно выше, чем деградация гетероструктур на GaP-подложках (в среднем –22% за 10000 часов), а у гетероструктур AlGaInN зелёного цвета свечения, выращенных на Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-подложках (в среднем –40% за 10000 часов), деградация существенно выше, чем деградация у гетероструктур, выращенных на SiC-подложках (до –25% за 10000 часов). Эти результаты могут быть объяснены значительным отличием в плотности дислокаций из-за разной степени рассогласования кристаллических решёток подложек и выращенных на них структур.

#### **Практическая ценность работы.**

1. Предложена новая, расширенная система существующих физических параметров светодиодов, основанная на их взаимозависимости и включающая характеристики, описывающие деградацию светодиодов: скорость деградации светового потока и силы света, изменение прямого напряжения за время наработки.

2. Разработана новая комплексная методика измерений, компьютерные программы расчётов светотехнических, фотометрических, колориметрических, электрических и энергетических характеристик и параметров светодиодов.

3. Показано, что разработанные средства, программы и методики измерений характеристик и параметров деградации светодиодов на основе AlGaInP и AlGaInN, в совокупности являются универсальным инструментом для прогнозирования изменения характеристик различных типов светодиодов, имеющих любые электрические характеристики, любое пространственное распределение излучения, разнообразные спектры и большой диапазон оптической мощности (от 1mW до 10W).

4. Метрологические средства измерения характеристик светодиодов (измерительный комплекс), могут быть использованы в области разработки и применения светодиодов со статусом держателя вторичной эталонной базы - от производственных участков до научных исследовательских лабораторий.

5. На основе определённых в настоящих экспериментах значений основных параметров светодиодов была установлена последовательность и режимы их измерения, рассчитаны и обоснованы их критерии при сортировке светодиодов на производстве с помощью стандартных сортировочных машин, которые позволяют достоверно отделить приборы с потенциально большими (от -20% за 10000 час., и более) скоростями деградации силы света или светового потока. Показано, что предложенные методы сортировки на производстве не требуют дополнительного оборудования, времени и трудозатрат персонала.

6. Определено, что установленные зависимости скорости деградации светового потока в процессе наработки светодиодов от величины их прямого напряжения и значения светового потока в начальный момент времени, позволяют выполнять селекцию неисправных приборов на производстве, не прибегая к технологической операции искусственного старения (продолжительность которой обычно составляет 3 – 5 дней), что существенно сокращает сроки производства качественных светодиодов и

исключает затраты на дорогостоящее оборудование, необходимое для проведения операции искусственного старения.

7. Применение в различных устройствах светодиодов, отсортированных по разработанным методикам на производстве показало уменьшение, не менее, чем на 90% количества приборов, чей световой поток деградировал более, чем на 20% или вышедших из строя процессе наработки всего за 2 - 3 тыс. час., что имеет особо важное значение при их использовании в изделиях, влияющих на здоровье и жизнь человека (светофоры, медицинские световые приборы, аварийное освещение, и т.д.).

#### **Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Учёт неоднородного распределения атомов индия в активной области гетероструктуры на основе AlGaInN позволяет представить кристалл светодиода как совокупность параллельно включённых микродиодов с различным содержанием индия в квантовых ямах активной области и показать, что спектр излучения и суммарный световой поток светодиода в целом являются суперпозицией спектров излучения и световых потоков всех микродиодов.

2. В процессе длительной наработки спектр излучения светодиода на основе AlGaInN смещается в длинноволновую сторону из-за более быстрой деградации микродиодов с меньшим содержанием индия, через которые протекают токи с существенно большей плотностью.

3. Наряду с изменением значения светового потока при наработке, происходит существенное перераспределение его плотности внутри диаграммы излучения по причине неоднородной степени деградации интенсивности излучения микродиодов с различным содержанием индия и изменения шунтирующего действия центров безизлучательной рекомбинации.

#### **Апробация работы.**

1. Материалы по теме настоящей работы были представлены на Всероссийской конференции «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» в МГУ им. Ломоносова, Москва, 2001 год, докладом о методах измерения световых характеристик светодиодов.

2. Результаты по совершенствованию методик измерений светотехнических и электрических параметров и исследований по изучению физических свойств излучения светодиодов были обсуждены на 25 сессии Международной комиссии по освещению (CIE) в Сан-Диего, США, 2003 год с представлением доклада «Red LED Railway Traffic Lights Visional Perception Research».

3. Материалы по теме настоящей работы были представлены на 37-ом международном семинаре «Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах» 28 – 30 ноября 2006г. в МЭИ, докладом о результатах исследований физических механизмов деградации и сортировки светодиодов на производстве с применением разработанной методики контроля деградации параметров.

#### **Публикации.**

Всего по теме диссертационной работы автором опубликовано 15 печатных работ.

#### **Структура диссертации.**

Работа содержит 158 страниц машинописного текста, 51 рисунок, 39 формул, 14 таблиц и 61 приложение. Использовано 82 литературных источника.

### **Основное содержание работы.**

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель работы, научная новизна и практическая значимость результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

### **Глава 1. Аналитический обзор публикаций.**

В главе 1 приведены сведения о физических процессах, протекающих в полупроводниковых структурах, рассмотрены преимущества и недостатки различных материалов подложек, используемых при эпитаксии структур, представлены наиболее популярные конструкции кристаллов, применённые для исследования в настоящей работе в составе светодиодов. Описаны различные типы светодиодов, области их применения и соответствующие особенности конструкции.

Отмечено, что представляемый автором эксперимент является продолжением и развитием идеи экспериментов по изучению деградации параметров светодиодов, описанной в публикациях, где разъяснены причины изменения интенсивности люминесценции и эффективной концентрации заряженных центров ОПЗ исследуемых InGaN/AlGaIn/GaN светодиодов со временем наработки и прослежена взаимосвязь с одновременным изменением характера вольт – амперной характеристики и появлением туннельной составляющей тока. Однако выводы по изменению интенсивности излучения были сделаны по результатам измерения спектрального распределения в относительных единицах, что эквивалентно измерению силы света в одной точке. Тем не менее, такой характер изменения излучения, не отражает истинной картины изменения интегральной оптической энергии всей структуры, так как известно, что результатом деградации является не столько уменьшение суммарного светового потока, сколько часто просто его перераспределение по объёму кристалла. Вероятно, существует прямая связь этого факта с исследованиями количественного изменения заряженных центров ОПЗ и изменения плотности их концентраций в объёме ОПЗ со временем наработки. Исходя из этого, важной задачей, стоящей перед представляемой работой является исследование именно светового потока. В ряде работ, основной упор был сделан на изменение осевой силы света со временем наработки. Результаты представляемого автором эксперимента выявили, что достоверность выводов о причинах деградации по этому параметру является крайне низкой из-за большой вероятности геометрического перемещения значений силы света в любой (в т. ч. и осевой) области диаграммы распределения излучения со временем наработки. Поэтому измерение и сравнение полных диаграмм пространственного распределения силы света является ещё одной задачей описываемого эксперимента.

В одной из работ была прослежена связь изменения энергетических показателей выходного излучения кристаллов с соответствующими им изначальными электрическими характеристиками. Это было сделано подробно, но исследования в процессе деградации не проводились, а представленное поведение мощности излучения в зависимости от электрических характеристик носило интегральный характер, не позволяющий составить полную картину изменения излучения в разных областях кристалла, где требуется иной

подход к измерениям: оптическая мощность связана со спектром излучения, который также изменялся. Исходя из этого, одной из задач данной работы является сопоставление измерений электрических характеристик и соответствующих им световых потоков светодиодов в процессе наработки.

