

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**«Томский государственный университет систем управления и  
радиоэлектроники»  
(ТУСУР)**

**Кафедра радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга  
(РЭТЭМ)**

УТВЕРЖДАЮ

Декан РКФ

\_\_\_\_\_ Д.В. Озеркин

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СВЕТОДИОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И  
СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ**

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и  
самостоятельной работе

Зав. кафедрой РЭТЭМ

\_\_\_\_\_ В.И. Туев

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Томск 2017

Туев В.И. Современные проблемы светодиодных технологий и светотехнических устройств: учебно-методическое пособие по практическим занятиям и самостоятельной работе. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2017. – 101 с.

Учебно-методическое пособие по практическим занятиям и самостоятельной работе предназначено для обучающихся в магистратуре по направлению 11.04.03 Конструирование и технология электронных средств.

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Список литературы к введению.....	5
1 Конструкция и технические характеристики светодиода кристалла.....	7
1.1 Топология и размеры кристалла.....	7
1.2 Исследование процессов, технологических режимов установки для лазерного «отстрела» пленочных композиций на основе GaN от эпитаксиальной подложки.....	11
1.3 Вертикальная конфигурация светодиодов, как способ улучшения выходных параметров и методы ее создания.....	14
1.4 Отделение гетероэпитаксиальных слоев от сапфировой подложки путем «отстрела» под воздействием мощного импульса лазерного УФ-излучения (Laser Lift-off или LLO).....	17
1.5 Разработка технологии нанесения наноразмерного покрытия для увеличения внешней квантовой эффективности.....	20
1.6 Моделирование оптических характеристик с помощью просветляющих покрытий.....	29
1.7 Исследования оптических характеристик просветляющих покрытий на различных подложках.....	31
1.8. Исследование просветляющих покрытий на гетероструктурах.....	36
1.9 Технология получения наноразмерных покрытий для увеличения внешней квантовой эффективности.....	40
Список литературы к разделу 1.....	43
2 Устройства управления и питания светотехнических устройств.....	49
2.1 Описание драйвера 20 Вт (УПС20).....	49
2.2 Описание драйвера 150 Вт.....	51
2.3 Описание драйвера 20 Вт (-60 - +50 °С).....	60
2.4. Сравнение с аналогами.....	64
2.5 Описание новых технических решений.....	65
2.6 Расчёты, подтверждающие работоспособность и надежность конструкции.....	70
Список литературы к разделу 2.....	71
3 Технология плоттерной печати.....	73
3.1 Растворы на основе сополифлуоренов для плоттерной печати матриц органических светодиодов (ОСИД).....	74
3.2. Печать транспортного (дырочного) слоя.....	84
3.3. Печать активных (светоизлучающих) слоев.....	87
3.4. Печать изолирующего слоя (диэлектрика).....	88
3.5. Печать проводящего (металлического) слоя.....	92
3.6. Влияние параметров отжига на электрическое сопротивление элементов печатной электроники.....	93
Список литературы к разделу 3.....	96

## ВВЕДЕНИЕ

До двадцати процентов всей вырабатываемой на Земном шаре электрической энергии тратится на цели освещения. Посмотрите на рис. В.1 как выглядит Земля с борта космического аппарата ночью [В.1]. Отчетливо видны ярко освещенные улицы и дороги крупных городов России, стран Европы, Азии, Северной Америки. Задача уменьшения затрат электрической энергии на освещение чрезвычайно актуальна.



Рисунок В.1. Вид на поверхность Земного шара ночью

В части энергосбережения для целей освещения знаменательным оказался 2011 год. Важность момента заключается в том, что именно в 2011 году появившиеся сравнительно недавно твердотельные источники света на основе гетеросистемы InGaN/GaN превзошли по значению параметра световой отдачи (количество света на единицу потребляемой электрической мощности) все использовавшиеся до этого времени электрические источники света: лампы накаливания, галогенные лампы, люминесцентные, натриевые и другие источники света.

В настоящем учебном пособии приведены некоторые результаты проведенных в 2010-2016 гг. научно-исследовательских, опытно-конструкторско-технологических работ и прикладных научных исследований

в рамках Федеральных целевых программ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы», а также по постановлению Правительства №218: НИОКТР «Разработка высокоэффективных и надёжных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства»; ПНИ «Разработка энергосберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания», ОКР «Разработка базовой технологии изготовления особо плоских полноцветных ОСИД-дисплеев методом принтерной печати». Работы выполнялись НИИ Светодиодных технологий и кафедрой Радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга ТУСУР в сотрудничестве с национальным исследовательским томским государственным университетом (раздел 1) [В.2 - В.4], АО «НИИ Полупроводниковых Приборов» (г.Томск) (раздел 2), кафедрой Физической Электроники (раздел 1) и студенческим конструкторским бюро «Смена» (раздел 3).

Пособие предназначено для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению 11.04.03 Конструирование и технология электронных средств, а также может быть полезно для студентов, осваивающих программу бакалавриата по этому направлению подготовки.

Список литературы к введению.

В.1 Официальный сайт [Электронный ресурс].  
<http://picslife.ru/kosmos/ogni-nochnoy-zemli-iz-kosmosa-chernyy-mramor-2012.html>. Режим доступа – свободный. Дата обращения 29.01.2017 г.

В.2 Туев В.И., Малютин Н.Д. и др. Развитие аддитивных принтерных технологий в электронике / Под ред. профессора Н.Д. Малютина. – Томск: Томск. Гос. ун-т систем упр. И радиоэлектроники, 2015. – 70 с. ISBN 978-5-86889-706-1.

В.3 Разработка высокоэффективных и надежных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства: отчеты по 1, 2 и 3 этапам ОКР. В 3 т. / Туев В.И. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 350 с. – Инв. №24.02/01-2010.

В.4 Разработка базовой технологии изготовления особо плоских полноцветных ОСИД-дисплеев методом принтерной печати: отчет по 1 этапу ОКР «Органика». В 2 т. – Том 1. ЕГВА.467848.001 ПЗ / Туев В.И. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 113 с. – Инв. №26.01/01-2013.

В.5 Разработка энергосберегающей светодиодной лампы с конвекционным газовым охлаждением излучателей и сферическим светораспределением, адаптированной к традиционной технологии массового производства ламп накаливания: отчет по этапу 1 «Выбор направления исследований» ПНИ по Соглашению о предоставлении субсидии от 05 июня 2014 г. № 14.577.21.0061 / Туев В.И. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. – 149 с. – Номер госрегистрации 114100640084. – Инв. № 24.01/01-15.

# 1 Конструкция и технические характеристики светодиода кристалла

## 1.1 Топология и размеры кристалла

Разрабатываемые гетероструктурные светоизлучающие элементы (чипы) должны обеспечить характеристики, представленные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики светоизлучающего элемента

Наименование параметра, единица измерения	Значение характеристики
Рабочий ток чипа, А, не более	0,35
Прямое падение напряжения при номинальном токе, В, не более	3,3
Максимум излучения светодиода чипа, нм	460
Яркость, Кд, не менее	5
Габариты, мм, не более	3,5×3,5×2,5
Масса, г, не более	0,6

Светодиодные кристаллы на гетероструктурах из нитрида галлия и его твердых растворов наиболее проработаны, установлены теоретические возможности получать СД с отдачей до 240 лм/Вт. Задача нацелена на достижение светоотдачи на уровне 160 лм/Вт, является актуальной и практически значимой.

Разработчиками в процессе выполнения второго этапа НИОТР по х/д 73/10 были разработаны два варианта конструкции светодиода чипа и технологии их изготовления. Первый вариант конструкции чипа и технологии имеет обобщенное название «планар», второе – вертикальная структура по технологии «*lift-off*». Конструкция чипов приведена на рисунке 1.1, геометрические размеры чипа представлены в таблице 1.2.

Обоснование конструкции и технологии базируется на анализе

литературных данных, патентных исследованиях и проведенных на втором этапе собственных экспериментальных конструкторско-технологических исследований. Работоспособность конструкции и технологии изготовления светодиодного чипа проверена на стадии разработки технического проекта.

Сравнение основных технических характеристик светодиодного кристалла с аналогичными кристаллами отечественного и зарубежного производства показали, что по основным характеристикам разрабатываемые чипы не уступают аналогам. В некоторых случаях наблюдается завышенное значение прямого напряжения на чипе при заданном токе (4 – 4,5 В вместо 3 – 3,3 В).

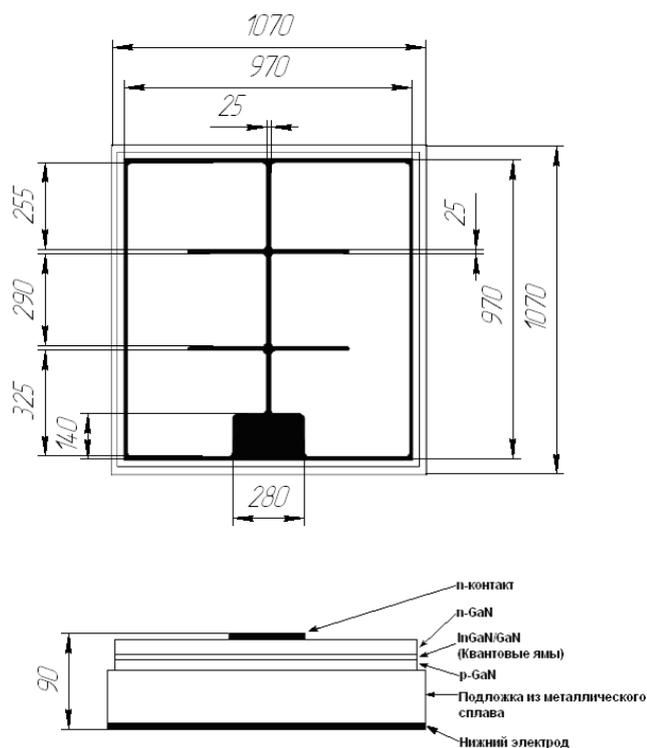


Рисунок 1.1 – Конструкция вертикального кристалла

Таблица 1.2 – Геометрические характеристики чипа (вертикальный кристалл)

Площадь p-n перехода	970×970 мкм	±20 мкм
Площадь базы	1070×1070 мкм	±50 мкм
Толщина кристалла	90 мкм	±10 мкм
Размер контактной площадки	140 мкм × 280 мкм	±15 мкм
Толщина контактной площадки	2.5 мкм	±0.5 мкм

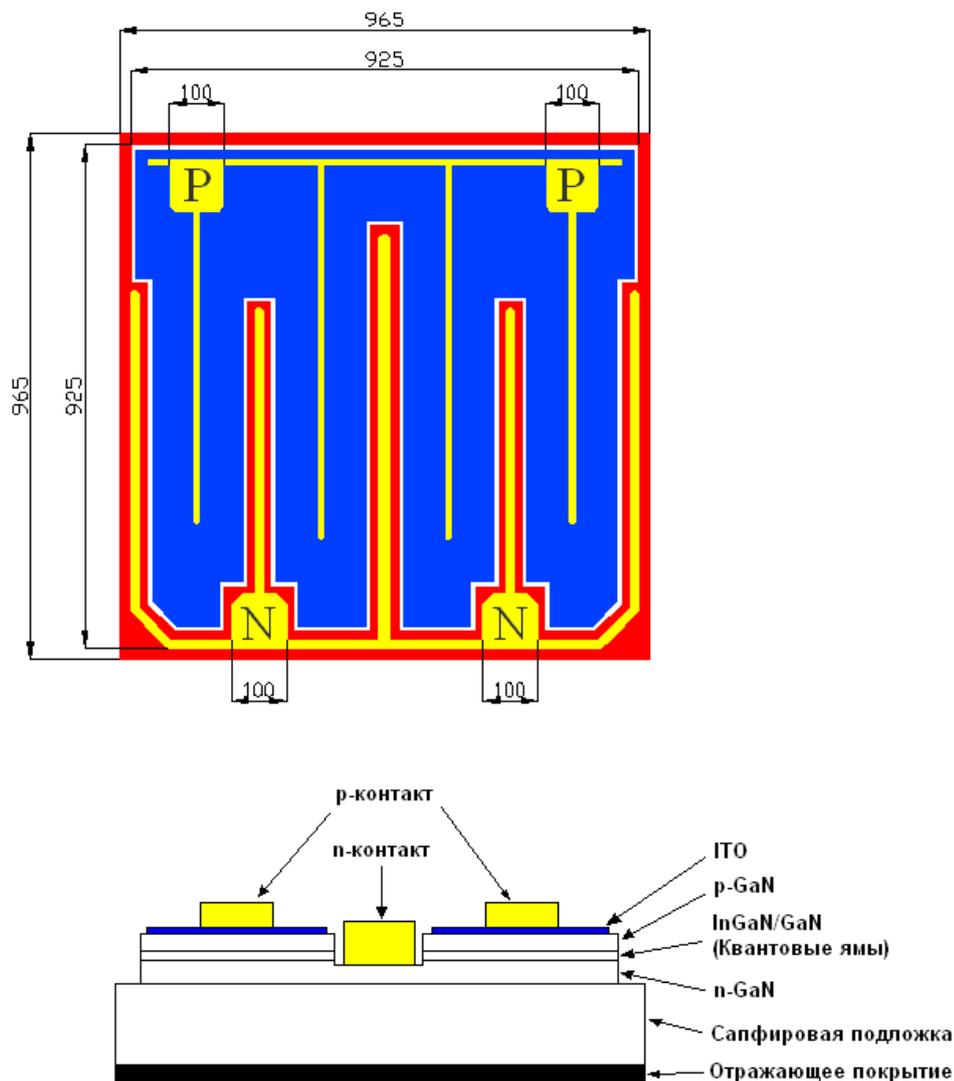


Рисунок 1.2 – Конструкция планарного кристалла

Таблица 1.3 – Геометрические характеристики чипа (планарный кристалл)

Размер кристалла	965 x 965 мкм (38 mil x 38 mil)	±10 мкм
Размер p-n перехода	925 x 925 мкм	±10 мкм
P-контакт	100 x 100 мкм	±10 мкм
N-контакт	100 x 100 мкм	±10 мкм
Толщина кристалла	150 мкм	±10 мкм

Используемые материалы: *p*-контакт металлизация Au, *n*-контакт: металлизация Au, металлизация задней стороны - отражающее покрытие

Ni/Ag/Au.

Предложенные разработчиками варианты конструкций чипа и технологий изготовления обладают патентной чистотой и конкурентоспособностью.

Технические решения по изготовлению светодиодного чипа представлены к защите в виде заявок на патенты: заявка на патент «Полупроводниковый излучающий прибор» № 2011100759/28 от 21.01.2011; заявка на патент «Способ изготовления светодиода».

Результаты испытаний макетов светодиодных чипов, изготовленных по предложенной конструкции и разработанной технологии, позволяют утверждать, что предложенный технологический маршрут позволяет получать светодиодные чипы с параметрами, близкими к указанным в таблице 1.1.

Изготовление светодиодных чипов для макетов и отработка технологии осуществлялась на покупном материале, закупаемом в фирме SemiLED в виде нитрид-галлиевых гетероструктур на сапфировой подложке диаметром один дюйм.

Применение дорогостоящих материалов обосновано необходимостью создания традиционного омического контакта.

Изделия соответствуют требованиям техники безопасности и производственной санитарии.

В процессе выполнения работ были выполнены расчеты о возникновении механических напряжений в светодиодном чипе при создании несущего и теплоотводящего слоя меди и влияния инвара на механические напряжения.

Расчеты показали, что если использовать подслой инвара, то толщина его не должна превышать 5 мкм. Возможна надежная, с точки зрения механических напряжений в структуре чипа, эксплуатация чипа и без инвара при толщинах слоя осажденной меди до 100 – 140 мкм.

## **1.2 Исследование процессов, технологических режимов установки для лазерного «отстрела» пленочных композиций на основе GaN от эпитаксиальной подложки**

Современные конструкции GaN светодиодов имеют характерные ограничения, которые создают барьер на пути улучшения их характеристик и производственных возможностей. Как показано на рисунке 2.1, голубой светодиод может содержать множество InGaN и GaN базовых слоев, которые гетеро-эпитаксиально выращены на SiC или сапфировой подложке вэйфера. Так как сапфировый вэйфер является изолятором по своей природе, ток подводится посредством электродов, расположенных горизонтально. Поскольку *p*-GaN слой обладает высоким сопротивлением, поверх *p*-GaN напыляется тонкая пленка Ni/Au, чтобы способствовать растеканию тока. При этом Ni/Au пленка поглощает существенную часть выходной мощности светодиода. Пленка Ni/Au является очень тонкой (как правило, меньше чем 100 Å) для того, чтобы быть прозрачной для излучения светодиода, так как она ограничивает прохождение излучаемого света. Тем не менее, приблизительно 25 % света, излучаемого светодиодом, поглощается в Ni/Au пленке. Более того, значительный процент испускаемого света теряется при прохождении через сапфир. Часть света направленного на сапфировую подложку отражается от фронтальной поверхности вследствие различия в показателях преломления между сапфировым вэйфером и его окружением. Ni/Au пленка поглощает большую часть и этой отраженной световой мощности.

Кроме того, пленка Ni/Au чувствительна к влажности, что со временем приводит к ее деградации. Для повышения прозрачности пленки тонкий слой Ni/Au наносится путем испарения металла с последующим отжигом в атмосфере воздуха или O<sub>2</sub>. Пленка Ni/Au формирует оксидный компаунд NiO<sub>x</sub> с Au-обогащенной структурой. После того, как влажность в течение продолжительного времени разрушит оксидную пленку светодиод выйдет из

строю.

Наличие Ni/Au-пленки приводит к деградации характеристик эффективности InGaN светоизлучающего слоя за счет эффекта сгущения тока. Поскольку в целях растекания тока пленка Ni/Au обладает более низким сопротивлением, чем *n*-GaN слой, ток может стягиваться в область вблизи *n*(-) электрода (см. рисунок 1.3). Таким образом, явление сгущения тока может препятствовать однородности использования активной InGaN области, приводя к низкой эффективности светового выхода и низкой надежности вследствие неоднородного использования активной области.

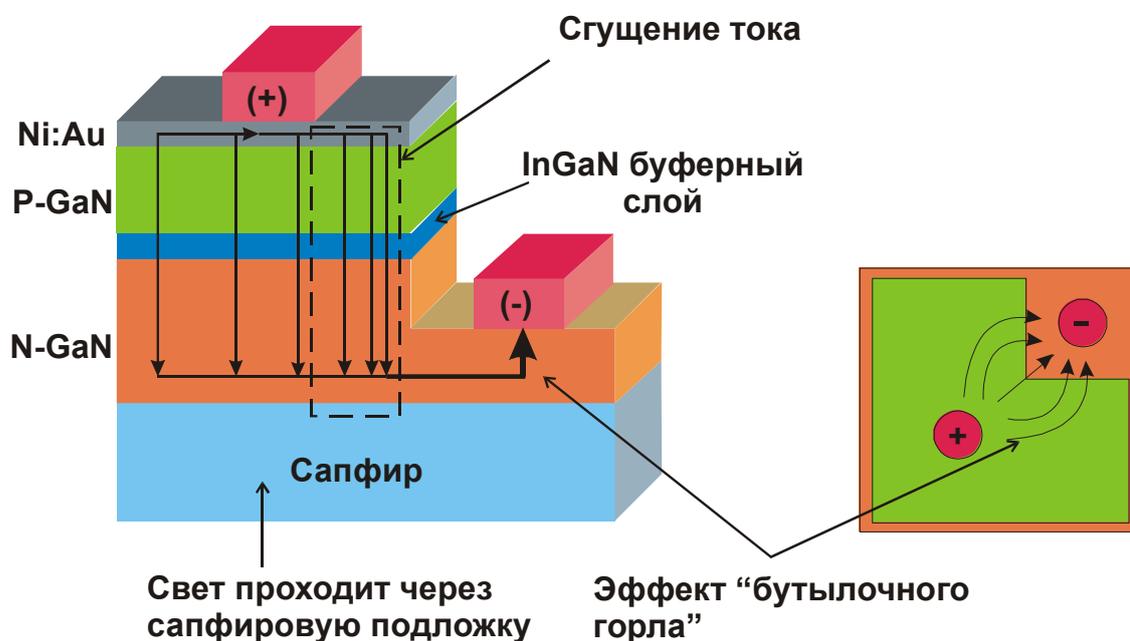


Рисунок 1.3 - GaN-светодиод в планарной конфигурации.

И наконец, горизонтальная конфигурация электрода может вызвать эффект бутылочного горла, приводя к низкой надежности. Ток, приложенный к *p*(+) электроду растекается по Ni/Au пленке и течет от *p*-GaN через InGaN к *n*-GaN. Поскольку *n*(-) электрод горизонтально расположен на *n*-GaN, ток стянут бутылочным горлом на площадке под электродом *n*(-) (рисунок 1.3).

Наличие сапфировой подложки является существенным препятствием на пути создания светодиодов с высокой эффективностью. Поэтому в последние годы большое количество исследований посвящено выращиванию

так называемых «свободных» структур InGaN/GaN [1]. К сожалению, выращиванию свободных структур на основе GaN препятствует термическая декомпозиция этого соединения при относительно низких температурах, приводящая к образованию металлического Ga и газообразного N<sub>2</sub> [2, 3]. Данный процесс мешает росту больших объемных кристаллов, нейтрализуя усилия по наращиванию тонких пленок, приводя к тому же к активации акцепторных примесей. Таким образом, наличие эпитаксиальной подложки, такой как сапфир или SiC, является необходимым условием выращивания структур, подобных InGaN/GaN [4]. При этом приходится мириться с тем, что большинство материалов, которые сегодня применяются в качестве подложек (сапфир или SiC) обладают существенно отличающимися свойствами, чем сами полупроводниковые слои. В отличие от большинства используемых полупроводников, современные коммерческие приборы на основе GaN исключительно изготавливаются посредством гетероэпитаксии на подложках из инородных материалов. Удивительно, что достигаемая плотность дислокаций в области от  $10^7$  до  $10^8$  см<sup>-2</sup> не приводит к коммерческому успеху III-нитридов в качестве светоизлучающих приборов в спектральном диапазоне от видимого до ультрафиолетового. Однако, широко признано, что в конечном итоге создание приборов на основе GaN может быть достигнуто лишь путем создания объемных GaN или AlN структур. К несчастью, несмотря на многолетние интенсивные исследования, высокие равновесные давления и температуры III-нитридов сопровождают гомоэпитаксиальный рост объемной композиции, создавая зерна недопустимых размеров и качества.

### **1.3 Вертикальная конфигурация светодиодов, как способ улучшения выходных параметров и методы ее создания**

В качестве жизнеспособной альтернативы прямой гетероэпитаксии прибора путем последовательного нанесения гетероструктур, использование объемных кристаллов или объемно-подобных «псевдо-структур», содержащих толстые (несколько сотен микрон) GaN слои, выращиваемые с высокой скоростью на сапфировой подложке в процессе *HVPE*, в последние годы привлекает значительное внимание. Имеются различные мотивации для такого подхода. Во-первых, возможность производить материал превосходного качества, т.е. с существенно меньшей плотностью дислокаций и значительно более узкой линией фотолюминесценции по сравнению с обычным гетероэпитаксиальным материалом на сапфире или SiC была продемонстрирована различными группами [17, 18]. Во-вторых, в то время как использование таких объемных или объемно-подобных структур для гомоэпитаксии нежелательно, двумерный рост, может быть достигнут без дополнительных шагов, таких как поверхностное азотирование или создание дополнительной нуклеации или буферных слоев. Более того, в случае свободных GaN структур, лазерные резонаторы могут быть получены скалыванием фаски [19, 20], а GaN структура может быть сделана электропроводной, что приводит к существенному упрощению производственного процесса и монтажа цепей. В частности последние два условия требует полного удаления сапфировой подложки после *HVPE* выращивания толстой GaN псевдо-структуры.

Недавний прогресс в технологии *HVPE* выращивания GaN продемонстрировал, что критические проблемы, такие как получение свободных от трещин пластин большой площади порядка 2” диаметром и 300 мкм толщины могут быть действительно преодолены [21, 22]. Однако шероховатость поверхности таких толстых *HPVE* слоев зачастую находится в области нескольких микрон, что вредно для любых приборных применений.

Поэтому, для приготовления эпитаксиальных GaN псевдоструктур, требуется поверхностная полировка после *HPVE* выращивания. Необходимость процедуры полировки затрудняется механической хрупкостью сапфира и существенной гибкостью GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> бинарных слоев, которая возникает вследствие различия коэффициентов теплового расширения GaN и сапфира и приводит к некоторой критической аккумуляции тепловых напряжений в результате перехода от высокой температуры выращивания ( $\approx 1050$  °C) к комнатной температуре. И вновь, полное удаление Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> подложки может избавить от большинства этих проблем. В результате, после изготовления прибора данным методом, *Nakamura* с соавторами сообщили о значительном увеличении времени жизни лазерных диодов и успешном фасетировании (скалывании фаски) после окончательного полирования и удаления сапфировой подложки [19, 23].

Все упомянутые выше причины сделали весьма желательным развитие процедуры, с помощью которой можно реализовать и обеспечить высокий выход процесса отлипания толстых *HPVE*-выращенных слоев GaN от своей сапфировой гетероподложки. На практике, такой процесс включает образование некоторого «мертвого» слоя между подложкой и GaN-слоем, который удаляется с помощью специфической химической или тепловой обработки. Одна из возможностей удаления «мертвого» слоя, это использование селективного химического травления, например, AlN против GaN в KOH. Однако, в этом случае отлипание GaN псевдо-структуры большой площади будет сдерживаться химической диффузией и будет навязывать дополнительные ограничения для нанесения буферных слоев. Не так давно была разработана эпитаксиальная процедура, приводящая к самоотлипанию GaN-пленок от сапфировой подложки в процессе охлаждения от температуры выращивания, что приводило к накоплению термического напряжения и разрушению решеточной связи между GaN и сапфиром [24]. В этом случае, становится необходимой достаточно сложная подготовка пластины, включающая процесс литографии, что ограничивает

возможности дальнейшего массового производства. Третий подход – это полное удаление подложки посредством вытравливания или полировки. Это, однако, требует значительного времени, в особенности в случае подложки из сапфира или SiC.

Процедура удаления подложки после выращивания пленки получила в литературе название «*lift-off*» или отлипание (отрыв, отстрел). Сапфировая подложка может быть удалена различными методами, включая хемомеханическое отделение от подложки [25] и влажное химическое травление промежуточных слоев [26, 27], однако относительная твердость сапфира и недостаточная эффективность материалов для влажного травления GaN или материалов, находящихся в контакте с GaN существенно снижает возможность использования всех вышеперечисленных методов в условиях массового производства.

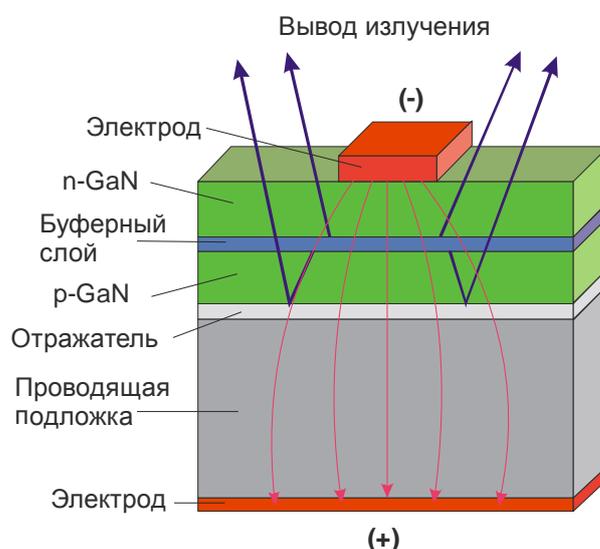


Рисунок 1.4. Вертикальная флип-чип конструкция GaN-светодиода

В результате процедуры *lift-off* становится возможным перенесение выращенной гетероструктуры с оказывающей негативное влияние сапфировой подложки на проводящую подложку, и реализовать опрокинутую «флип-чип» конструкцию светодиода с вертикальным

расположением электродов. В конструкции светодиода с вертикальной конфигурацией электродов (рисунок 1.4) преодолены многие недостатки горизонтальной конструкции светодиода. Как показано на рисунке 1.4, светодиод с вертикальной структурой предполагает перенос GaN слоев с сапфировой подложки на проводящую подложку, например кремниевый вэйфер. Так как *n*-GaN слой имеет меньшее сопротивление, чем *p*-GaN слой отпадает необходимость в тонкой Ni/Au пленке. Вследствие этого ток растекается более случайным образом и эффекты сгущения тока или бутылочного горла не проявляются. Отсутствие паразитной Ni/Au пленки приводит к повышению характеристик и надежности светодиодов с вертикальной структурой. Кроме того, отсутствие Ni/Au пленки увеличивает световой выход.

Вертикальная структура допускает нанесение металлического отражающего слоя, который минимизирует световые потери, имеющие место при прохождении через сапфир в горизонтальной конструкции.

Доминирующим в создании вертикальной светодиодной структуры является успешность процесса переноса (*lift-off*) слоя GaN с эпитаксиальной сапфировой подложки на проводящую подложку.

#### **1.4 Отделение гетероэпитаксиальных слоев от сапфировой подложки путем «отстрела» под воздействием мощного импульса лазерного УФ-излучения (*Laser Lift-off* или *LLO*)**

Процесс, который является значительно более гибким и существенно более быстрым, чем вышеупомянутые методы, это лазерно-индуцированная деламинация III-нитридов от прозрачной подложки, такой как сапфир или метод *laser lift-off (LLO)*. В данном процессе отделение слоя GaN от подложки происходит в результате облучения поверхности раздела пленка – подложка через подложку мощным лазерным импульсом, длина волны которого, находится в области прозрачности подложки, но сильно

поглощается GaN-слоем. Поглощение такого высоко интенсивного лазерного импульса приводит к быстрой термической декомпозиции облучаемого пограничного слоя GaN на металлический Ga и газообразный N<sub>2</sub> (рисунок 1.5). Ударная волна возникает в результате взрывного выделения газообразного азота в течение каждого импульса и отрывает пленку GaN от сапфировой подложки.

