

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

*На правах рукописи*

УДК 621.382.2-021.465

НАРОНСКИЙ  
Игорь Иванович

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ  
СВЕТОДИОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Автореферат  
на соискание степени магистра техники и технологии  
по специальности 1-39 81 01 Компьютерные технологии  
проектирования электронных систем

Научный руководитель  
канд. техн. наук, доцент  
ЛИХАЧЕВСКИЙ Дмитрий Викторович

Минск 2015

Работа выполнена на кафедре экономической информатики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель:

**Лихачевский Дмитрий Викторович,**

кандидат технических наук, доцент, декан факультета компьютерного проектирования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Рецензент:

**Захаров Александр Георгиевич,**

кандидат физико-математических наук, начальник управления подготовки кадров высшей квалификации «Белорусский государственный университет»

Защита диссертации состоится «24» января 2015 г. года в 9<sup>30</sup> часов на заседании Государственной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г.Минск, ул. П.Бровки, 6, 1 уч. корп., ауд. 415, тел.: 293-20-88, e-mail: [kafpiks@bsuir.by](mailto:kafpiks@bsuir.by)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

## ВВЕДЕНИЕ

Светодиодные элементы стали неотъемлемой частью в различных сферах человеческой деятельности. Массовое использование обуславливается быстрым ростом энергетических показателей, надежности и долговечности источников излучения. Экономический успех связан с непрерывным совершенствованием всех составляющих процессов создания светодиодов.

Эффективность светодиодных элементов – это отношение мощности светового излучения к потребляемой мощности. Этого можно достигнуть путем усовершенствования качества материалов, улучшения структуры чипа и технологии его формирования, текстурированием поверхности, улучшение свойств подложки. Одним из таких методов является так называемая технология обратного монтажа (*flip-chip*).

Метод обратного монтажа представляет собой процесс прикрепления полупроводникового кристалла на подложку лицевой стороной вниз, включает ультразвуковую и термозвуковую сварку, соединение с помощью анизотропных проводящих клеев и пайку плавлением. Применение *flip-chip* технологии для светодиодов позволяет уменьшить размеры корпусов, улучшить электрические характеристики и специфические требования к высокочастотным микросборкам. Также к достоинствам данного метода относится минимизация длины соединений, короткие электрические проводники приводят к уменьшению индуктивности по всей длине соединения, а значит, к снижению потерь сигнала и увеличению скорости его распространения вне кристалла, что делает возможным применение данной технологии при изготовлении высокочастотных приборов, работающих в мега- и гигагерцовых диапазонах.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В настоящее время разработка высокоэффективных мощных светодиодных является одной из основных задач в исследовании полупроводниковых приборов на основе нитрида галлия и его твердых растворов. Несмотря на большое количество работ, направленных на повышение внешнего квантового выхода излучения, его значение в лучших образцах светодиодов не превышает 40–50%. Наиболее эффективными способами преодоления этой проблемы представляются создание рассеивающих свет поверхностей, микрорезонатора внутри активной области фотонного кристалла, а также применение *flip-chip* конструкции светодиода кристалла.

Конструкция *flip-chip* светодиода кристалла с отражающим верхним контактом и вывод света через сапфировую подложку, является весьма эффективной с точки зрения вывода света из кристалла. В этой конструкции оптимизация углов наклона боковых стенок меза-структуры позволяет добиться увеличения внешней квантовой эффективности на 10–15%. Однако эффективность вывода света падает с увеличением геометрических размеров кристалла, поскольку для кристаллов большого размера меньше удельный

вклад в общий поток света, отраженного от наклонных боковых стенок мезоструктуры. С другой стороны, создание светодиодных кристаллов с большой оптической мощностью излучения требует использования большой площади активной области. В кристаллах большой площади на первый план выходит проблема повышения эффективности вывода света путем создания рассеивающих поверхностей на границах полупроводник/подложка или полупроводник/металл.