Идея представления излучающей структуры, как большого числа параллельных структур с различными  $E_g$ , предложенная автором в настоящей работе, наиболее достоверно объясняет поведение большинства характеристик излучающих структур в процессе наработки. Существуют достаточно справедливое утверждение о том, что излучающую структуру стоит рассматривать не как единую область с флуктуацией ширины запрещённой зоны  $E_g$ , а как схему, где выполнено параллельное включение множества микроскопических  $p - n$  – переходов со своими, отличающимися друг от друга значениями  $E_{g1}, E_{g2} \dots E_{gn}$ . Набор таких  $p - n$  – переходов, включённых параллельно и формирует всё спектральное распределение плотности энергетической яркости кристалла, внося свой вклад в виде отдельной длины волны и соответствующей амплитуды излучения. Подобная модель излучающей структуры хорошо объясняет изменение параметров спектра со временем, когда изменения ширины запрещённой зоны каждого элемента приводят к пропорциональному изменению интенсивности излучения на своей длине волны. Точно такое же объяснение применимо и для изменения приложенного внешнего электрического поля. При повышении  $U_f$  будут включаться мини  $p - n$  – переходы с наибольшими  $E_g$ , что увеличит вклад коротковолновых составляющих в спектр и наоборот, при этом рост амплитуды длинноволновых компонентов уже включённых в работу малыми  $U_f$  на экспоненциальном участке вольт – амперной характеристики, будет значительно меньшим из-за явления насыщения и ограниченного их количества, при определённом  $U_f$  первый процесс будет доминировать над вторым. Этим объясняется характерная несимметрия спектрального распределения излучения, определяющаяся положением центроидной длины волны спектра при малых плотностях тока, выравнивающаяся при их увеличении или при изменении температуры. В первом приближении, количественный состав переходов с различными значениями  $E_g$  будет определяться гауссовским распределением относительно средних значений  $E_g$  для данной структуры, что и можно заметить при рассмотрении вида формы кривых спектрального распределения, как результата сложения двух функций – упомянутой выше и функции распределения Ферми – Дирака. Таким же образом, состав спектра излучения позволяет судить о равномерности распределения легирующей примеси в слоях полупроводникового материала и наличии посторонних включений, что по сути и определяет качество излучающего кристалла, и как следствие долговечность жизни светодиода.

В одной из публикаций описан ещё один метод определения качества и структуры материала кристалла в части наличия в нём центров безизлучательной рекомбинации в области пространственного заряда, позволяющий получить информацию об этом принципиально другим методом, использующим свойства модуляции переменным сигналом  $u(t)$  ширины ОПЗ с одновременным постоянным смещением, либо малым переменным зарядом  $dq(t)$ , что вызывает пропорциональное изменение барьерной ёмкости. Очевидно, что связь спектральных характеристик и определённых таким методом



качественных показателей материалов кристаллов в процессе деградации позволит наиболее достоверно усмотреть причины перераспределения светового потока и плотности тока в излучающей структуре, что может быть проверено математическим моделированием параметров структуры и также является задачей представляемой работы.

Также, можно заметить, что деградационная характеристика светового потока существенно отличается от деградационной характеристики максимальной силы света в части их крутизны и тенденции ухода (рисунок 1), а наличие у светодиода оптики, объясняет факт значительного роста силы света на фоне практически не изменяющегося светового потока именно из-за описанного выше его перераспределения, а не изменения самого значения.

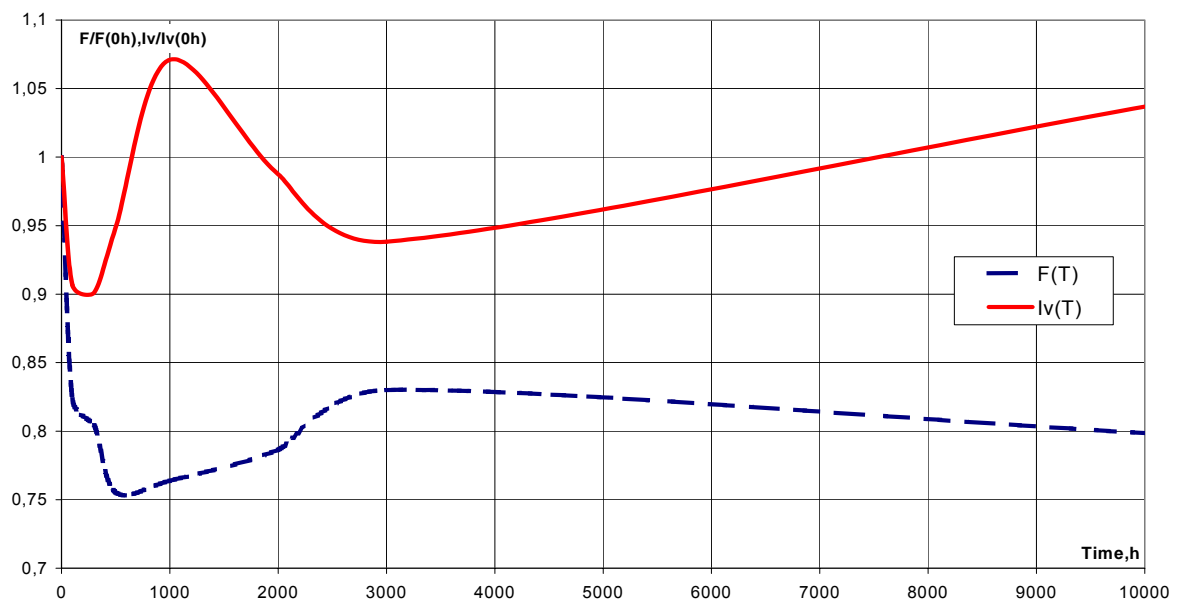


Рисунок 1. Относительные деградационные характеристики максимальной силы света  $I_v$  и светового потока  $F$  одного и того же светодиода.

Анализ результатов проведённых работ по деградации, публикаций и описанных в них исследований определил основные направления для решения поставленных перед проводимым экспериментом задач. Для его реализации необходимы:

- разработка новой подробной и обобщающей системы всех существующих физических параметров светодиодов с учётом их взаимной зависимости и указанием деградационных характеристик.
- разработка новой комплексной методики измерений параметров светодиодов
- создание специальных компьютерных программ для обработки данных и расчётов различных величин, моделирования и анализа исследуемых процессов
- разработка и создание специального метрологического комплекса для реализации измерений параметров светодиодов, предусмотренных указанной методикой
- разработка и реализация особой методики технологии производства образцовых светодиодов для исследования и порядка отбора исходных комплектующих и готовых приборов
- разработка и создание технической базы для реализации наработки светодиодов при необходимых условиях.

## Глава 2.

### Система электрических, светотехнических и колориметрических характеристик светодиодов. Методика измерения параметров. Последовательность и порядок измерений в ходе эксперимента.

В данном разделе описана не только существующая система характеристик, но и предпринята попытка формирования наиболее рациональной и информативной с точки зрения автора, отражающей максимальное количество характеристик, и что самое важное, их взаимозависимостей, которые могут учитывать также и факторы деградации параметров в зависимости от времени и различных режимов работы.

Все параметры современных спецификаций делятся на группы, отражающие физический смысл и природу их происхождения, а также необходимость и удобство их использования потребителем при расчётах устройств, учитывающих или основанных на этих параметрах. В составе каждой группы существующей системы параметров светодиодов, представленные характеристики расположены вне зависимости от важности (необходимости использования) для потребителя, однако информативность и физический смысл их находится в логической последовательности, позволяющей проследить связь большинства параметров.

#### Последовательность и порядок измерений в ходе эксперимента.

Структура описываемого эксперимента подразумевает измерение максимально возможного количества параметров светодиодов, как условие для получения наиболее достоверного ответа на вопрос о причинах и природе механизмов деградации излучающих структур на основе твёрдых растворов  $A^{III}B^V$ . Однако самым важным является нахождение связи в изменениях электрических характеристик с изменениями светотехнических в процессе деградации. Поэтому основной упор был сделан на измерение этих параметров при одинаковых условиях и в одинаковых последовательностях в каждой временной точке. Некоторые величины и зависимости были измерены в двух режимах: импульсном, исключаяющем разогрев структуры и статическом, учитывающем этот фактор. Благодаря достаточно симметричной диаграмме направленности излучения светодиодов, сформированной применённой оптической системой, предварительные (тестовые) расчёты светового потока показали, что для его достоверного расчёта достаточно результата измерения углового распределения силы света в шести плоскостях. Исходя из этого, в процессе разработки эксперимента были выделены следующие параметры, входящие в общую систему параметров, и порядок их расчёта и измерения.