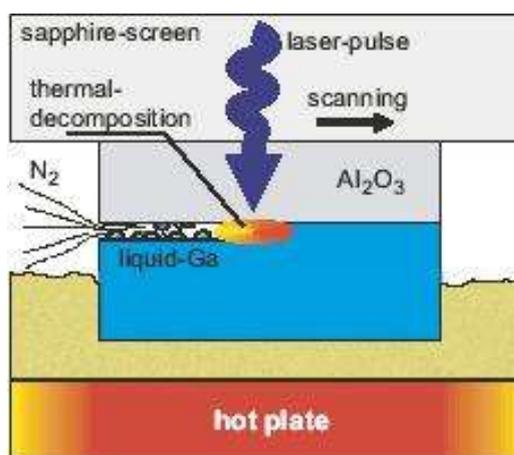


Рисунок 1.5. Схематический вид процесса *laser lift-off (LLO)*. Лазерный импульс высокой интенсивности воздействует на образец через сапфировую подложку и вызывает термическую декомпозицию тонкого GaN-слоя в переходном слое между подложкой и GaN. Ударная волна, возникает в результате взрывного выделения газообразного азота в течение каждого лазерного импульса и отрывает пленку GaN от сапфировой подложки. Нагретая пластина может быть использована для того, чтобы повысить температуру композиции в течение процесса и предотвратить аккумуляцию теплового напряжения

Впервые *M.K. Kelly* с соавторами продемонстрировал декомпозицию GaN вследствие лазерного облучения через прозрачный сапфир с использованием Nd:YAG-лазера с модулированной добротностью на 355 нм [28]. *W.S. Wong* с соавторами [29] использовали 248 нм эксимерный лазер для отделения GaN пленки с толщиной ~ 5 мкм от сапфирового вэйфера. В дальнейшем *W.S. Wong* с соавторами развили *lift-off* процесс для GaN

светодиода с использованием 248 нм эксимерного лазера [30]. *M.K. Kelly* с соавторами также продемонстрировали процесс *lift-off* свободной пленки GaN толщиной 275 мкм с использованием растрового сканирования излучения Nd:YAG лазера с модулированной добротностью 355 нм [31].

Характерные преимущества такого *LLO* процесса по сравнению с другими вышеупомянутыми способами выражаются в следующем:

- Сапфир производится в промышленных масштабах, хорошо изучен и может быть приобретен по разумным ценам. Имеется возможность повторных циклов использования подложки после *LLO* для очередного напыления.
- Процесс *LLO* не требует наличия каких-либо «мертвых» слоев среди напыленных слоев. Использование низкотемпературных, а, следовательно, низкокачественных AlN или GaN, буферных слоев, удаляемых одновременно вместе с подложкой, даже лучше.
- *LLO* процесс достаточно быстрый и легко масштабируемый. При использовании обычного Nd:YAG или эксимерного лазера с частотой повторения импульсов порядка 1000 Гц, двухдюймовая пластинка может быть в принципе подвержена *lift-off* обработке в течение нескольких секунд.
- Так как *LLO* не требует какого-либо прямого механического или химического контакта с пластинкой, *lift-off* процесс может осуществляться непосредственно после напыления III-нитридной пленки в напылительной установке без охлаждения до комнатной температуры. Для этого, естественно необходимо предусмотреть оптическое окно и внешнюю лазерную сканирующую систему, но в тоже время предотвратит возникновение критических тепловых напряжений, которые возникают на толстой GaN-пленке нанесенной на гетероподложку в процессе охлаждения от температуры осаждения порядка 1100 °С до комнатной температуры в результате большого

несоответствия коэффициентов теплового расширения для двух материалов.

### **1.5 Разработка технологии нанесения наноразмерного покрытия для увеличения внешней квантовой эффективности**

В настоящее время разработка высокоэффективных мощных светодиодных кристаллов, излучающих в синем и ультрафиолетовом диапазонах, 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, наиболее эффективными способами преодоления этой проблемы представляются создание рассеивающих свет поверхностей, микрорезонатора внутри активной области, фотонного кристалла, а также применение флип-чип конструкции светодиодного кристалла.

Внешняя квантовая эффективность светодиодного кристалла определяется двумя основными величинами — внутренней эффективностью полупроводниковой гетероструктуры и эффективностью вывода света из светодиодного кристалла. Основным физическим эффектом, ограничивающим эффективность вывода света, является эффект полного внутреннего отражения на границе материала с высокой оптической плотностью (полупроводника) и материала с низкой оптической плотностью (сапфировой подложки и (или) воздуха). Свет, распространяющийся в полупроводнике под углом, превосходящим угол полного внутреннего отражения, оказывается захваченным в волновод, образованный полупроводниковым слоем, и распространяется в нем, постепенно затухая. Для светодиодных кристаллов на основе AlGaInN-гетероструктур критический угол составляет  $\sim 23^\circ$  (показатели преломления GaN и сапфира соответственно 2.5 и 1.6), и, следовательно, вывод света с поверхности кристалла не превышает 5 %.

Конструкция флип-чип светодиодного кристалла с отражающим верхним контактом и глубокой меза-структурой (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 меза-структуры. С другой стороны, создание светодиодных кристаллов с большой оптической мощностью излучения требует использования большой площади активной области ( $\geq 1 \text{ мм}^2$ ). Это требование особенно жестко для квантово-размерных InGaN/GaN-структур, для которых, как известно, характерно быстрое падение внутреннего квантового выхода излучения с ростом плотности тока. Это означает, что в кристаллах большой площади на первый план выходит проблема повышения эффективности вывода света путем создания рассеивающих поверхностей на границах полупроводник/подложка и (или) полупроводник/металл.

В работе [61] рассматриваются характеристики светодиодов на основе AlGaInN с удаленной сапфировой подложкой. Для удаления подложки применялся метод лазерного отделения (*lift-off*). Подложка удалялась с готового светодиодного кристалла, смонтированного методом флип-чип на кремниевой плате. С целью увеличения эффективности вывода света на поверхности n-GaN был создан рассеивающий рельеф методом реактивного ионного травления в газовой смеси  $\text{Cl}_2 : \text{Ar}$  (рисунок 1.6). В результате этой операции было достигнуто увеличение внешней квантовой эффективности светодиодного кристалла на 25–30%. Светодиоды, изготовленные из кристаллов, полученных описанным способом, устойчиво работают в диапазоне токов накачки до 300 мА, достигая оптической мощности 110 мВт (рисунок 1.7).

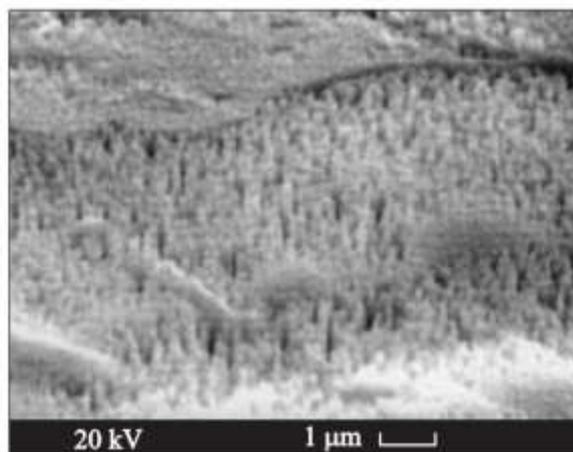


Рисунок 1.6 – Микрофотография поверхности структуры, полученной в результате травления в газовой смеси  $\text{Cl}_2:\text{Ar}$  [61]

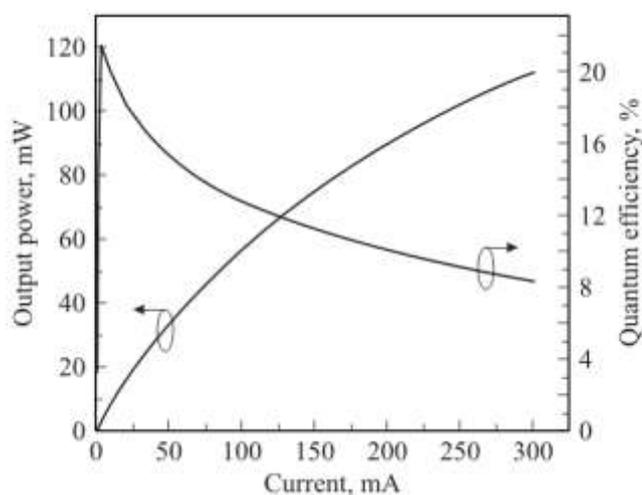


Рисунок 1.7 – Зависимость выходной оптической мощности и внешней квантовой эффективности светодиодов с удаленной сапфировой подложкой от тока накачки [61]

Работа [62] посвящена развитию метода создания рассеивающего свет микрорельефа на внешней стороне подложек SiC для уменьшения потерь при выводе света из светодиодного кристалла, связанных с эффектом полного внутреннего отражения в структурах AlGaIn/GaN. Предложено использовать тонкие слои фоторезиста в качестве случайных масок для процесса реактивного ионного травления подложки из карбида кремния. Оптимизацией режимов травления на поверхности подложки SiC получен

микрорельеф (рисунок 1.8) с требуемыми параметрами, что привело к увеличению внешней квантовой эффективности светоизлучающих кристаллов более чем на 25 % (рисунок 1.9).

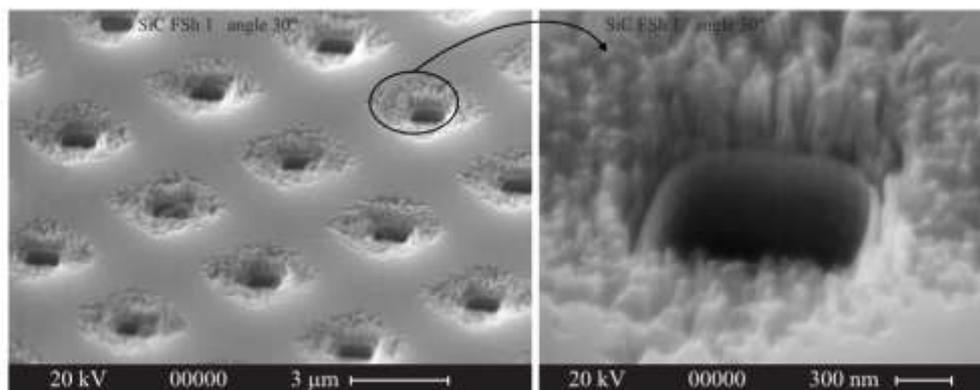


Рисунок 1.8 – Микрофотографии рельефа, возникающего при травлении подложек SiC. Слева – общий вид травленной поверхности, справа – фрагмент поверхности в увеличенном масштабе [62]

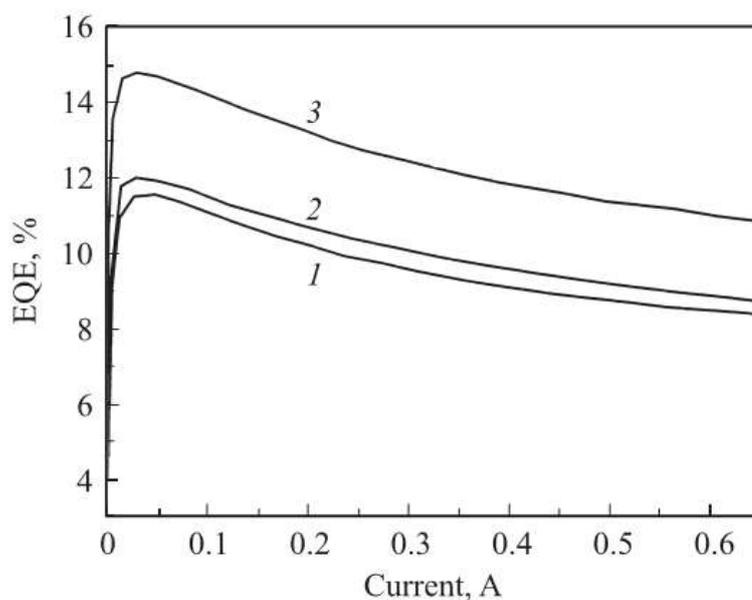


Рисунок 1.9 – Зависимость квантовой эффективности кристалла от тока накачки: 1 – исходный кристалл, 2 – реактивное ионное травление обратной стороны подложки SiC через тонкий резист в плазме SF<sub>6</sub> в течение 20 мин, 3 – травление в том же режиме в течение 60 мин [62]

Увеличение эффективности вывода излучения светодиодов на основе

GaN за счет создания шероховатости поверхности исследовалась авторами работы [63]. Путем травления с помощью лазера получена выходная поверхность светодиодов на основе GaN с конусообразными выходными элементами (рисунок 1.10). Это позволило в 2-3 раза увеличить их выходную мощность по сравнению со светодиодами без обработки поверхности.

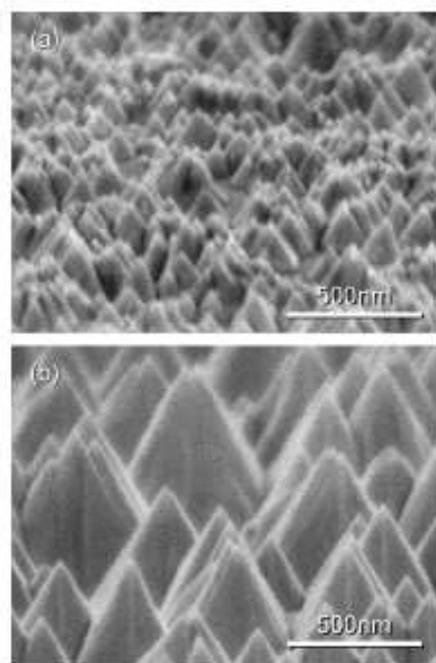


FIG. 3. SEM micrographs of an N-face GaN surface etched by a KOH-based PEC method. (a) 2-min etching and (b) 10-min etching.

Рисунок 1.10 – Вид световыводящей поверхности *n*-GaN после химического травления: а – время травления 2 мин, б – время травления 10 мин. [63]

В работе [64] повышение внешней квантовой эффективности в солнечных элементах GaN/InGaN было достигнуто с помощью создания шероховатой поверхности (рисунок 3.6), индуцированной во время роста *p*-GaN, и составило 72 %. При этом максимальная выходная мощность увеличилась на 35 %.

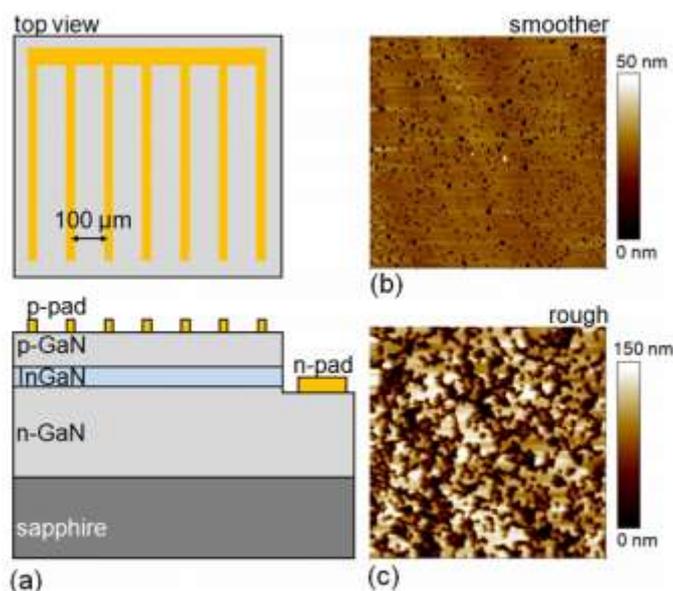


FIG. 1. (Color online) (a) Schematic of the InGaN/GaN solar cell structure.  $12.5 \times 12.5 \mu\text{m}^2$  AFM scans of the surface of the (b) smoother sample with rms roughness of  $\sim 7$  nm and (c) rough sample with rms roughness of  $\sim 41$  nm.

Рисунок 1.11 – Схема структуры InGaN/GaN (а), поверхность гладкого образца шероховатостью 7 нм (б) и грубого образца шероховатостью 41 нм (с) [64]

Стандартными литографическими методами в сочетании с травлением индукционно возбужденной плазмой авторами [65] получены светодиоды на основе пятипериодной сверхрешетки InGaN/GaN с текстурированным прозрачным слоем ИТО, покрытые порошком  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (рисунок 1.12). Для текстурирования поверхности в качестве маски травления используется порошок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  размером 300 нм, который остается на поверхности после текстурирования для увеличения эффективности экстракции (рисунок 3.8). При 20 мА выходная мощность светодиодов, покрытых  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , увеличивается на 112 % по сравнению с нетекстурированными диодами. Увеличение выходной мощности объясняется улучшением эффективности экстракции в результате уменьшения полного внутреннего отражения вследствие текстурирования поверхности и покрытия ее порошком  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

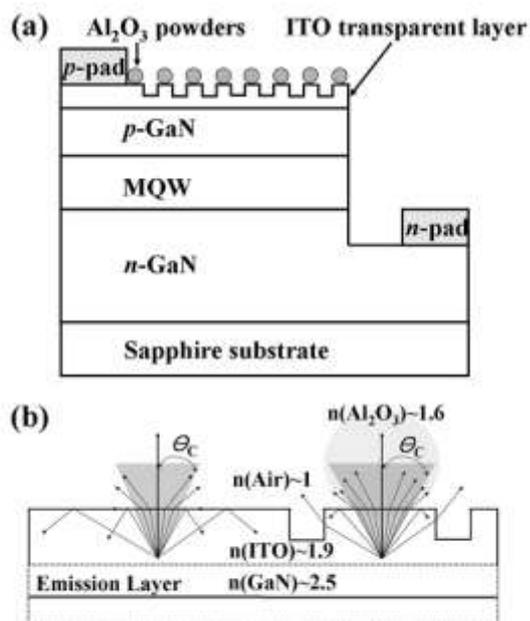


FIG. 1. (a) Schematic diagram of a surface-textured LED coated with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder and (b) possible photon paths for a flat surface and a surface-textured structure coated with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder.

Рисунок 1.12 – Схематическое изображение структуры светодиода с текстурированным прозрачным слоем ИТО, покрытый порошком  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (а) и процесс излучения на профилированной подложке (б) [65]

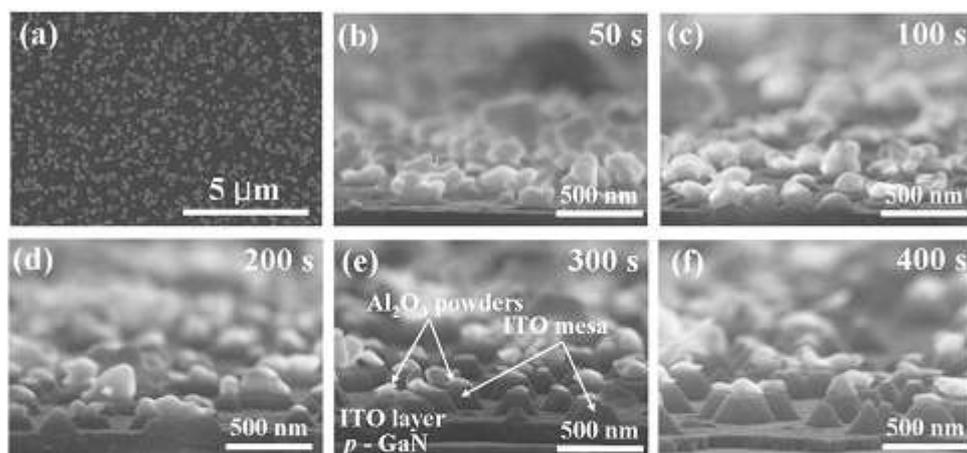


FIG. 2. (a) Plane view SEM image of the ITO transparent layer coated with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder. Cross-sectional SEM images of surface-textured LEDs coated with the powder for etching times of (b) 50 s, (c) 100 s, (d) 200 s, (e) 300 s, and (f) 400 s, respectively.

Рисунок 1.13 – Планарное изображение структуры ИТО с микросферами  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в зависимости от времени травления [65]

В работе [66] предложено повышение внешней квантовой



В работе [68] методом электронно-лучевого напыления тонких пленок оксида индия и олова (*ITO*) был получен отражающий контакт к слою *p*-GaN, используемый при создании синих флип-чип светодиодов. Высокий коэффициент отражения контакта, превосходящий коэффициент отражения контакта на основе Ni/Ag, обеспечивает прирост внешней квантовой эффективности светоизлучающих кристаллов на 15–20% (рисунок 3 11). Прямые падения напряжения для кристаллов с контактом *ITO* (5 нм)/Ag(220 нм) сравнимы с аналогичными величинами для кристаллов с контактом Ni(1.5 нм)/Ag(220 нм). Удельное сопротивление контакта со слоем ИТО составляет  $3.7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ . Показано, что для полученных данным методом пленок ИТО оптимальные толщины, обеспечивающие наилучшие электрические и оптические характеристики кристаллов, лежат в диапазоне 2.5–5.0 нм.

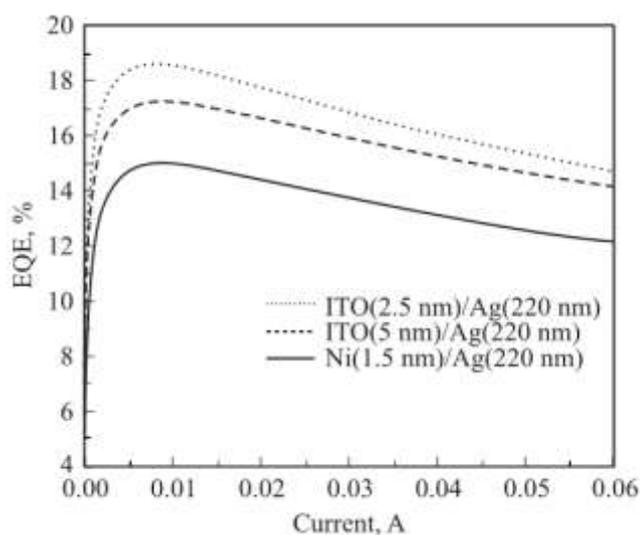


Рисунок 1.16 – Зависимость внешней квантовой эффективности от тока накачки для кристаллов с различными контактами к слою *p*-GaN [68]

## **1.6 Моделирование оптических характеристик с помощью просветляющих покрытий**

Для получения максимального эффекта просветления для однослойных покрытий должно выполняться следующее условие:  $n_1^2 = n_0 n_s$ , где  $n_s$  – показатель преломления материала кристалла,  $n_1$  – показатель преломления пленки, нанесенной на поверхность кристалла,  $n_0$  – показатель преломления окружающей среды. Одновременно должно выполняться условие, что оптическая толщина просветляющего покрытия  $n_1 d$  должна быть равна четверти длины волны излучаемой кристаллом, то есть  $n_1 d = \lambda/4$ , где  $\lambda = 455$  нм.

Для подложки с показателем преломления равным 1,51 (стекло), выбор слоев с показателями преломления  $n_0 = 1$ ,  $n_1 = 1,2$  (показатель преломления  $\text{SiO}_2+\text{C}$ ),  $n_s = 1,51$  обеспечивает получение нулевого отражения на требуемой длине волны ( $\lambda = 455$  нм), а для подложки с показателем преломления равным 2,4 ( $\text{LiNbO}_3$ ), нулевое отражение достигается при выборе слоев с показателями преломления  $n_0 = 1$ ,  $n_1 = 1,55$ ,  $n_s = 2,4$ .

Спектральные характеристики были рассчитаны для подложки из стекла (рисунок 3.12) и ниобата лития (рисунок 3.13).

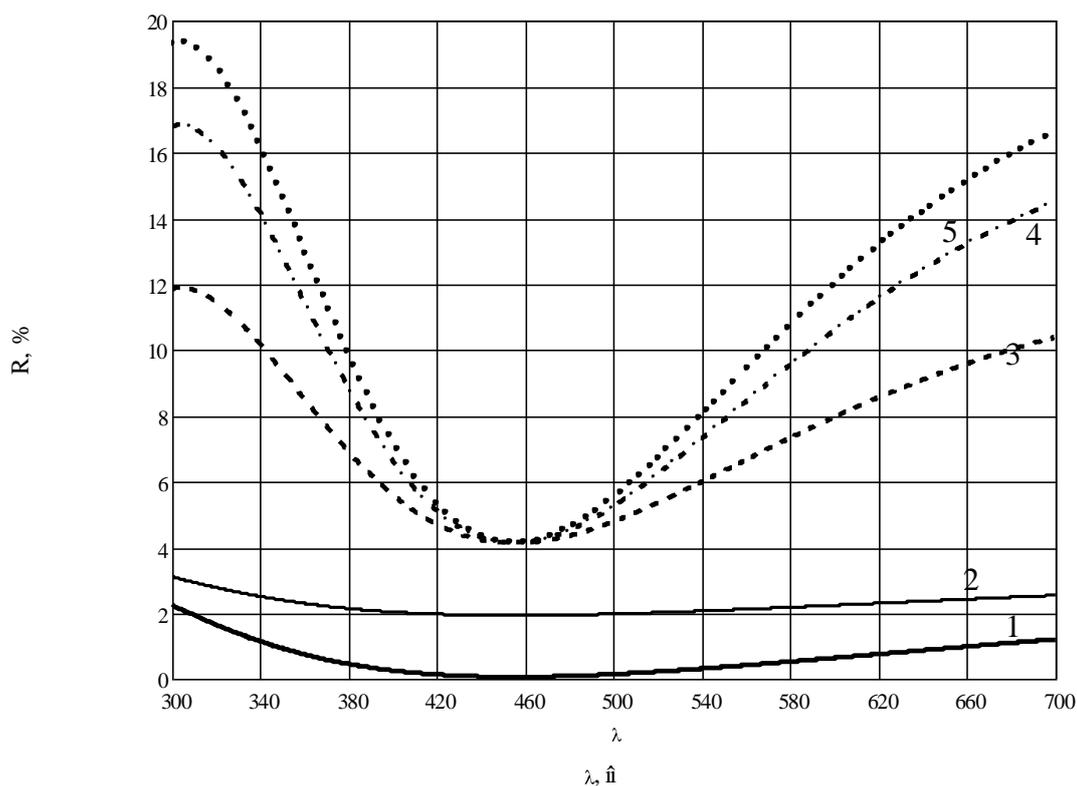


Рисунок 1.17 – Спектр отражения для подложки из стекла с различными просветляющими покрытиями (1 - SiO<sub>2</sub>+C, 2 - SiO<sub>2</sub>, 3 - Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 4 - SiO<sub>x</sub>, 5 - TiO<sub>2</sub>)

Для подложек из стекла оптическая толщина пленок с низким показателем преломления SiO<sub>2</sub> ( $n = 1,41$ ) и SiO<sub>2</sub>+C ( $n = 1,2$ ) равна  $\lambda/4$ , а для пленок с высоким показателем преломления Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ( $n = 1,76$ ), TiO<sub>2</sub> ( $n = 1,97$ ) и SiO<sub>x</sub> ( $n = 1,9$ ) оптическая толщина равна  $\lambda/2$ .

Лучшим просветляющим покрытием для подложки из стекла является SiO<sub>2</sub> + C ( $R = 0\%$ ). Коэффициент отражения пленки SiO<sub>2</sub> равен 2%. У пленок с высоким показателем преломления коэффициент отражения  $R = 4,2\%$ .

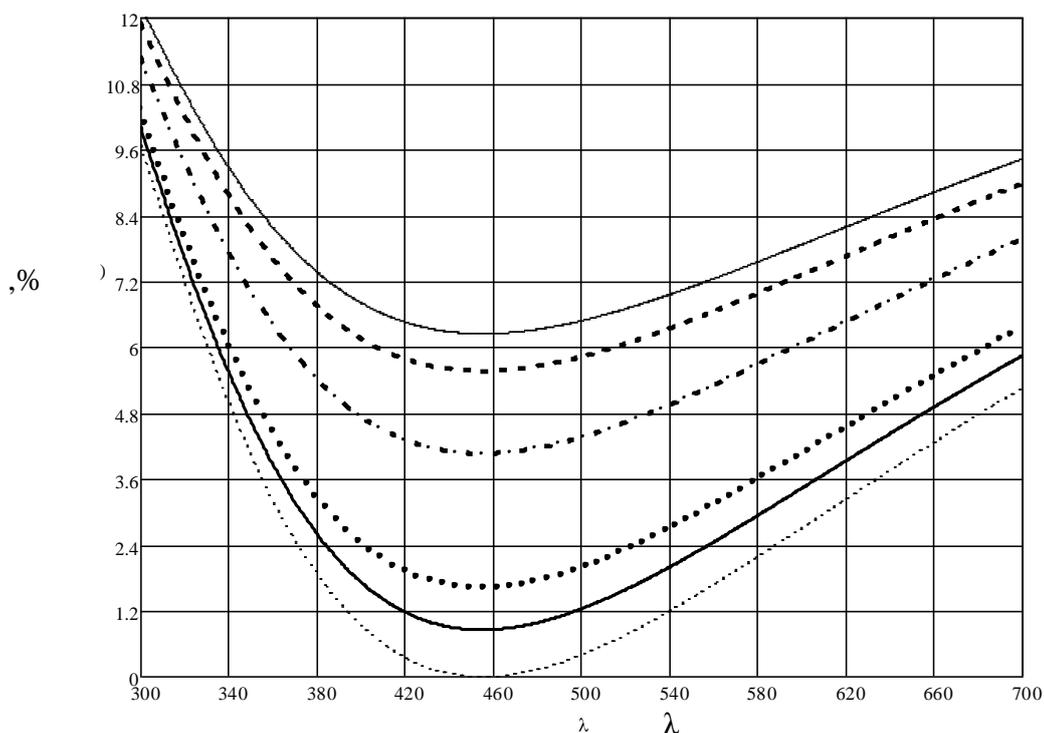


Рисунок 1.18 – Спектр отражения для подложки из  $\text{LiNbO}_3$  с различными просветляющими покрытиями (1- $n = 1,55$ ; 2- $\text{SiO}_2$ ; 3-  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ; 4-  $\text{SiO}_x$ ; 5-  $\text{TiO}_2$ ; 6- $\text{SiO}_2+\text{C}$ )

Для подложек из ниобата лития все пленки имели оптическую толщину  $\lambda/4$ .

Лучшим просветляющим покрытием для подложки из ниобата лития является  $\text{SiO}_2$  ( $R = 0,8\%$ ).

Пленка с показателем преломления 1,55 имеет нулевое отражение. Пленка  $\text{SiO}_2+\text{C}$  в качестве просветляющего покрытия для  $\text{LiNbO}_3$  не может использоваться.

