

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.389; 544.653

МОХАММЕД
Абубакар Саддик

**СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НАНОПОРИСТЫЙ
КРЕМНИЙ – АЛЮМИНИЙ МИКРОМИНИАТЮРНЫХ
УСТРОЙСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Минск 2015

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Смирнов Александр Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией НИЛ 4.7 учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Лыньков Леонид Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Защита информации» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Соловьев Ярослав Александрович, кандидат технических наук, доцент, главный инженер филиала ОАО «ИНТЕГРАЛ – УКХ «ИНТЕГРАЛ»

Оппонирующая организация **Белорусский национальный технический университет**

Защита состоится 16 апреля 2015 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by тел. 293-89-89.

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

Автореферат разослан « » марта 2015 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
доктор технических наук, профессор

С. В. Бордусов

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В последние годы на рынке устройств и систем телекоммуникационной и медиа-техники все заметнее доля видеопроекционных систем персонального типа на основе микроминиатюрных дисплеев (микродисплеев).

Микродисплеи – это новая фаза в развитии дисплейных технологий, способная как существенно изменить внешний вид существующих устройств, так и создать целый класс новых с расширенными функциональными возможностями типа мобильных телекоммуникационных систем с возможностью отображения полноформатных страниц текста или графики, беспроводных компьютерных интерфейсных систем и др., что до их появления было невозможным. Кроме того, может быть решена вечная проблема, существующая в области электронной техники, когда поддается комплексной микроминиатюризации все, кроме дисплеев. К числу других наиболее перспективных применений микродисплеев можно отнести видеопроекционные системы различного класса и назначения, наголовные и нашлемные индикаторы типа «Head Mounted Display» и «Helmet Mounted Display», а также тренажеры и электронные игры с эффектами виртуальной реальности.

Среди многочисленных технологий создания микродисплеев наиболее перспективными в настоящее время представляются отражательные LCoS (Liquid Crystal on Silicon) и светоизлучающие LED (Light Emitting Diode) структуры, адресуемые матрицей МОП-транзисторов, формируемых на кремниевом чипе.

Диссертационная работа посвящена разработке и комплексному исследованию конструктивно-технологических вариантов светоизлучающих элементов на основе обратно-смещенной Шоттки-структуры нанопористый кремний – алюминий для микродисплеев, используемых в видеопроекционных системах персонального типа, разработке методики и программно-аппаратного комплекса для визуального контроля пользователем яркости, разрешающей способности, цветопередачи и контраста формируемых на микродисплее изображениях, в том числе программным путем, выработке практических рекомендаций эффективного использования подобных устройств отображения информации.

Применение разработанных устройств в разнообразных областях оптоэлектроники экономически обосновано за счет упрощения их конструкции и технологии производства при одновременном улучшении эксплуатационных свойств и снижении стоимости.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Тема диссертации утверждена Советом учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (протокол № 1 от 13.09.2010 г.) и соответствует разделу б «Лазерные, оптические, оптико-, опто-, микро- и радиоэлектронные технологии и системы» и «Научные основы создания и функционирования оптико-электронных микросистем, устройств молекулярной электроники и кремниевой фотоники, электронных и оптических систем обработки информации на спиновых эффектах; нанотехнологии, наноструктуры и наноматериалы в электронике, оптике, оптоэлектронике» Перечня приоритетных направлений фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015 гг., утвержденных Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 19 апреля 2010 г. № 585.

Диссертационная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках следующих заданий республиканских научно-технических программ, хоздоговоров и контрактов:

– ГКПНИ «Наноматериалы и нанотехнологии», задание 4.12 «Разработка схмотехнических и топологических вариантов, конструкций и технологий изготовления светоизлучающих микродисплеев высокого разрешения на основе наноструктурированных материалов, интеграция их с драйверами в одном кремниевом кристалле для использования в персональных видеопроекционных устройствах нового поколения» (2006 – 2010 гг., № госрегистрации 20063723);

– ГПНИ «Функциональные материалы и технологии, наноматериалы», задание 2.4.15 «Разработка технологий получения и исследование самоорганизующихся наноструктур на основе кремния, Al, Al₂O₃ и органических соединений для солнечных элементов, дисплейных устройств и элементов микро- и нанофотоники» (2011 – 2013 гг., № госрегистрации 20120400);

– ГПНК «Конвергенция», задание 3.1.03 «Разработать и исследовать физико-химические и технологические основы создания высокоэффективных солнечных элементов, светоизлучающих панелей и дисплейных устройств на основе наноструктурированных органических и неорганических материалов, в том числе на гибких носителях. Разработать концепцию организации массового их производства по принципу «с рулона-на-рулон»(2011 – 2013 гг., № госрегистрации 20115153);

– международный проект седьмой рамочной программы Евросоюза «BELERA» № 295043 “Reinforcing carbon nanotubes and photonics research cooperation between the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics and the European Research Area” (2012 – 2013 гг.).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка и комплексное исследование конструктивно-технологических вариантов светоизлучающих элементов на основе Шоттки-структур нанопористый кремний – алюминий для микродисплеев, используемых в видеопроекционных системах персонального типа, разработка методики и программно-аппаратного комплекса для визуального контроля яркости, разрешающей способности, цветопередачи и контраста формируемых на микродисплее изображениях, выработка практических рекомендаций эффективного использования подобных устройств отображения информации.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Экспериментально установлены закономерности формирования стабильных и воспроизводимых слоев нанопористого кремния толщиной 100–200 нм с размером пор 10–20 нм и пористостью 70–80 % в водных растворах $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$.

2. Разработаны конструкция и технология, изготовлен и исследован светоизлучающий элемент в виде обратно смещенного Шоттки-диода со структурой нанопористый кремний – алюминий.

3. Разработаны, изготовлены и исследованы тестовые образцы пассивно-матричных LED-микродисплеев со светоизлучающими элементами на основе структуры нанопористый кремний – алюминий.

4. Исследована возможность применения пассивно-матричных LED-микродисплеев со светоизлучающими элементами на основе структуры нанопористый кремний – алюминий в составе видеопроекционной системы персонального типа.

5. Разработаны методика, структурная схема и конструкция, изготовлен и испытан программно-аппаратный комплекс для визуального контроля яркости, разрешающей способности, цветопередачи и контраста изображений, формируемых на микродисплее.

6. Выработаны практические рекомендации эффективного использования разработанных устройств отображения информации в составе видеопроекционной системы персонального типа.