### **Степень разработанности проблемы**

Исследования, посвященные разработке новых методов по производству и оптимизации светодиодных элементов широко освещаются в работах В. Ланин, В. Толмачева, А. Прохоровой, Ф. Шуберта, А. Скрипченко и других авторов. Изучение актуальных проблем в разработке представлено в работах С. Гужов, Ж. Алферов, М. Робле.

Среди большого числа математических исследований по этой теме необходимо отметить работы Д. Закгейм, К. Пирс и Н. Ли.

Авторами российских работ, посвященных изучению методов повышения работоспособности светодиодных элементов и их внедрение в широкое применение, являются О. Зенкевич, А. Игнатенко, Д. Адамов, В. Мешков.

Основным недостатком этих исследований является сложность и не всегда доступность высококачественного оборудования, необходимого для прецизионных работ.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертации является разработка метода повышения работоспособности светодиодных элементов, выявление достоинств и недостатков, меры по их усовершенствованию.

Для выполнения поставленной цели в работе были сформулированы следующие задачи:

- освещаются технологии производства светодиодных элементов;
- рассматриваются схемы питания светодиодных элементов;
- анализируются существующие методы повышения работоспособности светодиодных элементов;
- осуществляется постановка цели и задачи исследований;
- выявляются возможности использования светодиодных элементов;
- приводится классификация светодиодов;
- освещается методика проведения обратного монтажа (*flip-chip*);
- разрабатываются рекомендации по практическому применению методики проведения обратного монтажа.

**Объектом** исследования является метод повышения работоспособности светодиодных элементов.

**Предметом** работы выступают факторы, определяющие совершенствование технических и рабочих характеристик светодиодов.

**Область исследования.** Содержание диссертационной работы соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

### **Теоретическая и методологическая основа исследования**

В основу диссертации легли результаты исследований различных ученых, специализирующихся на разработке современных методов производства высокотехнологических приборов на основе светодиодных элементов.

Для получения теоретических результатов исследования применялись математические модели современных способов, направленных на оптимизацию и улучшение существующих показателей работоспособности светодиодов.

Имитационные расчеты по математической модели производительности осуществлены в пакете MultiSim 12. Обработка теоретических данных проводилась с использованием MSWord.

**Информационная база** исследования для метода повышения работоспособности сформированы на основе статистических данных.

**Научная новизна диссертационной работы** заключается в разработке метода повышения работоспособности светодиодных элементов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Обобщенная технология производства светодиодных элементов, технологические этапы формирования конечного элемента, достоинств светодиодов, схемы и устройства (светодиодный драйвер), призванные преобразовать источник напряжения в источник тока, для поддержания его на постоянном уровне.

2. Достоинства светодиодных элементов, обзор отраслей, где наиболее широко используются преимущества светодиодов перед традиционными источниками освещения, параметры классифицирующие светодиодные элементы по различным параметрам: излучаемому свету, количеству цветов, способу монтажа, расчет эффективности предложенного экземпляра согласно общепринятой методике.

3. Методика проведения обратного монтажа, присоединение кристаллов по технологии flip-chip ультразвуковой и термозвуковой сваркой, присоединение с помощью анизотропных или изотропных проводящих клеев, пайка оплавлением, метод удаления сапфировой подложки.

**Теоретическая значимость** диссертации заключается в том, что в ней предложен метод повышения работоспособности светодиодных элементов. Представлена математическая модель, демонстрирующая изменение основных характеристик светодиодов в сторону увеличения внешнего квантового выхода и КПД в целом.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что на основе предложенного метода повышения работоспособности светодиодных эле-

ментов можно добиться значительного роста производительности и экономичности готового элемента.

### **Апробация и внедрение результатов исследования**

Результаты исследования были неоднократно представлены на в XVIII всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «НИТ-2013» (Рязань, 13-15 ноября 2013 г.), Международной научно-технической конференции, приуроченной к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 года), VII Международной молодежной научно-технической конференции «Новые направления развития приборостроения» (Минск, апрель 2014 г.).