Расчеты показали эффективность просветления на  $\text{LiNbO}_3$  пленки  $\text{SiO}_2$ , имеющей оптическую толщину  $\lambda/4$ .

### **1.7 Исследования оптических характеристик просветляющих покрытий на различных подложках**

В качестве просветляющих покрытий используются тонкие слои

диоксида кремния  $\text{SiO}_2$ , пятиокиси тантала  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , диоксида титана  $\text{TiO}_2$  и др. Выбор этих покрытий объясняется их дешевизной и высокой степенью отработанности процесса получения.

Исследуемые пленки были получены магнетронным распылением соответствующих мишеней в различных средах: Si в среде Ar ( $\text{SiO}_x$ ), Si, Ta, Ti в смеси Ar+O<sub>2</sub> ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ), сложная мишень из Si и углерода в среде Ar+O<sub>2</sub> ( $\text{SiO}_2$ +C).

На рисунке 1.19 приведено изображение поверхности  $\text{SiO}_2$ +C, полученное на электронном микроскопе ТМ 1000.

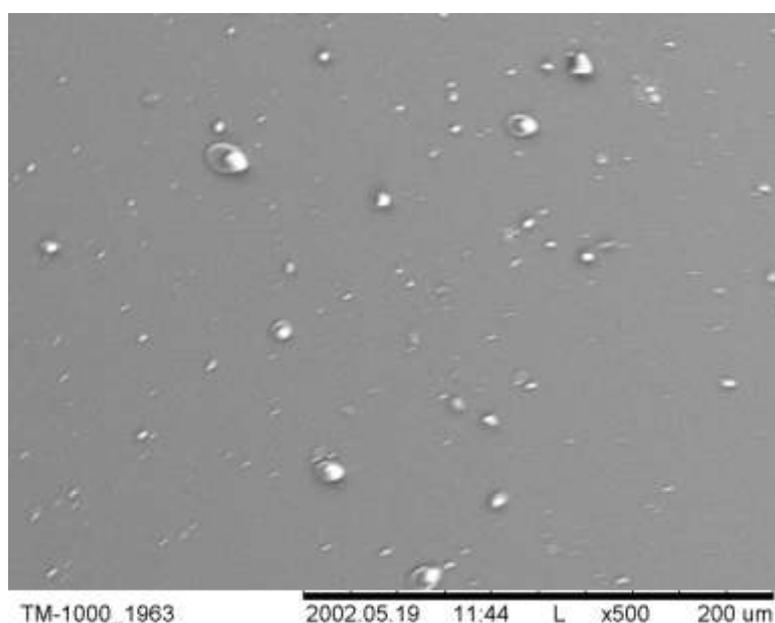


Рисунок 1.19 - Изображение поверхности  $\text{SiO}_2$ +C

В данной работе были исследованы оптические характеристики покрытий с помощью лазерной эллипсометрии ЛЭМ-3:

$\text{SiO}_x$ :  $d = 85$  нм,  $n = 1,9$  при  $\lambda = 450$  нм,  $n = 1,64$  при  $\lambda = 632$  нм;

$\text{SiO}_2$ :  $d = 20$  нм,  $n = 1,413$  при  $\lambda = 632$  нм;

$\text{Ta}_2\text{O}_5$ :  $d = (55 - 57)$  нм,  $n = 1,76$  при  $\lambda = 632$  нм;

$\text{TiO}_2$ :  $d = (42 - 48)$  нм,  $n = 1,97 - 2,04$  при  $\lambda = 632$  нм;

$\text{SiO}_2$ +C:  $d = 95$  нм,  $n = 1,2$ .

На рисунках 1.20 – 1.24 приведены спектры пропускания, полученные с помощью электронно-оптического спектрометра *USB2000*.

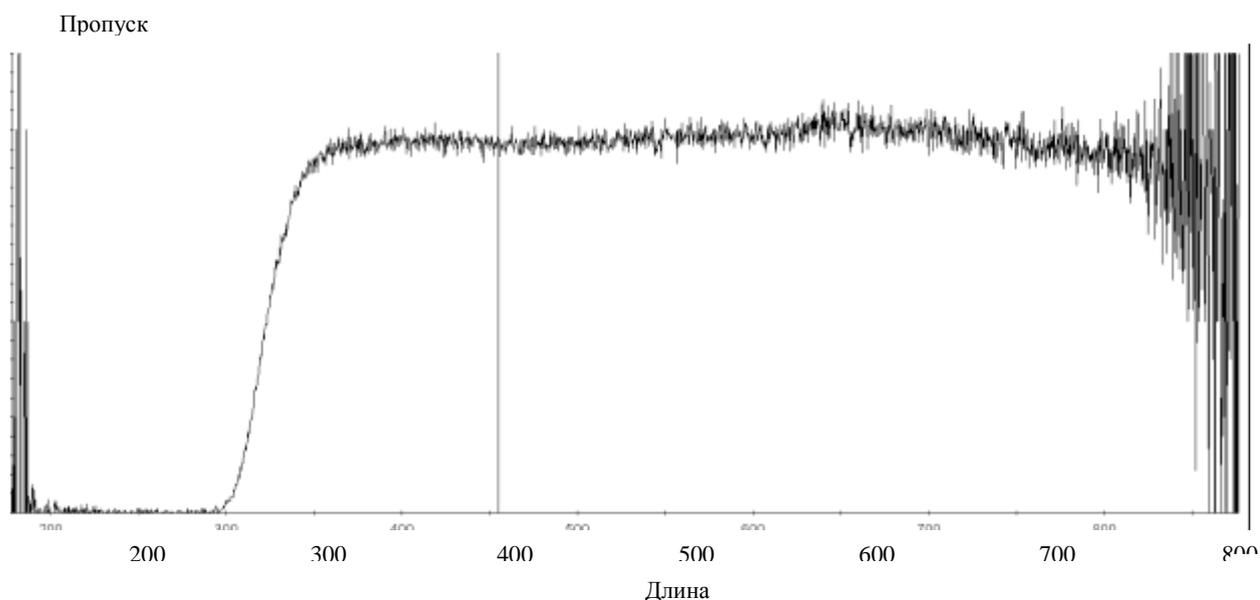


Рисунок 1.20 – Спектр пропускания  $\text{SiO}_2$  на подложке из стекла

Снимались спектры пропускания для чистых материалов. Коэффициент пропускания чистого (без покрытий) стекла равен 60% при  $\lambda = 455$  нм. При нанесении пленки  $\text{SiO}_2$  на подложку из стекла коэффициент пропускания увеличился на 39% (коэффициент пропускания  $\text{SiO}_2$  на подложке из стекла равен 99%). Таким образом, показана эффективность просветления  $\text{SiO}_2$  на подложке из стекла.

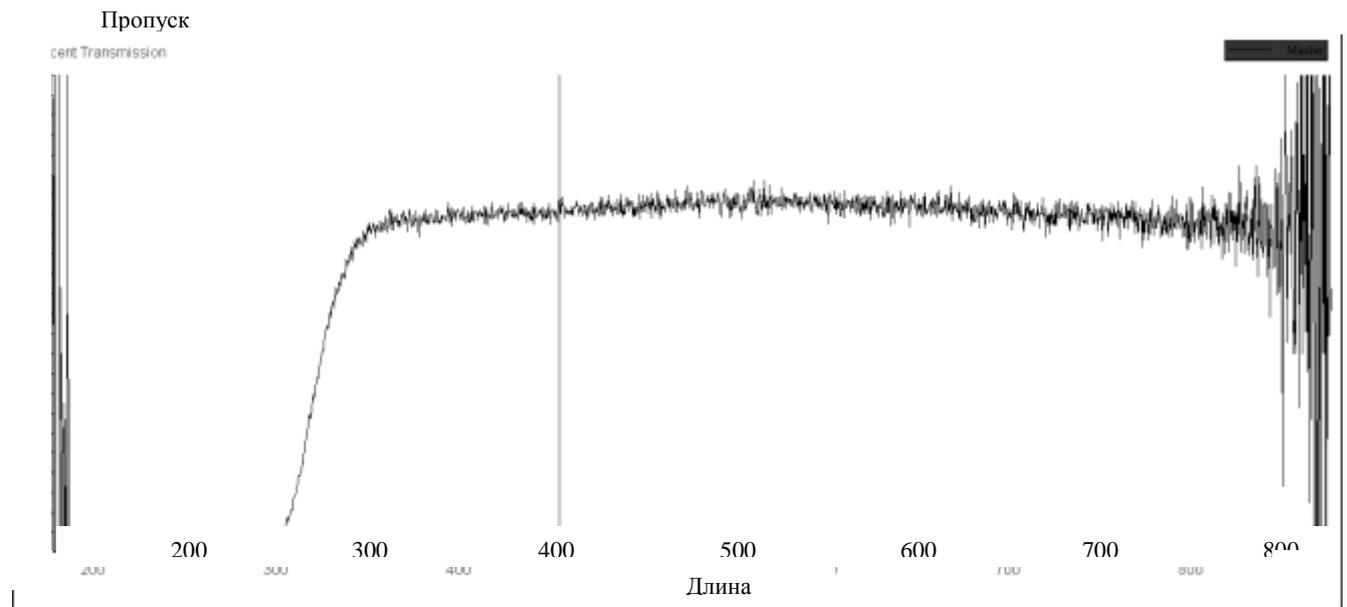


Рисунок 1.21 – Спектр пропускания  $\text{SiO}_2+\text{C}$  на подложке из стекла

Коэффициент пропускания  $\text{SiO}_2+\text{C}$  на подложке из стекла при  $\lambda = 455$  нм равен 89%. Коэффициент пропускания при нанесении пленки  $\text{SiO}_2+\text{C}$  на стекло увеличился на 29%, меньше чем для  $\text{SiO}_2$ .

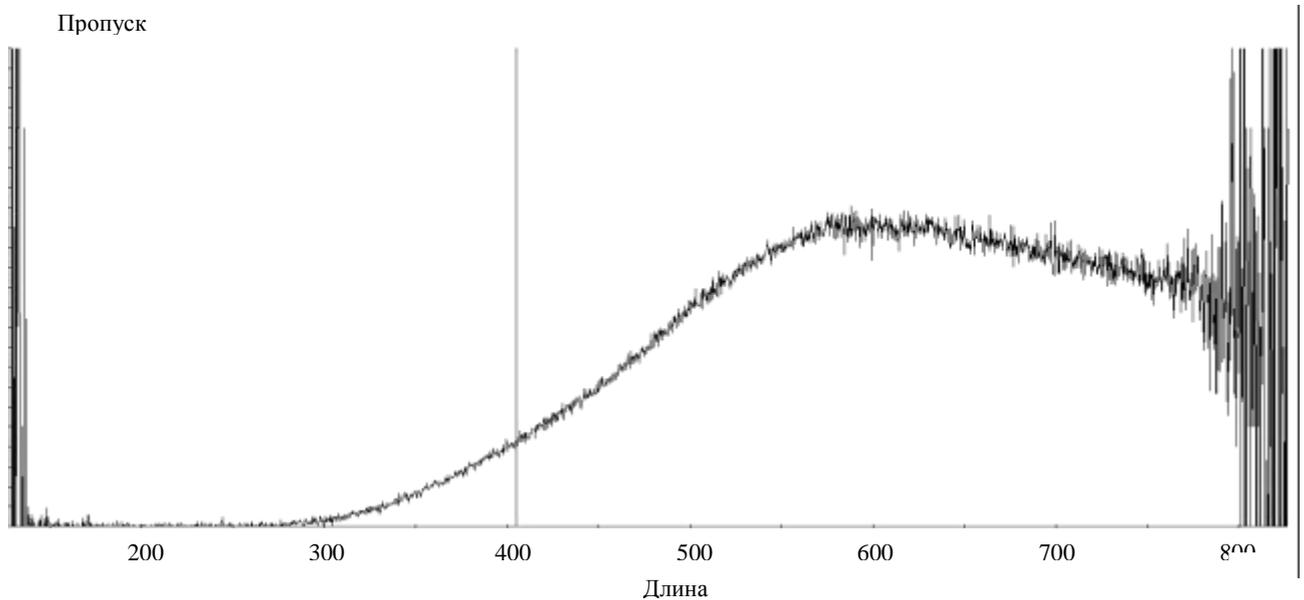


Рисунок 1.22 – Спектр пропускания  $\text{SiO}_x$  на подложке из стекла

Из рисунка 1.22 видно, что пленка  $\text{SiO}_x$  не является просветляющим

покрытием для  $\lambda = 455$  нм, так как  $\text{SiO}_x$  - полупрозрачная поверхность.

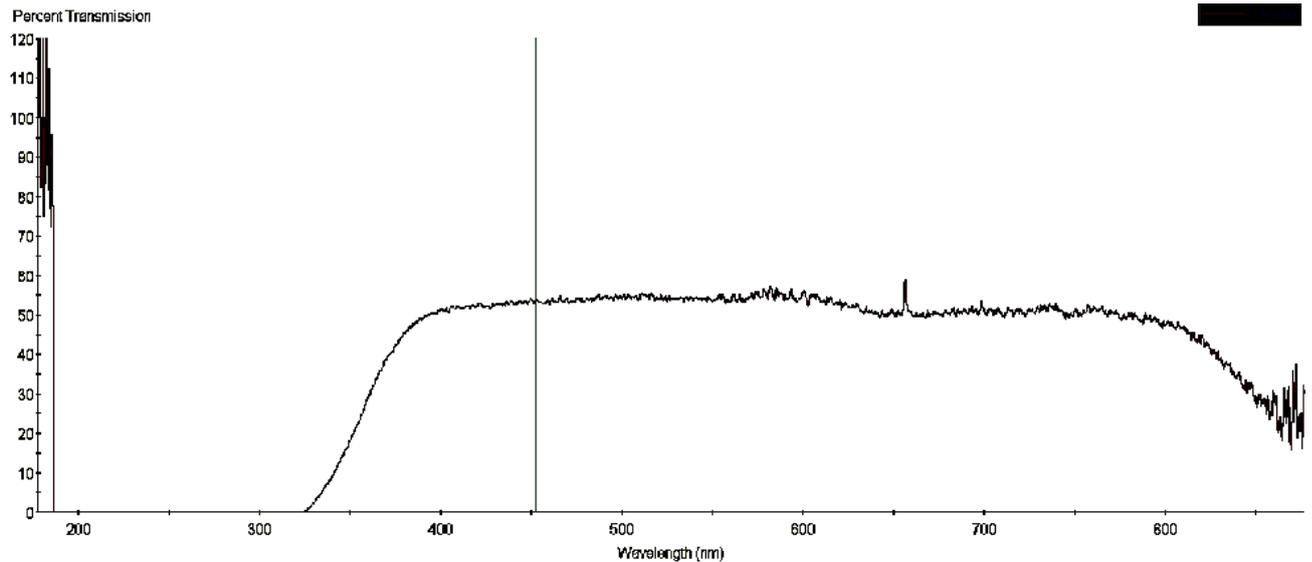


Рисунок 1.23 – Спектр пропускания ниобата лития без просветляющих покрытий

Коэффициент пропускания для чистого ниобата лития  $T = 55\%$  ( $\lambda = 455$  нм). Плохое пропускание обусловлено недостаточно хорошей полировкой поверхностей ниобата лития.

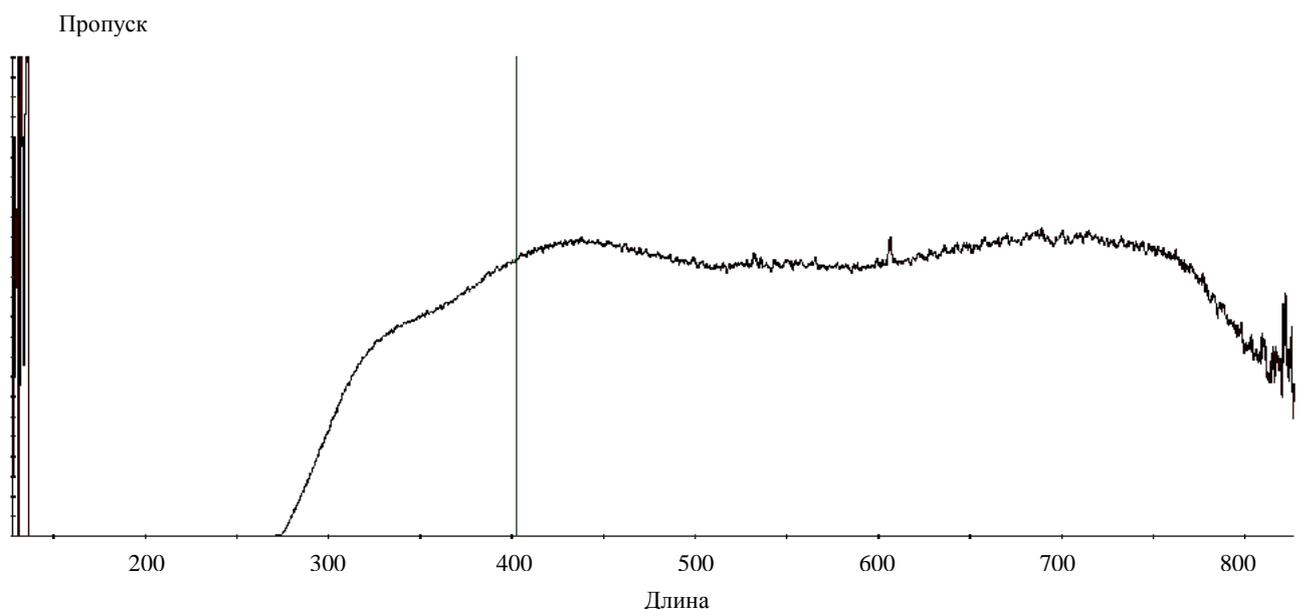


Рисунок 1.24 – Спектр пропускания  $\text{SiO}_2$  на подложке из ниобата лития

Коэффициент пропускания  $\text{SiO}_2$  на подложке из ниобата лития равен 75% ( $\lambda = 455$  нм).

Из рисунков 1.23 – 1.24 видно, что при нанесении просветляющего покрытия  $\text{SiO}_2$  на  $\text{LiNbO}_3$  коэффициент пропускания увеличился на 20%.

Экспериментальные данные не совпадают с рассчитанными. Расхождение спектральных характеристик расчетного и экспериментально полученного покрытия обусловлено шероховатостью (пористостью) пленок, которая не была учтена при моделировании.

### **1.8. Исследование просветляющих покрытий на гетероструктурах**

В работе исследовались гетероструктуры на GaN, выращенные на сапфировых подложках толщиной 400 мкм и 150 мкм. Нижняя поверхность сапфировой подложки имела шероховатую структуру, а верхняя поверхность - профилированная. На рисунке 1.25 приведено схематическое изображение гетероструктуры на сапфировой подложке.



Рисунок 1.25 – Схематическое изображение гетероструктуры

На верхнюю поверхность p-GaN осаждалась пленка  $\text{SiO}_2$  толщиной около 80 нм.

На рисунках 1.26 – 1.27 приведены спектры отражения исходной гетероструктуры без просветляющего покрытия (рисунок 1.26) и с

нанесенным слоем SiO<sub>2</sub> (d~80 нм) (рисунок 1.27).



Рисунок 1.26 - Спектр отражения исходной гетероструктуры на GaN (толщина сапфировой подложки 400 мкм)

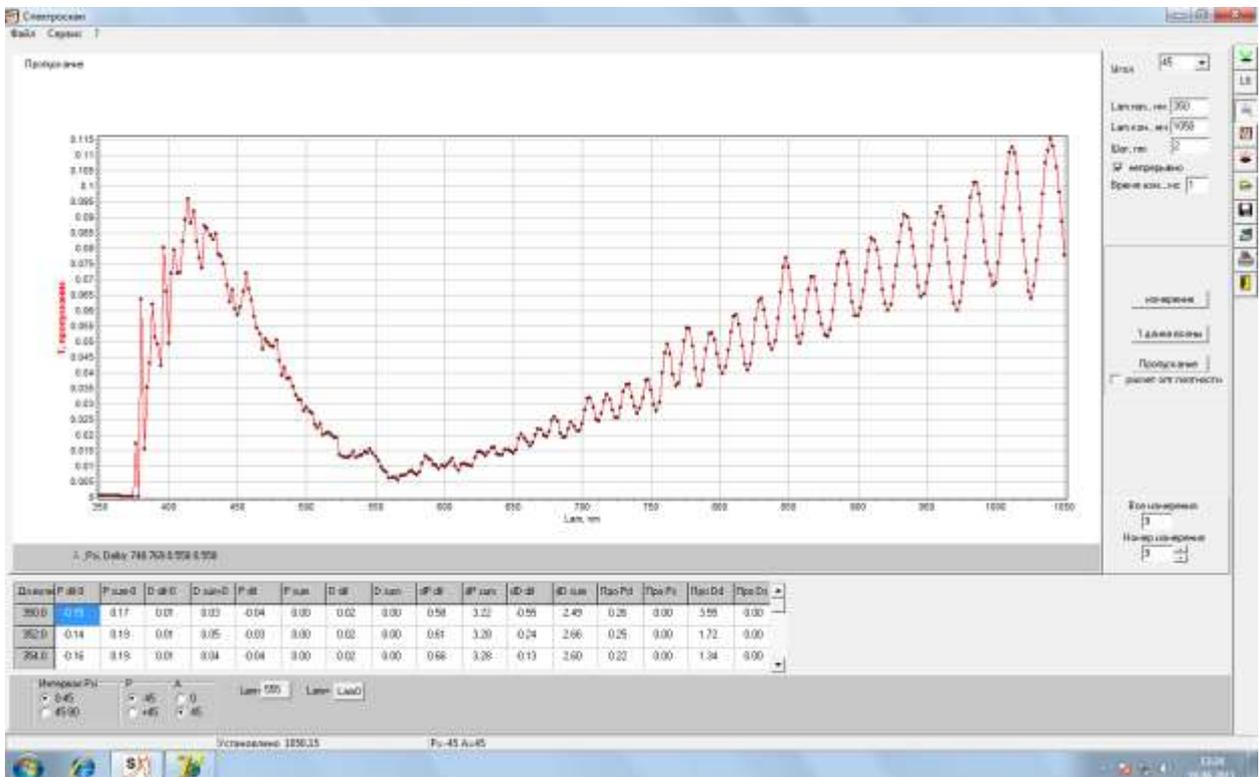


Рисунок 1.27 - Спектр отражения гетероструктуры с SiO<sub>2</sub> (80 нм) на GaN (толщина сапфировой подложки 400 мкм)

Анализ полученных результатов, показывает что при нанесении на гетероструктуру пленки  $\text{SiO}_2$  на длине волны  $\lambda = 562,5$  нм наблюдается максимальный эффект просветления ( $R=0,5$  %). Это говорит о том, что толщина пленки составляет 100 нм, что не соответствует оптической длине волны  $\lambda/4$  для  $\lambda = 455$  нм.

Согласно полученным спектрам пропускания (рисунки 3.23 – 3.24) нанесение покрытия  $\text{SiO}_2$  позволило увеличить коэффициент пропускания на 20 %.

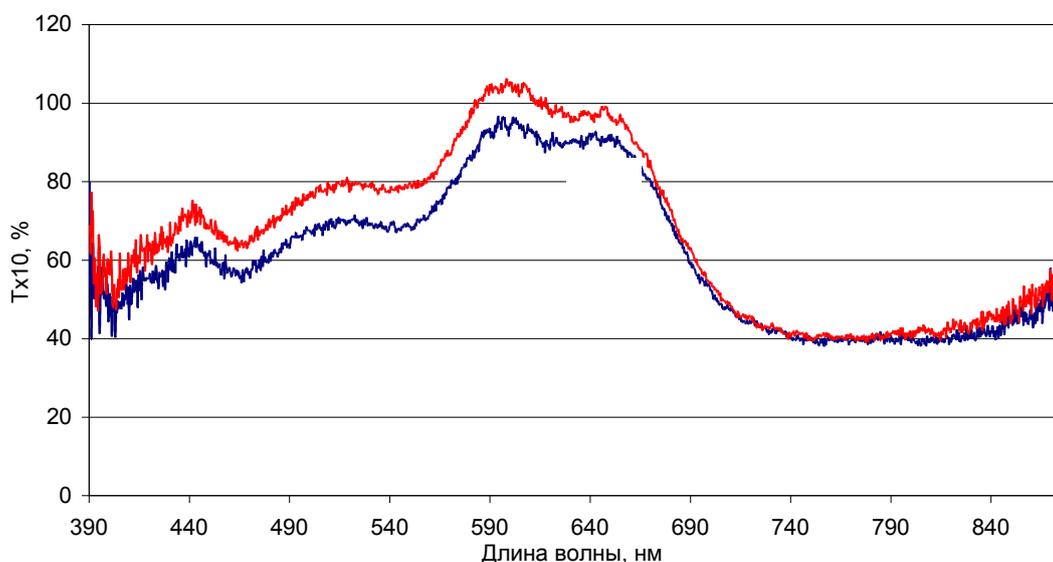


Рисунок 1.28 - Спектр пропускания гетероструктуры: 1 – исходная; 2 – с  $\text{SiO}_2$

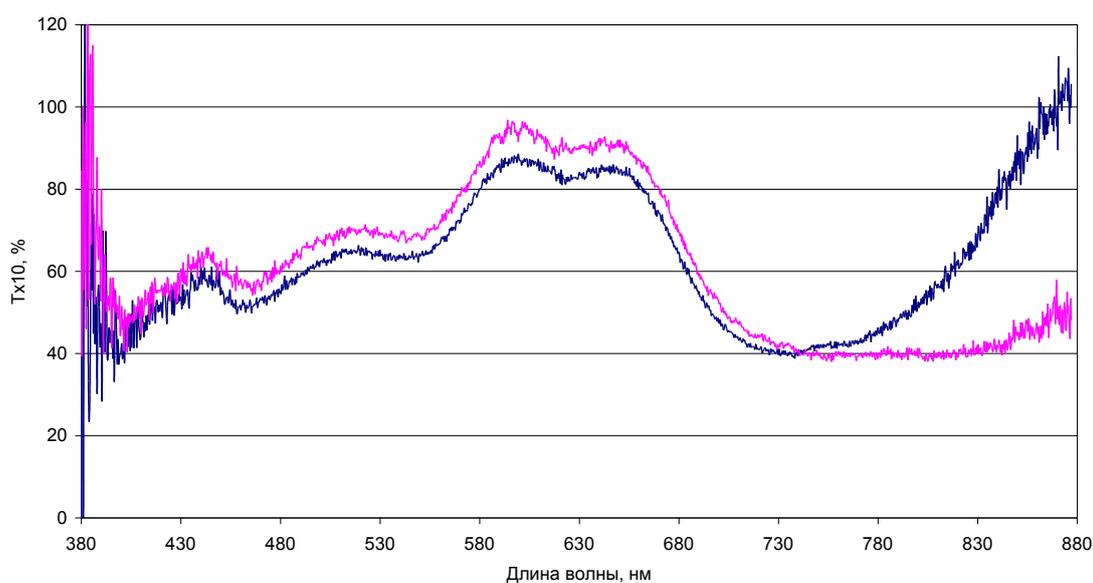


Рисунок 1.29 - Спектр пропускания гетероструктуры при освещении

галогеновой лампой мощностью 100 Вт: 1 – исходная; 2 – с SiO<sub>2</sub>

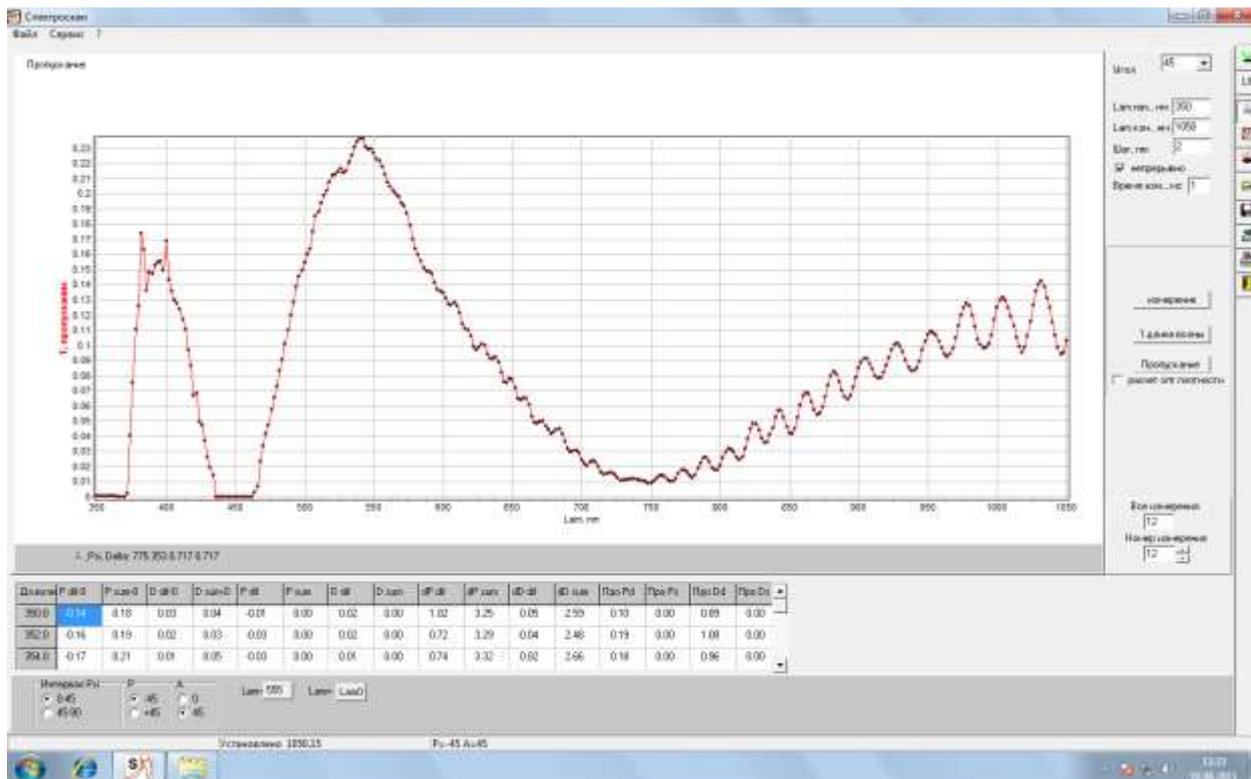


Рисунок 1.30 - Спектр отражения гетероструктуры с SiO<sub>2</sub> (0,5 мкм) на GaN (толщина сапфировой подложки 150 мкм)

Как видно из рисунка 1.30 минимальный коэффициент отражения получен для длины волны  $\lambda = 455$  нм.