Научная новизна

Экспериментально установлены закономерности формирования стабильных и воспроизводимых слоев нанопористого кремния толщиной 100–200 нм с размером пор 10–20 нм и пористостью 70–80 % в водных растворах $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ в соотношении 2:1:1:9 за счет замедления процесса локального анодного растворения кремния в присутствии ионов фтора и PO_4^- , что позволяет снизить уровень токсичности процесса до безопасного для оператора предела, а также исключить агрессивное воздействие раствора на металлизацию структуры.

Впервые разработаны научные основы технологии, изготовлен и исследован светоизлучающий элемент – Шоттки-диод со структурой нанопористый кремний – алюминий, с яркостью излучения не менее 20 Кд/м^2 в области спектра 440–800 нм при рабочих напряжениях $-5\dots-10 \text{ В}$, временами включения-выключения менее 30 нс, что позволяет создавать видеопроекционные системы персонального типа с пассивно адресуемым LED-микродисплеем матричного типа с упрощенной оптической и электронной архитектурой и тем самым снизить стоимость устройства; установлена взаимосвязь между параметрами и электрофизическими свойствами подобных микродисплеев, что позволило определить оптимальные режимы их формирования.

Впервые разработана методика контроля функционирования микродисплеев, включающая набор отображаемых на нем тестовых изображений, генерируемых программно-аппаратным комплексом, с последующим визуальным анализом пользователем яркости, разрешающей способности, цветопередачи и контраста изображений, в том числе генерируемых программно.

Положения, выносимые на защиту

1. Формирование слоев нанопористого кремния толщиной 100–200 нм с размером пор 10–20 нм и пористостью 70–80 % в растворах состава $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ в соотношении 2:1:1:9 обеспечивает воспроизводимость параметров пористого слоя и его временную стабильность за счет замедления процесса локального анодного растворения кремния в присутствии ионов фтора и PO_4^- и позволяет устранить воздействие токсичных реагентов на оператора и металлизацию структуры.

2. Светоизлучающий элемент со структурой нанопористый кремний – алюминий обеспечивает яркость излучения не менее 20 Кд/м^2 в спектральной области 440–800 нм при напряжении смещения $-5\dots-10 \text{ В}$, времена включения-выключения менее 30 нс, что позволяет создать

видеопроекционные системы персонального типа на основе пассивно-матричного светоизлучающего микродисплея с упрощенной оптической и электронной архитектурой и тем самым снизить стоимость устройства.

3. Методика контроля функционирования персонального микродисплея должна включать набор отображаемых на нем стандартных изображений, генерируемых программно-аппаратным комплексом, с последующим визуальным анализом пользователем яркости, разрешающей способности, цветопередачи и контраста изображений, формируемых на микродисплее.

Личный вклад соискателя ученой степени

В диссертации изложены результаты исследований, выполненных автором лично и в соавторстве. В совместно опубликованных работах автором осуществлялись постановка задачи, обоснование направлений решения научных проблем, разработка методик проведения исследований, непосредственное проведение исследований, анализ результатов и формулировка выводов. Автором лично предложены методика контроля функционирования и визуального восприятия изображения микродисплея с помощью разработанного им программно-аппаратного комплекса, разработаны конструкции и технологии изготовления светоизлучающего элемента со структурой нанопористый кремний – алюминий и пассивно-адресуемых LED-микродисплеев на их основе.

Определение целей и задач исследования, обсуждение и обобщение основных научных результатов исследований проводились совместно с научным руководителем, доктором технических наук, профессором А.Г. Смирновым. Напыление алюминиевых пленок на стеклянные и кремниевые подложки осуществлялось при участии сотрудника СП «Изовак» Е.А. Хохлова. Обсуждение процессов анодирования тонких пленок алюминия и кремния проводилось с сотрудниками НИЧ БГУИР – доктором технических наук В.А. Соколом, кандидатом технических наук В.П. Бондаренко, старшим научным сотрудником Т.И. Ореховской. Анализ электрооптических параметров микродисплеев проводился совместно с заведующим лабораторией «Оптика конденсированных сред» НИУ "ПФП им. А.Н. Севченко" кандидатом физико-математических наук В.И. Лапаником и сотрудником лаборатории «Материалы и технологии ЖК-устройств» ГНУ «Институт химии новых материалов» НАН Беларуси А.А. Муравским.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на 7 международных научно-технических конференциях, в том числе на 19-м и 20-м международном симпозиуме «Перспективные технологии дисплеев и полупроводниковой осветительной техники» (г. Логойск, Беларусь, 2011 г., г. Ялта, Украина, 2012); Society for Information Display International Symposium, Seminar & Exhibition (г. Лос-Анджелес, США, 2011 г.); 4-й международной конференции Nanomeeting-2011 (г. Минск, Беларусь, 2011 г.); 8-й международной конференции «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (г. С. - Петербург, Россия, 2012 г.); 9-й международной конференции “Porous Semiconductors – Science and Technology-2014” (г. Бенидорм, Испания, 2014 г.); 1-й международной школе и конференции “Saint-Petersburg OPEN 2014” (г. С. - Петербург, Россия, 2014 г.)

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе БГУИР на кафедре микро- и наноэлектроники в лекционном курсе по дисциплине «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике» и в НИЛ 4.7 БГУИР «Устройства обработки и отображения информации», что подтверждено соответствующими актами.

Опубликование результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 15 научных работ, в том числе 3 статьи в научных рецензируемых журналах, 6 статей в сборниках материалов научных конференций, 6 тезисов докладов на научных конференциях общим объемом 1,97 авторских листов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка, списка публикаций автора и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 117 страниц, из них 37 страниц текста, 76 рисунков на 59 страницах, 11 таблиц на 10 страницах, библиографический список из 74 источников на 6 страницах и 15 публикаций соискателя ученой степени по теме диссертации на 2 страницах, 2 приложения на 3 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** и в **общей характеристике** работы дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, определены цели и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, приведены сведения об апробации и опубликованности основных результатов диссертации в отечественных и зарубежных источниках.