#### Группа электрических характеристик

1. Прямое напряжение в статическом режиме ( $I_f = 80 \text{ мА}$ ) -  $U_f$
2. Прямая вольт – амперная характеристика в импульсном режиме -  $I_f(U_f)$ .
3. Обратная вольт – амперная характеристика в импульсном режиме -  $I_r(U_r)$ .
4. Зависимость прямого напряжения от времени наработки  $U_f(t)$

#### Группа энергетических характеристик излучения

1. Угловое распределение силы света -  $I_v(\Omega)$
2. Световой поток  $\Phi$
3. Угол излучения по уровню осевой силы света  $0,5 I_v$   $2 \Omega_{0,5I_v}$

4. Зависимость силы света от прямого тока  $I_v(I_p)$
5. Распределение светового потока по углу излучения  $\Phi(\Omega)$
6. Плотность светового потока  $I_{v,\Omega}$  или  $\Phi(\Omega)/d\phi$
7. Деградационная характеристика светового потока  $\Phi(t)$
8. Деградационная характеристика силы света  $I_v(t)$

**Группа спектральных характеристик излучения.**

1. Спектральное распределение энергии излучения  $\Phi_e(\lambda)$
2. Спектральная световая эффективность  $K(\lambda)$

Время, в течение которого велось наблюдение за параметрами, было разбито на этапы, по завершении которых производился описываемый комплекс измерений, затем светодиоды снова устанавливались на наработку до завершения следующего этапа.

В каждой временной точке была реализована идентичная программа измерения всех светодиодов. Последовательность измерения параметров каждого светодиода была также строго сохранена независимо от групп светодиодов или времени наработки.

**Методика измерений и расчёта параметров.**

Частным случаем измерения углового распределения силы света является измерение её значения в одной точке. Совокупность этих точек (значений), соответствующих углу отклонения  $\Omega$  от произвольно выбранной оси и есть функция пространственного распределения силы света  $I_v(\Omega)$ .

На основе известного выражения для расчёта любого значения  $I_v$  автором было получено выражение для  $I_v$  в реальном фотометре, где учитывается спектральное распределение излучения светодиода, относительная спектральная чувствительность фотометра и его площадь, и расстояние до источника излучения, измеренное значение силы света приобретает вид:

$$I_v = \frac{K_a \cdot E^2 \cdot i}{S_\phi} \cdot \frac{\int_{\theta_{d1}}^{\theta_{dN}} E(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda \int_{\theta_{d1}}^{\theta_{dN}} E_a(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\int_{\theta_{d1}}^{\theta_{dN}} E(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \int_{\theta_{d1}}^{\theta_{dN}} E_a(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda}$$

Где:

$V(\lambda)$  – кривая видности глаза,

$E(\lambda)$  – спектральное распределение излучения исследуемого светодиода.

$E_a(\lambda)$  – спектральное распределение излучения источника типа «А».

$S(\lambda)$  – функция чувствительности фотометрической головки.

$K_a = 14,35 \text{ } \mu\text{A/lx}$ , коэффициент преобразования фотометра по источнику типа «А» (данные результатов очередной поверки).

$i$  – ток фотометра.

$L$  – расстояние до фотометра.

$S_\phi$  – площадь фотометра.

На основе полученных функций  $I_v(\Omega)$  автором предложен вариант расчёта светового потока  $\Phi$  для каждой плоскости по следующему алгоритму:

$$\Phi_1 = 2\pi \cdot \int_0^{-\Omega} I(\Omega) \cdot \sin(\Omega) d\Omega$$

$$\Phi_2 = 2\pi \cdot \int_0^{\Omega} I(\Omega) \cdot \sin(\Omega) d\Omega$$

$$\Phi = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2}$$

Соответственно, общий световой поток светодиода будет:

$$\Sigma\Phi = (\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_6) / 6$$

Функция распределения светового потока по углу излучения рассчитывается с помощью этих же формул, где интеграл имеет ограничение по любому углу. Таким образом, возможен расчёт распределения светового потока по углу излучения  $\Phi(\Omega)$  с любой точностью, стремящейся к минимальному элементарному, ограниченному только лишь возможностью фиксации угла поворота датчиком гониометра –  $0,1^\circ$ .

Непосредственно во время измерения светотехнических характеристик, после установления термодинамического равновесия измеряется значение прямого напряжения  $U_f$  на рабочем токе (80 mA) в статическом режиме. Результаты измерений в разных точках временного интервала наработки составляют деградационную характеристику прямого напряжения, которая может выглядеть как на рисунке 2.

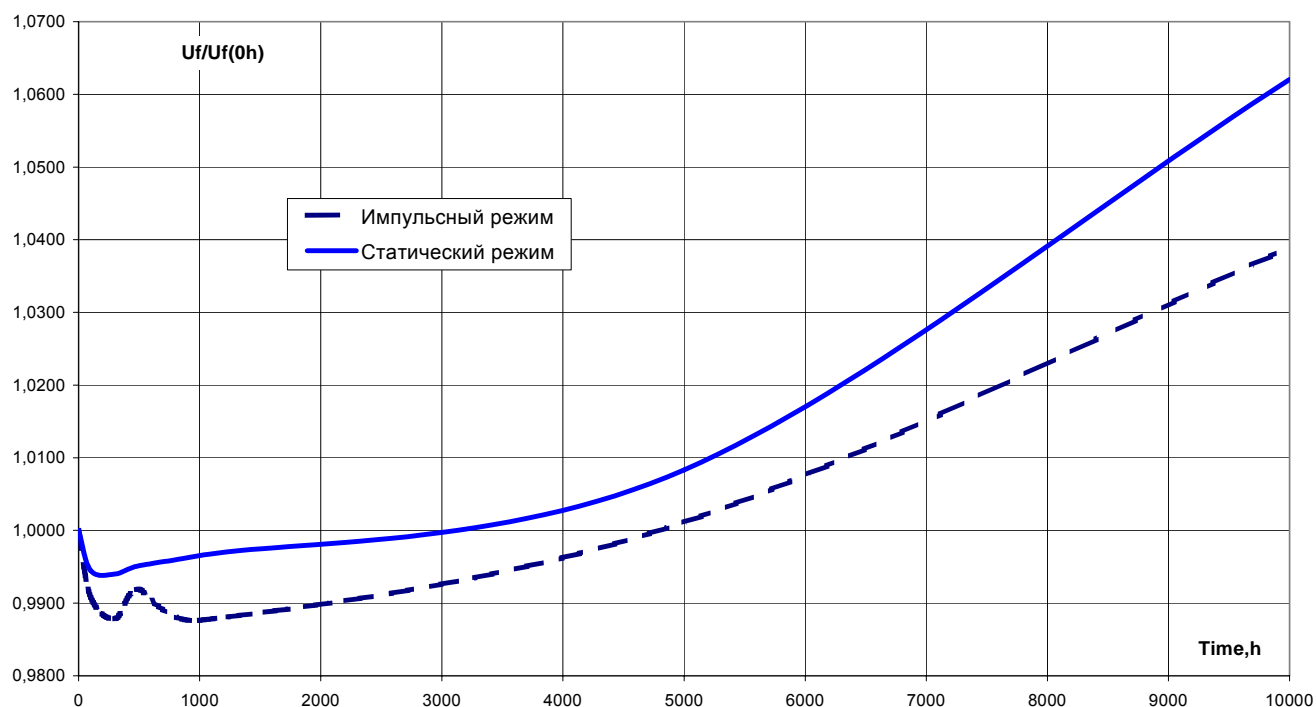


Рисунок 2. Деградационные характеристики прямого напряжения в 2-х режимах измерения. Измерение прямой вольт - амперной характеристики (ВАХ) в импульсном режиме производится также для каждого временного интервала. Установлен режим измерения с минимальной длительностью импульса тока и минимальным интервалом между импульсами, обеспечивающий его «неразогревающее» действие. Поэтому значения прямого напряжения  $U_f$  в случае его фиксации непосредственно при измерении

светотехнических характеристик и в этом варианте при одном и том же токе будут несколько отличаться (рисунок 2). Непосредственно после этого, измеритель ВАХ переходит в режим измерения обратной ВАХ. Построение семейства прямых и обратных ВАХ отражает динамику изменения электрических характеристик со временем наработки.