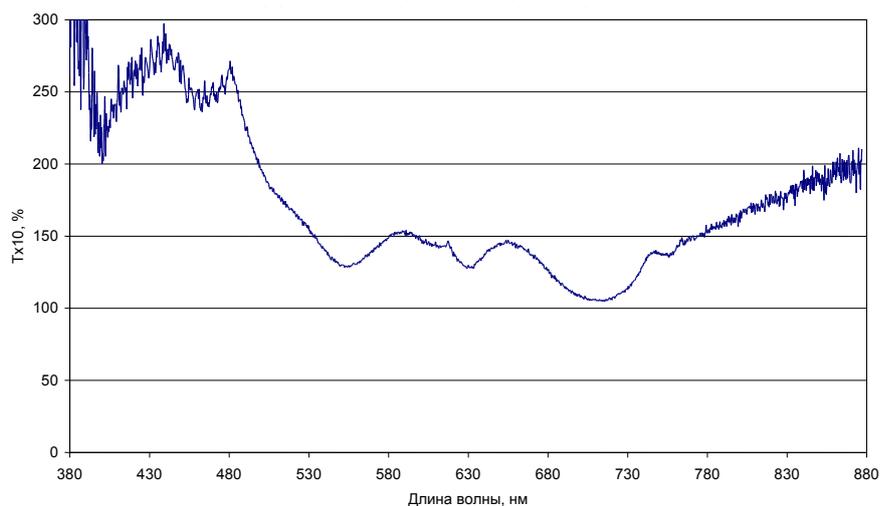


Рисунок 1.31 - Спектр пропускания гетероструктуры с SiO<sub>2</sub> (0,5 мкм) на GaN (толщина сапфировой подложки 150 мкм) при освещении галогеновой лампой мощностью 100 Вт

Уменьшение толщины сапфировой подложки и полировка ее поверхности привело к увеличению коэффициента пропускания.

В дальнейшем планируются исследования оптических характеристик СД с просветляющими покрытиями.

### **1.9 Технология получения наноразмерных покрытий для увеличения внешней квантовой эффективности**

Исходя из проведенного литературного обзора одним из эффективных способов повышения внешнего квантового выхода является создание рассеивающих свет поверхности. Рассеивающий рельеф создается, как правило, методом травления (реактивное ионное и т.д.).

Для создания рассеивающих свет поверхностей вовлечение в обработку *p*-слоя гетероструктур на первый взгляд кажется вполне обоснованным, так как он расположен сверху структуры и доступен. Однако такой подход имеет определенные недостатки в силу малой толщины *p*-слоя (0,15 мкм) и, следовательно, близости *p*-*n*-перехода, а также нестабильности *p*-поверхности по отношению к различным способам обработки. Указанных недостатков лишен *n*-слой, однако для получения доступа к нему подложку необходимо удалить (конструкция вертикального чипа).

Целесообразнее на *p*-GaN получать без травления GaN рассеивающий рельеф в дополнительном покрытии SiO<sub>2</sub> или ITO. В качестве просветляющего покрытия с текстурированной поверхностью возможно использовать пленки SiO<sub>2</sub>+C, обладающие пористой структурой. На рисунке 3.27 приведены микрофотографии поверхности структуры SiO<sub>2</sub>+C. Как видно, структура пленки не регулярная.

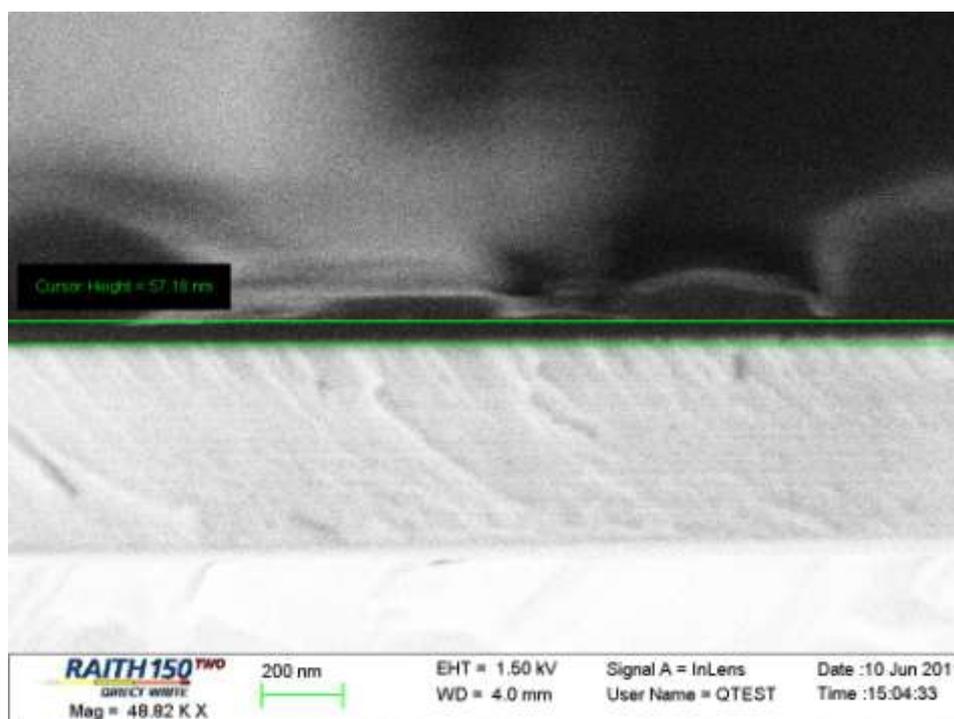


Рисунок 1.32 - Микрофотографии поверхности пленки  $\text{SiO}_2+\text{C}$

Интерес представляет использование рассеивающей свет поверхности с упорядоченной структурой. Из литературы известно, что оптимальный геометрический масштаб микрорельефа для достижения эффективного рассеяния света должен быть сопоставим с длиной волны излучения в полупроводниковом материале, т.е. составлять порядка (0,1-0,2) мкм. Одним из путей решения является создание nanoострий регулярной структуры в просветляющих покрытиях  $\text{SiO}_2$  или *ITO*. На рисунке 3.28 представлено изображение выращенных nanoострий с помощью фотолитографии. Расстояние между nanoостриями 0,5 мкм, диаметр основания 284 нм, что соответствует плотности nanoострий  $1,4 \cdot 10^7$  шт/см<sup>2</sup>.

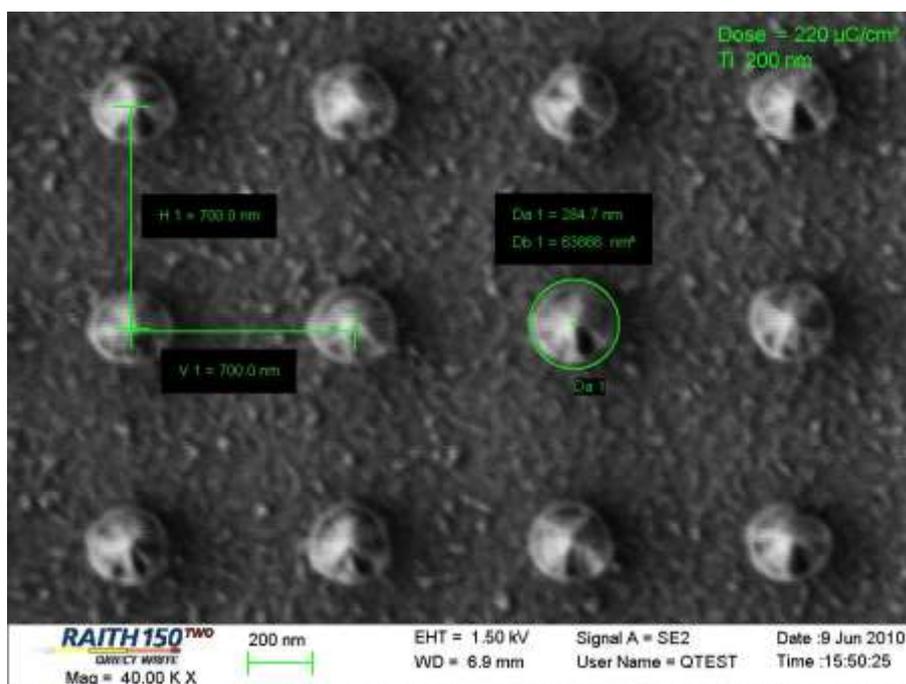


Рисунок 1.33 – Изображение наноострий

Микрофотография наноострия представлена на рисунке 1.34.

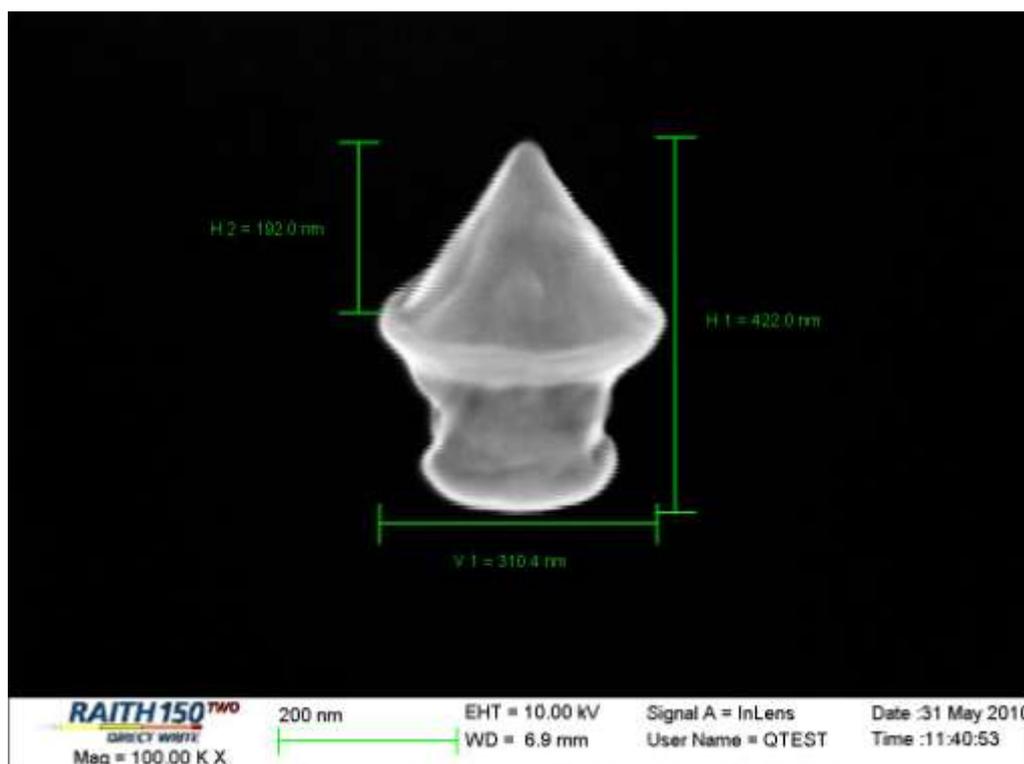


Рисунок 1.24 – Микрофотография наноострия

В дальнейшем планируется проведение эксперимента с целью уменьшения расстояния между наноостриями до 0,1 мкм и увеличением высоты наноострий.

Эксперименты показывают целесообразность включения процесса выращивания наноострий на просветляющих покрытиях SiO<sub>2</sub> в технологический маршрут изготовления светодиода с целью создания рассеивающий свет световыводящей поверхности.

### **Список литературы к разделу 1**

1. Miskys C.R., Kelly M.K., Ambacher O., Stutzmann M. - Freestanding GaN-substrates and devices // *Phys. Stat. Sol. (c)*, 2003, No.6, pp. 1627-1650.
2. Munir Z.A., Searcy A.W.- Activation energy for sublimation of gallium nitride - *J. Chem. Phys.*, 1965, Vol. 42, p. 4233.
3. Newman N., Ross J., Rubin M. - Thermodynamic and Kinetic processes involved in the growth of epitaxial GaN thin films // *Appl. Phys. Lett.*, 1993, Vol. 62, No 1, pp. 1242 – 1244.
4. Nakamura S., Senoh M., Mukai T. - High-power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes // *Appl. Phys. Lett.*, 1993, Vol. 62, pp. 2390 – 2392.
5. Nakamura S. - InGaN-based violet laser diodes, *Semicond. Sci. Technol.* 1999, Vol.14, No6, R27.
6. Kukushkin S.A., Osipov A.V., Bessolov V.N., Medvedev B.K., Nevolin V.K., Tcarik K.A. - Substrates for epitaxy of gallium nitride: New Materials and Techniques // *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 2008, Vol. 17, pp. 1-32.
7. Ponce F.A. - Structural defects and materials performance of the III-V nitrides, in: B. Gil (Ed.), *Group III Nitride Semiconductor Compounds*, Oxford University Press, Oxford, 1998, Chapter 4, pp. 123-157.
8. Romano L.T. - General remarks on extended defects in GaN and related materials, in: J.H. Edgar, S.S. Strite, I. Akasaki, and H. Amano (Eds.), *Properties, Processing and Applications of Gallium Nitride and Related Semiconductors*, INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, Stevenage, UK, 1999, pp. 209-212.
9. Northrup J.E., Romano L.T. - Planar defects in GaN: basal plane faults, prismatic faults, stacking mismatch boundaries and inversion domain boundaries, in: J.H. Edgar, S.S. Strite, I. Akasaki, and H. Amano (Eds.), *Properties, Processing and Applications of Gallium Nitride and Related Semiconductors*, INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, Stevenage, UK, 1999, pp. 213-229.
10. Suski T., Jun J., Leszczyski M., Teisseyre H., Strite S., Rockett A., Kamp M., Ebeling K.J. // *J. Appl. Phys.* 1998, Vol.84, p.1155.
11. Amano H., Iwaya M., Kashima T., Katsuragawa M., Akasaki I., Han J., Floro J.A., Chason E., Figiel J. - Stress and defect control in GaN using low

- temperature interlayers // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, Vol.37, pp. L1540-L1542.
12. Beaumont B., Vennegures Ph., Gibart P. - Epitaxial lateral overgrowth of GaN // *Phys. Stat. Sol. (b)*, 2001, Vol.227, pp. 1-43.
  13. Zheleva T.S., Smith S.A., Thomson D.B., Linthicum K.J., Rajagopal P., Davis R.F. - Pendeo-epitaxy/-A new approach for lateral growth of gallium // *J. Electron. Mater.* 1999, Vol.28, pp. L5-L8.
  14. Lahreche H., Vennegures P., Beaumont B., Gibart P. // *J. Cryst. Growth*, v.205, 1999, p. 245.
  15. Ashby C.I.H., Mitchel C.C., Han J., Missert N.A., Provencio P.P., Follstaedt D.M., Peake G.M., Griego L. // *Appl. Phys. Lett.* 2000, Vol. 77, p. 3233.
  16. Detchrohm T., Yano M., Sano S., Nakamura R., Mochizuki S., Nakamura T., Amano H., Akasaki I. - Heteroepitaxial lateral overgrowth of GaN on periodically grooved substrates: A new approach for growing low-dislocation-density GaN single crystal // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2001, Vol. 40, pp. L16-L19.
  17. Mayer M., Pelzman A., Kamp M., Ebeling K.J., Teisseyre H., Nowak G., Leszczynski M., Grzegory I., Porowski S., Karczewski G. // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, Vol. 36, p.L1634.
  18. Ponce F.A., Bour D.P., Götz W., Johnson N.M., Helava H.I., Grzegory I., Jun J., Porowsky S. - Homoepitaxy of GaN on polished bulk single crystals by metalorganic chemical vapor deposition // *Appl. Phys. Lett.* 1996, Vol. 68, Issue 7, pp. 917-919.
  19. Nakamura S., Senoh M., Nagahama S., Iwasa N., Yamada T., Matsushita T., Kiyoku H., Sugimoto Y., Kozaki T., Umemoto H., Sano M., Chocho K. - InGaN/GaN/AlGaN-based laser diodes with cleaved facets grown on GaN substrates // *Appl. Phys. Lett.*, 1998, Vol. 73, pp.832-834.
  20. Kuramoto M., Ssaoka C., Hisagana Y., Kimura A., Yamaguchi A.A., Sunakawa H., Kuroda N., Nido M., Usui A., Mizuta M. - Room temperature continuous-wave operation of InGaN multi-quantum-well laser diodes grown on an n-GaN substrate with a backside n-contact // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, Vol. 38, pp. L184-L186
  21. Vaudo R.P., Phanse V.M., Wu X., Golan Y., Speck J.S. // 2<sup>nd</sup> Int. Conf. Nitride Semiconductors, Tokushima, 1997, p. 442.
  22. Park S.S., Park I.-W., Choh S.H. - Free standing GaN substrates by hydride vapor epitaxy, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2000, Vol.39, p. L1141.
  23. Nakamura S., Senoh M., Nagahama S., Iwasa N., Yamada T., Matsushita T., Kiyoku H., Sugimoto Y., Kozaki T., Umemoto H., Sano M., Chocho K. - Continuous-wave operation of InGaN/GaN/AlGaN-based laser diodes grown on GaN substrates // *Appl. Phys. Lett.*, 1998, Vol. 72, pp. 2014-2016.
  24. Tomita K., Kachi T., Nagai S., Kojima A., Yamasaki S., Koike M. - Self-separation of freestanding GaN from sapphire substrates by hydride vapor phase epitaxy // *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2002, Vol. 194, p.563.

25. Haisma J., Spierings G.A.C.M., Biermann U.K.B., Pals J.A. - Silicon-on-insulator wafer bonding-wafer thinning; technological evaluations // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1989, Vol. 28, pp. 1246–1443.
26. Yablonovitch E., Gmitter T., Harbison J.P., Bhat R. - Extreme selectivity in the lift off of epitaxial GaAs films // *Appl. Phys. Lett.*, 1987, Vol. 51, pp. 2222 – 2224.
27. Yablonovitch E., Kash K., Gmitter T.G., Florez L.T., Harbison J.P., Colas E. - Regrowth of GaAs quantum wells on GaAs liftoff films “Van Der Waals bonded” to silicon substrates // *Electron. Lett.* 1989, V. 25, pp. 171 –172.
28. Kelly M.K., Ambacher O., Dahlheimer B., Gross G., Dimitrov R., Angerer H., Stutzmann M. - Optical patterning of GaN films // *Appl. Phys. Lett.*, 1996, Vol. 69, pp. 1749-1751.
29. Wong W.S., Sands T., Cheung N.W. - Damage-free separation, of GaN thin films from sapphire substrates // *Appl. Phys. Lett.*, 1998, Vol. 72, pp. 599-601.
30. Wong W.S., Sands T., Cheung N.W., Kneissl M., Bour D.P., Mei P., Romano L.T., Johnson N.M. - Fabrication of thin-film InGaN light-emitting diode membranes by laser lift-off // *Appl. Phys. Lett.*, 1999, Vol. 75, pp. 1360-1362.
31. Kelly M.K., Vaudo R.P., Phanse V.M., Görgens L., Ambacher O., Stutzmann M. - Large free-standing GaN substrates by hydride phase epitaxy and laser-induced liftoff // *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, Vol. 38, p. 217.
32. Ambacher O., Brandt M.S., Dimitrov R., Metzger T., Stutzmann M., Fisher R. A., Miehr A., Bergmaier A., Dollinger G. - Thermal stability desorption of group III nitrides prepared by metal organic chemical vapor deposition // *J. Vac. Sci. Technol.*, 1996, Vol. B14, pp. 3532-3543.
33. Kelly M.K., Ambacher O., Dimitrov R., Handschuh R., Stutzmann M., - Optical process for liftoff of group III-nitride film // *Phys. Stat. Sol. (a)*, 2000, Vol. 617, pp. R3-R4.
34. Сейсян Р.П., Ермакова А.В., Калитеевская Н.А., Марков Л.К., Рымалис М.Р. - Абляция тонких эпитаксиальных пленок GaN под действием импульсного излучения KrF эксимерного лазера // *Письма в ЖТФ*, 2007, т. 33, вып. 7 стр. 64-70.
35. Muth J.F., Lee J.H., Shmagin I.K., Kolbas R.M., Casey Jr., H.C., Keller B.P., Mishra U.K., DenBaars S.P. // *Appl. Phys. Lett.*, 1997, Vol. 71, p. 2572.
36. Бараш Е.Г., Кабин А.Ю., Любин В.М., Сейсян Р.П. // *ЖТФ*, 1992, т. 62, вып. 3, стр. 106.
37. Ambacher J., Kelly M.K., Miskys C.R., Höppel L., Nebel C., Stutzmann M. // *Mat. Res. Soc. Symp.* 2000, Vol. 617, J1.7.1.
38. Ambacher O. - Growth and application of group III-nitrides // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 31, No 20, pp. 2651-2710.
39. Pearton S.J., Zolper J.C., Shul R.J., Ren F. - GaN: Processing, defects and devices // *J. Appl. Phys.*, 1999, Vol. 86, p. 1.

40. Chu C.-F., Lai F.-I., Chu J.-T., Yu C.-C., Lin C.-F., Kuo H.-C., Wang S.C. - Study of GaN light-emitting diodes fabricated by laser lift-off technique // J. Appl. Phys., 2004, Vol. 95, No 8, pp. 3916-3922.
41. Stach E. A., Kelsh M., Wong W. S., Nelson E. C., Sands T., Cheung N.W. // Mat. Res. Soc. Symp. 2000, Vol. 617, J3.5.1.
42. Stach E.A., Kelsh M., Nelson E.C., Wong W.S., Sands T., Cheung N.W. - Structural and chemical characterization of free-standing GaN-films separated from sapphire substrates by laser lift-off // Appl. Phys. Lett., 2000, Vol. 77, pp. 1819-1821.
43. Wong W.S., Cyj Y., Weber E.R., Sands T., Yu K.M., Krüger J., Wengrow A.B., Cheung N. W. - Structural and optical quality of GaN/metal/Si heterostructures fabricated by excimer laser liftoff // Appl. Phys. Lett, 1999, v. 75, pp. 1887-1889.
44. Kim Hyeon-Soo, Dawson M.D., Yeom Geun-Young - Surface properties of GaN fabricated by laser lift-off and ICP etching // J. Korean. Phys.Soc., 2002, Vol. 40, pp. 567-571.
45. Park J., Sercel J. P., Sercel P.J. - Method of separating layers of materials // US Patent 7,241,667 B2, 2007.
46. Делоне Н.Б. - Взаимодействие лазерного излучения с веществом: Курс лекций. М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит., 1989. – 280 с.
47. Fabro R., Fournier J., Ballard P., Devaux D., Virmont J. - Physical study of laser-produced plasma in confined geometry // J. Appl. Phys., 1990, Vol. 68, No. 2, pp. 775 – 784.
48. Ueda T., Ishida M., Yuri M. - Laser lift-off of very thin AlGaIn film from sapphire using selective decomposition of GaN interlayers // Appl. Surf. Science, 2003, Vol. 216, pp. 512 – 518.
49. Travemier P.R., Clarke D.R. - Mechanics of laser-assisted debonding of films // J. Appl. Phys., 2001, Vol. 89, p. 1527.
50. Brown M.G., Ellashevich I., Gottfried M., Karlicek, R. F. Jr., Nering J.E. - Semiconductor device separation using patterned laser projection // US Patent 6,413,839 B1, 2002.
51. Wen W.-C., Yan L.-J., Chang C.-S. - Laser lift-off method // US Patent 7,754,511 B2, 2010.
52. Köhler A. - Zeitschrift für wissenschaftliche Mikroskopie - Band X, Seite, 1893, pp. 433 – 440.
53. Dickey F.D., O'Neil B. - Multifaceted laser beam integrators: general formulation and design concepts // Opt. Eng. 1988, Vol. 27, pp.999-1007.
54. Dickey F.M., Holswade S.C.- Gaussian Laser Beam Profile Shaping // Optical Engineering, 1996, Vol. 36, No 11, pp. 3287 – 3295.
55. Воронцов М.А., Матвеев А.Н., Сивоконь В.П. - К расчету фокусаторов лазерного излучения в дифракционном приближении. // В сб. «Компьютерная оптика». – Самара: Изд-во Самарского аэрокосмического ун-та. Вып.1, 1987, с.74-78.

56. Микрюков А.С. Ильина И.В., Черезова Т.Ю. Формирование заданных распределений интенсивности. Часть 1: Алгоритм Гершберга – Сакстона, алгоритм покоординатного спуска и их комбинации // Оптика атмосферы и океана, 2010, т.23, N1 С. 59 – 65.
57. Rodes P.W., Shealy D.L. – Refractive optical systems for irradiance redistribution of collimated radiation: their design and analysis // Applied Optics, 1980, Vol. 19, No.20, p.3545-3553.
58. Гончарский А.В., Попов В.В., Степанов В.В. – Введение в компьютерную оптику: Учебное пособие.-М.: Изд-во МГУ, 1992. -312 с.
59. Vorontsov M.A., Kolosov V.V., Kohnle A. – Adaptive laser beam projection on an extended target: phase- and field-conjugate precompensation // J. Opt. Soc. Am. A, 2007, Vol. 24, No. 7, pp. 1975 – 1993.
60. Vorontsov M.A., Kolosov V.V. – Target-in-the-loop beam control: basic considerations for analysis and wave-front sensing // J. Opt. Soc. Am. A, 2005, Vol. 22, No. 1, pp. 126 – 141.
61. Синие флип-чип светодиоды на основе AlGaInN с удаленной сапфировой подложкой / Смирнова И.П., Марков Л.К., Закгейм Д.А., Аракчеева Е.М., Рымалис М.Р. // Физ. и техн. полупровод. — . – 2006. – Т. 40; № 11. – с.1397-1401.
62. Увеличение квантовой эффективности флип-чип AlGaInN-светодиодов путем реактивного ионного травления внешней стороны подложек SiC/ Смирнова И.П., Марков Л.К., Аракчеева Е.М., Павлюченко А.С., Закгейм Д.А., Кулагина М.М. // Физ. и техн. полупровод. — . – 2010. – Т. 44; № 5. – с.684-687.
63. Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening // Увеличение эффективности вывода излучения светодиодов на основе GaN созданием шероховатости поверхности / Fujii T., Gao Y., Sharma R., Hu E. L., DenBaars S. P., Nakamura S. // Appl. Phys. Lett. — . — 2004. — Т. 84; № 6. — с. 855–857.
64. High internal and external quantum efficiency InGaN/GaN solar cells // Высокая внутренняя и внешняя квантовая эффективность InGaN/GaN солнечных батарей / Matioli E., Neufeld C., Iza M., Cruz S. C., Al-Heji A. A., Chen X., Farrell R. M., Keller S., DenBaars S., Mishra U., Nakamura S., Speck J., Weisbuch C. // Appl. Phys. Lett. — . — 2011. — Т. 98; № 021102/1-021102/3.
65. GaN-based light-emitting diode with textured indium tin oxide transparent layer coated with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder // Светодиод на основе GaN с текстурированным прозрачным слоем ИТО, покрытым порошком Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ Kim T.K., Kim S.H., Yang S.S., Son J.K., Lee K.H., Hong Y.G., Shim K.H., Yang J.W., Lim K.Y., Bae S.J., Yang G.M. // Appl. Phys. Lett. — . — 2009. — Т. 94; № 16. — с. 161107/1–161107/3.

66. Пат. EP 2218114. High extraction efficiency nitride based light emitting by surface / Zhong Hong, Tyagi Anurag, Vampola Kenneth J., Speck James S., Denbaars Steven P., Nakamura Shuji. - Оpubл. 18.08.2010.
67. Fabrication and characteristics of thin-film InGaN-GaN light-emitting diodes with TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> omnidirectional reflectors // Изготовление и характеристики тонкопленочных InGaN-GaN СД со всенаправленными TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> отражателем / Chiu C.H., Kuo H.C., Lee C.E., Lin C.H., Cheng P.S., Huang H.W., Lu T.C., Wang S.C., Leung K.M. // Semicond. Sci. and Technol. — 2007. — Т. 22; № 7. — с. 831–835.
68. Отражающий р-контакт на основе тонких пленок ИТО для флип-чип светодиодов AlGaInN / Марков Л.К., Смирнова И.П., Павлюченко А.С., Аракчеева Е.М., Кулагина М.М. // Физ. и техн. полупровод. – 2009. – Т. 43; № 11. – с.1564-1569.

## 2 Устройства управления и питания светотехнических устройств

### 2.1 Описание драйвера 20 Вт (УПС20)

Схема электрическая принципиальная данного технического решения изображена на рисунке 2.1.