В **первой главе** представлены результаты анализа существующих конструкций, материалов и технологий изготовления микродисплеев, обоснована перспективность их использования в видеопроекционных системах персонального типа, приведены их электрооптические параметры и области применения [1, 5]. Анализ опубликованной научно-технической, патентной и коммерческой информации показал, что:

- видеопроекционные системы персонального типа получили широкое распространение в современном медиа-пространстве ввиду их высокой эффективности, необычных эргономических свойств и экономической целесообразности, при этом прогнозируется бурный рост областей их применения уже в ближайшем будущем;

- наиболее распространенные технологии, используемые при разработке и производстве современных видеопроекционных систем персонального типа, – это LCoS- и OLED-микродисплеи с активно-матричной адресацией;

- для LCoS-микродисплеев, работающих в отражательном режиме, можно использовать независимую адресацию каждого пикселя с помощью матрицы МОП-транзисторов, формируемой на кремниевом кристалле, при этом возможна также интеграция строчных и столбцовых драйверов, позволяющая существенно снизить количество внешних выводов, повысить надежность и снизить стоимость устройства;

- светоизлучающие OLED-микродисплеи на основе органических материалов характеризуются высокой эффективностью благодаря простой оптической архитектуре, однако ввиду сложной технологии изготовления и высокой стоимости они пока не вышли на стадию массового промышленного производства;

- наиболее перспективны в настоящее время светоизлучающие LED-микродисплеи на основе неорганических материалов, в частности, нанопористого кремния, излучающие в видимой области спектра, формируемые на кремниевом кристалле с возможностью использования всех преимуществ кремниевой МОП-технологии.

Проведенный анализ позволил оценить актуальность и перспективы настоящего исследования и сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** представлены результаты теоретического и экспериментального исследования конструкций, технологий и основных параметров светоизлучающих элементов в виде обратно смещенных Шоттки-диодов со структурой нанопористый кремний – алюминий, эффективно излучающих в видимой области спектра. При этом особое внимание уделено процессу формирования нанопористых слоев кремния толщиной 100–200 нм, обладающих губчатой структурой с порами размером 10–20 нм и высокой пористостью [4, 6, 7, 15].

Стандартным технологическим приемом формирования нанопористого кремния как функционального слоя для светоизлучающих элементов оптоэлектроники является электрохимическое травление (анодирование) в концентрированной плавиковой кислоте, имеющей такие существенные недостатки, как малое время травления (несколько секунд для получения нанопористых слоев толщиной 100–200 нм), высокая токсичность для оператора и агрессивное воздействие плавиковой кислоты на металлизацию приборов.

В диссертационной работе для формирования стабильных и воспроизводимых сверхтонких слоев нанопористого кремния мы впервые использовали водный раствор состава $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ со сверхмалой концентрацией ионов фтора. Добавление этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) в раствор позволяет эффективно смачивать поверхность кремния, в результате чего увеличивается воспроизводимость процесса, а добавление ортофосфорной кислоты (H_3PO_4) позволяет контролировать уровень ионов фтора в растворе и получать равномерные нанопористые слои по всей поверхности анодирования. Использование фторида аммония (NH_4F) снижает уровень токсичности до абсолютно безопасного для операторов предела, а также устраняет агрессивное воздействие на металлизацию приборов [9, 10, 11].

Нами экспериментально установлено, что в оптимальных режимах анодирования можно формировать стабильные и воспроизводимые слои нанопористого кремния с необходимой пористостью в водном растворе $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ при соотношении компонентов 2:1:1:9 [8, 14].

Нами впервые выявлена закономерность, что с увеличением концентрации NH_4F с 5 до 25 весовых % при плотности тока $J=0,1 \text{ mA/cm}^2$ размер пор уменьшается с 20 до 10 нм по линейному закону (рисунок 1). При этом нанопористые слои имеют губчатую структуру и пористость в пределах 70–80 %.

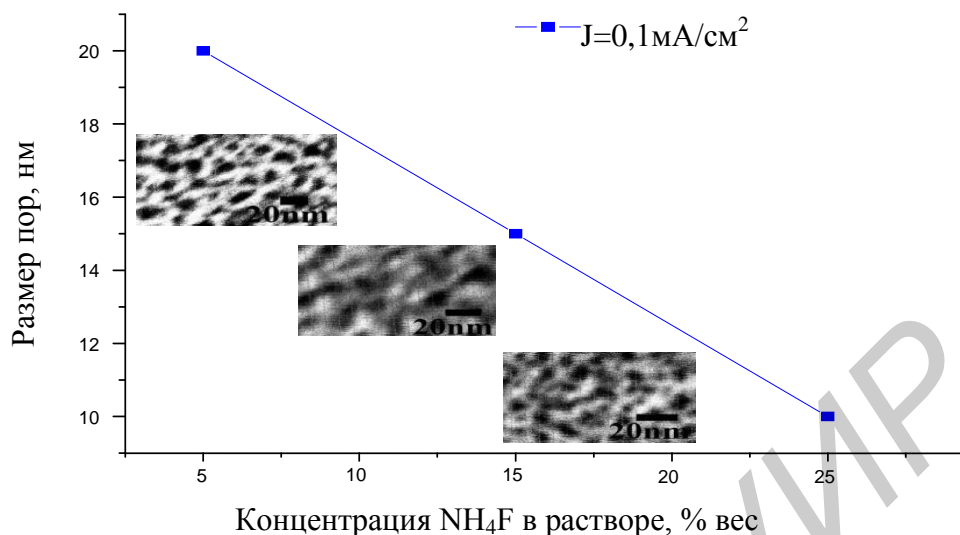


Рисунок 1. – Зависимость размера пор от концентрации NH_4F

Таким образом, проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований процессов формирования нанопористых слоев позволил впервые разработать, изготовить и исследовать тестовые образцы светоизлучающих элементов со структурой нанопористый кремний – алюминий, сформированных на сильнолегированных подложках монокремния n-типа ($0,01 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), которые обеспечивают яркость излучения не менее 20 Кд/м^2 в спектральной области $440\text{--}800 \text{ нм}$ при напряжении смещения менее 10 В с временами переключения менее 30 нс [4, 9, 10, 11].

С учетом особенностей структуры светоизлучающих элементов разработана специальная методика измерений их вольт-амперных характеристик в составе многовыводных структур, сформированных на монокристаллическом кремнии, при этом экспериментально установлено, что уже в области малых смещений доминирует туннельная компонента тока, а высота энергетического барьера на границе раздела может существенно увеличиваться.