### Глава 3.

#### Описание концепции эксперимента по изучению деградации и построение системы оборудования для его проведения.

##### *Описание эксперимента.*

Эксперимент включает в себя основную часть, которая предполагает измерения параметров специально изготовленных образцов и изучение их деградационных характеристик по установленной программе и вспомогательную часть, в которой проводятся более детальные исследования некоторых параметров, требующих углублённого исследования с применением других режимов измерений, условий протекания наработки и образцов других конструкций. Также, к вспомогательной части эксперимента относится проверка сделанных на базе основного, выводов о причинах деградации параметров на значительной партии светодиодов, как факт практического применения результатов исследования.

##### *Изготовление образцов со специальными параметрами для исследования и технология их производства.*

Для получения достоверных результатов исследований и корректности сравнения параметров разных образцов, а также исключения влияния качества сборки на деградационные характеристики, производство светодиодов для эксперимента было выполнено по особой схеме, которая предполагала максимальное соблюдение технологии сборки приборов с контролем каждой операции и отбором из числа готовых образцов необходимого количества с предельно близкими характеристиками углового распределения силы света.

В результате отбора образцов было сформировано 6 групп светодиодов, идентичных по конструкции кристалла (таблица 1),

Таблица 1. Применяемость кристаллов в образцовых светодиодах.

# группы	Производитель кристалла	Тип кристалла	Цвет	Материал	Диапазон
1	CREE	MBright™ C470-MB290-E1000	Синий	InGaN/AlGaInP/GaN	B1 - B50
2	CREE	MBright™ C527-MB290-S0500	Зелёный	InGaN/AlGaInP/GaN	G1 - G50
3	EPISTAR	ES-CEGH713	Зелёный	InGaN/AlGaInP/GaN	Z1 - Z50
4	EPISTAR	ES-CARL512	Красный	AlGaInP	R1 - R50
5	EPISTAR	ES-SAYL814	Жёлтый	AlGaInP	Y1 - Y50
6	LUMILEDS	HWFR-B317	Жёлтый	AlGaInP	J1 - J50

по 4 подгруппы в каждой группе, и по 5 светодиодов в подгруппе. Всего 20 светодиодов в каждой группе. С учётом количества групп (6) получилось 120 образцовых приборов, отобранных по всем вышеизложенным правилам.

##### *Систематизация, разработка и изготовление измерительного и вспомогательного оборудования для проведения эксперимента.*

Для осуществления описанной программы измерений подавляющее большинство электронных устройств, механических систем и средств измерения было разработано и изготовлено специально.

**- фотометрический стенд**

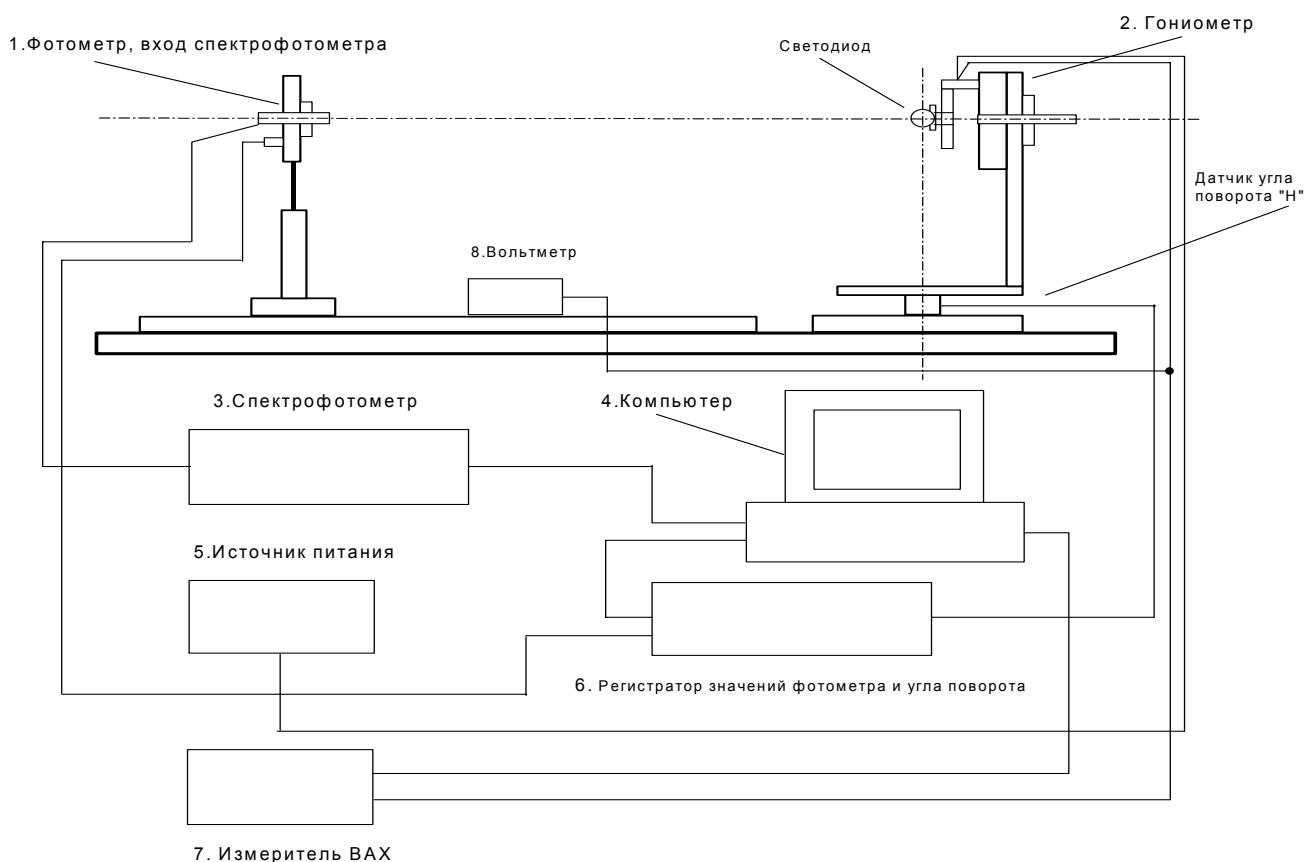


Рисунок 3. Блок – схема фотометрического стенда, специально разработанного для проведения эксперимента.

Фотометр 1 выполнен на основе фотометрической головки типа ГФ-38. Гониометр 2 имеет датчик угла поворота в горизонтальной плоскости (на рисунке 3.24. - «Н»), способный регистрировать угловое перемещение гониометра вместе с закреплённым на нём излучателем (светодиодом) в размере 6-ти угловых минут.

Прецизионный источник тока 5 имеет 3 идентичных канала с цифровой настройкой значения выходного тока отдельно в каждом канале в пределах 0 – 100 мА.