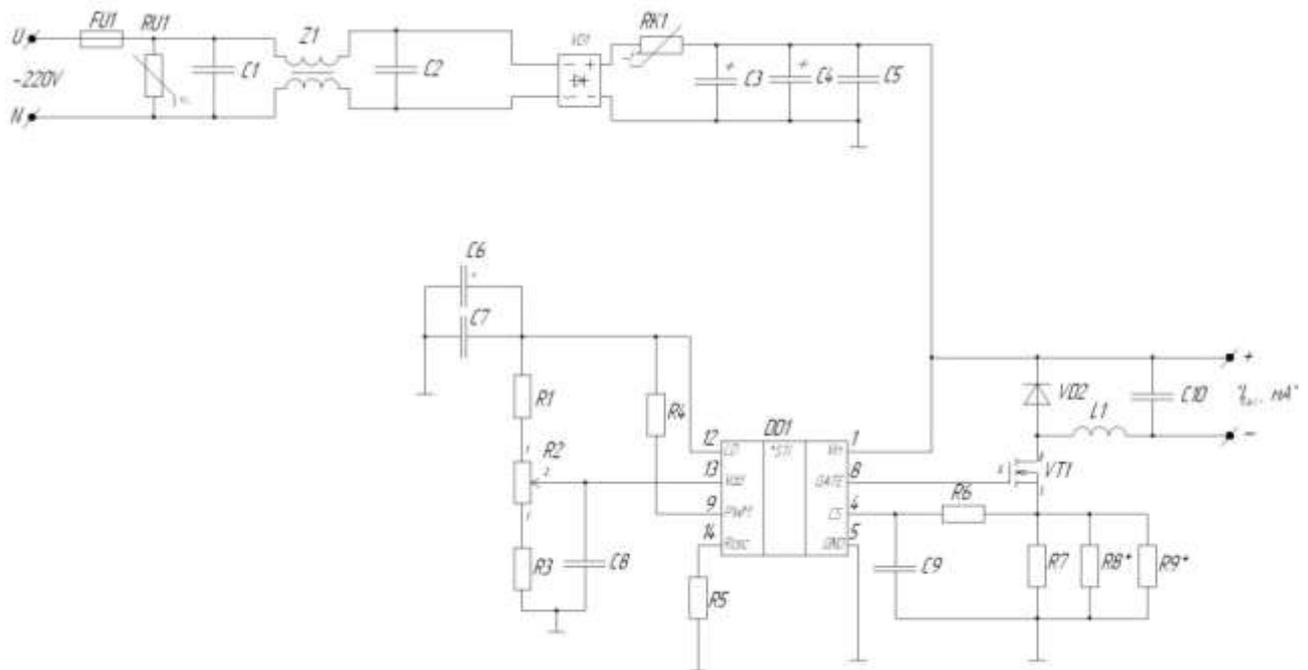


Рисунок 2.1 – Схема электрическая принципиальная драйвера мощностью 20 Вт

На базе данной схемы были испытаны три интегральные схемы контроллеров тока

светодиодного драйвера:

1. UC3843B (SOIC8) – Texas Instruments.

Его основные особенности:

- низкая стоимость микросхемы, распространенность на рынке различных модификаций;
- диапазон рабочих температур  $-40 - +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- сравнительно высокий ток потребления в пусковом и рабочих

режимах. Наличие в схеме дополнительных мощных токоограничивающих резисторов на питающем выводе микросхемы снижает эффективность преобразователя;

- повышенный нагрев корпуса микросхемы.

## 2. HV9961B (SOIC16) – Supertex

- диапазон рабочих температур -40 - +50 °С;
- диапазон выходного напряжения ограничен минимальным уровнем 14В;
- повышенный нагрев корпуса микросхемы;

## 3. FAN7601 (SOIC8 – Fairchild Semiconductors

- Отсутствие режима перегрузки по току не позволяет обеспечить контроль короткого замыкания на выходе светодиодного драйвера;
- диапазон рабочих температур -40 - +50 °С.

В виду наиболее подходящих характеристик контроллером тока для драйверов модификаций 20 Вт и 60 Вт выбрана микросхема HV9961B.

Для устранения влияния температуры нагрева транзистора и удобства настройки, данная микросхема с чип элементами монтируется с противоположной стороны от установки навесных элементов.

Драйвер 20Вт (УПС20) изготавливался на печатной плате из двустороннего фольгированного стеклотекстолита марки FR-4 размерами 76x51мм. Монтаж выполнен с двух сторон (на нижней стороне только элементы поверхностного монтажа).

Радиатором транзистора является алюминиевый уголок, соприкасающийся с корпусом драйвера, что позволяет отвести тепло с транзистора на корпус.

В плате предусмотрены отверстия для проводов (см. рисунок. 2), исключая выдергивание проводов (испытание на отрыв).

Варианты установки навесных элементов в соответствии с ОСТ45.010.030-92.

В схеме драйвера применены ЭРИ зарубежного производства.

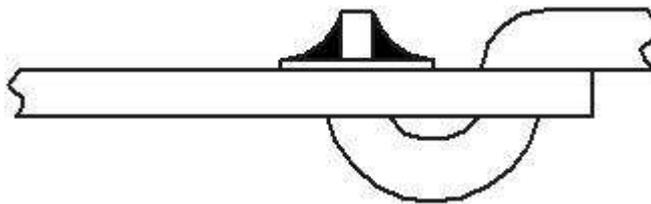


Рисунок 2.2 – Распайка проводов

В качестве корпуса драйвера применяется корпус G1019 фирмы Gainta Industries. Данный корпус выполнен из жаростойкого пластика. Корпус является легко доступным и дешевым (47 р. с НДС). В данном корпусе обеспечивается степень защиты IP40, IP65 в соответствии с ГОСТ 14254-96.

Драйвер УПС20 обеспечивает II класс защиты от поражения электрическим током по ГОСТ 12.2.007.0-75 (2001).

Драйвер УПС20 удовлетворяет требованиям электромагнитной совместимости в соответствии с ГОСТ Р 51514–99.

По уровню промышленных радиопомех драйверы соответствуют требованиям ГОСТ Р 51318.15–99.

Драйверы предназначены для работы в электрических сетях общего назначения с номинальным напряжением 220 В частотой 50 Гц.

Испытания драйвера 20Вт (УПС20) проводились согласно «Программы испытаний драйвера мощностью 20 Вт корпусного исполнения IP40».

Протоколы испытаний УПС20 приведены в приложении А.

## **2.2 Описание драйвера 150 Вт**

Структурная схема источника питания для светодиодного светильника мощностью 150 Вт приведена на рисунке 2.3.

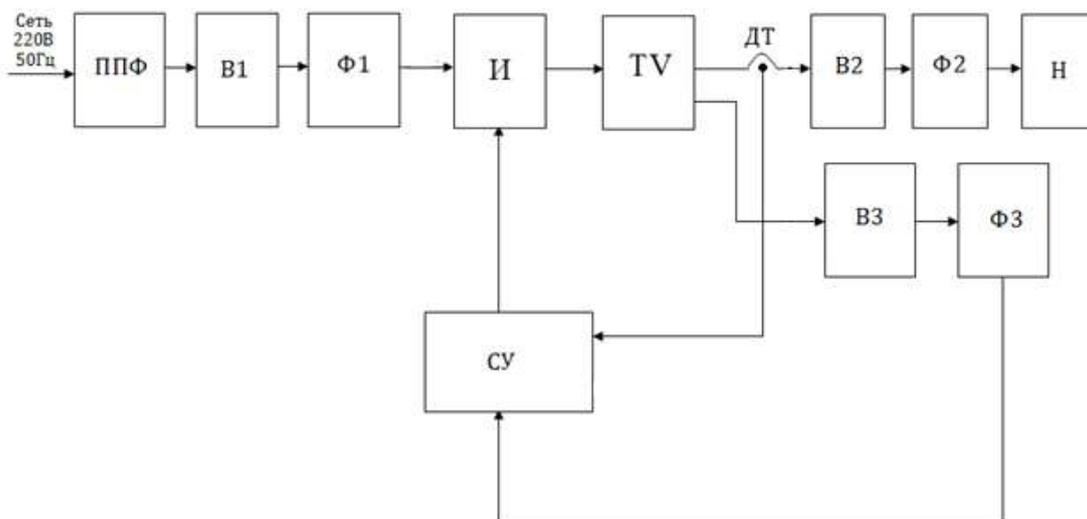


Рисунок 2.3 – Структурная схема источника питания мощностью 150 Вт

ППФ – помехоподавляющий фильтр предназначен для подавления электромагнитных помех со стороны самого источника питания.

В1 – входной низкочастотный однофазный выпрямитель преобразует напряжение промышленной частоты 50 Гц в постоянное.

Ф1 – входной фильтр предназначен для компенсации токов рекуперации, которые обусловлены спецификой работы электромагнитных элементов на высокой частоте.

И – высокочастотный инвертор преобразует постоянное выпрямленное напряжение в переменное высокочастотное.

ТV – высокочастотный трансформатор понижает напряжение инвертора до необходимой величины и обеспечивает эффективную передачу мощности на сигналах с быстрыми фронтами.

ДТ – датчик тока. Используется для стабилизации заданного значения тока.

В2,В3 – выходные высокочастотные выпрямители, которые преобразуют переменное высокочастотное напряжение в постоянное выпрямленное.

Ф2, Ф3 – выходные высокочастотные фильтры, предназначены для фильтрации выходного высокочастотного напряжения.

СУ – система управления силовыми транзисторами. Используется

принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с применением обратной связи по току. Задаёт частоту и длительность импульсов тока силовых ключей;

Н – нагрузкой является светодиодная линейка с нелинейной вольт – амперной характеристикой.

Высокочастотный инвертор И, высокочастотный трансформатор TV, выходные выпрямители В2, В3 и выходные фильтры Ф2, Ф3 образуют силовую часть источника питания (рисунок 2.4). Её основой является одноконтный обратноходовой двухключевой инвертор (в отечественной литературе часто можно встретить название «косой полумост»).

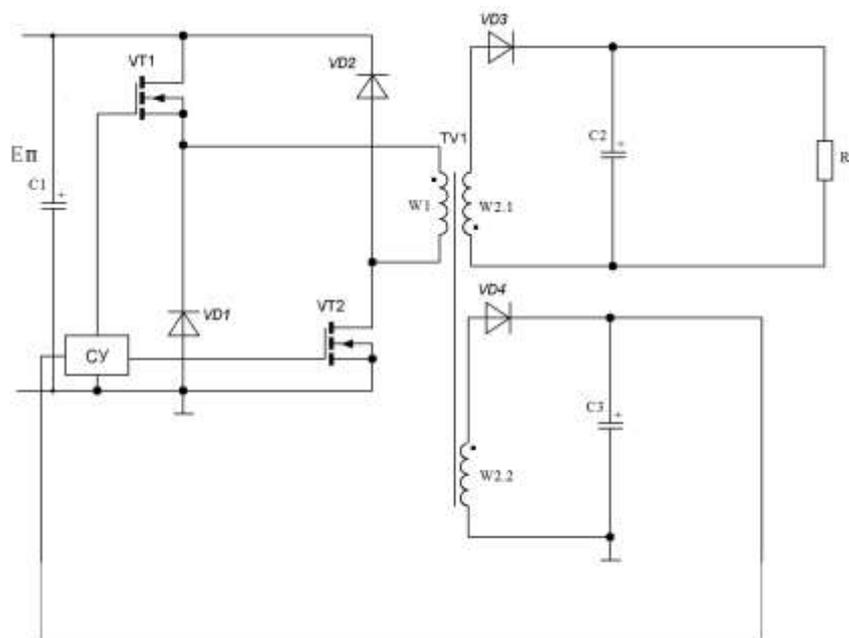


Рисунок 2.4 – Одноконтный двухключевой инвертор

Такое схемное решение обладает рядом преимуществ и достоинств, которые хорошо подходят для реализации источника питания для светодиодного светильника это:

- защита от короткого замыкания;
- универсальность схемы по мощности (с таким решением можно реализовывать схемы на рабочую мощность от 50Вт до 150Вт);
- напряжение на стоке силовых транзисторов не превышает напряжения питания инвертора, что даёт возможность использовать более дешёвые

силовые транзисторы;

- нет гальванической связи между входом и выходом;

- отсутствуют сквозные токи;

- малое число силовых ключей;

- энергия паразитных выбросов напряжения рекуперирована через диоды в первичный источник питания (это позволяет сохранить высокий КПД).

Инвертор работает следующим образом (рисунок 2.5). Когда транзисторы VT1, VT2 открыты, то диод VD3 закрыт, а энергия первичного источника, запасается в индуктивности намагничивания и в индуктивности рассеяния трансформатора. При этом магнитопровод трансформатора намагничивается в прямом направлении.

Когда транзисторы VT1, VT2 закрыты, то диод VD3 открыт и накопленная энергия через него поступает в конденсатор фильтра и нагрузку. Энергия, запасенная в индуктивности намагничивания и в индуктивности рассеяния трансформатора, возвращается в источник питания E через открывающиеся диоды VD1 и VD2, благодаря чему протекает размагничивание магнитопровода в обратном направлении, за счет приложения обратного напряжения к обмотке w1.

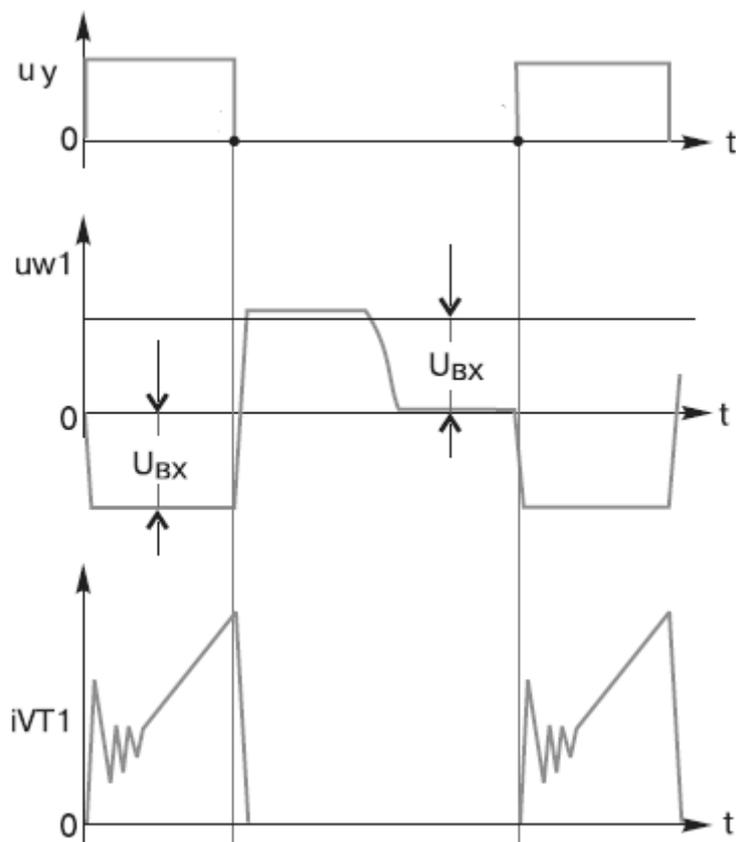


Рисунок 2.5 – Диаграммы работы однотактного двухключевого инвертора

Поскольку к моменту открытия ключевого транзистора процесс размагничивания должен закончиться, режим работы преобразователя выбирается таким, чтобы коэффициент заполнения не превышал величину 0,5. Поэтому в качестве входного напряжения при расчетах необходимо подставлять его минимально возможное значение.

В однотактный двухключевом инверторе может наблюдаться как прерывистый, так и непрерывный режим тока дросселя.

Главная цель схемы управления – это поддерживать выходное постоянное напряжение для большого диапазона токов нагрузки. Для этого используется контур отрицательной обратной связи. Контроллеры всех источников питания как линейных, так и импульсных – считывают выходное напряжение. Номинальное выходное напряжение понижается до уровня опорного напряжения внутри микросхемы контроллера. Это напряжение обратной связи подаётся на инверсный вход операционного усилителя с

большой степенью усиления, называемого усилителем напряжения ошибки. Опорное напряжение подаётся на не инверсный вход того же операционного усилителя. Выход усилителя соответствует усиленной разнице между опорным и выходным напряжениями. Это выходное напряжение называется напряжением ошибки (рассогласования). Далее это напряжение используется для управления той частью энергии, которую источнику питания необходимо передать нагрузке. Напряжение ошибки может быть положительным в результате слишком низкого выходного напряжения. В этом случае источник питания должен увеличить значение передаваемой энергии. А может быть напряжение ошибки и отрицательным в результате слишком высокого выходного напряжения. В этом случае источник должен уменьшить значение передаваемой энергии.

Для того чтобы источник питания не превышал своих номиналов мощности считывают значения тока с помощью датчиков тока, которые были рассмотрены выше.

Выбор метода управления микросхемы является очень важным моментом. В общем случае, прямоходовые топологии обычно используют контроллеры, работающие в режиме напряжения, а обратноходовые обычно в токовом режиме [1].

Так как светодиод является токовым прибором и силовая часть строится на основе обратноходового преобразователя, то в данной работе будет использован токовый режим управления контроллера.

Для управления силовой частью разрабатываемого источника питания хорошо подходит ШИМ – контроллер из семейства UC2844 – UC 3845. Это дешёвый и распространённый чип, выпускаемый многими производителями. Выберем один из вариантов этой серии исходя из следующих соображений:

- в данной серии чипов есть возможность ограничения величины рабочего цикла любой величиной, и все расчёты могут быть адаптированы под любое максимальное значение рабочего цикла.
- сетевому источнику питания желательно иметь большой гистерезис

питающего напряжения чипа – это значительно облегчает построение схем запуска и защиты.

- данная микросхема выпускается в двух модификациях. В чипах обозначение которых содержит индекс (А), снижен стартовый ток и несколько выше точность опорного напряжения, но стоимость их одинакова, поэтому лучше использовать микросхему с индексом.

Сопоставляя всё вышесказанное, остановимся на выборе микросхемы UC 2844 А как отвечающей всем условиям.

Структурная схема внутреннего строения микросхемы изображена на рисунке 2.6.

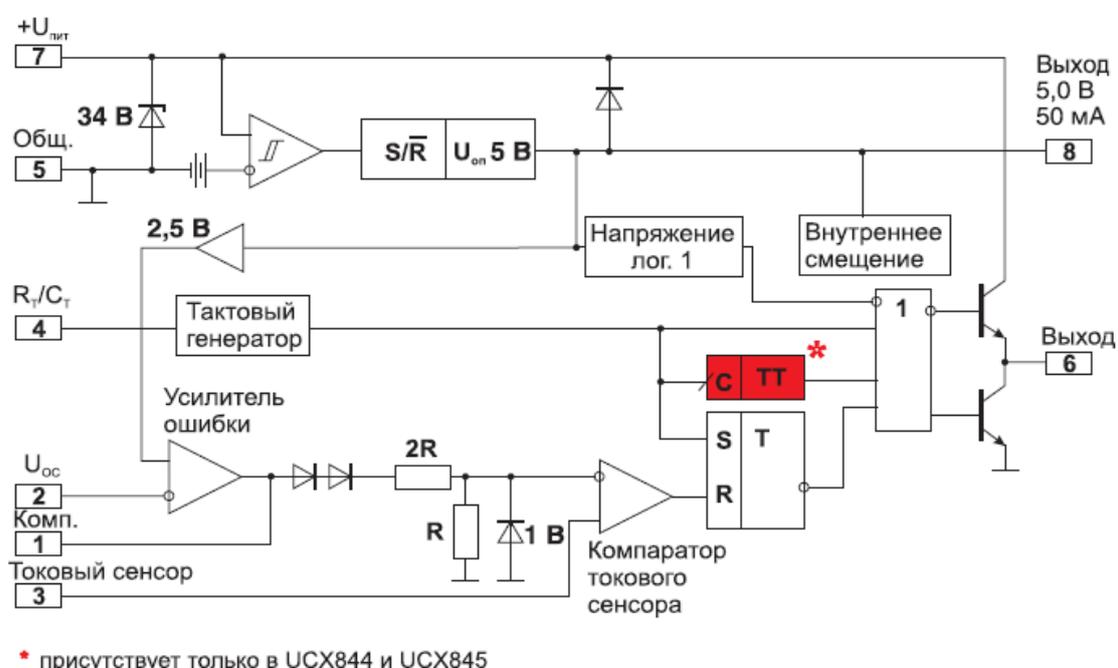


Рисунок 2.6 – Структурная схема внутреннего строения микросхемы

Микросхема содержит блок защитного выключения при снижении напряжения питания. Блок состоит из триггера Шмитта, имеющего дифференциальные входы, и источника опорного напряжения. С помощью RS – триггера этот блок управляет общим источником опорного напряжения 5В. Этот источник имеет собственный вывод и обеспечивает ток до 50мА (рисунок 2.7).

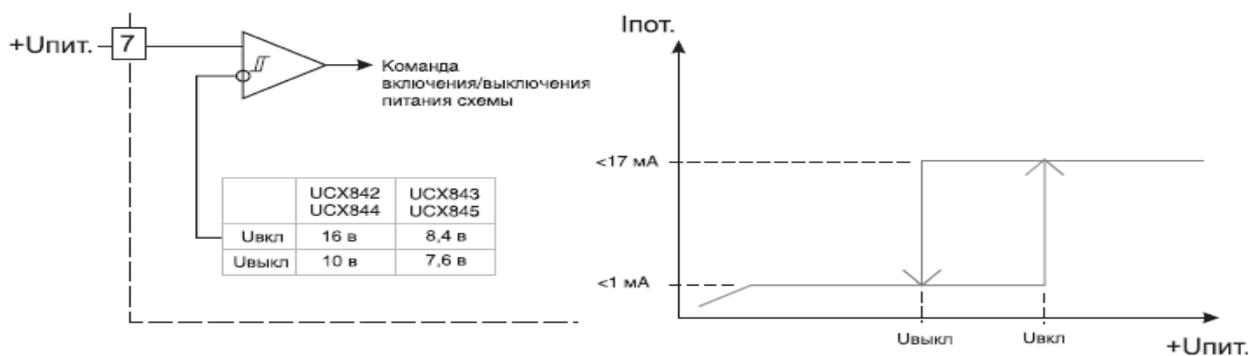


Рисунок 2.7 – Блок защитного отключения

В режиме короткого замыкания он способен выдерживать до 100 мА. Этот ШИМ – контроллер получил название токовый из – за блока защитного отключения. Микросхема начинает работать при токе потребляемого около 1 мА и допускают питание от источника высокого напряжения через цепочку резисторов, главное чтобы обеспечивался диапазон рабочих токов и напряжений по выводам питания. Для этой цели между плюсом и землёй включен стабилитрон с напряжением пробоя. Помимо блока защитного отключения на кристалле выполнена схема внутреннего смещения и схема питания логики. Так же генератор импульсов, который имеет один вывод для подключения времязадающей RC – цепи (рисунок 2.8). На минимальную частоту ограничений в справочнике не указано, а максимальная частота равна 500кГц.

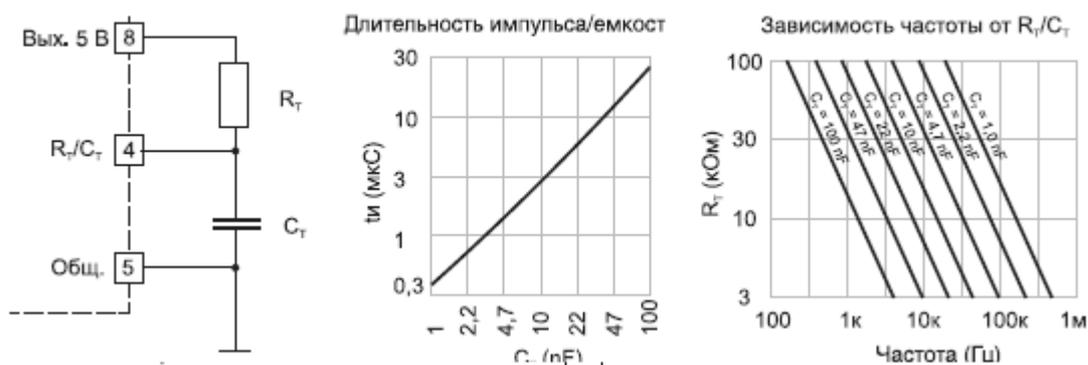


Рисунок 2.8 – Генератор импульсов и зависимости рабочего цикла от ёмкости и частоты от сопротивления

На кристалле имеется усилитель ошибки (рисунок 2.9), не инвертирующий вход которого подключен к внутреннему источнику напряжения 2,5В, а инвертирующий вход имеет собственный вывод, служащий входом обратной связи.

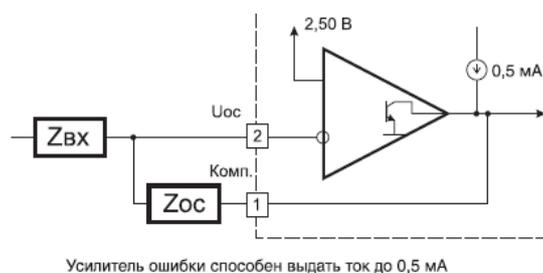


Рисунок 2.9 – Усилитель ошибки

Выход этого усилителя соединяется с выводом 1и через цепочку сдвига уровня с инвертирующим входом компаратора ограничения тока. Не инвертирующий вход компаратора ограничения тока выведен на отрицательный вывод и служит для подключения к внешнему токоизмерительному резистору (рисунок 2.10), через который течёт ток нагрузки. Номинал этого резистора и, соответственно, падение напряжения на нём и определяет предельный ток, текущий через мощный внешний ключ, которым управляет контроллер.

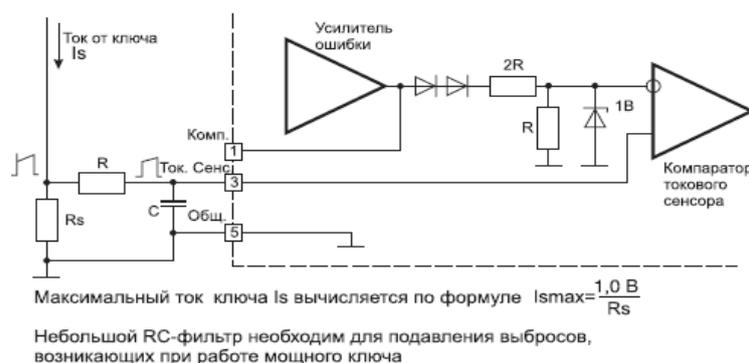


Рисунок 2.10 – Токковый сенсор

Другие устройства на кристалле – это RS – защёлка и логика. Вместе они обеспечивают модуляцию ширины импульса в зависимости от

напряжения усилителя ошибки и сигнала токового компаратора. Выходной каскад состоит из двух  $n - p - n$  транзисторов.

Схема электрическая принципиальная разработанного источника питания с выходной мощностью 150 Вт представлена на рисунке 2.11.

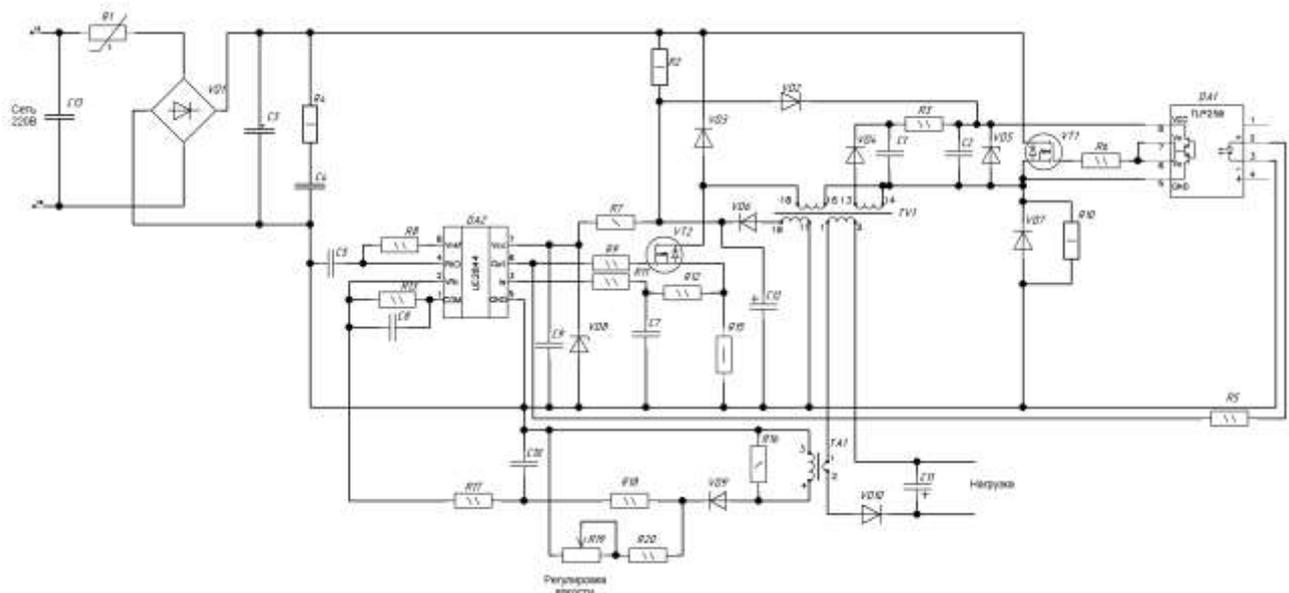


Рисунок 2.11 – Драйвер с мощностью 150 Вт.

На основании данного схмотехнического решения, но с изменением номинальных значений компонентов изготавливался источник питания с выходной мощностью 60 Вт. Полученные технические характеристики модифицированного драйвера указаны в пункте 1 настоящего отчёта.

### 2.3 Описание драйвера 20 Вт (-60 - +50 °С)

Целью разработки данной модификации является получение источника питания для светодиодных светильников работоспособного при температуре -60 - +50 °С. Особенностью данного схмотехнического решения является отсутствие контроллера тока в интегральном исполнении, потому что этот компонент работает в диапазоне температур (-40 - +50 °С). В связи с этим разработка и изготовления макета производилась с применением только дискретных элементов обладающих требуемым температурным диапазоном.

Данная схема представляет собой обычный обратноходовой

преобразователь, выполненный по автогенераторной схеме (рисунок 2.12). Рассмотрим кратко принцип работы преобразователя напряжения.

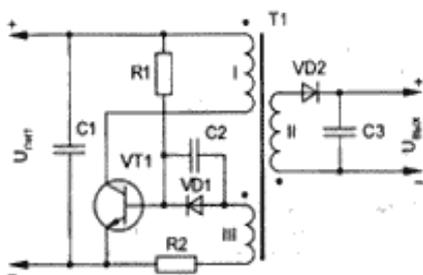


Рисунок 2.12 – Обратногоходовой преобразователь

Трансформатор Т1 - линейный дроссель; интервалы накопления энергии в нем и передачи накопленной энергии в нагрузку разнесены во времени. На рисунке 2.13 показаны: II – ток первичной обмотки трансформатора, III – ток вторичной обмотки,  $t_n$  – интервал накопления энергии в дросселе,  $t_p$  - интервал передачи энергии в нагрузку.