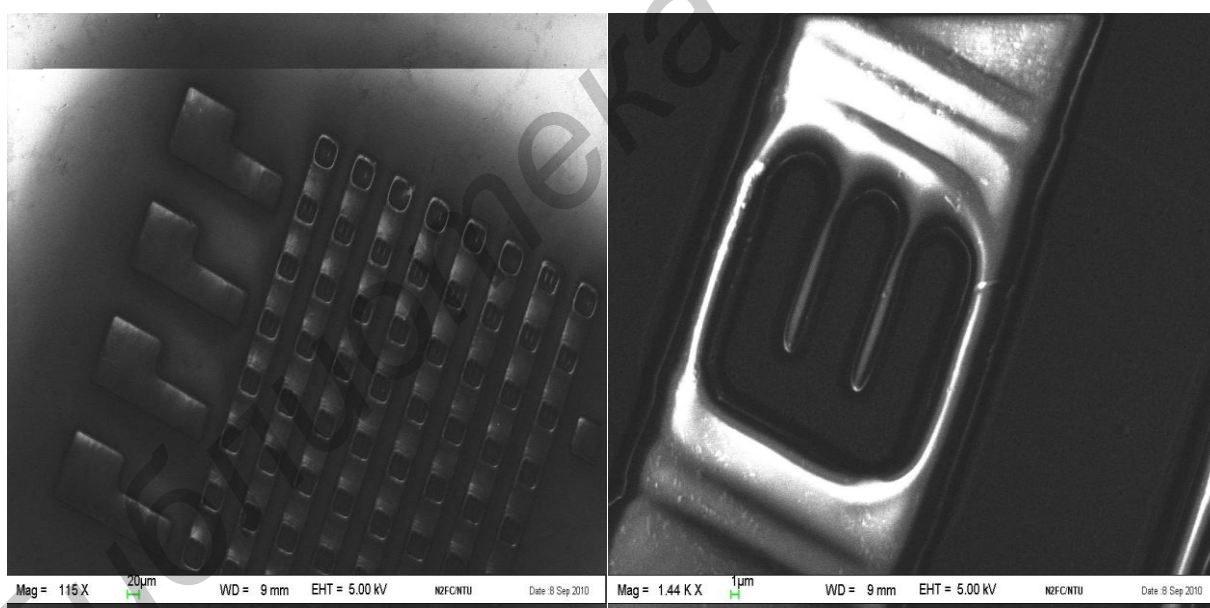
Выявлено, что нагрев локальной области Шоттки-перехода может приводить к дрейфу его вольт-амперной характеристики, появлению гистерезиса, а в предельных случаях – к шнурованию тока и необратимому пробое переходу. Стандартным методом решения данной проблемы, который и был применен нами, является импульсное возбуждение, при этом необходимая длительность импульсов может быть определена расчетным либо экспериментальным путем.

Нами достигнуты следующие параметры светоизлучающих элементов, сформированных в оптимальных технологических режимах [2, 9]:

- минимальное пространственное разрешение – 12x12 мкм;
- рабочее напряжение – от –5 до –10 В;
- быстродействие – от 10 до 30 нс;
- плотность рабочего тока – до 7000 А/см² в импульсе;
- яркость излучения – не менее 20 Кд/м²;
- внешняя эффективность – не менее 1 %;
- срок службы – не менее 7000 ч.

В **третьей главе** представлены результаты разработки и исследования конструктивно-технологических вариантов тестовых образцов LED-микродисплеев на основе светоизлучающих Шоттки-диодов, описанных в главе 2. Основные их особенности – белый цвет свечения и наносекундное быстродействие – определили электронную архитектуру разрабатываемого микродисплея: пассивно-матричная адресация пикселей с черно-белыми точками с градациями серой шкалы.

Внешний вид тестового кремниевого кристалла с LED-матрицей 8x8 и одного светоизлучающего элемента приведены на рисунке 2, а, б [2].



а

б

а – внешний вид кристалла с LED-матрицей 8x8 элементов;

б – светоизлучающий элемент LED-матрицы

Рисунок 2. – Тестовый кремниевый кристалл с LED-матрицей

Поскольку описанные в литературе рекомендации имеют большой разброс по соотношению характеристик оптической системы/микродисплея и фактически подбираются для каждой конструкции микродисплея индивидуально, мы оценивали визуальное восприятие изображений, генерируемых на тестовых образцах пассивно-адресуемых LED-матриц на основе диодов

Шоттки со структурой нанопористый кремний – алюминий, с помощью специально разработанных методики и макетного устройства для ее практической реализации.

Тестирование проводили сотрудники лаборатории НИЛ 4.7, аспиранты и магистранты БГУИР (всего 7 человек в возрасте от 23 до 60 лет) с просмотром изображения на микродисплее от 2 до 60 мин при различных яркостях свечения и скорости обновления информации. Методика тестирования заключалась в следующем: на матрице 3x5 LED-элементов генерировалась в произвольном порядке последовательность десятичных цифр от 0 до 9 с изменяемой яркостью свечения и скоростью обновления информации либо параллельные линии на расстоянии 15 и 30 мкм. В качестве оптической системы использовался объектив от цифрового фотоаппарата «Medion» с фокусным расстоянием 8.7 мм и апертурой 1:3. При этом параметры матрицы микродисплея соответствуют размеру 16 x 26 мм на дистанции оптимального наблюдения 30 см.

В результате анализа визуальной оценки группой пользователей образцов светоизлучающих LED-элементов нами сделано следующее заключение:

- при правильном позиционировании окуляра не наблюдается дискомфорта при просмотре и повышенной утомляемости глаз, по рабочему полю не фиксируются изменения яркости и/или размытия изображений, светящиеся линии на расстоянии от 15 мкм устойчиво и без напряжения разрешаются глазом при частотах обновления информации до 100 Гц;
- яркость изображения является комфортной при токе через элемент матрицы в диапазоне от 8 до 50 мА.

Таким образом, нами впервые экспериментально подтверждено, что с учетом уникальных свойств LED-диодов Шоттки со структурой нанопористый кремний – алюминий возможно конструирование на их основе недорогих пассивно-матричных светоизлучающих микродисплеев высокого разрешения, которые будут востребованы при массовом производстве видеопроекционных систем персонального типа нового поколения.

В четвертой главе описана разработанная нами простая и эффективная методика функционального контроля микродисплеев для видеопроекционных систем персонального типа по визуальному отклику, а также программно-аппаратный комплекс для ее практической реализации [1, 3, 12].

Структурная схема программно-аппаратного комплекса контроля функционирования микродисплеев для видеопроекционных систем персонального типа, состоящего из ряда узлов, соединенных между собой различными интерфейсами, представлена на рисунке 3.