### **Публикации**

Основные положения работы и результаты диссертации изложены в четырех опубликованных работах общим объемом 5,0 стр. (авторский объем 5,0 стр.).

**Структура и объем работы.** Структура диссертационной работы обусловлена целью, задачами и логикой исследования. Работа состоит из введения, трёх глав, заключения, библиографического списка и приложения. Общий объем диссертации – 72 страниц. Работа содержит 1 таблицу, 41 рисунок. Библиографический список включает 39 наименования.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В **общей характеристике работы** сформулированы ее цель и задачи, показана связь с научными программами и проектами, даны сведения об объекте исследования и обоснован его выбор, представлены положения, выносимые на защиту, приведены сведения о личном вкладе соискателя, апробации результатов диссертации и их опубликованность, а также, структура и объем диссертации.

В **первой главе** рассматривается технология производства светодиодных элементов, приведены основные этапы:

- выращивание кристалла предусматривает процесс металлоорганической эпитаксии – ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки). Эпитаксиальный рост полупроводников осуществляется методом термического разложения металлоорганических соединений, содержащих необходимые химические элементы;

- на этапе создания чипа происходят такие процессы, как травление, создание контактов, резка. Весь этот комплекс получил название планарная обработка пленок, пленка, выращенная на одной подложке, разделяется на несколько тысяч чипов;

- биннирование предусматривает отбор светодиодов, удовлетворяющих необходимые критерии;

– создание светодиода – это заключительный этап технологической цепочки, на котором создается корпус будущего источника света, монтируются выводы, подбирается люминофор, изготавливаются линзы.

Приводятся схемы приборов (светодиодные драйверы), направленных на защиту светодиодов от обычных колебаний напряжения, а также от перенапряжений и скачков напряжения. Рассмотрены различные варианты электропитания светодиодных элементов: низковольтная питающая сеть, встроенный источник питания, интегрированный источник питания.

Проанализированы методы повышения работоспособности светодиодных элементов:

- метод наноформованной сапфировой подложки;
- технология фотонных кристаллов;
- эпитаксиальное боковое приращивание;
- поверхностный плазмон;
- наноттисковая литография и др.

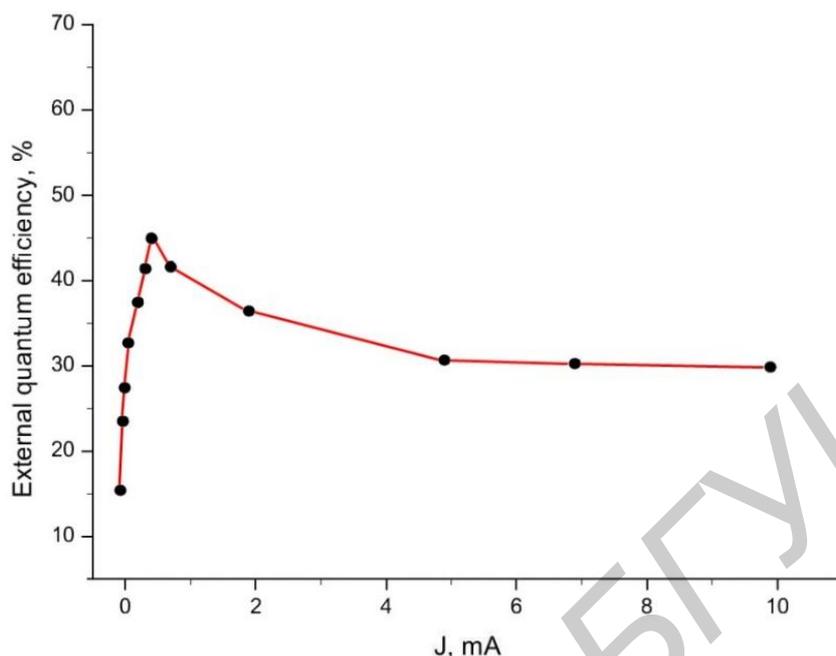
Во **второй главе** рассматриваются особенности светодиодов в отличие от стандартных ламп накаливания и энергосберегающих. Перечислены главные достоинства: длительный срок службы работы, экономичность, экологическая безопасность, высокая надежность, механическая прочность, виброустойчивость, низкие эксплуатационные расходы и др.