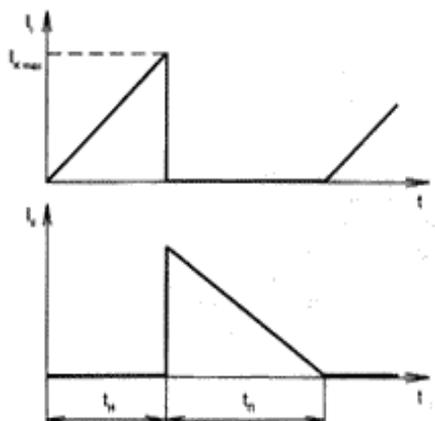


Рисунок 2.13 – Обратногоходовой преобразователь

При подключении питающего напряжения  $U_{пит}$  через резистор R1 начинает проходить ток базы транзистора VT1 (диод VD1 препятствует прохождению тока по цепи базовой обмотки, а шунтирующий его конденсатор C2 увеличивает положительную обратную связь (ПОС) на этапе формирования фронтов напряжения). Транзистор приоткрывается, замыкается цепь ПОС через трансформатор Т1, в котором происходит регенеративный процесс накопления энергии. Транзистор VT1 входит в насыщение. К первичной обмотке трансформатора приложено напряжение питания, и ток II (ток коллектора  $I_k$  транзистора VT1) линейно нарастает. Ток

базы IB насыщенного транзистора определяется напряжением на обмотке III и сопротивлением резистора R2. На этапе накопления энергии диод VD2 закрыт (отсюда и название преобразователя - с "обратным" включением диода), и потребление мощности от трансформатора происходит только входной цепью транзистора через базовую обмотку.

Когда ток коллектора  $I_K$  достигнет значения:

$$I_{K \max} = h_{21Э} I_B, \quad (1)$$

где  $h_{21Э}$  – статический коэффициент передачи тока транзистора VT1, транзистор выходит из режима насыщения и развивается обратный регенеративный процесс: транзистор закрывается, открывается диод VD2 и энергия, накопленная трансформатором, передается в нагрузку. После уменьшения тока вторичной обмотки вновь начинается этап накопления энергии. Интервал времени  $t_p$  максимален при включении преобразователя, когда конденсатор C3 разряжен, и напряжение на нагрузке равно нулю.

В [2] показано, что блок питания, собранный по схеме на рисунке 2.9, – функциональный преобразователь источника напряжения питания  $U_{пит}$  в источник тока нагрузки  $I_n$ .

Важно отметить: поскольку этапы накопления энергии и ее передачи разнесены во времени, максимальный ток коллектора транзистора не зависит от тока нагрузки, т. е. преобразователь полностью защищен от замыканий на выходе. Однако при включении преобразователя без нагрузки (режим холостого хода) всплеск напряжения на обмотке трансформатора в момент закрывания транзистора может превысить максимально допустимое значение напряжения коллектор-эмиттер и вывести его из строя.

Недостаток простейшего преобразователя - зависимость тока коллектора  $I_{K \max}$ , а следовательно, и выходного напряжения от статического коэффициента передачи тока транзистора VT1. Поэтому параметры источника питания будут значительно отличаться при использовании различных экземпляров транзистора.

Более стабильными характеристиками обладает преобразователь,



Схема, представленная на рисунке 2.15, является вариантом схемы, представленной на рисунке 2.14, доработанной для питания светодиодного светильника.

В схеме, приведенной на рисунке 2.15 в качестве основного транзистора вместо биполярного используется полевой для увеличения рабочей частоты преобразователя. Для стабилизации тока через светодиод введена обратная связь по току. В качестве датчика тока служит шунтовой резистор R2, pnp-транзистор VT1 служит для усиления сигнала обратной связи.

#### **2.4. Сравнение с аналогами**

В процессе работы над макетами было проведено исследование некоторых доступных на рынке драйверов, среди которых можно отметить следующие:

##### **MeanWell LCP-20-350**

- Напряжение питания 100-240 В 50/60Гц;
- Потребляемая мощность 20Вт;
- Выходной ток 350мА;
- $U_{\text{вых}} - 24\text{В}$
- Коэффициент мощности: 0,92;
- КПД – 87%;
- Степень защиты IP67.

##### **RACD20-350 (фирма RECOM)**

- Напряжение питания 90-264 В, 47-63Гц;
- Потребляемая мощность 20Вт;
- Выходной ток 350мА;
- $U_{\text{вых}} - 6-56\text{В}$ ;
- Коэффициент мощности: 0,95;
- КПД – 85%;

- Степень защиты IP20.

### **RLDL-20**

- Входное напряжение: AC 175-250 В
- КПД: 86 %
- Коэффициент мощности: 0,85-0,95
- Выходное напряжение: 60 В
- Выходной ток: 320-370 мА
- Пиковый ток: 380 мА
- Рабочая температура: -40 +85 С

Здесь можно отметить, что все рассмотренные устройства имеют значение КПД менее 90%, что свидетельствует о проблеме создания драйвера, имеющего высокий коэффициент мощности и при этом имеющий высокий КПД. Из рассмотренных драйверов не было ни одного работающего в температурном диапазоне от -60 °С. Отличия в основном наблюдались в диапазоне выходных напряжений, что в свою очередь свидетельствовало о различных конфигурациях светодиодных линеек, к которым адаптирован каждый драйвер. Еще наблюдались незначительные отличия, например, в наличии функции диммирования.

## **2.5 Описание новых технических решений**

Помимо разработки активных источников питания велись работы по бездрайверному подключению светодиодных цепей.

Известен источник оптического излучения, питаемый от сети переменного напряжения, содержащий выпрямитель переменного напряжения, группу последовательно согласно соединенных светодиодов, подключенных к выходу выпрямителя напряжения через резистор, первый конденсатор, включенный параллельно группе последовательно соединенных диодов, второй конденсатор, включенный параллельно входу выпрямителя

напряжения, и две цепочки, включенные между входными клеммами устройства и входом выпрямителя, первая из которых состоит из первого резистора, а вторая – из параллельно соединенных второго резистора и третьего конденсатора [3].

Недостатком устройства является сложность электрической схемы (схема, в частности, содержит выпрямитель переменного напряжения) и невысокий коэффициент полезного действия из-за рассеивания значительной части мощности на выпрямителе.

В качестве устройства для стабилизации тока в полупроводниковых излучающих приборах широко используются полевые транзисторы, у которых затвор и исток соединены между собой [4].

Недостатком такого стабилизатора тока является невозможность использования его в источниках излучения, питаемых от переменного напряжения.

Наиболее близким к заявляемой полезной модели является трехзначный светодиодный светофор, содержащий светодиодную группу, состоящую из последовательно соединенных цепочек, каждая из которых состоит из двух встречно параллельно соединенных светодиодов, и стабилизирующий рабочий ток светодиодов резистор, подключенный последовательно к светодиодной группе [5]. Светофор питается от сети переменного напряжения. Недостатком устройства-прототипа является низкий уровень стабильности излучения и низкая надежность (обусловлена, в частности, низкой стабильностью рабочего тока).

Задача, на достижение которой направлено предлагаемое решение, – увеличение стабильности излучения и увеличение надежности работы источника оптического излучения.

Решение поставленной задачи достигается тем, что в источнике оптического излучения, содержащем группу, состоящую из последовательных цепочек, каждая из которых состоит из встречно параллельно соединенных оптических диодов, стабилизатор тока,

включенный последовательно с группой оптических диодов, и две входные клеммы питающего переменного напряжения, стабилизатор тока выполнен из двух частей, каждая из которых содержит полевой транзистор и защитный диод, анод которого соединен с истоком и затвором полевого транзистора, а катод со стоком полевого транзистора, при этом сток первого и сток второго полевых транзисторов соединены с началом и концом группы оптических диодов соответственно, а истоки первого и второго полевых транзисторов подсоединены к входным клеммам.

Схема предлагаемого источника оптического излучения приведена на рисунке 2.16. Она содержит оптические диоды  $D_1, D_2, \dots, D_N$ , и  $D_1', D_2', \dots, D_N'$ , два полевых транзистора  $VT_1$  и  $VT_2$  и два защитных диода  $D_{з1}$  и  $D_{з2}$ .

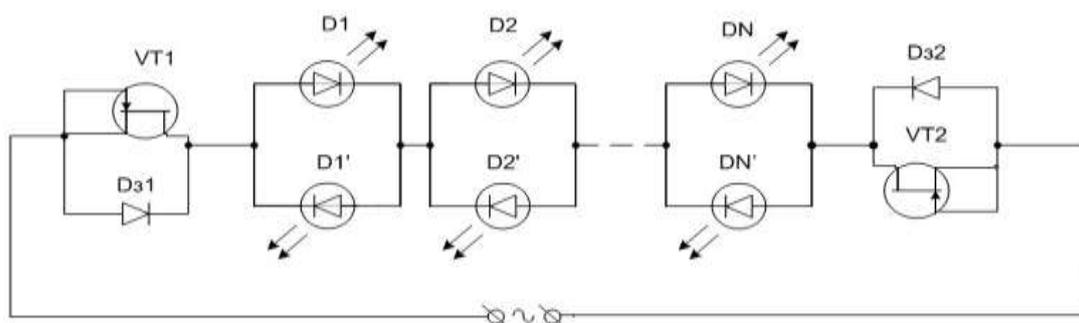


Рисунок 2.16

Стабилизирующее действие полевого транзистора иллюстрируется графиком, представленным на рисунке 2.17, на котором приведена его выходная вольт-амперная характеристика. При изменении напряжения на транзисторе  $VT_1$  или  $VT_2$  в пределах от  $U_{нас}$  до  $U_{пр}$ , где  $U_{нас}$  – напряжение насыщения,  $U_{пр}$  напряжение пробоя, ток через транзистор изменяется незначительно. Этот участок вольт-амперной характеристики и используется для стабилизации тока в оптических диодах  $D_1, D_2, \dots, D_N$ , и  $D_1', D_2', \dots, D_N'$ .

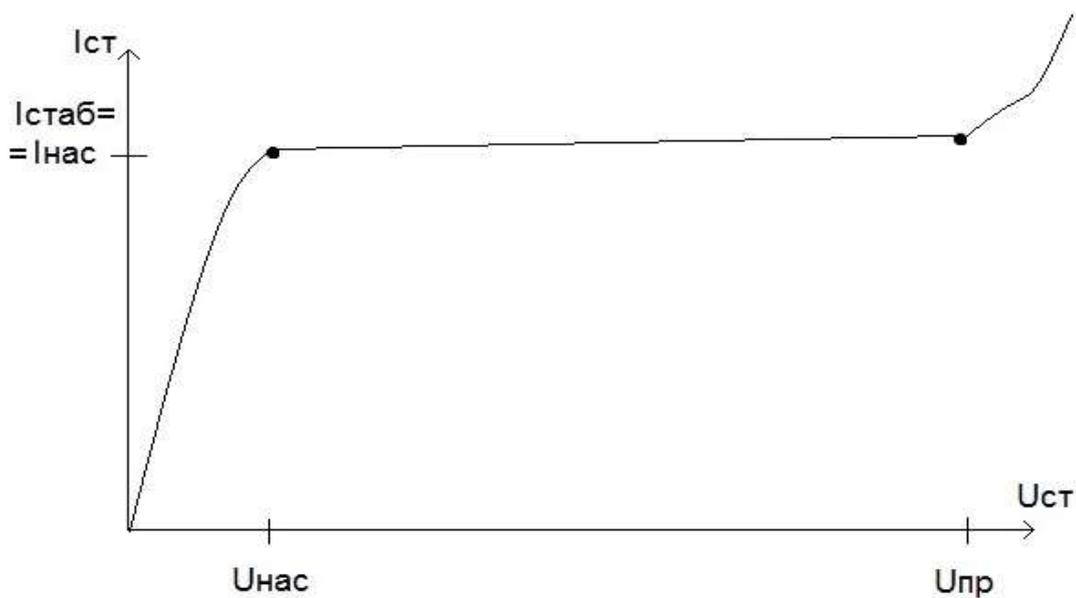


Рисунок 2.17

Источник оптического излучения работает следующим образом, при положительной полуволне питающего напряжения, поданной на входную клемму, которая соединена с истоком и затвором полевого транзистора VT1 и анодом защитного диода Dз1, относительно другой клеммы, которая, в свою очередь, соединена с истоком и затвором полевого транзистора VT2 и анодом защитного диода Dз2, ток протекает через защитный диод Dз1, оптические диоды D1, D2, ..., DN и транзистор VT2.

При отрицательной полуволне питающего напряжения, поданной на входную клемму, которая соединена с истоком, затвором полевого транзистора VT1 и анодом защитного диода Dз1, относительно другой клеммы, которая, в свою очередь, соединена с истоком, затвором полевого транзистора VT2 и анодом защитного диода Dз2, ток протекает через защитный диод Dз2, оптические диоды D1', D2', ..., DN' и транзистор VT1.

При повышении входного напряжения ток в группе оптических диодов практически не возрастает, так как транзисторы работают в режиме насыщения.

Защитные диоды Dз1 и Dз2 предназначены для увеличения коэффициента полезного действия источника оптического излучения, так как

обратное сопротивление полевого транзистора больше, чем сопротивление защитного диода, смещенного в прямом направлении, а также для увеличения надежности устройства.

Число оптических диодов в группе зависит от напряжения питания.

Экспериментальные исследования устройства, выполненного по схеме, представленной на рисунке 2.16 с использованием полевых транзисторов типа КП303Е и одной ячейки, содержащей два встречно параллельно соединенных светодиода типа АЛ307, показали, что при изменении переменного напряжения источника питания в интервале от 5 В до 15 В амплитудное значение пульсирующего тока в цепи диодов изменялось от 12 мА до 16 мА.

Дополнительно проводилась работа по созданию управляемого источника питания для светодиодных светильников. Специфика данной работы подразумевает индивидуальное изменение яркости и цветовых оттенков свечения [6]. Эта отличительная особенность позволяет производить индивидуальную настройку рабочих мест или их групп в производственных помещениях, настраивать подсветку в выставочных залах и т. п.

На рисунке 2.18 изображена структурная схема данного источника питания.

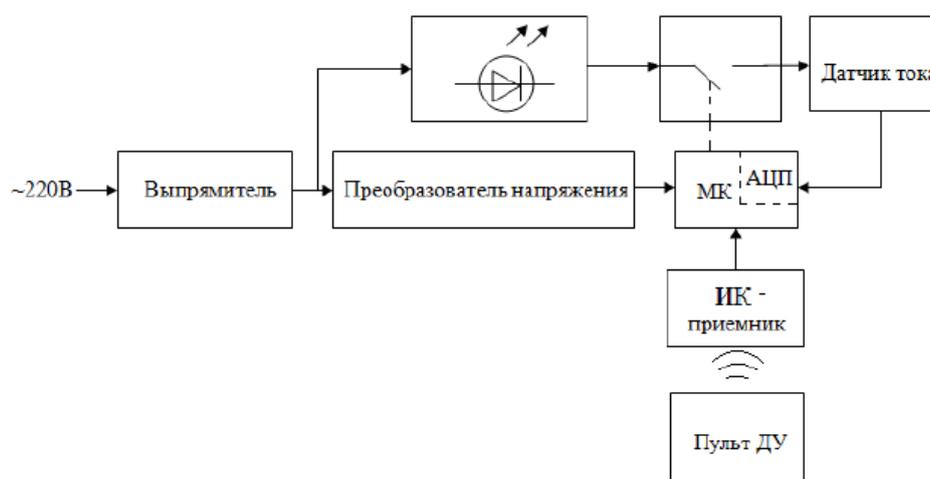


Рисунок 2.18 – Структурная схема управляемого дистанционно источника питания для светодиодных светильников

Управление производится при помощи инфракрасного приёмника (ИК) и пульта дистанционного управления (ПДУ), подобного телевизионному. В разрабатываемом устройстве применен широко распространенный импульсный подход стабилизации тока. Для каждой цветовой составляющей светодиодной линейки использована своя стабилизация, выполненная в виде отдельного канала. Но в связи с внедрением беспроводного управления типовой контроллер тока (например, HV9961, TPS92210) заменен на микроконтроллер (МК) со встроенным аналого-цифровым преобразователем, в котором реализованы те же функции при помощи реализации соответствующего программного обеспечения и дополнены специальными расширениями, позволяющими работать с ИК-приёмником. С помощью ПДУ можно будет изменять цвет и яркость светильника, а так же включать/выключать.

## **2.6 Расчёты, подтверждающие работоспособность и надежность конструкции**

Таблица 1 – Данные необходимые для расчёта надёжности

№	Драйвер 20Вт	$n_i$	Интенсивность отказов (ИО) 1/час	Поправочный коэффициент $a_i$ при наилучшем $K_n$	$K_n$
1	Варистор	1	2,00E-07	При T=28C a=0,92	0,7
2	Конденсатор	2	1,35E-07	При T=27C a=0,27	0,7
3	Трансформатор	1	1,09E-06	При T=28C a=1,4	0,9
4	Диодный мост	1	2,00E-08	При T=28C a=0,95	0,8
5	Катушка индуктивности	2	1,75E-07	При T=30C a=1,4	0,9
6	Резистор	2	4,00E-08	При T=31C a=0,99	0,8
7	Термистор	1	2,00E-07	При T=35C a=0,97	0,7
8	Конденсатор электролит.	2	3,50E-08	При T=35 a=1	0,7
9	Конденсатор	2	1,35E-07	При T=29C a=0,27	0,7
10	Индуктивность намоточная	1	2,00E-08	При T=35C a=1,9	0,9

11	Транзистор	1	4,00E-07	При T=45C a=0,75	0,8
12	Диод	1	2,00E-07	При T=40C a=1,04	0,7
13	Резистор	1	3,00E-08	При T=31C a=0,88	0,8
14	Резистор	3	3,00E-08	При T=30C a=0,88	0,8
15	Конденсатор	1	1,00E-07	При T=30C a=0,27	0,7
16	Конденсатор	1	1,00E-07	При T=30C a=0,27	0,7
17	Микросхема	1	2,00E-08	При T=51C a=1,5	0,8
18	Резистор	1	3,00E-08	При T=30C a=0,88	0,8

Поправочный коэффициент  $a_i$  зависит от температуры элемента и коэффициента нагрузки  $K_n$ .

Коэффициент нагрузки выбран из таблицы оптимальных коэффициентов для различных компонентов.

Общая интенсивность отказов изделия (ОИО)

$$ОИО = \sum_{i=1}^{18} (ИО_i n_i a_i) = 3,47 \times 10^{-6} \cdot \text{час}^{-1}$$

Наработка на отказ (Т) = (ОИО)<sup>-1</sup> = 2.882 × 10<sup>5</sup> = 288200 час. Базовая наработка на отказ t = 50000 час.

Вероятность безотказной работы (P0 (в течение базовой наработки на отказ t)) =  $e^{(-ОИО \times t)} = 0,841$ , т.е. 84,1% [7, 8].

**Вывод: НАРАБОТКА НА ОТКАЗ – 288200 ЧАСОВ; ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ В ТЕЧЕНИЕ 50000 ЧАСОВ – 84,1%**

### **Список литературы к разделу 2**

1. Бас А. А., Миловзоров В. П., Мусолин А. К. Источники вторичного электропитания с бестрансформаторным входом. - М.: Радио и связь, 1987.
2. Власов Ю. Стабилизированный однотактный преобразователь напряжения // Радио. – 1999. – № 3. – С. 37.
3. Пат. РФ № 95214, МПК: H05B 37/00. Схема подключения светодиодного светового прибора в сеть переменного тока // Кумин А.М. (RU) - Заявл. 17.12.2009, опубл. 10.06.2010.
4. Электронные предохранители и ограничители постоянного и

переменного тока. URL: <http://lib.qrz.ru/node/9731>.

5. Пат. РФ № 2239575, МПК: В61L 5/18, G08G 1/095, H05B 37/00. Трехзначный светодиодный светофор // Сергеев Б.С. (RU), Савельев Е.О. (RU) - заявл. 09.10.2002, опубл. 10.11.2004. – прототип.

6. Бомбизов П.В. Управляемый источник питания для светодиодных светильников // Научная сессия ТУСУР–2011: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 4–6 мая 2011 г. – Томск: В-Спектр, 2011: В 6 частях. – Ч. 1. – 344 с.

7. Половко А.М., Маликов И.М. Сборник задач по теории надежности. – М.: "Советское радио", 1972. – 408 с.

8. Козлов В.Г. Теория надёжности: Учеб пособие – Томск: ТУСУР, 2004.

9. Туев В.И. Учет насыщения дрейфовой скорости носителей при аппроксимации вольт-амперных характеристик полевых транзисторов // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники №1 (15). – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. – С. 51-56.

10. Жаркой А.Г., Туев В.И. Аппроксимация вольт-амперных характеристик МДП-полевых транзисторов // Изв. высш. учебн. зав. Сер. Радиоэлектроника. – 1988. – №5. – С. 69-70.

11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Гос. издательство физ.-мат. литературы, 1962. – 609 с.

### 3 Технология плоттерной печати

Исследования плоттерной печати отражены в работах [13-16, 20, 21, 28-31]. Принцип работы оборудования плоттерной печати наглядно показан на рис. 3.1, на котором иллюстрируется нанесение линий капиллярным дозатором чернил на поверхность подложки. Особенность плоттерной печати заключается в том, что дозатор наносит жидкость при непосредственном контакте капли с поверхностью подложки.

Для оценки технических характеристик метода плоттерной печати использовалось оборудование фирмы Sonoplot – GIX Microplotter II. [28, 29]. Исследовалась зависимость параметров пленки от скорости перемещения печатающей головки [28-31]. В векторном редакторе SonoDraw, ориентированном на работу с GIX Microplotter II, была подготовлена топология: одиночные линии (длиной 3 мм); полигоны (прямоугольники длиной 3 мм и шириной 0,5 мм, выполненные путем печати перекрывающихся линий с шагом 20 мкм); субпиксели (отрезки линий длиной 0,2 мм).

Большое значение для реализации печати имеют свойства растворов материалов, которые часто называют чернилами по аналогии с хорошо освоенными методами струйной печати текстов и изображений.

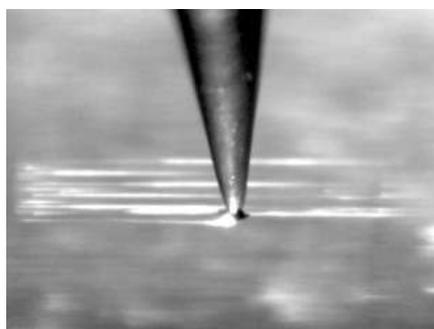


Рис. 3.1. Нанесение чернил в виде линий на поверхность подложки капиллярным дозатором

Следующий подраздел посвящен решению задач получения растворов для изготовления органических светодиодов (ОСИД). Задача приготовления и исследования свойств растворов решается с применением хорошо отработанной технологии изготовления органических светодиодов методом центрифугирования. Это позволяет определить основные параметры растворов и ОСИД. Экспериментальные результаты, полученные таким образом, позволили в дальнейшем перейти к применению растворов при обработке технологии печати с помощью плоттеров.

### ***3.1 Растворы на основе сополифлуоренов для плоттерной печати матриц органических светодиодов (ОСИД)***

Проблема принтерной печати устройств органической электроники стоит очень остро во всем мире, о чем свидетельствуют многочисленные исследования в этом направлении [32 – 36]. В настоящее время исследования направлены на поиск новых материалов, способах растворения и приготовления композиций чернил, отработки режимов нанесения органических слоев методом принтерной печати с целью уменьшения шероховатости поверхности, равномерности нанесения, снижения краевых эффектов. Если в ранних работах[37] сообщалось, что эффективность ОСИД, изготовленных методами струйной печати существенно ниже, чем эффективность ОСИД, изготовленных центрифугированием, то в последних работах характеристики уже сравнимы. По-прежнему, рекордные характеристики эффективности получаются при изготовлении ОСИД методами термовакuumного напыления, однако, этот метод имеет ряд существенных недостатков. В частности, методом термовакuumного напыления невозможно наносить полимерные функциональные материалы. В таблице 4 **Ошибка! Источник ссылки не найден.** приведены сравнительные характеристики различных методов изготовления ОСИД. Видно, что различные методы имеют свои достоинства и недостатки.

Одной из основных проблем принтерной печати является подбор

параметров растворителей для приготовления чернил и выбора режима печати. В работе голландских исследователей [38] изучена прецизионная принтерная печать полимерными чернилами. Печать выполнялась с помощью печатающих головок DIMATIX (объем капли 15 пл, 128 сопел, расстояние между соплами 508 мкм). По результатам исследования была построена математическая модель, описывающая процесс печати. На основании модели проведено моделирование различных режимов печати. Показано, что: для точного дозирования малых объемов необходимо учитывать всю последовательность капель; для характеристики капель лучше использовать системы со съемкой одиночных капель, нежели системы со стробированием и усреднением по множеству изображений; даже печать на больших частотах не может быть описана как стационарный процесс. Первая капля может быть описана, как одиночная капля на низкой частоте печати. Последующие капли сильно зависят от капель, нанесенных ранее. Впрыск капель даже при разрыве быстро стабилизируется. В большинстве случаев первая капля сильно отличается по размерам и скорости, следующие капли почти равны по размеру и скорости. При высоких частотах заполнение сопел чернилами становится существенным за счет избыточного давления Бернулли, которое вызывает уменьшение обратного втягивания мениска и, тем самым, понижает затягивание воздуха в сопла.

Таблица 3.1. Сравнение различных методов создания ОСИД

Сравниваемый параметр	Термовакuumное напыление	Центрифугирование	Трафаретная печать	Струйная печать
Яркость изготавливаемых ОСИД	очень высокая	высокая	высокая	высокая
разрешение, мкм	4	низкое	30	10
размеры печатаемых устройств, м <sup>2</sup>	0,9	0,01	очень большие	4
скорость создания, м <sup>2</sup> /с	0,01	низкая	50	0,005
возможность варьирования наносимого	низкая	низкая	низкая	высокая

рисунка				
наличие растворителя	нет	есть	есть	есть
цена устройства на выходе	средняя	высокая	низкая	низкая
возможность многослойного нанесения	большая	средняя	малая	малая

Больших успехов в области создания чернил для органической электроники достигла группа Шуберта [**Ошибка! Закладка не определена.**, **Ошибка! Закладка не определена.**, 39, 40]. В работах авторы используют микроплоттер microdrop Technologies (Norderstedt, Germany) с диспенсерной (дозаторной) системой, имеющей внутренний диаметр 70 мкм. Было показано, что для печати полимерных пленок такие параметры, как поверхностное натяжение и вязкость, не играют решающей роли, т.к. в большинстве случаев можно подобрать оптимальный режим печати для чернил любой вязкости, однако большое значение играет разница температур кипения основного и вспомогательного растворителей и должна составлять 90-100 °С. В работе [39] в качестве основных растворителей были выбраны толуол ( $T_{\text{кип}} 110\text{ °C}$ ), п-ксилол ( $T_{\text{кип}} 138\text{ °C}$ ), и мезитилен ( $T_{\text{кип}} 165\text{ °C}$ ). В качестве соразтворителей были выбраны нехлорированные ароматические растворители с температурами кипения от 136 до 293 °С с шагом по температуре около 18 °К. В сумме было проверено 42 различных системы: 20, 15 и 7 комбинаций соответственно для толуола, п-ксилола и мезитилена. Показано, что, в конечном итоге, качество пленки зависит не только от поведения высыхания растворителей, но также от стабильности и воспроизводимости капель в процессе печати. Характеристики жидкости также очень важны. Наилучшие характеристики, такие как приемлемые частотные режимы печати и наименьшую шероховатость пленки (6-8 нм), показала система мезитилена в смеси с октилбензолом. Эта система оказалась лучше широко используемой смеси толуол/о-дихлорбензол [40], к тому же и менее токсичной.

В работе [41] также предлагается композиция, пригодная для изготовления электронных устройств, таких как ОСИД, с использованием технологии струйной принтерной печати. В состав чернил входит растворитель, имеющий температуру кипения более 250 °С и вязкость менее 5сПс. Композиция имеет вязкость в диапазоне от 0,1 до 20 сПс и растворитель относится к алкилзамещенному бензолу (от гексилбензола до додецилбензола). При этом вязкость контролируется количеством растворенного полимера. Высокая температура кипения растворителя позволяет чернилам оставаться «мокрыми» после печати. Это обеспечивает лучший контроль в процессе сушки, что, в конечном итоге положительно сказывается на параметрах напечатанной пленки. Низкая вязкость растворителя обеспечивает работу с такими чернилами на высоких частотах.

В работе [42] авторам удалось создать полноцветный AMPLD дисплей с разрешением 200 ppi методом струйной принтерной печати. В качестве подложки использовалась кремниевая матрица Continuous Grain Silicon с размером пиксела 42 мкм. На этой структуре с нанесенным ИТО, методом принтерной печати было нанесено два функциональных слоя: PEDOT:PSS и излучающий полимерный слой (LEP). В случае синего пиксела между PEDOT:PSS и LEP дополнительно принтерной печатью наносился промежуточный слой (IL). Как IL, так и LEP были созданы на основе полифлуорена. Катод был нанесен методом термовакуумного напыления и состоял из бария и алюминия.

В процессе принтерной печати размер капель составлял 23,7 мкм, что составляло объем 7 пл. Первый напечатанный дисплей имел артефакты при отображении, однако, после оптимизации процесса печати дисплей отвечал очень высоким характеристикам, как по разрешению, так и по цветопередаче.

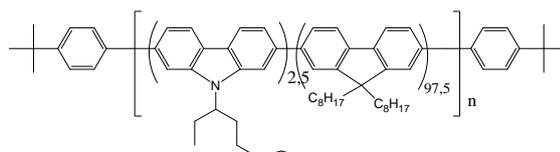
Отдельной мировой проблемой является принтерная печать материалов катода [43]. Использование существующих в настоящее время токопроводящих чернил на основе серебра приводит к плохим характеристикам ОСИД устройств, т.к. серебро обладает относительно

высокой работой выхода и требует нанесения дополнительных слоев [46]. Для этих целей более предпочтительны металлы с низкой работой выхода, как, например, кальций, барий, магний, алюминий и т.п. К сожалению, эти металлы очень активны и окисляются не только кислородом воздуха, но и азотом, особенно в мелкодисперсном виде с образованием непроводящего оксида или нитрида [44]. В работе [45] авторы делали чернила для печати катода на основе мелкодисперсного алюминия. Для предотвращения окисления металла (время окисления на воздухе около 100 пс) измельчение проводилось в шаровой мельнице в среде гексана. Окисление наночастиц меди происходит медленнее, особенно в присутствии восстанавливающего агента [47]. Поэтому часто используют не сами металлы, а их соли или металлоорганические комплексы. Дополнительно, необходима стабилизация коллоидной системы для того, чтобы частицы металла существовали в виде коллоидной системы и не выпадали в осадок, а напечатанный токопроводящий слой имел хорошую адгезию к поверхности [47]. Такую стабилизацию выполняют при помощи различных органических комплексных добавок. Однако такие добавки после печати создают между частицами металла изолирующие прослойки, что снижает проводимость. Поэтому, зачастую, требуется дальнейшая термическая или химическая обработка [48]. Тем не менее, катодные чернила на наночастицах металлов и металлоорганические декомпозиционные чернила рассматриваются, как наиболее перспективные для применения в струйной принтерной технологии создания устройств органической электроники.