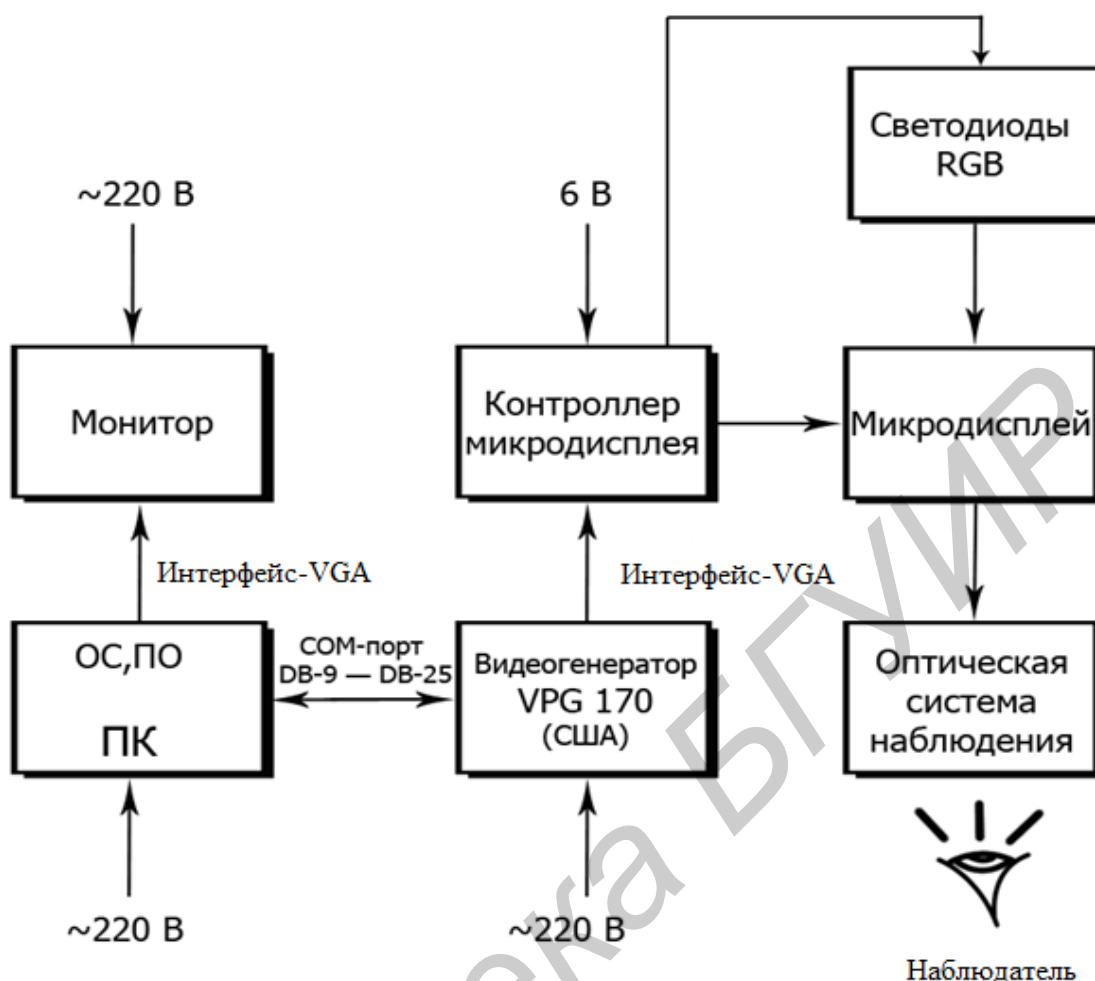


Рисунок 3. – Структурная схема программно-аппаратного комплекса контроля функционирования микродисплеев

Основным звеном комплекса является генератор испытательных сигналов Video Pattern Generator типа VPG 170 производства компании KLEIN Instruments (США), выполняющий функции формирователя видео-изображений, который позволяет создавать тестовые поля изображений с различными характеристиками.

В качестве контрольного элемента при настройке комплекса мы использовали активно-матричный LCoS-микродисплей, разработанный в НИЛ 4.7 и изготовленный на ОАО «Интеграл» в рамках задания 04.40 ГНТП «БелЭлектроника» [1].

Испытываемый микродисплей через разъем типа BGA (Ball Grid Array) и шлейф DC Flex Cable 12 подключен к разработанному нами специальному контроллеру EK4, который связан с генератором испытательных сигналов через интерфейс-VGA. Входящие в его состав микроконтроллеры A220/A221 производства фирмы Surux (США) – это высокоинтегрированные интегральные схемы, которые поддерживают управление цветными микродисплей-

ными устройствами. Они предназначены для приема цифрового видеосигнала в формате BT656 и преобразования его в аналоговый RGB-сигнал для микродисплея. Микродисплеи получают три различных видеосигнала – по красному, зеленому и синему каналам. Вдобавок для корректной работы также необходимы строчный и кадровый синхросигналы. Контроллеры A220/A221 содержат по три 8-битных ЦАП, видеоусилитель и одну схему 5-вольтовой зарядки для аккумулятора микродисплея. Кроме того, контроллер A221 дополнительно содержит широтно-импульсный модулятор управления яркостью подсветки. Предусмотрено также управление генератором тестовых сигналов VPG 170 с помощью специально разработанного программного обеспечения, которое установлено на персональный компьютер с операционной системой Windows XP [1].

Генератор используется для всех типов микродисплеев, подключается по интерфейсу VGA или BNC коаксиальным кабелем и формирует тестовые поля изображений с различными характеристиками на испытываемом микродисплее. Генератор испытательных сигналов в свою очередь контролируется с помощью программного обеспечения, установленного на персональном компьютере, и обладает возможностями создания новых изображений и хранением данных измерений. Подобный подход оригинален, не описан в литературе и позволяет существенно упростить процесс контроля функционирования микродисплея при сохранении его достоверности.

Дополнительно нами разработана, изготовлена и испытана специальная видеопроекционная система контроля функционирования микродисплеев с оптической схемой на основе двух отражательных активно-матричных LCoS-микродисплеев со светодиодной подсветкой [1, 3]. Она состоит из стереочков и блока управления, соединенных высокочастотным кабелем. В свою очередь в очки кроме пары LCoS-микродисплеев встроена черно-белая ПЗС-камера и шесть инфракрасных светодиодов подсветки, включаемых при плохом освещении или в полной темноте (рисунок 4). Подобная конструкция позволяет использовать систему в автономном режиме при разнообразном применении.