Технико-экономические показатели светодиодных светильников позволяют эффективно использовать их при освещении самых различных объектов: производственных и складских помещений предприятий, автомобильных парковок и автозаправочных станций, теплиц, площадей, парковых и пешеходных зон, улиц, дорог, мостов, тоннелей, объектов ЖКХ, гостиниц и административных зданий, железнодорожных платформ и станций, для архитектурной подсветки зданий и сооружений, фонтанов, аварийного и офисного освещения, территорий дворов, в больницах, школах и др.

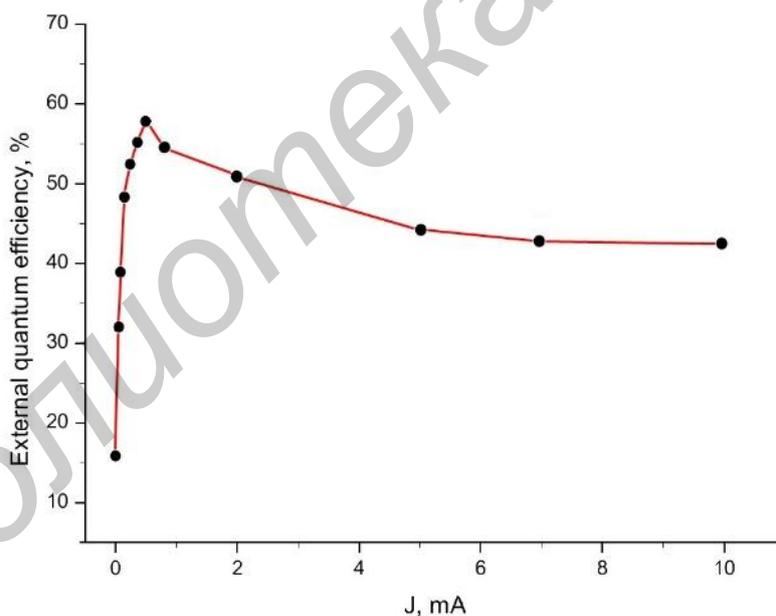
Одним из преимуществ светодиодных светильников уличного освещения является излучаемый свет максимально близкий к естественному солнечному белому свету. Все более широкое распространение получают современные светодиодные светофоры.

В **третьей главе** представлены результаты по удалению сапфировой подложки на готовом светодиодном кристалле, смонтированном *flip-chip* монтажом на кремниевой плате. Для создания рассеивающей поверхности после проведения удаления применялось реактивное ионное травление поверхности *n-GaN* в газовой смеси  $Cl_2:Ar$ . На рисунках 1 и 2 изображены зависимости внешней квантовой эффективности светодиода от тока: в первом случае используется светодиод со стандартной сапфировой подложкой, во втором – с удаленной сапфировой подложкой. Максимум внешней квантовой эффективности достигается на токе 0,5 мА (45% и 58 % соответственно), когда инжектированный ток главным образом протекает через активный регион гетероструктуры. При дальнейшем увеличении тока квантовый выход плавно

спадает вследствие насыщения каналов излучательной рекомбинации и тепловых эффектов.



**Рисунок 1 – Зависимость внешней квантовой эффективности светодиода с сапфировой подложкой от тока**



**Рисунок 2 – Зависимость внешней квантовой эффективности светодиода с удаленной сапфировой подложкой от тока**

На рисунках 3 и 4 приведена зависимость КПД от тока протекающего через светодиод, для различных образцов. Максимум эффективности достигается практически сразу после зажигания светодиода. Затем вследствие экспоненциального нарастания электрической мощности и следовательно уве-

личения тепловых потерь происходит постепенный спад эффективности работы.