Измеритель ВАХ - 7 был разработан с учётом возможности измерений подавляющего большинства электрических характеристик светодиодов. Предусмотрена возможность изменения времени измерения между дискретами в диапазоне 20 мкс – 30 мин для реализации режимов импульсного и разогревающего действия тока. Для измерений спектрального распределения энергии излучения  $\Phi_e(\lambda)$  использовался спектрофотометр

**- оборудование для обеспечения необходимых режимов светодиодов во время наработки.**

Основным условием является факт постоянства пребывания светодиодов в рабочем состоянии, по возможности с минимальным количеством коммутационных циклов, которые обязательно внесут свой вклад в деградацию параметров. Исходя из этого, была разработана особая система питания светодиодов. Для каждого из исследуемых образцов

индивидуально была применена двухступенчатая схема стабилизации: по напряжению и току.

#### Глава 4.

#### Исследование физических механизмов деградации. Деградационные характеристики параметров светодиодов, их расчёт и практическое применение на производстве.

Анализ поведения полученных деградационных характеристик выявил наиболее общую особенность для материалов всей группы на основе твёрдых растворов  $A^{III}B^V$ : светодиоды с наибольшими значениями светового потока в группах имеют наименьшую степень деградации параметров, причём энергетическая световая эффективность при этом может и не превышать среднего для группы показателя. Это полностью подтверждается расчётом результатов данного исследования при условии формирования подгрупп светодиодов по принципу начального значения светового потока.

#### Физические механизмы деградации параметров.

Автором было высказано предположение, что многие экспериментальные данные по свойствам синих светодиодов: ширина спектрального распределения, сдвиг максимума излучения в коротковолновую область при увеличении плотности прямого тока в отсутствие нагрева активной области (например, при питании в импульсном режиме), вольт – амперные характеристики и т. д., могут быть рассмотрены на основе модели неравномерного распределения состава  $In_xGa_{1-x}N$  в активной области кристалла, при этом предлагалось рассматривать модель кристалла и светодиода, изображённую на рисунке 4. Данная модель (флуктуация содержания In в квантовых ямах) упоминалась Маняхиным Ф.И., Юновичем А.Э. при описании исследований спектрального состава излучения структур на основе  $In_xGa_{1-x}N$  с учётом хвостов плотности состояний в 2D структурах.

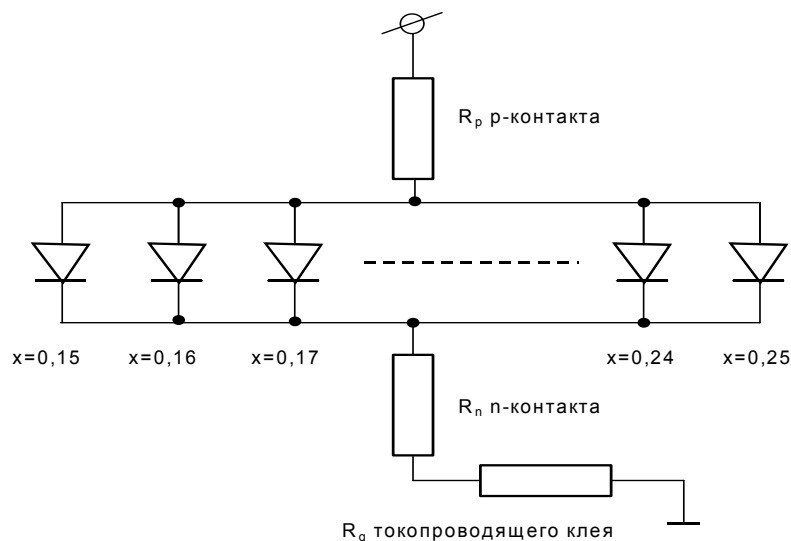


Рисунок 4. Электрическая модель светодиода.

Согласно этой модели, светодиод представляет собой совокупность параллельно включённых микродиодов, имеющих одинаковые параметры широкозонных n – GaN и p – GaN эмиттеров, но отличающихся друг от друга содержанием индия в квантовых ямах. Последовательно с этой совокупностью микродиодов включено общее сопротивление контактов. Площади микродиодов (секторов, площадок)  $S(x)$  с различным содержанием индия ( $x$ ) в квантовых ямах в первом приближении могут быть описаны гауссовским

распределением относительно средних значений  $x = 0,4$  для зелёных светодиодов и  $x = 0,2$  для синих.

$$S(x) = \frac{S_0}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \exp\left[\frac{-(x - x_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right] = \frac{S_0}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,0167} \cdot \exp\left[\frac{-(x - x_0)^2}{2 \cdot (0,0167)^2}\right] \quad (4.1)$$

где:  $S_0$  – полная площадь кристалла светодиода, величина  $x$  изменяется дискретно в пределах  $x = 0,15 \dots 0,25$  с шагом  $dx = 0,01$ , а величина  $x_0 = 0,2$ .

По многим экспериментальным данным, эта величина  $x_0$  является типичной для синих светодиодов. Величина  $\sigma = 0,0167$  выбрана из необходимости соблюдения известного условия (4.2):

$$(x_{\min} - x_0) = (x_{\max} - x_0) = 3 \sigma \quad (4.2)$$

Таким образом, было необходимо рассчитать ВАХ каждого микродиода со своим значением  $x$ , и своей величиной площади, а затем, учитывая их параллельное соединение при заданной величине прямого напряжения, рассчитать вольт – амперную характеристику светодиода в целом. При этом движение зарядов в продольном направлении (параллельно р-п переходу) не учитывалось.

Моделирование спектра излучения было основано на расчётах суммарной скорости излучательной рекомбинации в наборе квантовых ям ( $U_{BV}$ ) и полного числа квантов, излучаемых в наборе ям ( $U_{BV} \cdot S \cdot d$ ) при различных значениях состава  $x$ . На рисунке 5 приведено сравнение рассчитанной вольт – амперной характеристики и экспериментальной