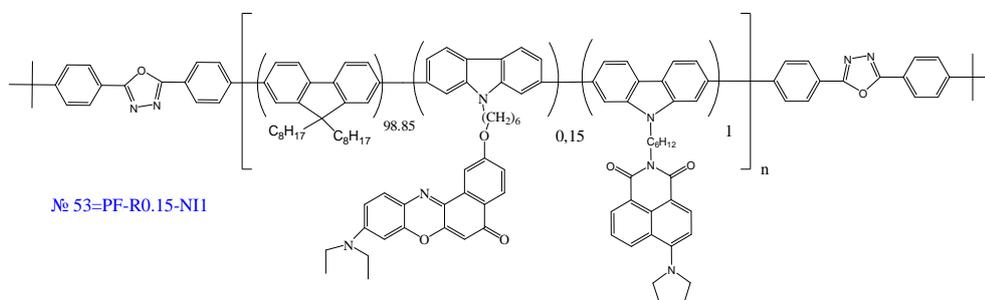
В сборнике [49] показана перспективность использования материалов на основе сополифлуоренов для создания ОСИД, поскольку эти полимеры обладают высокой дырочной проводимостью (до  $10^{-3} \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ), широкими возможностями варьирования спектра излучения, большим временем работы устройств. Ни один класс соединений не дает такого большого разнообразия материалов, обладающих высокими электролюминесцентными характеристиками, как у полифлуорена.

В настоящей главе приведены исследования вольт-амперных, вольт-яркостных, спектральных и цветовых характеристик ОСИД, созданных на основе сополифлуоренов, синтезированных в Институте Высокомолекулярных Соединений РАН (Санкт-Петербург) [50].

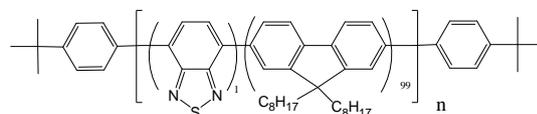
Структурные формулы исследованных сополифлуоренов приведены ниже.



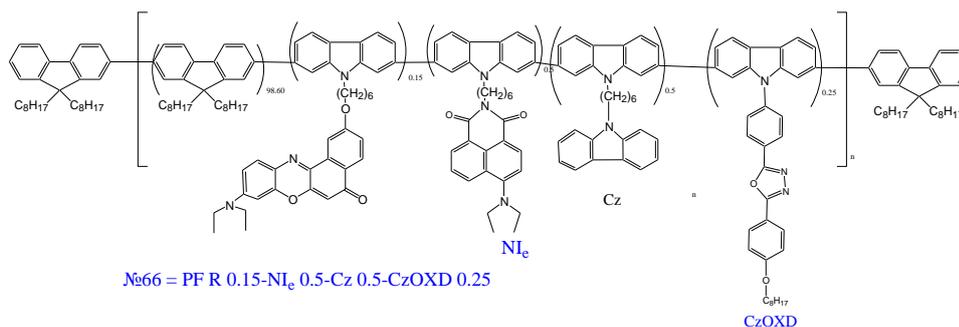
№50 PF-Cz2.5



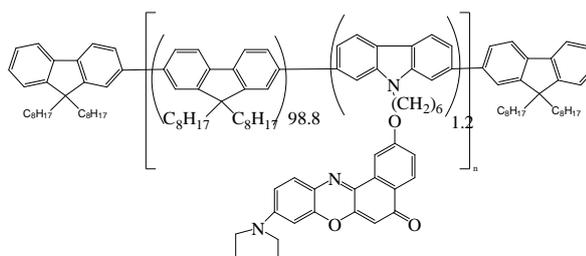
№53=PF-R0.15-NI1



№64 PF-BT-1



№66 = PF R 0.15-NIe 0.5-Cz 0.5-CzOXD 0.25



№81 PF-R1.2

В качестве растворителя использовался толуол (Aldrich) высокой

степени чистоты (для ВЖХ). Навески образцов растворялись в толуоле в течение 2 суток при постоянном перемешивании на химическом шейкере. Пленки готовились из полученных растворов методом центрифугирования на центрифуге KW-4A при скорости вращения 2000 об/мин (30 сек). Для измерения спектров поглощения и флуоресценции растворы дополнительно разбавлялись таким образом, чтобы оптическая плотность не превышала 1. Спектры поглощения растворов и пленок измерялись на спектрофотометре-спектрофлуориметре Solar CM2203, спектры флуоресценции – на спектрофлуориметре Cary Eclipse. ОСИД готовились по следующей методике: подложки с напыленным ITO ( $\Omega=100 \text{ Ом}/\square$ ) и профилированным анодом (лазерная гравировка) отмывались в перекисно-аммиачном растворе в течение 30 минут, затем дважды в бидистиллированной воде, после чего сушились в вакуумном шкафу при температуре 110 °С. Далее подложки обрабатывались кислородной плазмой. Дальнейшие операции по изготовлению образцов ОСИД проводились в перчаточном боксе в атмосфере сухого азота с содержанием паров воды и кислорода не более 10 ppm (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Технологическая линия для создания ОСИД в атмосфере сухого азота

На очищенную подложку методом центрифугирования наносился предварительно профильтрованный через 0,45 мкм PTFE-фильтр водный раствор PEDOT:PSS при скорости вращения 3000 об/мин (1 мин). После нанесения PEDOT:PSS подложка сушилась на нагревательном столике в течение 1 часа при температуре 120 °С. Толуольные растворы сополифлуоренов предварительно фильтровались через 0,45 мкм PTFE-фильтр. Пленка сополифлуорена наносилась также методом центрифугирования при скорости вращения 2000 об./мин. в течение 1 мин. После нанесения органического люминофора производился отжиг в течение 2 часов при температуре 120 °С. Контрольные измерения толщины пленок выполнялись на профилометре KLA-Tencor MicroXAM 100 (рис. 3.3).



Рис.3.3. Профилометр KLA-Tencor MicroXAM 100

После нанесения слоя сополимера подложка с полимером помещалась в держатель с теневой маской и переносилась в напылительную камеру установки термовакuumного напыления Auto-306, встроенную в перчаточный бокс с вакуумом не хуже  $5 \times 10^{-6}$  бар. Использовалась композиция катода Ca/Al. Сначала напылялся слой кальция толщиной 10 нм, затем алюминий толщиной 20 нм. Скорость напыления 2 нм/с. После нанесения всех слоев, ОСИД капсулировался для предотвращения воздействия атмосферной влаги и кислорода. Для этого на поверхность катода наносился фотоотверждаемый эпоксидный компаунд (OSSILA) не реагирующий с органическими слоями. Активная зона ячейки закрывалась покровным стеклом. Отверждение

эпоксидного компаунда производилось УФ лампой в течение 10 минут. Далее ОСИД извлекался из перчаточного бокса. Все измерения характеристик ОСИД выполнялись при обычных условиях. Вольт-амперные, вольт-яркостные, спектральные и цветовые характеристики измерялись на разработанном автоматизированном комплексе на основе источника-анализатора Keithley и оптоволоконного CCD-спектрометра AvaSpec—2048x64. Программное обеспечение разработано в СФТИ ТГУ (рис.3.4).

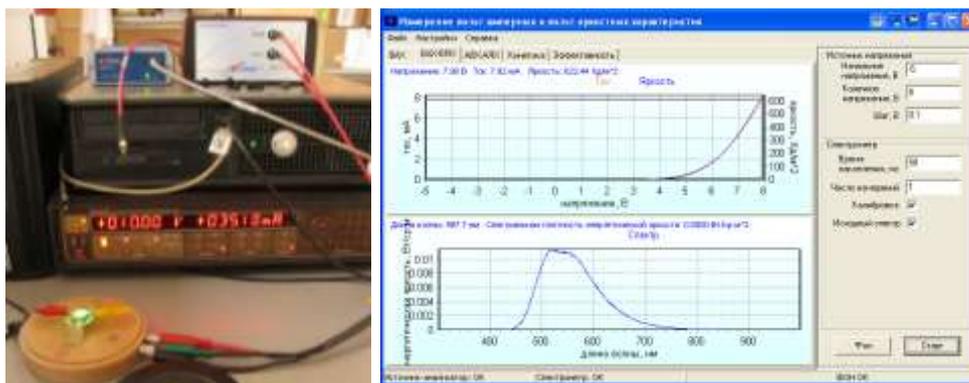
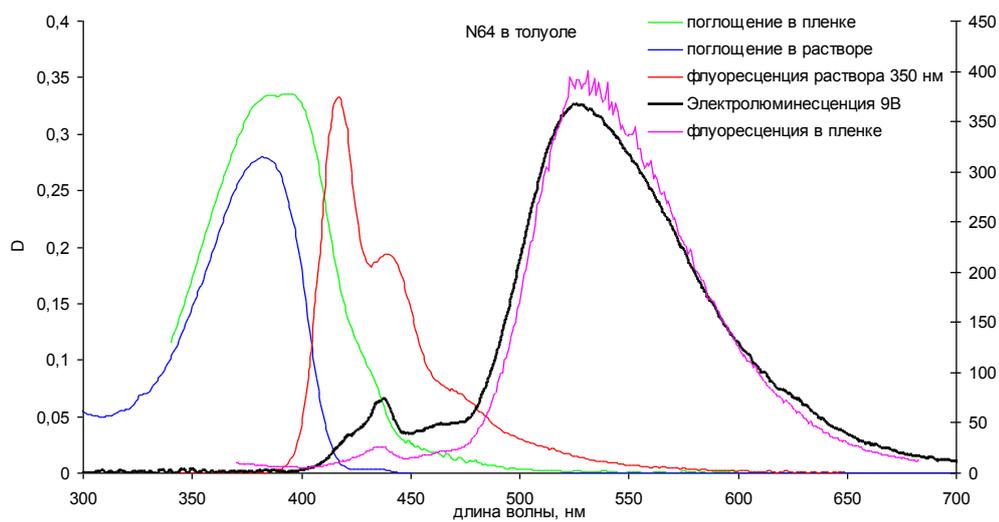
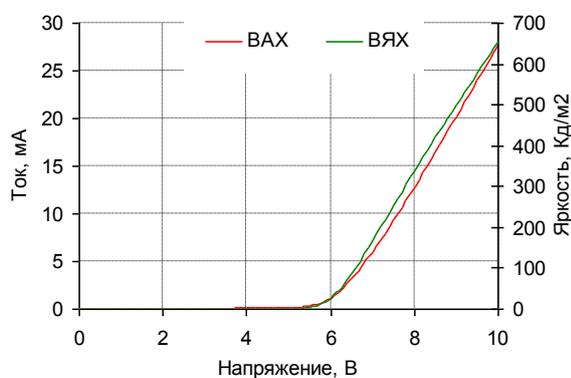


Рис. 3.4. Разработанный автоматизированный комплекс для измерения вольт-амперные, вольт-яркостные, спектральные и цветовые характеристики

Ниже приведены типичные спектры поглощения и флуоресценции растворов и пленок полифлуоренов и типичные ВАХ, ВЯХ и цветовые характеристики ОСИД (рис. 17, табл. 5), имеющие следующую структуру: ITO/PEDOT:PSS/СП/Ca/Al, где СП – это исследуемый сополифлуорен. Излучающая площадь ОСИД 1 см<sup>2</sup>.



а)



б)

Рис. 3.5. Типичные спектры поглощения, флуоресценции исследованных растворов и пленок сополифлуоренов (а) и электролюминесценции ОСИД на их основе. ВАХ и ВЯХ сополифлуорена №64 (б)

Таблица 3.2. Спектрально-люминесцентные и электролюминесцентные характеристики толуольных растворов, пленок сополифлуоренов и структур ОСИД на их основе

В-во	раствор		пленки		EL	Яркость, Кд/м <sup>2</sup> при 10 В	U <sub>п</sub> , В	CIE 1931
	$\lambda_{\text{погл}}$ , нм	$\lambda_{\text{фл}}$ , нм	$\lambda_{\text{погл}}$ , нм	$\lambda_{\text{фл}}$ , нм	$\lambda_{\text{эл}}$ , нм			
N50	387	417 440 470	397 425	435 462 492	435 460 490	166	3,7	x=0,15 y=0,08

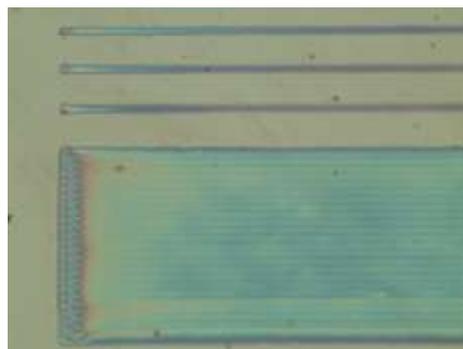
N53	387	417 442 470	405	437 498 558	440 460 560	643	5,4	x=0,399 y=0,447
N64	383	417 440 470	395	531	440 530	657	6,0	x=0,33 y=0,54
N66	386	417 440 470	395	436 463 560	425 460 480	480	4,4	x=0,20 y=0,22
N81	383	416 440 470 566	383 430	436 462 494 570	440 460 500 560	200	8,4	x=0,40 y=0,41

Как видно из приведенных данных, положение полос, как поглощения, так и флуоресценции растворов одинаково для всех соединений, принадлежит флуореновым звеньям. При переходе от раствора к пленке происходит уширение полос поглощения и изменение полосы флуоресценции, что говорит о конформационных изменениях, приводящих к усилению переноса энергии с флуореновых звеньев на другие фрагменты молекулы. Полоса электролюминесценции близка по форме к полосе флуоресценции пленки. Пороговые уровни напряжения низкие (3,7÷8 В), яркость некоторых образцов ОСИД достигает 657 Кд/м<sup>2</sup> при напряжении 10 В в неоптимизированных ячейках, что говорит о перспективности этих соединений для дальнейших применений в принтерной печати.

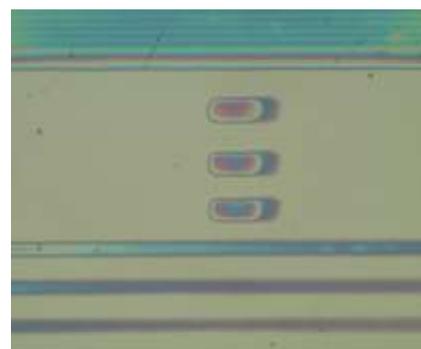
### **3.2. Печать транспортного (дырочного) слоя**

В качестве чернил использовался PEDOT:PSS марки M121 (Ossila), подложка – кварцевое стекло марки S113 50×50×1,0 мм<sup>3</sup> со слоем ITO 100 нм (Ossila). После нанесения слоя чернил подложка подвергалась отжигу в инфракрасной конвекционной печи «Аверон Тропик» при температуре 150°C в течении пяти минут. На рис. 18 представлены микрофотографии полученных пленок и профилограмма. На микрофотографии видно, что пленка непрерывна, обеспечивает заданную топологию, но недостаточно однородна и значительно по данному параметру уступает пленкам, получаемых методом напыления. На профилограмме наблюдается

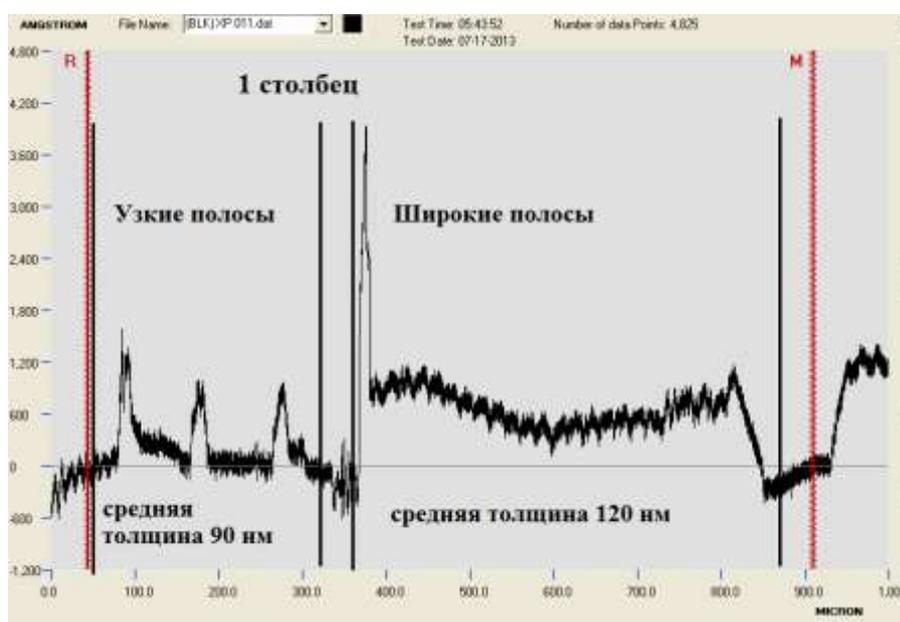
неравномерность.



а)



б)



в)

Рис. 3.6. Микрофотография напечатанного слоя: а) линии и полигоны; б) полигоны, субпиксели, линии; в) профилограмма пленки линий и полигонов

Как видно из рис. 3.6, плоттер обеспечивает достаточную для практических целей повторяемость печати. Толщина пленки для одиночных линий и субпикселей находится на уровне 80 - 90 нм, средняя толщина пленки полигона – на уровне 120 нм.

На рис. 3.7 приведена типичная профилограмма пленки PEDOT:PSS (снятая на профилометре KLA-Tencor MicroXAM 100), полученная при скорости перемещения дозатора 100 мм/с и значении действующего

напряжения на пьезоэлементе, равном 1 В.

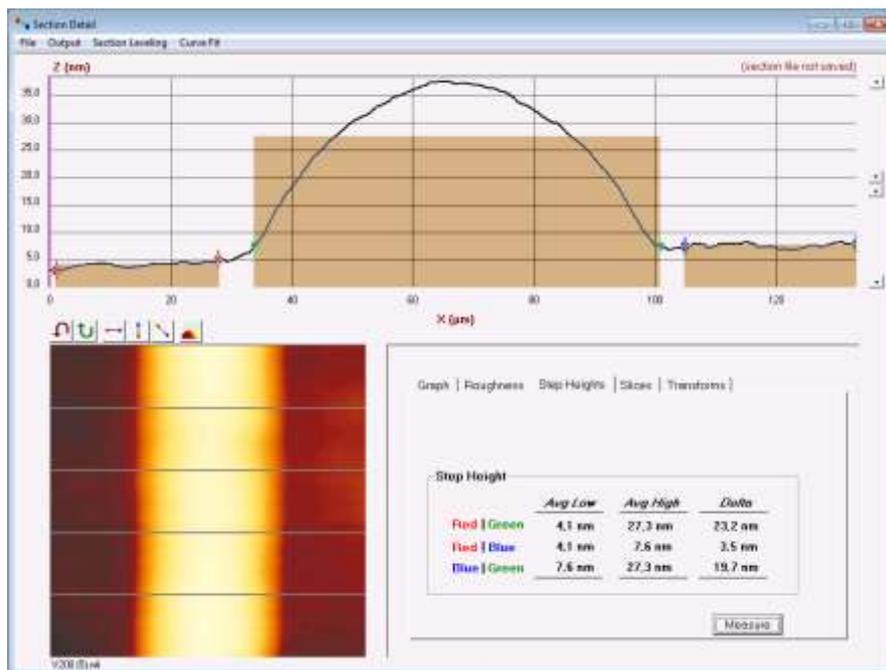


Рис. 3.7. Профилограмма пленки PEDOT:PSS (линия)

На рис. 20 приведена профилограмма пленки для полигона, выполненного путем печати перекрывающихся линий с шагом 20 мкм на скорости 100 мм/с.

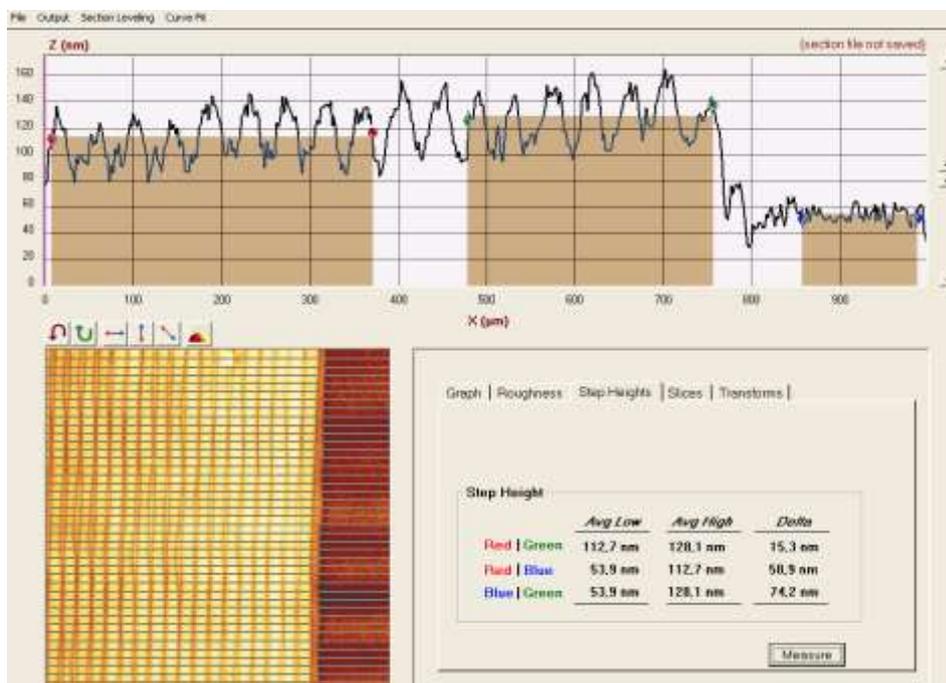


Рис. 3.8. Профилограмма пленки PEDOT:PSS (полигон)

Средняя толщина пленки PEDOT:PSS составила около 60 нм, полученные результаты говорят о хорошем приближении к требованиям по

толщине транспортного слоя, предъявляемым при изготовлении органических светодиодов.

### 3.3. Печать активных (светоизлучающих) слоев

Аналогично описанной технологии нанесения транспортного слоя были проведены экспериментальные исследования печати активных слоев. Печать выполнялась на поверхность подложки из кварцевого стекла, с предварительно нанесенными слоями ITO и PEDOT:PSS.

На рис. 3.9 приведена измеренная типичная профилограмма пленки, полученная печатью раствором PF64 на скорости 300 мм/с при напряжении 1 В.

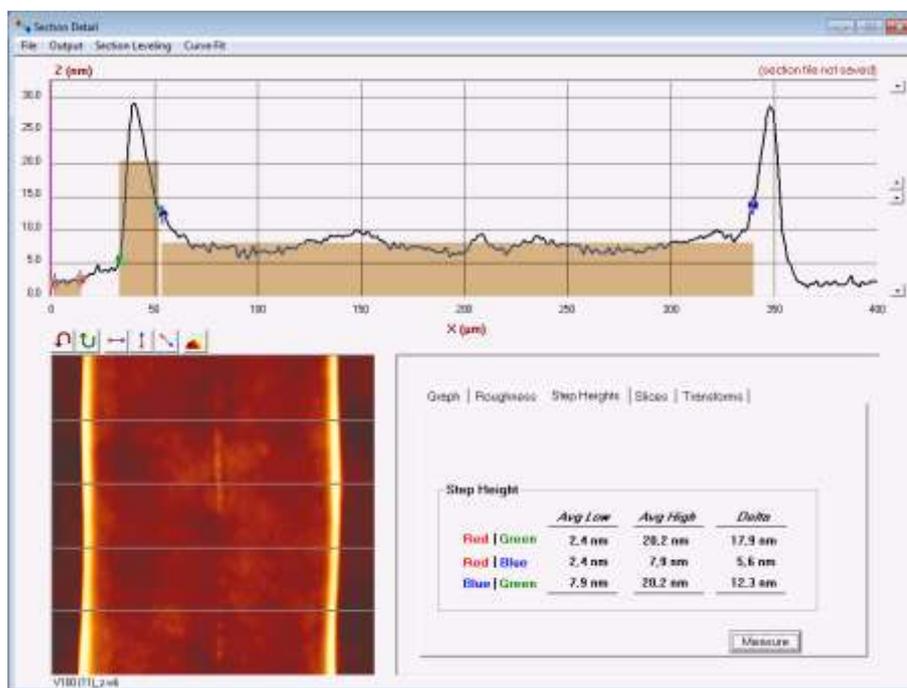


Рис. 3.9. Профилограмма пленки PF64

Установлено, что ширина пленок во всем диапазоне напряжений и скоростей движения дозатора составляла  $320 \pm 20$  мкм при диаметре капилляра дозатора равном 60 мкм. Это, как утверждается в работах [28, 29], – следствие высокой смачиваемости пленки PEDOT:PSS чернилами PF64.

Очевидным путем уменьшения ширины пленок является оптимизация реологических и физико-химических свойств растворов чернил активных

слоев. В первую очередь оптимизации должны подвергаться такие параметры чернил, как вязкость, поперстное натяжение и интенсивность испарения.

На рис. 3.10 приведены профилограммы пленок, полученных с использованием модифицированного раствора активного слоя: PF8 в смеси толуола и линейного алкилбензола в соотношении 1:3. При концентрации PF8 10 мг/мл вязкость при температуре 20°C составила 2,455сП. Плотность раствора около 0,9 г/мл.



Рис. 3.10. Профилограмма пленок одиночных линий PF8 (модифицированный раствор)

Из рис. 3.10 видно, что модификация растворителя позволила уменьшить относительную величину выбросов на краях пленки. При этом толщина пленки, измеренная вдоль продольной оси линии, увеличилась с 5–8 до 25 нм.

### **3.4. Печать изолирующего слоя (диэлектрика)**

Одним из ключевых вопросов в технологии производства светодиодных матриц и других устройств является обеспечение электрической изоляции:

между соседними пикселями, между анодными и катодными электродами, а также между соседними электродами одного потенциала. Получение изолирующих слоев может решаться традиционно, т.е. путем напыления тонких пленок диэлектриков на различных стадиях. Перспективным представляется технологический процесс печати органических диэлектриков, тем более что он полностью совместим с остальными процессами печати органических слоев матриц. Для этих целей была проведена серия экспериментов по печати изолирующих слоев на базе полиметилметакрилата [28, 29] растворами:

Раствор 1 (PMMA) – Poly(methylmethacrylate) в концентрации 7 мг/мл;

Раствор 2 (PMMA w 15% POSS) – Poly[(propylmethacryl-heptaisobutyl-PSS)-co-(t-butyl methacrylate)] 15% wt POSS в концентрации 7 мг/мл.

На рис. 3.11 и рис. 3.12 приведены профилограммы, измеренные для пленок одиночных линий, нанесенных с использованием растворов 1 и 2.



Рис. 3.11. Профилограмма пленок (линии), полученных печатью раствором PMMA

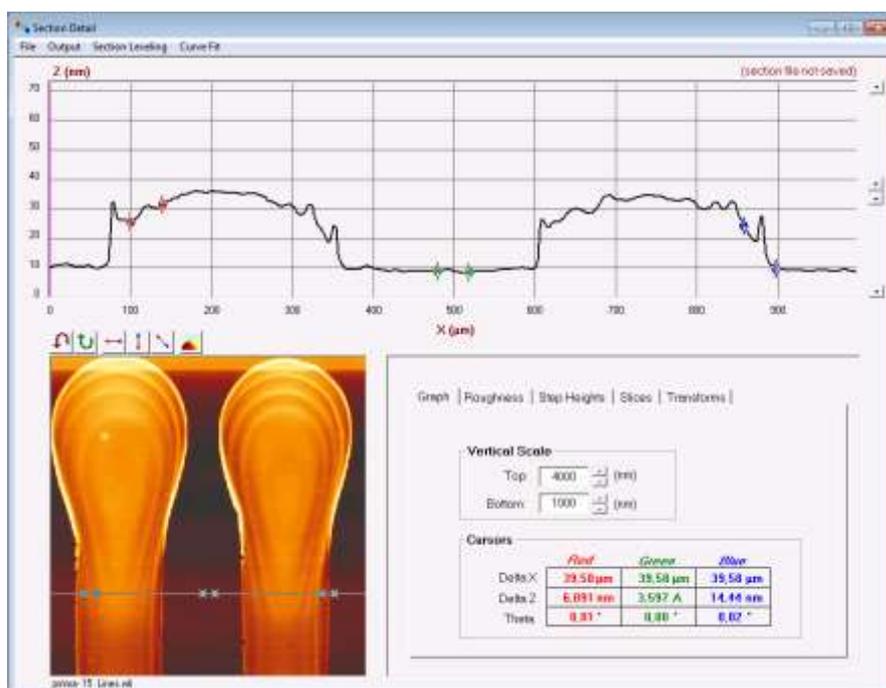


Рис. 3.12. Профилограмма пленок (линии), полученных печатью раствором PMMA w 15% POSS

На рис. 3.13 приведена профилограмма, измеренная для сплошной пленки PMMAw 15% POSS, выполненной путем печати перекрывающихся линий с шагом 20 мкм.