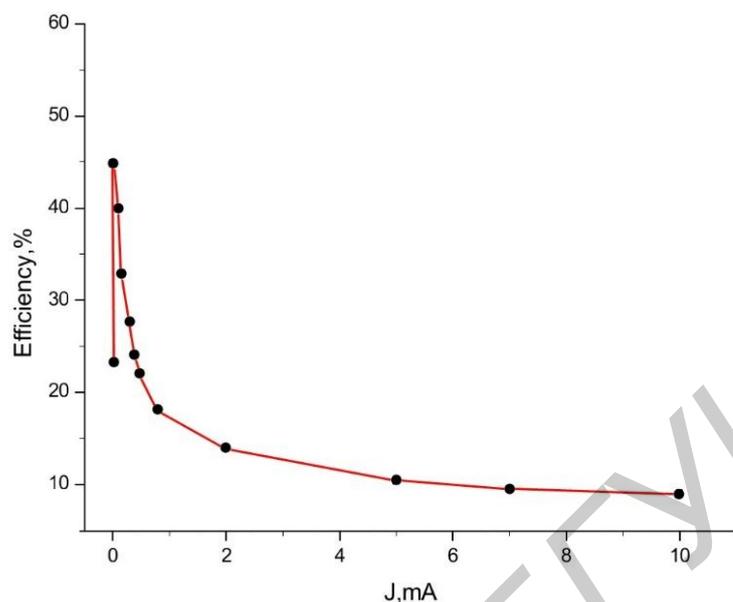


Рисунок 3 – Зависимость КПД от тока для светодиода с сапфировой подложкой от тока

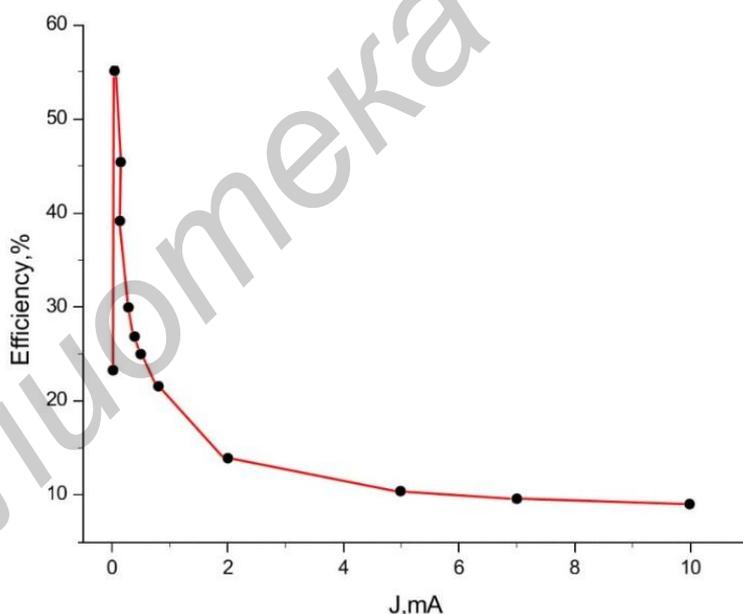


Рисунок 4 – Зависимость КПД от тока для светодиода с удаленной сапфировой подложкой от тока

Здесь же проводится разработка метода реализации методики проведения обратного монтажа. Процесс монтажа *flip-chip* заключается в присоединении полупроводникового кристалла интегральной микросхемы на подложку активной стороной вниз. Выводы кристалла могут быть выполнены из проводящего полимера, а также представлять собой металлические шарики или столбики металла (*Au*, *Cu*), припоя или металлические контактные площадки. Методы присоединения кристаллов по технологии *flip-chip* включа-

ют ультразвуковую и термозвуковую сварку, присоединение с помощью анизотропных или изотропных проводящих клеев, пайку оплавлением. Основными преимуществами технологии являются возможность матричного расположения контактных площадок и очень малая протяженность межкомпонентных соединений, что сводит к минимуму величину их индуктивности. *Flip-chip* компоненты заслуженно зарекомендовали себя благодаря своим очевидным преимуществам, к которым относятся:

- экономия места на печатной плате;
- сокращение длины соединений, что обеспечивает лучшие электрические параметры;
- меньшее количество соединений, что сокращает количество потенциальных узлов отказа и обеспечивает более эффективное распределение тепловой энергии.