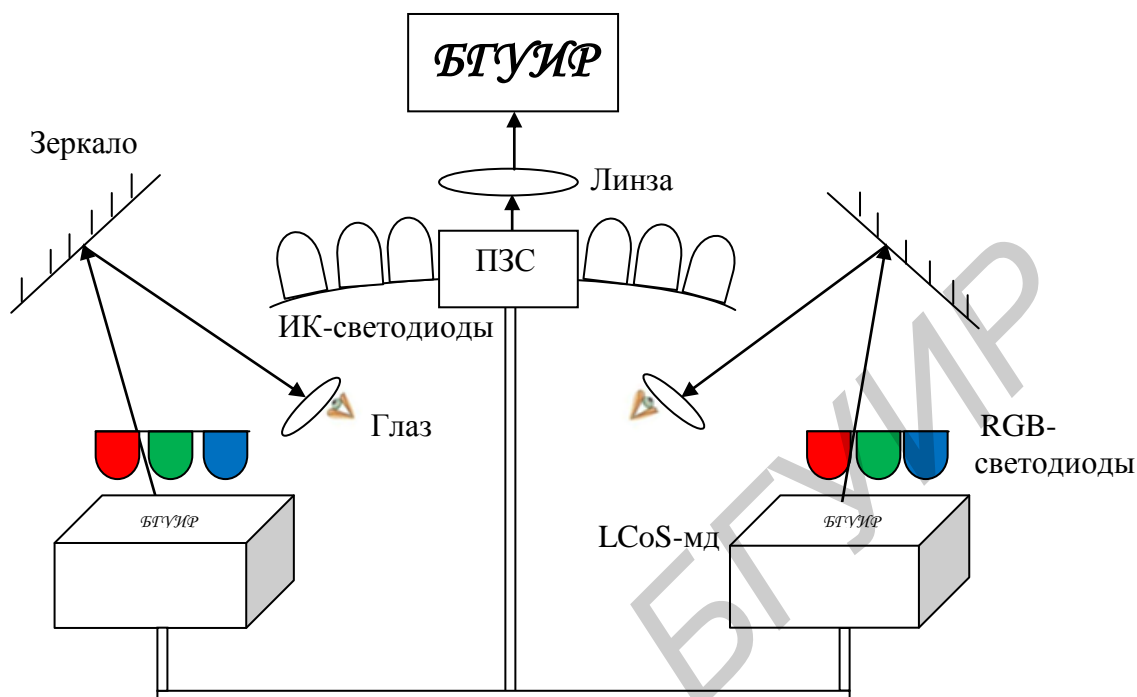


Рисунок 4. – Структура видеопроекционной системы контроля функционирования микродисплеев

При разработке структурной схемы, приведенной на рисунке 4, проведено научное обоснование и осуществлен выбор метода адресации LCoS-микродисплеев. Показано, что использование активно-матричной адресации обеспечивает формирование изображения требуемого качества без существенного усложнения электронной части устройства. Установлено, что для реализации шкалы серого и полноцветного изображения LCoS-микродисплеев необходимо использовать метод последовательного формирования цветных полей, что позволяет увеличить разрешение в 3 раза, обеспечивает упрощение конструкции и снижение стоимости LCoS-микродисплеев. Разработанная электронная архитектура LCoS-микродисплея для видеопроекционной системы персонального типа обеспечивает возможность интеграции строчных и столбцовых драйверов на кремниевом чипе.

В **приложении** приводятся документы, подтверждающие использование результатов диссертационной работы в учебном процессе и в НИЛ 4.7 НИЧ БГУИР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В диссертационной работе разработаны научно обоснованные принципы формирования светоизлучающих элементов на основе структур нанопористый кремний – алюминий для использования в микроминиатюрных дисплеях и в видеопроекционных системах персонального типа различного назначения. Получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

1. Экспериментально установлены закономерности формирования стабильных и воспроизводимых слоев нанопористого кремния толщиной 100–200 нм с размером пор 10–20 нм и пористостью 70–80 % в водных растворах $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ в соотношении 2:1:1:9 за счет замедления процесса локального анодного растворения кремния в присутствии ионов фтора и PO_4 , что позволяет снизить уровень токсичности процесса до безопасного для оператора предела, а также устранить агрессивное воздействие раствора на металлизацию структуры [2, 4, 8, 11, 12, 15]. Впервые выявлена прямо пропорциональная зависимость уменьшения размера пор от 20 до 10 нм при увеличении концентрации NH_4F в растворе с 5 до 25 весовых процентов при неизменной плотности тока анодирования 0,1 mA/cm^2 .

2. Впервые разработаны научные и технологические основы, изготовлена и исследована теоретически и экспериментально светоизлучающая структура с контактом Шоттки нанопористый кремний – алюминий, обеспечивающая яркость излучения не менее 20 Kd/m^2 в области спектра 440–800 нм при напряжении смещения менее 10 В, времена включения – выключения менее 30 нс. Установлена взаимосвязь между параметрами и электрофизическими свойствами подобных структур, что позволило определить оптимальные режимы их формирования [2, 6, 7, 9, 10, 14].

3. Достигнутые параметры светоизлучающих структур – наносекундное быстроедействие, спектральный диапазон и яркость излучения позволили изготовить и исследовать тестовые образцы LED-микродисплеев с пассивно-матричной адресацией пикселей с упрощенной оптической и электронной архитектурой, что позволило снизить их стоимость [2].

4. Впервые разработана методика контроля функционирования микродисплеев, включающая набор отображаемых на нем тестовых полей изображений, генерируемых программно-аппаратным комплексом с последующим визуальным анализом пользователем яркости, разрешающей

способности, цветопередачи и контраста формируемых изображений, в том числе генерируемых программным методом [1, 3].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Предложено использовать пассивно-адресуемые LED-микродисплеи в видеопроекционных системах персонального типа нового поколения с последовательной передачей цветовых полей, обладающих существенным потенциалом для увеличения разрешения и яркости изображения [2, 5, 13, 14].