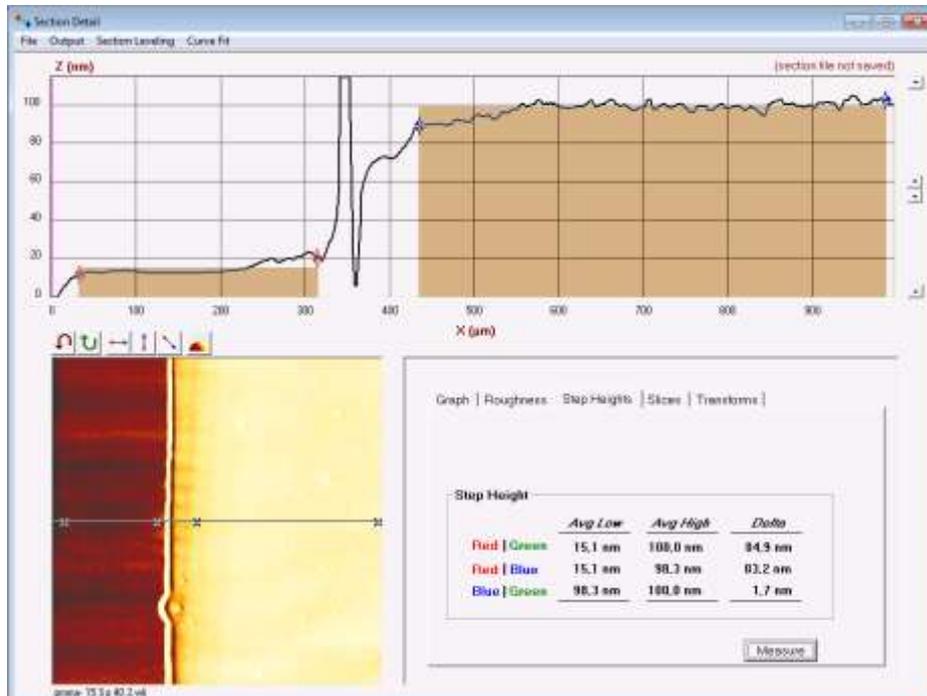


Рис. 3.13. Профилограмма сплошной пленки, полученной печатью раствором PMMAw 15% POSS

Как видно из результатов измерений, применяемая технология печати вполне позволяет получать как отдельные линии шириной порядка 250 – 300

мкм и толщиной 20 – 30 нм (см. рис. 3.12), так и обеспечивает однородную заливку поверхности (см. рис. 23.13) с толщиной слоя на уровне 100 нм. Это позволяет прогнозировать использование операции печати диэлектрических слоев при производстве компонент электроники.

Для определения электрических характеристик полученных пленок были изготовлены макеты тонкопленочных структур с топологическими размерами 2,54×5 мм, поперечное сечение которых приведено на рис. 3.14.

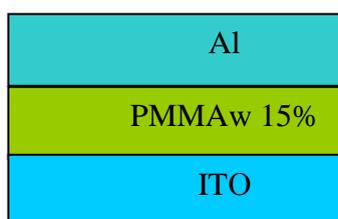


Рис. 3.14. Поперечное сечение структуры для определения электрических характеристик

Для изготовленных макетов были измерены значения сопротивлений изоляции при значении постоянного напряжения 50, 100 и 200 В. Среднее значение сопротивления изоляции пленки PMMAw 15% POSS составило 5 МОм. Толщина пленки диэлектрика PMMAw 15% POSS составляла около 100 нм.

### 3.5. Печать проводящего (металлического) слоя

Одним из перспективных применений использования печатной технологии при создании ОСИД-матриц и других элементов является получение проводящих дорожек с использованием серебросодержащих чернил. Было проведено несколько экспериментов по нанесению слоя проводящих чернил марки ANP DGP 40TE-20C.

На рис. 3.15, 3.16 приведены профилограммы пленок одиночной линии и полигона, выполненного путем печати перекрывающихся линий с шагом 20 мкм.

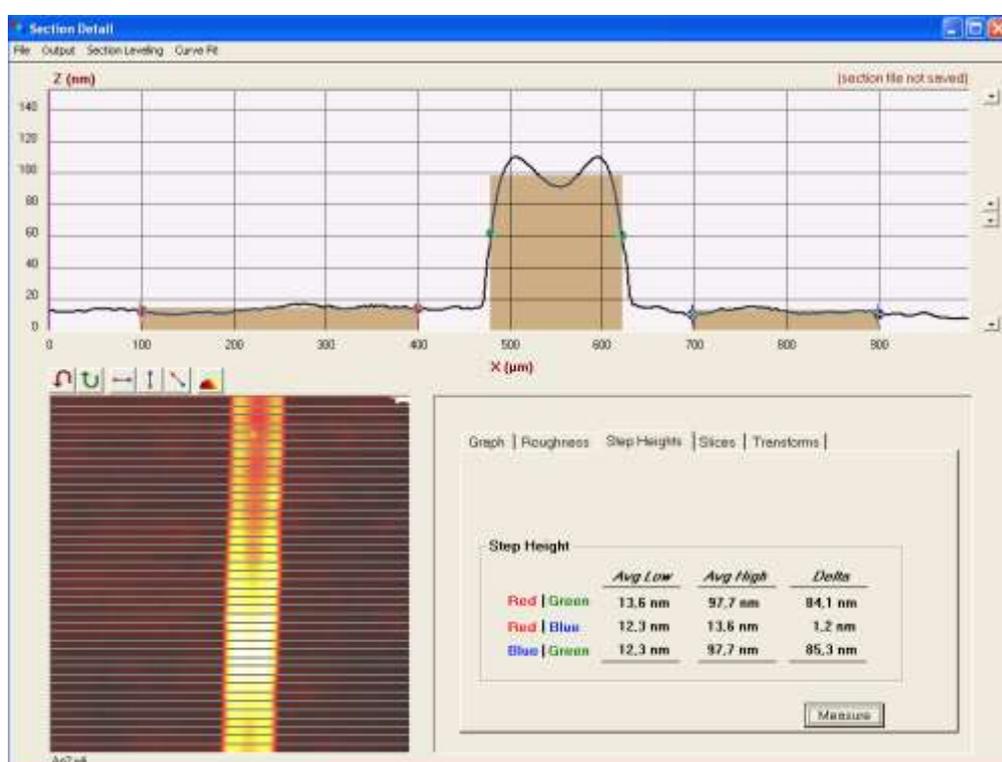


Рис. 3.15. Профилограмма пленки проводящей линии

В результате экспериментальных исследований получены проводящие пленки толщиной 100 нм (для одиночных линий) и 168 нм (для сплошных полигонов). Сопротивление пленок составило порядка 3–5 Ом/□.

Полученные проводящие пленки могут применяться:

для уменьшения контактного сопротивления в области подключения к

анодным электродам матрицы;

для уменьшения потерь тока в проводниках анода, путем шунтирования прозрачного анодного электрода узким проводником (30 мкм и менее) имеющим меньшее сопротивление;

для обеспечения коммутации элементов катодных электродов, полностью либо частично заменить собой проводящие пленки алюминия.

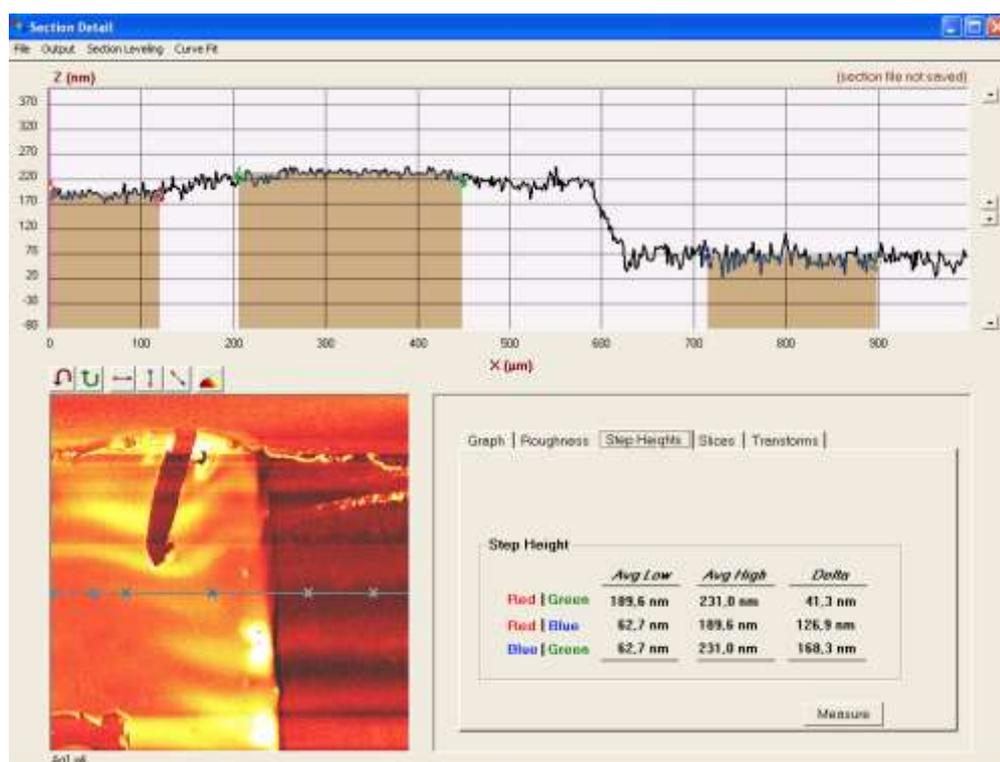


Рис. 3.16. Профилограмма проводящей пленки полигона

### **3.6. Влияние параметров отжига на электрическое сопротивление элементов печатной электроники**

Для создания устройств печатной электроники необходимо использовать специализированные чернила, которые представляют собой полимерный раствор с мелкодисперсными частицами материала, определяющего свойства пленки в дальнейшем (проводник, полупроводник, диэлектрик).

В работе [31] для создания проводников использованы полимерные чернила с нанодисперсными частицами серебра ANP DGP 40TE-20C.

Согласно технологии создания печатных проводников после нанесения чернил на подложку их необходимо высушить при температуре 100...200 °С (в зависимости от типа чернил). В связи с этим возникает необходимость выбора температуростойкой подложки. В качестве гибкого основания для печати была использована пленка из полиэстера (ПЭТ), широко применяемая в задачах ламинирования полиграфической продукции. Увеличение температуры отжига может сократить время нагревания, однако при этом следует учитывать свойства подложки, чтобы избежать ее деформации и разрушения. Поэтому чернила, нанесенные на подложку, подвергались отжигу в инфракрасной конвекционной печи Аверон «АПИК 1.0 Тропик» при температуре 120°С. При этом использовался температурный профиль, представленный на рис. 3.17.

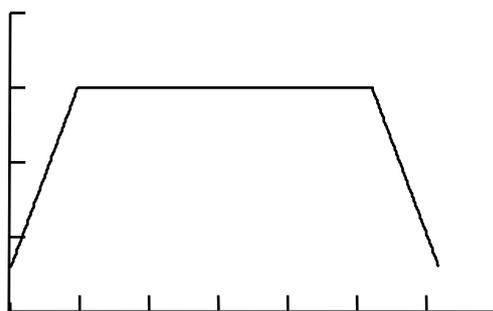


Рис. 3.17. Термопрофиль нагревания чернил во время отжига (120°С, 400 с)

В качестве экспериментальных элементов печатной электроники с помощью GIX Microplotter II фирмы SonoPlot были нанесены проводники различной длины  $L = (5, 10...25)$  мм. При использовании капилляра с соплом 140 мкм ширина проводников составила 200 мкм (за счет растекания чернил на подложке). Была определена зависимость электрического сопротивления проводников от длительности отжига. Для этого измерялось сопротивление образцов после каждого цикла нагревания согласно термопрофилю рис. 23.17. Результат измерения представлен на рис. 3.18.

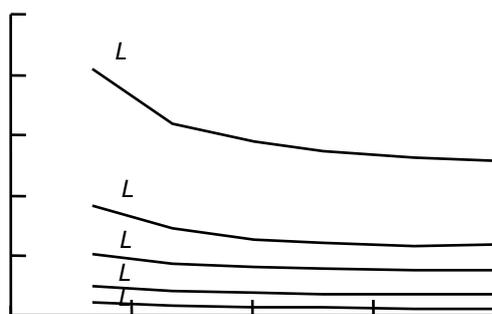


Рис. 3.18. Зависимость электрического сопротивления проводников от времени отжига

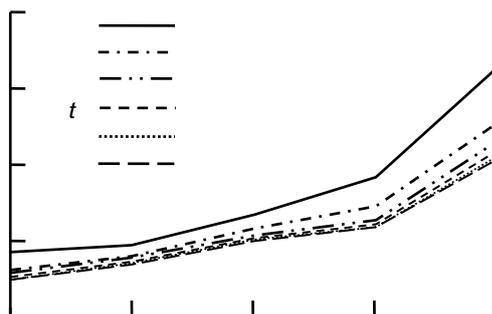


Рис. 3.19. Зависимость погонного электрического сопротивления проводников от их длины.  $t$  – время нагревания

Из рис. 30 видно, что во время отжига сопротивление образцов уменьшается. Сопротивление падает до определенного значения и затем остается постоянным. В данном случае это произошло через 40 мин нагревания. В рекомендациях производителя указывается фиксированное время отжига при заданной температуре. Однако в подобных задачах, где используются низкотемпературные материалы, такие условия не могут быть выполнены. В связи с этим представляет интерес возможность снижения температуры отжига. В этом случае минимальное изменение сопротивления может служить критерием завершения процесса отжига, так как дальнейшее нагревание не влияет на снижение сопротивления.

Обнаружено, что сопротивление изменяется непропорционально изменению длины проводника (рис.3.19). Отсюда можно сделать вывод о том, что характеристики печатных проводников характеризуются нелинейной зависимостью электрического сопротивления, как от параметров технологических режимов отжига, так и от длины проводника.

Неравномерное распределение сопротивления проводника может быть связано с образованием дефектов в процессе печати и во время отжига. В обоих случаях возможно незначительное локальное растекание чернил. Рельеф поверхности основания также может влиять на появление локальных дефектов в процессе печати. Представляет интерес контроль и диагностика качества напечатанных пленок и полученных проводников.

Известны работы [51], в которых изучены свойства СВЧ-линий на традиционных медных печатных проводниках. Результаты свидетельствуют о наличии нелинейных свойств подобных проводящих структур. Представляет интерес проведение детальных исследований для изучения нелинейных свойств проводников, изготовленных по технологии принтерной печати. Учитывая локальный характер появления дефектов, следует оценивать качество печати всей топологии. В этом случае проводник рассматривается как линия с распределенными параметрами. В связи с этим предлагается для диагностики качества печати проводников использовать известный метод нелинейной видеоимпульсной рефлектометрии. Также для контроля эффективности отжига можно использовать модифицированный метод нелинейной рефлектометрии с учетом термоэлектрических эффектов [52]. Методы позволяют в линии с распределенными параметрами обнаруживать участки, сопротивление которых изменяется под нагревающим воздействием постоянного электрического тока [53].

### **Список литературы к разделу 3**

1. Argon plasma sintering of ink jet printed silver track on polymer substrates / I. Reinhold, C.E. Hendriks, R. Eckardt, J.M. Kranenburg, J. Perelaer, R.R. Baumann, U.S. Schubert // Journal of Materials Chemistry 19 – 2009. – No. 21. – P.3384–3388. ISSN: 0959-9428. <http://pubs.rsc.org/en/Content/ArticleLanding/2009/JM/b823329b>.

2. Simulation and prediction of the thermal sintering behavior for a silver nanoparticle ink based on experimental input. Sebastian Wünscher, Tobias Rasp, Michael Grouchko, Alexander Kamyshny, Renzo M. Paulus, Jolke Perelaer,

Torsten Kraft, ShlomoMagdassi and Ulrich S. Schubert // Journal of materials chemistry. C, Materials for optical and electronic devices, 2 – (2014) –, No.31. – P. 6342–6352. – ISSN: 2050-7526. ISSN: 2050-7534. DOI: 10.1039/C4TC00632A.

3. Printed electronics: the challenges involved in printing devices, interconnects, and contacts based on inorganic materials / JolkePerelaer, Patrick J. Smith, Dario Mager, Daniel Soltman, Steven K. Volkman, Vivek Subramanian, Jan G. Korvink and Ulrich S. Schubert // J. Mater. Chem., – 2010, – 20, – 8446.DOI:10.1039/c0jm00264j.

4. Printed electrically conductive composites: conductive filler designs and surface engineering / Cheng Yang, Ching Ping Wong and Matthew M. F. Yuen // J. Mater. Chem. – C, 2013, – 1, 4052.DOI:10.1039/c3tc00572k.

5. Rapid two-step metallization through physicochemical conversion of Ag<sub>2</sub>O for printed “black” transparent conductive films / Dong-Youn Shin, Gi-Ra Yi, Dongwook Lee, Jungwon Park, Young-Boo Lee, Inseok Hwang and Sangki Chun // Nanoscale, 2013, – 5, 5043. DOI: 10.1039/c3nr00962a.

6. Rapid sintering of silver nanoparticles in an electrolyte solution at room temperature and its application to fabricate conductive silver films using polydopamine as adhesive layers / Yuhua Long, Junjie Wu, Hao Wang, Xiaoli Zhang, Ning Zhao and Jian Xu // J. Mater. Chem., 2011, – 21, – 4875.DOI: 10.1039/c0jm03838e.

7. Nanocomposite oxygen reduction electrocatalysts formed using bioderived reducing agents / Lee Johnson, WimThielemans and Darren A. Walsh // J. Mater. Chem., 2010, – 20, – 1737.DOI:10.1039/b922423h.

8. Conductive patterns on plastic substrates by sequential inkjet printing of silver nanoparticles and electrolyte sintering solutions / Michael Layani, Michael Grouchko, ShaiShemesh and ShlomoMagdassi // J. Mater. Chem., 2012, – 22, – 14349.DOI:10.1039/c2jm32789a.

9. Film formation properties of inkjet printed poly(phenylene-ethynylene)-poly(phenylene-vinylene)s /AnkeTeichlera, Rebecca Eckardta, Christian Friebe, JolkePerelaera, Ulrich S. Schubert. // Thin Solid Films, 519, 2011, 3695–3702. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.schubert-group.de/publications/PDF/Papers/Teichler-2011-2.pdf>

10. All inkjet-printed piezoelectric polymer actuators: Characterization and applications for micropumps in lab-on-a-chip systems / Oliver Pabst, JolkePerelaer, Erik Beckert, Ulrich S. Schubert, Ramona Eberhardt, Andreas Tünnermann // Organic Electronics. Volume 14, Issue 12, – December 2013 – P. 3423–3429.

11. Прохоренко П. П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов, Г.Е. Коновалов; Под ред. В.В. Клубовича. Минск: Наука и техника, 1981. – 135 с.

12. [Электронный ресурс] <http://nplit.ru/books/item/f00/s00/z0000060/st061.shtml>

13. Polymer light emitting diodes and poly(di-n-octylfluorene) thin films as fabricated with a microfluidics applicator / H. Cheun, P.P. Rugheimer, B.J. Larson,

P. Gopalan, M.G. Lagally and M.J. Winokur // Journal of Applied Physics 100, – 073510. – 2006.

14. Larson B.J. Controlled deposition of picoliter amounts of fluid using an ultrasonically driven micropipette / B.J. Larson, S.D. Gillmor, and M.G. Lagally – Review of Scientific Instruments 75, 2004– P. 832–836..

15. B.J. Larson. Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison. New technologies for fabricating biological microarrays. 2005.

16. Patent: 6,874,699 US Int.cl. B05B 1/08. Methods and apparatus for precisely dispensing microvolumes of fluids / B.J. Larson, C.H. Lee, A. Lal, and M.G. Lagally – data of Patent 05.04.2005

17. Template-directed carbon nanotube network using self-organized Si nanocrystals. B. Yang, M.S. Marcus, D. G. Keppel, P.P. Zhang, Z. W. Li, B. J. Larson, D. E. Savage, J.M. Simmons, O.M. Castellini, M. A. Eriksson, and M. G. Lagally. – Applied Physics Letters – 86, – 263107 – 2005..

18. Deposition of sample sand sample matrix for enhancing the sensitivity of matrix-assisted laser desorption D. Barnes, M. Vestling, B.J. Larson, and M.G. Lagally. / ionization mass spectrometry. – USPTO Application – # 11/025,349.

19. Nearterm aging and thermal behavior of polyfluorene in various aggregation states / H. Cheun, B. Tanto, W. Chunwaschirasiri, B. Larson, and M.J. Winokur // Applied Physics Letters – 2004. – № 84, – C.22–24 .

20. Johnson P. GIX Microplotter II: Manual // USA: SonoPlot, – 2011. – 71 p.

21. SonoPlot Microplotter GIX II. URL: [Электронный ресурс] – Режим доступа; [www.sonoplot.com/products/Gix-Microplotter-II](http://www.sonoplot.com/products/Gix-Microplotter-II) (дата обращения 25.05.2013).

22. [Электронный ресурс] – Режим доступа; [http://global.epson.com/company/corporate\\_history/milestone\\_products/pdf/16\\_sq-2000.pdf](http://global.epson.com/company/corporate_history/milestone_products/pdf/16_sq-2000.pdf).

23. [Электронный ресурс] – Режим доступа; <http://www.nestor.minsk.by/kg/1997/16/kg71608.htm>

24. [Электронный ресурс] – Режим доступа; <http://4pda.ru/2011/12/9/51237/>

25. [Электронный ресурс] – Режим доступа; <http://3dmid.ru/#/>

26. Нисан Антон. 3D-MID: Области применения и технологии производства // Поверхностный монтаж. – №3 (89), – март 2011. – С. 9-13.. [Электронный ресурс] – Режим доступа; <http://3dmid.ru/upload/files/pdf/1/3d-midpdf.pdf>

27. Волков Игорь. Новые возможности прототипирования изделий с использованием 3D-MID технологии // Поверхностный монтаж. №3 (100), – апрель 2013. – С. 11–14. [Электронный ресурс] – Режим доступа; <http://3dmid.ru/upload/files/pdf/1/prototypepdf.pdf>

28. Разработка базовой технологии изготовления особо плоских полноцветных ОСИД-дисплеев методом принтерной печати: пояснительная записка по договору «Органика», государственный контракт

№ 12418.1006899.11.055 от 05 апреля 2012 г. Этап 1/ Гл. конструктор Туев В.И. Технический проект. Томск, – 2012. – 149 с.

29. Разработка базовой технологии изготовления особо плоских полноцветных ОСИД-дисплеев методом принтерной печати: пояснительная записка по договору «Органика», государственный контракт № 12418.1006899.11.055 от 05 апреля 2012 г. Этап 2 / Гл. конструктор Туев В.И.. Томск, – 2013. – 103 с.

30. Здрок А.Е. Исследование технологии плоттерной печати изделий полимерной электроники // Научная сессия ТУСУР–2014: матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, – Томск – 14–16 мая 2014 г.:– в 5 ч. Томск: В-Спектр, 2014. Ч. 1. – С. 180–183.

31. Analysis of influence of annealing parameters on electrical resistance of printed electronics elements / S.A. Artishchev, A.E. Zdrok, A.G. Loschilov, N.D. Maljutin // Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 2014 24th International Crimean Conference. Sevastopol – 2014. – P. 690 – 691 (engl.,rus.). – DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959587. IEEE Conference Publications. [Электронный ресурс] – Режим доступа <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=6959587&queryText%3DMalyutin+N.D.>

32. A. Teichler, Zh. Shu, A. Wild, C. Bader, J. Nowotny, G. Kirchner, S. Harkema, J. Perelaer and U.S. Schubert Inkjet printing of chemically tailored light-emitting polymers // European Polymer Journal. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.03.031>.

33. A. Teichler, R. Eckardt, C. Friebe et al. Film formation properties of inkjet printed poly(phenylene-ethynylene)-poly(phenylene-vinylene)s // Thin Solid Films. – 2011. – 519. – P. 3695–3702.

34. S.-H. Jung, J.-J. Kim, H.-J. Kim High performance inkjet printed phosphorescent organic light emitting diodes based on small molecules commonly used in vacuum processes // Thin Solid Films. – 2012. – V. 520. – P. 6954–6958.

35. B.J. Larson, S.D. Gillmor, M.G. Lagally Controlled deposition of picoliter amounts of fluid using an ultrasonically driven micropipette // Rev. Sci. Instrum. – 2004. – V. 75, № 832; doi: 10.1063/1.1688436.

36. Y. Xia, R.H. Friend Controlled Phase Separation of Polyfluorene Blends via Inkjet Printing // Macromolecules. – 2005, 38, 6466–6471.

37. S.Ch. Chang, J. Liu, J. Bharathan, Y. Yang, J. Onohara, J. Kido Multicolor Organic Light-Emitting Diodes Processed by Hybrid Inkjet Printing // Advanced Materials. – 1999. – V. 11, N. 9. – P. 734-737.

38. J.F. Dijkman, P.C. Duineveld, M.J.J. Hack et al. Precision ink jet printing of polymer light emitting displays // Journal of Materials Chemistry. – 2007. – V. 17. – P. 511-522.

39. A. Teichler, J. Perelaer, U.S. Schubert Screening of Film—Formation Qualities of various Solvent Systems for  $\pi$ -Conjugated Polymers Via Combinatorial Inkjet Printing // Macromolecular Chemistry and Physics. – 2013. – V. 214. – P. 547-555.

40. A. Teichler, J. Perelaer, F. Kretschmer, M.D. Hager, U.S. Schubert Systematic Investigation of Novel Low-Bandgap Terpolymer Library via Inkjet Printing: Influence of Ink Properties and Processing Conditions // *Macromolecular Chemistry and Physics*. – 2013. – V. 214. – P. 664-672.
41. Пат. US 20110008590A1 United States, H01B 1/12, B32B 3/10, H01L 51/54 Solvent for a printing composition / S. Goddard, P. Wallace. – опубли. 13.01.2011б; приоритет 03.03.2008.
42. T. Gohda, Y. Kobayashi, K. Okano, et al. .6-in. 202-ppi Full-Color AMPLD Display Fabricated by Ink-Jet Method // *SID*. – 2006. - ISSN0006-0966X/06/3702-1767-\$1.00+.00.
43. M. Tuomikoski, R. Suhonen. Pursuing the Printed OLED // электронный ресурс. Режим доступа <http://www.industrial-printing.net/content/pursuing-printed-oled>
44. Grouchko M, Kamyshny A, Magdassi S. Formation of air-stable copper-silver core-shell nanoparticles for inkjet printing. *J Mater Chem*. – 2009. – 19. – P. 3057-62.
45. T. Maaninen Low work function cathode ink // *Generic technologies, Materials and processes. Research and development activities in printed intelligence*. VTT Technical research centre of Finland – 2008., 52 p.
46. In-K. Shim, Y.I. Lee, K.J. Lee, J. Joung An organometallic route to highly monodispersed silver nanoparticles and their application to ink-jet printing // *Materials Chemistry and Physics*. – 2008. – 110. – P. 316–321.
47. Nir MM, Zamir D, Haymov I, et al. Electrically conductive inks for inkjet printing. In: Magdassi S, Ed. *The chemistry of inkjet inks*. New Jersey-London-Singapore: World Scientific. – 2010. - P. 225-54.
48. A. Kamyshny, J. Steinke, S. Magdassi Metal-based Inkjet Inks for Printed Electronics // *The Open Applied Physics Journal*. – 2011. – 4. P. 19-36.
49. J. Shinar *Organic Light Emitting Devices* / Springer; 1 edition, October 31, 2003, 384 p.
50. T.N. Kopylova, R.M. Gadirov, K.M. Degtyarenko, E.N. Tel'minov, T.A. Solodova, E.N. Ponyavina, S.Yu. Nikonov, G.I. Nosova, N.A. Solovskaya, I.A. Berezin, D.M. Il'gach, A.V. Yakimansky Spontaneous and Stimulated Emissions of
51. Distributed passive intermodulation distortion on transmission lines / J. Wilkerson, P. Lam, K. Gard, M. Steer // *IEEE Microwave Theory and Techniques*, – May 2011. – vol. 59, №. 5, – P. 1190–1205,.
52. Artishchev S.A. Diagnostics of electric contact quality by the method of nonlinear baseband pulse reflectometry with allowance for thermoelectric effects. / S.A. Artishchev, E.V., Semyonov. – *Russian Physics Journal*, 2014 – Vol. 56 – №9 – P. 1039–1045
53. Diagnostic of electrical contacts quality by the nonlinear reflectometry adjusted for thermo effects. / E.V. Semyonov, S.A. Artishchev, A.A. Gorodilov, S.B, Suntsov. // 22nd Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2012). – Sevastopol, 2012, – P. 915–916.

54. Здрок А.Е. Исследование электрических характеристик пьезоэлектрического дозатора плоттерной системы печати / А.Е. Здрок, А.Г. Лощилов, С.А. Артищев. // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов X Международной научно-практической конференции (12–14 ноября 2014 г.): В 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2014. – С. 216–219. – ISBN978-5-91191-318-2

55. Артищев С.А.. Измерительный стенд для контроля электрических параметров функциональных слоев изделий органической электроники/ С.А. Артищев, А.А. Бомбизов, А.Е. Здрок, А.Г. Лощилов // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов X Международной научно-практической конференции (12–14 ноября 2014 г.): В 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, – 2014. – С. 208–212. – ISBN978-5-91191-318-2.

56. Туев В.И. Измерение сопротивлений двухполюсников с применением импульсного сигнала // Известия Том. политех. ун-та. 2006. № 1. – С. 178–182.

57. Семёнов Э.В. Нелинейная рефлектометрия с применением видеоимпульсных тестовых сигналов // Известия Том. политех. ун-та. 2006. – Т. 307, № 3. – С. 153–155.

58. Лощилов А.Г. Измерительный комплекс для исследования электрических и оптических характеристик органических светодиодных матриц / А.Г. Лощилов, М.А. Лазыко, А.А. Бомбизов, С.П. Караульных, И.М. Макаров // Электронные средства и системы управления: Материалы докладов X Международной научно-практической конференции (12–14 ноября 2014 г.): В 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, – 2014. – С. 212–218. – ISBN 978-5-91191-318-2 (Ч. 2).

59. Problem of Ink Evaporation while using Plotter Systems to Manufacture Printed Electronic Products / Allanurov A.M., Zdrok A.Ye., Loschilov A.G., Malyutin N.D. // Procedia Technology. – 2014. – V. 18. – P. 19–24. – Elsevier Ltd. DOI:10.1016/j.protcy. 2014.11.006. [Электронный ресурс] – Режим доступа [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). International workshop on Innovations in Information and Communication Science and Technology, ICST 2014, 3-5 September 2014, Warsaw, Poland (engl.).

60. Аллануров А.М. Проблема испарения чернил при эксплуатации плоттерных систем изготовления изделий печатной электроники / А.М. Аллануров, А.Е. Здрок, А.Г. Лощилов, Н.Д. Малютин. // Электронные средства и системы управления: материалы докладов X Международной научно-практической конференции (12–14 ноября 2014 г.): В 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2014. – С. 220–218. – ISBN978-5-91191-318-2.

61. Мартенс Л.К. Техническая энциклопедия в 26 т. – 1929. – Т. 9. – С. 360–366.