Из графиков видно, что удаление подложки благоприятно влияет на показатель внешней квантовой эффективности, а также на оптические характеристики и на 10% КПД светодиода в целом.

В **приложении** приводится графическое изображение презентации, подготовленной для защиты магистерской диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в рамках диссертационной работы теоретические и практические результаты направлены на совершенствование методов повышения работоспособности светодиодных элементов в частности удаление сапфировой подложки с поверхности кристалла.

Представлена обобщенная технология производства светодиодных элементов, определены технологические этапы формирования конечного элемента. Выявлен ряд достоинств светодиодов, зарекомендовавших себя, как перспективные возможности добиться ощутимого экономического эффекта.

Рассмотрены схемы и устройства (светодиодный драйвер), призванные преобразовать источник напряжения в источник тока, для поддержания его на постоянном уровне. Светодиодный драйвер предназначен для защиты светодиодов от обычных колебаний напряжения, а также от перенапряжений и скачков напряжения.

Проведен анализ существующих методов, направленных на повышение эксплуатационных характеристик светодиодных элементов. Определено, что наиболее распространенным методом повышения светоотдачи обычных кристаллов является случайное текстурирование верхнего слоя *p-GaN*.

В ходе работы выявлены многочисленные достоинства светодиодных элементов, представлены отрасли, где наиболее широко используются преимущества светодиодов перед традиционными источниками освещения. Определены параметры классифицирующие светодиодные элементы по различным параметрам: излучаемому свету, количеству цветов, способу монтажа и др. Выполнен расчет эффективности предложенного экземпляра согласно общепринятой методике. Проанализирована методика проведения обрат-

ного монтажа (*flip-chip*), рассмотрены технологии ультразвуковой и термо-звуковой сварки, по средствам которых осуществляется процесс присоединения кристалла к подложке.

Таким образом можно сделать вывод, что метод удаления сапфировой подложки, исследованный в работе, является перспективным в плане роста дальнейшего потенциала увеличения рабочих показателей светодиода, о чем свидетельствуют графики зависимостей обычного образца и исследуемого. Во время испытаний был получен образец, квантовая эффективность которого превосходит традиционный почти на 10%, что является хорошим показателем для совершенствования и отладки представленной технологии и с возможным ее внедрением в широкое производство.

### **Список опубликованных работ**

[1–А]. Наронский, И.И. Методы повышения работоспособности светодиодных элементов / И.И. Наронский, Д.В. Лихачевский // Новые информационные технологии в научных исследованиях «НИТ-2013»: материалы XVIII всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 13-15 ноября 2013 г. - Рязань, ФГБОУ ВПО «РГРТУ», 2013. – С.111-112.

[2–А]. Наронский, И.И. Достоинства метода обратного монтажа (*flip-chip*) / И.И. Наронский, Д.В. Лихачевский // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 года): материалы конф. В 2 ч. Ч. 2. – Минск, 2014. – в печати.

[3–А]. Наронский, И.И. Методы повышения внешнего квантового выхода излучения светодиодов / И.И. Наронский, Д.В. Лихачевский // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР (Минск, 18-19 марта 2014 года): материалы конф. В 2 ч. Ч. 2. – Минск, 2014. – в печати.

[4–А]. Наронский, И.И. Метод *flip-chip* с отражающим задним контактом / И.И. Наронский, Д.В. Лихачевский // Новые направления развития приборостроения: материалы VII Международной студенческой научно-технической конференции, Минск, 23-25 апреля 2014 г. / БНТУ. – Минск, 2014. – С. 133.