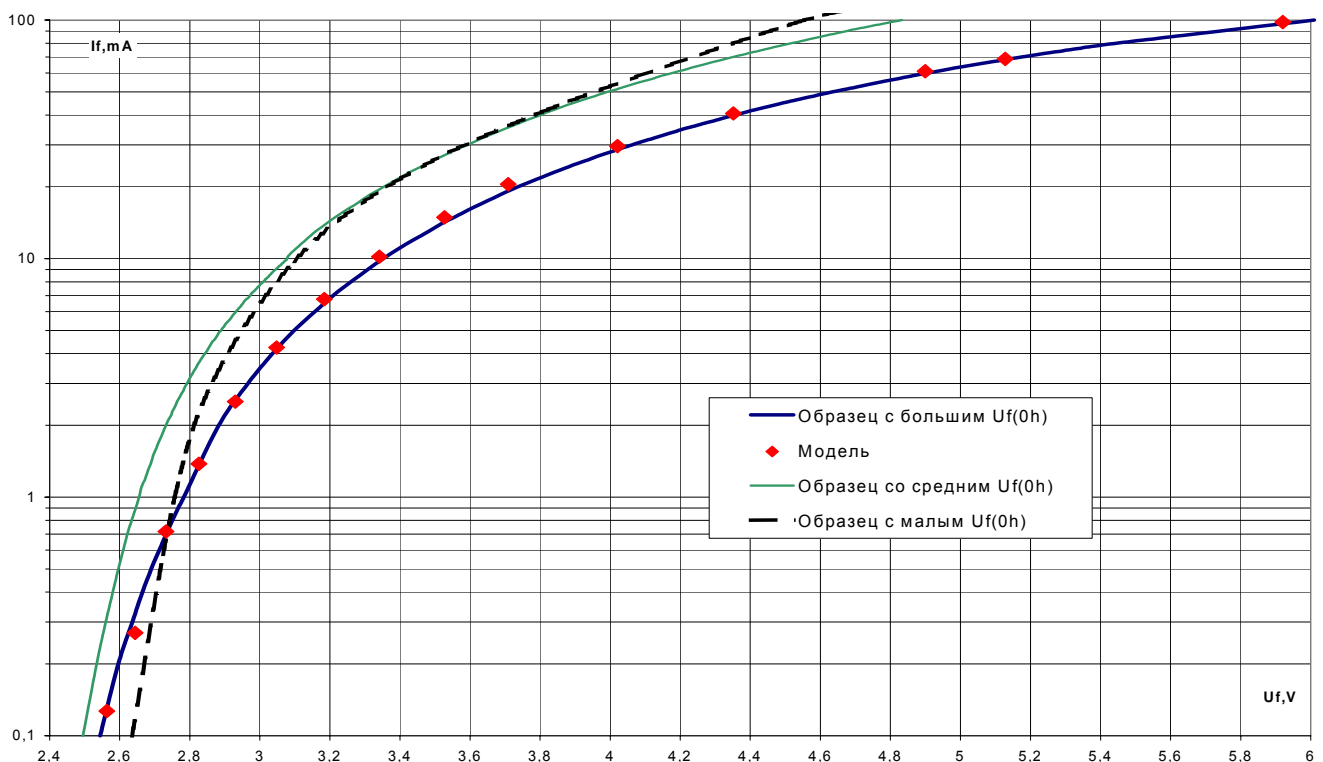


Рисунок 5. ВАХ светодиодов группы 1 с разными прямыми напряжениями в начальный момент и модель ВАХ, рассчитанная по гауссовскому распределению площадей микро – р-п переходов с различным содержанием индия. Видно отличие крутизны характеристик на самых малых и самых больших токах, свидетельствующее о большом содержании дефектов, которые отсутствуют как в образцах с большим  $U_f$ , так и в расчётной ВАХ.



ВАН светодиодов группы 1 (на основе кристалла CREE MBright™ C470-MB290-E1000, цвет – синий), подгруппы 4 (с самым высоким  $U_f(0h)$ ).

На рисунке 6. приведено сравнение рассчитанного и полученного экспериментально спектра излучения светодиодов той же группы.

При моделировании ВАН, безусловно, наличие центров безизлучательной рекомбинации не учитывалось: чем и обусловлено такое отличие модели ВАН от характеристики приборов подгруппы 1, а также совпадение с кривой приборов подгруппы 4, в излучающих структурах, в которых попросту, нет указанных дефектов в виде центров безизлучательной рекомбинации, или их количество ничтожно мало. ВАН светодиодов подгруппы 3 (среднее значение  $U_f(0h)$ ) приведено для сравнения, из которого видно, что характеристика повторяет модель, только при более низких напряжениях (вероятно, это обусловлено другой комбинацией площадей с различными  $U_f$  и  $E_g$ ), и также, не содержит дефектов, вызывающих изменение крутизны. Однако именно средний участок ВАН (15 – 30 мА) используется как при измерениях на сортировочном участке производств, так и при эксплуатации приборов, как рабочий режим. Поэтому, сходство  $U_f(0h)$  всех подгрупп на этом участке не позволяет достоверно определить истинную разницу в характеристиках светодиодов, что и происходит на производстве при существующей методике сортировки.

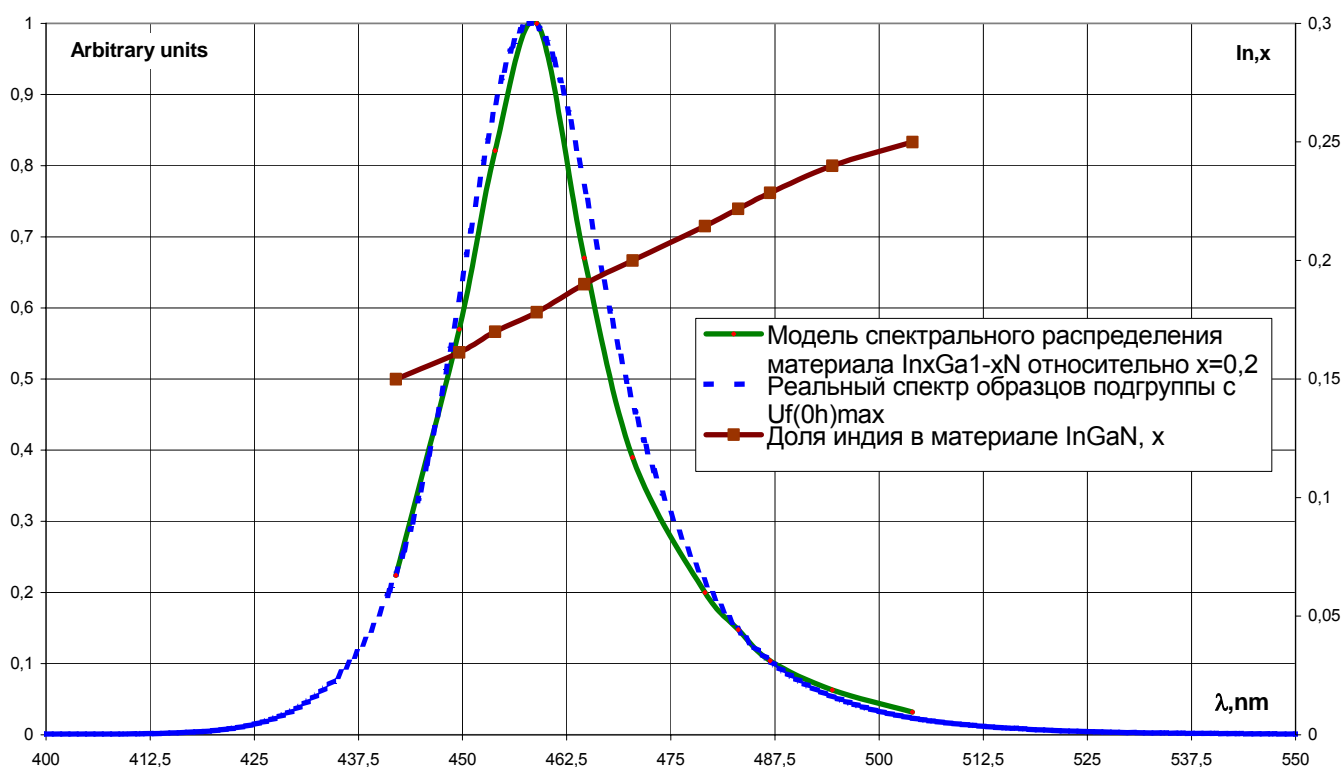


Рисунок 6. Спектр излучения. Рассчитанная модель и полученное измерение.

Соответствие полученных различным способом характеристик позволяет использовать рассчитанные данные для обоснования закономерностей в изменениях характеристик синих светодиодов, наблюдающихся при их длительной наработке, поскольку деградация величины светового потока экспоненциально зависит от плотности тока (4.3.),

$$\Phi(t) = \Phi(0h) \cdot \exp((-J) \cdot \alpha \cdot t) \quad (4.3)$$

где:

$J$  – плотность тока,  $A/cm^2$ ;

t-время наработки, h;

$\alpha$ - коэффициент, описывающий скорость деградации,  $\text{cm}^2 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$

$\Phi(t)$ -световой поток через время наработки t,

$\Phi(0h)$ -начальный световой поток, lm.