2. Впервые разработана, изготовлена и испытана многофункциональная видеопроекционная система персонального типа на основе пары LCoS-микродисплеев SVGA-формата, обеспечивающая защиту оптического канала передачи и обработки информации за счет расположения микродисплеев на расстоянии 10–15 мм от глаза оператора, что позволяет фокусировать изображение непосредственно на сетчатку глаза. Подобная система позволяет отображать программно формируемые «виртуальные» изображения различного формата и совмещение с реальными изображениями от ПЗС-камеры, в том числе в условиях полной темноты, что делает их востребованными, в первую очередь пожарными, сотрудниками МЧС, военными и другими специалистами [1, 3, 12].

3. Впервые разработан, изготовлен и испытан программно-аппаратный комплекс функционального контроля микродисплеев различного типа по визуальному отклику, позволяющий существенно упростить и ускорить процедуру контроля [1, 3].

4. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе БГУИР на кафедре микро- и нанoeлектроники в лекционном курсе по дисциплине «Нанотехнологии и наноматериалы в электронике» и в НИЛ 4.7.

5. Дальнейшие исследования будут направлены на усовершенствование разработанных конструкций и технологий, в частности, в плане увеличения разрешающей способности микродисплеев, расширения цветовой гаммы отображаемой информации. Кроме того, в тесном взаимодействии с заинтересованными медицинскими учреждениями может быть проведен расширенный комплекс медико-биологических исследований практического применения видеопроекционных систем персонального типа, в том числе в экстремальных условиях [8].

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных рецензируемых журналах

1. Методика и программно-аппаратный комплекс функционального контроля микродисплейного модуля видеопроекционного устройства персонального типа / А.С. Мохаммед, Е.В. Муха, А.А. Степанов, А.В. Пасынков, А.Г. Смирнов // Доклады БГУИР. – 2014. – № 3 (81). – С. 85–89.
2. Пассивно-матричные микродисплеи светоизлучающего типа / А.С. Мохаммед, Е.В. Муха, А.А. Степанов, А.Г. Смирнов // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4 (82). – С. 29–34.
3. Мохаммед, А.С. Электронная архитектура LCoS-микродисплея для видеопроекционных устройств персонального типа / А.С. Мохаммед, А.Г. Смирнов // Доклады БГУИР. – 2014. – № 7 (85). – С. 96–100.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

4. Nanosized Metal and Anodic Oxide Films with Improved Optical Features For Displays and Photonic Devices / A. Smirnov, A. Stsiapanau, A.S. Mohammed, Y. Mukha, A.A. Hadi, M.I. Dohan // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures, Singapore, 2011. – P. 519–522.
5. Microdisplay's Technology / A.S. Mohammed, A.A. Hadi, M.A. Dohan, A. Smirnov // Перспективные технологии дисплеев и полупроводниковой осветительной техники: материалы 19-го Международного симпозиума, Логойск, Республика Беларусь, март 2011. – С. 170–182.
6. Combined Nanostructured Layers for Display Applications / A. Smirnov, A. Stsiapanau, A.S. Mohammed, Y. Mukha, H.S. Kwok, A. Murauski // Display Week 2011: proc. SID Symposium, Los-Angeles, May, 2011. – P.1385–1387.
7. Sponge like Porous Silicon Formation for Integrated Electroluminescence Light Emitting Devices / A. Smirnov, A. Stsiapanau, E. Mukha, A.S. Mohammed, J. Garcia, A. Hubarevich, J. Solovjov // Аморфные и микрокристаллические полупроводники: сб. трудов, материалы 8-й Международной конференции, С. - Петербург, июнь 2012. – С. 270–271.
8. Controllable Ultrathin Nanoporous Silicon Film's Fabrication for a "Lab-on-chip" Biosensing Platform / A. Smirnov, A. Hubarevich, A. Stsiapanau, A.S. Mohammed, Y. Mukha, J.G. Castello, J.G. Ruperez // Materials of the 9th International Conference, Alicante-Benidorm, Spain, March, 2014. – P. 170–172.

9. Transparent Conductor based on Aluminum Nanomesh / B. Kazarkin, A.S. Mohammed, A. Stsiapanau, S. Zhuk, Y. Satskevich, A. Smirnov // Journal of Physics: Conference series № 541, London, UK, 2014. – P. 1–6.

Тезисы докладов на научных конференциях

10. Наноструктурированный кремний с губчатой структурой для интегральных излучателей света / А. Губаревич, А. Смирнов, А.С. Мохаммед, А. Хади, М. Доха // АДТЛ-2011: тезисы 19-го Международного симпозиума, Логойск, Республика Беларусь, февраль 2011. – С. 23.

11. Тонкие пленки нанопористого кремния, сформированные электрохимическим травлением в растворе фторида аммония, для излучателей интегральной оптоэлектроники / А. Губаревич, Ю. Хонг, А. Смирнов, А.С. Мохаммед, С. Мусаев, А. Хади, М. Доха // АДТЛ-2011: тезисы 19-го Международного симпозиума, Логойск, Республика Беларусь, февраль 2011. – С. 14.

12. Микродисплейное видеопроjectionное устройство персонального типа с передачей данных по радиоканалу / С. Войтенков, А.С. Мохаммед, С. Мусаев, А. Хади, М. Доха, А. Румянцев, А. Смирнов // АДТЛ-2011: тезисы 19-го Международного симпозиума, Логойск, Республика Беларусь, февраль 2011. – С. 15.

13. Механизм светоизлучения в LED-излучателях на основе нанопористого кремния / П. Позняк, А. Степанов, А.С. Мохаммед, Е. Муха // АДТЛ-2012: тезисы 20-го Международного симпозиума, Ялта, Украина, октябрь 2012. – С. 15.

14. Precise nanoporous silicon formation process for an integrated LED source / Y. Mukha, A. Stsiapanau, A.S. Mohammed, A. Hubarevich, A. Smirnov // Abstracts of 1st Int. School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures, St. Petersburg, Russia, March, 2014. – P. 234–235.

15. Al Transparent Conductor made of Aluminum Nanomesh / B. Kazarkin, A. Stsiapanau, A.S. Mohammed, S. Zhuk, Y. Satskevich, A. Smirnov // Abstracts of 1st International School and Conference on Optoelectronics, Photonics Engineering and Nanostructures, St. Petersburg, Russia, March, 2014. – P. 111–112.

РЭЗІЮМЭ

Махаммед Абубакар Садзік

Святлавыпраменьваючыя структуры нанопорысты крэмній – алюміній мікрамініятурных прыстасаванняў адлюстравання інфармацыі

Ключавыя словы: святлавыпраменьваючыя структуры, нанопорысты крэмній, мікрадысплей, відэапраекцыйнае прыстасаванне персанальнага тыпу.