то в большей степени деградации подвержены области структуры с малыми значениями  $x = 0,15 \dots 0,17$ , через которые протекают токи с большой плотностью. Вследствие этого, спектры излучения в процессе наработки смещаются в длинноволновую сторону, поскольку более коротковолновая часть спектрального распределения деградирует быстрее. Исходя из формулы (4.4.) можно рассчитать фактор деградации светового потока  $\alpha$ , и значение светового потока в любой момент времени наработки  $t_n$  относительно начального  $\Phi(0h)$  (4.5), или установившегося в течение некоторого времени стабилизации параметров  $t_{\text{стаб}}$ , (4.6.), о котором говорилось ранее (1000 – 3000 часов), что может служить долгосрочным прогнозом поведения этой важной характеристики и выводом о качестве и надёжности светодиода.

$$\alpha = - \ln[\Phi(t_2) / \Phi(t_1)] / J \cdot (t_2 - t_1) \quad (4.4.)$$

где:

$\Phi(t_1)$  – световой поток через время наработки  $t_1$

$\Phi(t_2)$  – световой поток через время наработки  $t_2$

J-плотность тока,  $\text{A}/\text{cm}^2$ ;

$$\Phi(t) = 1,0 \cdot \exp((-J) \cdot \alpha \cdot t_n) \quad (4.5.)$$

$$\Phi(t) = [\Phi(t_{\text{стаб}}) / \Phi(0h)] \cdot \exp((-J) \cdot \alpha \cdot t_n) \quad (4.6.)$$

На основе предложенных выражений для расчётов, производится оценка деградации светового потока произведённых светодиодов без их долговременной наработки и вывод об их качестве.

### **Практическое применение результатов эксперимента на производстве.**

На основании лабораторного эксперимента по изучению деградации был рассчитан примерный прогноз поведения осевой силы света отдельных групп диодов, сформированных по признаку различия наклонов ВАХ (как функций прямого напряжения от тока), и разработан план проведения производственного исследования по проверке возможностей сортировочной машины дифференцировать описанные группы диодов, и соответствии поведения светового потока во времени отсортированных образцов по рассчитанным в лаборатории зависимостям.

Для данного исследования были отобраны светодиоды, предварительно уже отсортированные на выходе из производства, и имеющие по показаниям начальной (0h наработки) сортировки, одинаковые параметры  $I_v$ ,  $U_f$ ,  $L_{\text{dom}}$ , не имеющие обратного тока, и признанные годными. Также, всё количество (более 100000 образцов каждого типа) было произведено одной сменой персонала, из комплектующих одной партии и в одно время. Эта сортировка проводилась по стандартной методике на одном значении тока – 20 mA. Однако значения прямого напряжения на этом токе не имеют достаточного разброса для деления светодиодов на группы из – за специфического хода ВАХ (рисунок 7), и как говорилось ранее, существенное отличие может быть замечено лишь при больших плотностях тока. Выявление этого факта стало возможным только при исследовании

большого числа светодиодов по предложенной методике, и позволило обнаружить очень важный недостаток в принятой мировой практикой производства системе сортировки готовых светодиодов, и тем самым объяснить причину появления потенциально дефектных приборов в общей массе признанных годными. Поэтому, было принято решение об измерении всех возможных параметров приборов всей партии на пяти точках значения тока  $I_f = 10, 20, 40, 80, 100 \text{ mA}$  (что возможно реализовать в подавляющем большинстве типов сортировочных машин без увеличения затрат времени на измерение одного образца) в импульсном режиме, с временными параметрами импульсов токов, рекомендованных производителем светодиодов. А сортировку по прямому напряжению после расчёта его значения, производить на токах не менее 60 -80 mA.

Отсортированные по рассчитанному признаку диоды (3 группы по наклону ВАХ) при нулевой наработке имели следующий разброс по силе света от максимального значения всей партии:

- с большой крутизной (зона 1 рисунка 7) ВАХ - 94-95%
- со средней крутизной (зона 2 рисунка 7) ВАХ - 100%
- с меньшей крутизной (зона 3 рисунка 7) ВАХ - 95-96%

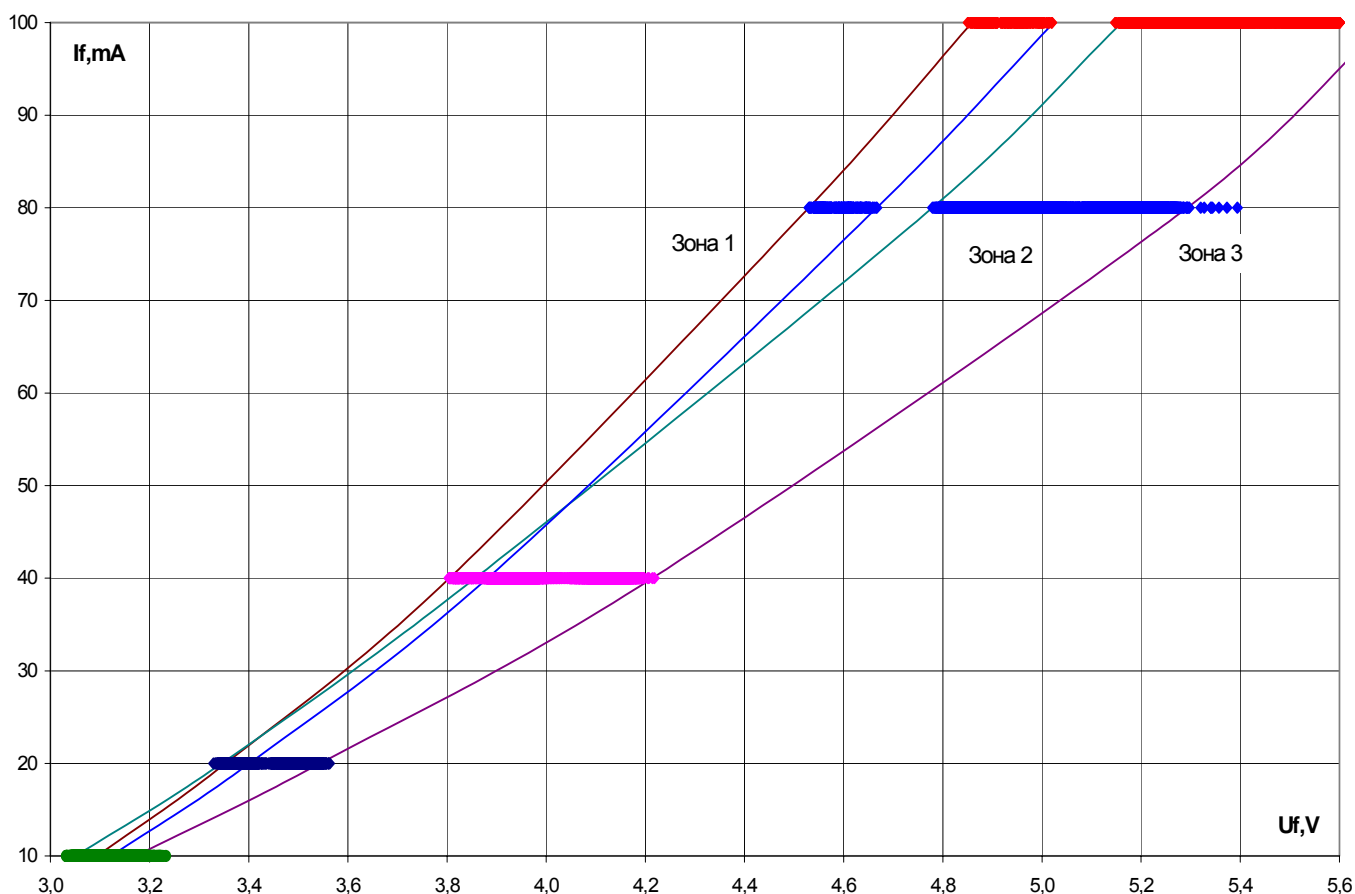


Рисунок 7. Вольт – амперные характеристики светодиодов, исследовавшихся на производстве при нуле часов наработки. Диаграмма включает не менее 100000 образцов.

После проведения операции искусственного старения, соответствующей не менее чем 3 – 5 тыс. часам наработки и сортировки по описанному критерию, были получены следующие результаты по силе света от максимального значения всей партии:

- с большой крутизной (зона 1 рисунка 7) ВАХ - 84-86%
- со средней крутизной (зона 2 рисунка 7) ВАХ - 100%
- с меньшей крутизной (зона 3 рисунка 7) ВАХ - 94-95%.