Мэта працы: распрацоўка і комплекснае даследаванне канструктыўна-тэхналагічных варыянтаў святлавыпраменьваючых элементаў на аснове Шоткі структур нанопорысты крэмній – алюміній для мікрадысплеяў, якія выкарыстоўваюцца ў відэапраекцыйных сістэмах персанальнага тыпу, распрацоўка методыкі і праграма-апаратнага комплексу для візуальнага кантролю яркасці, распазнавальнай здольнасці, колераперадачы і кантрасту фарміраваных на мікрадысплее малюнкаў, выпрацоўка практычных рэкамендацый эфектыўнага выкарыстання падобных прылад адлюстравання інфармацыі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: устаноўлена эксперыментальна, што фармаванне стабільных і ўзнаўляемых слаёў нанопорыстага крэмнію талшчынёй 100 – 200 нм з памерам пораў 10–20 нм і порыстасцю 70–80 % магчыма пры выкарыстанні раствораў $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ ў суадносінах 2:1:1:9, што дазваляе знізіць узровень таксічнасці працэсу да абсалютна бяспечнай для аператара мяжы, а таксама мінімізаваць агрэсіўнае ўздзеянне раствору на металізацыю структуры. Упершыню распрацавана, выраблена і даследавана святлавыпраменьваючая структура з кантактам Шоткі (нанопорысты крэмній – алюміній), што забяспечвае яркасць выпраменьвання не менш чым 20 Кд/м^2 ў галіне спектра 440-800 нм пры напружанні зрушэння менш за 10 В, якая дазваляе істотна спрасціць аптычную і электронную архітэктuru відэапраекцыйнага прыстасавання персанальнага тыпу і знізіць яго кошт.

Ступень выкарыстання: вынікі дысертацыйнай працы будуць выкарыстаны пры распрацоўцы пасіўна-адрасуемых LED-мікрадысплеяў для відэапраекцыйных прыстасаванняў адлюстравання інфармацыі персанальнага тыпу новага пакалення с паслядоўнай перадачай каляровых палёў, а таксама перспектыўных біясэнсарных платформаў тыпу “Lab-on-Chip” с выкарыстаннем нанаструктураваных матэрыялаў.

Галіна прымянення: відэапраекцыйныя прыстасаванні адлюстравання інфармацыі персанальнага тыпу, перспектыўныя біясэнсарныя платформы.

РЕЗЮМЕ

Мохаммед Абубакар Саддик

Светоизлучающие структуры нанопористый кремний – алюминий микроминиатюрных устройств отображения информации

Ключевые слова: светоизлучающие структуры, нанопористый кремний, микродисплей, видеопроекционная система персонального типа.

Цель работы: разработка и комплексное исследование конструктивно-технологических вариантов светоизлучающих элементов на основе Шоттки-структур нанопористый кремний – алюминий для микродисплеев, используемых в видеопроекционных системах персонального типа, разработка методики и программно-аппаратного комплекса для визуального контроля яркости, разрешающей способности, цветопередачи и контраста формируемых на микродисплее изображениях, выработка практических рекомендаций эффективного использования подобных устройств отображения информации.

Полученные результаты и их новизна: установлено экспериментально, что формирование стабильных и воспроизводимых слоев нанопористого кремния толщиной 100–200 нм с размером пор 10–20 нм и пористостью 70–80 % возможно при использовании растворов $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ в соотношении 2:1:1:9, что позволяет снизить уровень токсичности процесса до безопасного для оператора предела, а также устранить агрессивное воздействие раствора на металлизацию структуры. Впервые разработана, изготовлена и исследована светоизлучающая структура с контактом Шоттки нанопористый кремний – алюминий, обеспечивающая яркость излучения не менее 20 Кд/м^2 в области спектра 440–800 нм при напряжении смещения менее 10 В и позволяющая существенно упростить оптическую и электронную архитектуру микродисплеев и снизить их стоимость.

Рекомендации по использованию: результаты диссертационной работы будут использованы при разработке пассивно-адресуемых LED-микродисплеев для видеопроекционных систем персонального типа нового поколения с последовательной передачей цветовых полей, а также перспективных биосенсорных платформ типа “Lab-on-Chip” с использованием наноструктурированных материалов.

Область применения: микродисплеи, видеопроекционные устройства отображения информации персонального типа, перспективные биосенсорные платформы.

SUMMARY

Mohammed Abubakar Saddiq

Light emitting structures of nanoporous silicon – aluminum for microminiaturized displays

Key words: light emitting structures, nanoporous silicon, microdisplays, personal video projection systems

The aim of the research: Design and complex investigation of constructive-technological versions of light emitting elements based on Schottky structures nanoporous silicon – aluminum for microdisplays used in personal video projection systems, design of functional control method and soft- hard ware complex of visual control of brightness, resolution, colouring and contrast of microdisplay's images, development of practical recommendations for effective usage of microdisplays.

The results obtained and their novelty: It have been experimentally established that the formation of stable and reproducible silicon nanoporous films with pore sizes of 10–20 nm and porosity of 70–80 % was possible with the aid of diluted salty solution of hydrofluoric acid composed of – $\text{NH}_4\text{F}:\text{H}_3\text{PO}_4:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ in the ratio of 2:1:1:9. This reduced the toxic level to an absolutely safe value for operators and it also minimized the aggressive reaction of the solution on the metal structure. For the very first time, we have designed and investigated a light emitting structure with Schottky contact of nanoporous silicon – aluminum, providing brightness not less than 20 Cd/m^2 in the spectral range of 440–800 nm with operating voltages less than 10 V. Thus, substantially simplifying the optical and electronic architecture of microdisplays at reduced cost can be achieved.

Degree of utilization: results of the thesis will be used during design of passive addressed LED microdisplays for new generations of personal video projection systems with field sequential colour technology as well as for prospective bio sensing platforms of “Lab-on-Chip” type based on nanostructured materials.

Field of application: microdisplays, personal video projection system, prospective bio sensing platforms.

Научное издание

Мохаммед Абубакар Саддик

**СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НАНОПОРИСТЫЙ
КРЕМНИЙ – АЛЮМИНИЙ МИКРОМИНИАТЮРНЫХ
УСТРОЙСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать	Формат	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л.
Уч.- изд. л.	Тираж 60 экз.	Заказ

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
Распространителя печатных изданий

ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6