Как видно из представленных результатов, предположение об увеличенной деградации силы света светодиодов группы с большой крутизной ВАХ подтверждается.

### Выводы

1. Разработана новая система существующих параметров светодиодов, основанная на учёте их физических взаимозависимостей и включающая характеристики, описывающие деградацию параметров светодиодов (скорость деградации светового потока и силы света, изменение прямого напряжения за время наработки), позволяющая установить связь любого параметра с последующей деградацией других, что необходимо при проектировании устройств на светодиодах.

2. Установлено, что основные характеристики светодиодов на основе AlGaInN: ширина спектрального распределения, сдвиг максимума излучения в коротковолновую область при увеличении плотности прямого тока в отсутствие нагрева активной области (например, при питании в импульсном режиме), вольт – амперные характеристики и т. д., могут быть рассчитаны на основе модели неравномерного распределения состава  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  в активной области кристалла, а излучающий кристалл представляет собой совокупность параллельно включённых микродиодов, имеющих одинаковые параметры широкозонных  $n$  – GaN и  $p$  – GaN эмиттеров, но отличающихся друг от друга содержанием индия в квантовых ямах.

3. С помощью компьютерного моделирования активной области структуры в части суммарной скорости излучательной рекомбинации в наборе квантовых ям ( $U_{\text{ВВ}}$ ) и полного числа квантов, излучаемых в наборе ям ( $U_{\text{ВВ}} * S * d$ ), установлено, что через площадки с меньшим ( $x < 0,2$ ) содержанием индия ( $x$ ) в квантовых ямах проходит ток значительно большей плотности, что объясняет ускоренную деградацию характеристик их излучения и соответствующее этому, смещение спектрального состава излучения всей структуры в длинноволновую сторону.

4. Предложенная модель излучающей структуры светодиода, представляющая из себя совокупность мини  $p$ - $n$  переходов с различными  $U_f$  и  $E_g$ , формирующими своим параллельным включением суммарную вольт – амперную характеристику и спектральное распределение излучения объясняет связь электрических характеристик структуры и физические механизмы деградации светового потока.

5. Установлена взаимосвязь между изначальными параметрами и показателями деградации тех или иных характеристик светодиодов на основе различных конструкций кристаллов. На примере поведения вольт - амперных характеристик и диаграмм распределения светового потока со временем наработки, показана возможная причина возникновения деградации параметров излучения и связь её величины со значением прямого напряжения при определённой плотности тока в начальный момент времени наработки: меньшему значению прямого напряжения соответствует больший показатель деградации светового потока.

6. Разработана методика измерения и расчёта базовых характеристик светодиодов (светотехнических, фотометрических, колориметрических, электрических, энергетических и температурных), порядок проведения измерений и их последовательность, применимая при измерениях соответствующих величин современными средствами (гониметрами разрешения не менее 0,1 градуса и диапазоном 0,1 – 10000 кд) и получения их значений с максимальной точностью.

7. Разработан и создан универсальный метрологический комплекс для реализации измерений параметров светодиодов, а также техническая база для реализации наработки светодиодов продолжительностью не менее 50000 часов. Создана нормативная база, документация и проведена сертификация средств измерений в установленном поверочной схемой порядке (с занесением в Государственный реестр средств измерений).

8. Разработана методика отбора образцов излучающих кристаллов и светодиодов для проведения экспериментов по определению деградации позволяющая осуществлять определение свойств излучающих структур в диапазоне плотностей тока через р-п-переход до 120А/см<sup>2</sup>. Установлены основные типы производственных и технологических дефектов (несоблюдение технологии монтажа излучающего кристалла: посадка на основание, приварка контактных проводников, температурные режимы сушки и полимеризации эпоксидных составов и условий проведения ускоренного старения, и т. д.), являющихся причиной появления деградации параметров светодиодов, не связанной с исследуемыми в работе механизмами её появления.

9. Используемые на производстве светодиодов разработанные методики сортировки готовой продукции на основе контроля деградации параметров с применением питания светодиодов током большой плотности в импульсном режиме в момент измерения, не менее чем на 95% позволили снизить долю выхода к потребителю светодиодов с деградацией светового потока или осевой силы света более 15% за 5000 – 7000 часов наработки, что недопустимо при применении в большинстве устройств.

10. Показано, что разработанная методика проведения комплексного эксперимента по изучению механизмов деградации параметров, как готовых светодиодов, так и кристаллов для их производства на основе твёрдых растворов AlGaInP и AlGaInN различных конструкций позволяет получать и исследовать большинство характеристик излучения указанных структур для широкого спектра научных и производственных задач.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Аникин П.П., Аникин Д.П., Никифоров С.Г., Столяревская Р.И. Методы измерения световых характеристик светодиодов. // Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы». Москва, МГУ им. Ломоносова, 2001 год (01 – 02. 11.). Материалы конференции, стр. 31 – 32.
2. Агафонов Д.Р., Аникин П.П., Никифоров С.Г. Вопросы конструирования и производства светоизлучающих диодов и систем на их основе. // «Светотехника» № 6 2002, стр. 6 - 11.
3. Абрамов В.С., Никифоров С.Г., Соболев П.А., Сушков В.П. Свойства зелёных и синих InGaN – светодиодов. // «Светодиоды и лазеры» № 1 – 2 2002, стр. 30 - 33.

4. D.R. Agafonov, P.P. Anikin, S.G. Nikiforov. On Design and Manufacturing of LED and systems based on LED. // «Light & Engineering», volume 11, number 1, 2003, p. 50 – 56.
5. D. Agafonov, M. Murashova, S. Nikiforov, O. Pinchuk, R. Stolyarevskaya. Red LED Railway Traffic Lights Visional Perception Research. // report to 25<sup>th</sup> CIE Session 2003 (25 June – 2 July), San Diego, USA. Proceedings, volume 2, p. D4-40 – D4-43.
6. Агафонов Д.Р., Мурашова М.А., Никифоров С.Г., Пинчук О.П., Столяревская Р.И. Исследования визуального восприятия красных железнодорожных светофоров на основе светоизлучающих диодов // «Светотехника» № 6 2003, стр. 22 - 27.
7. D. Agafonov, M. Murashova, S. Nikiforov, O. Pinchuk, R. Stolyarevskaya Red LED Railway Traffic Lights Visional Perception Research. // «Light & Engineering», volume 11, number 4, 2003, p. 40 – 42.
8. Абрамов В.С., Никифоров С.Г., Сушков В.П., Шишов А.В. Особенности конструирования мощных белых светодиодов. // «Светодиоды и лазеры» № 1 – 2 2003, стр. 10 - 12.
9. Никифоров С.Г., Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества. // «Компоненты и Технологии» №5 2005, стр. 48 - 57.
10. Никифоров С.Г. Почему светодиоды не всегда работают так, как хотят их производители? // «Компоненты и Технологии» №7 2005, стр. 16 - 24.
11. Никифоров С.Г. Температура в жизни и работе светодиодов .1 часть. // «Компоненты и Технологии» №9 2005, стр. 48 - 54.
12. Никифоров С.Г. Температура в жизни и работе светодиодов. 2 часть. // «Компоненты и Технологии» №1 2006, стр. 18 - 23.
13. Никифоров С. Г. Теперь электроны можно увидеть: светодиоды делают электрический ток очень заметным. // «Компоненты и технологии» №3 2006, с. 20 - 27.
14. Никифоров С.Г., Сушков В.П. Измерительная лаборатория для комплексного исследования характеристик светодиодов и проведения экспериментов по изучению деградации параметров излучающих  $A^{III}B^V$  - структур. // Материалы семинара «МИСиС – ULVAC – АГУ «Перспективные технологии и оборудование для материаловедения, микро- и нанoeлектроники» 2006, стр. 645.
15. Никифоров С. Г. Исследование параметров семейства светодиодов CREE XLamp. // «Компоненты и технологии» №11 2006, стр. 42 - 49.