

Учреждение образования  
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.382/621.315

**ЛЕ**  
**Динь Ви**

**ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО  
КРЕМНИЯ В МАТРИЦЕ ИЗ ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ  
И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ЛАВИННЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА ЕГО ОСНОВЕ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы  
(материалы для электроники и фотоники)

Минск 2020

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

Научный руководитель **Лазарук Сергей Константинович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры микро- и наноэлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Прищепя Сергей Леонидович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

**Ковальчук Наталья Станиславовна**, кандидат технических наук, доцент, заместитель главного инженера открытого акционерного общества «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Оппонирующая организация Государственное научно-производственное объединение «**Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника**» Национальной академии наук Беларуси

Защита состоится «08» октября 2020 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.07 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

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

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » сентября 2020 г.

И. о. ученого секретаря  
совета по защите диссертаций  
доктор физико-математических наук, доцент

Д. Б. Мигас

## ВВЕДЕНИЕ

Кремниевой фотоникой называют синергию (соединение, взаимодействие) двух групп технологий – интегральной электроники и оптики, которая позволяет принципиально изменить систему обработки и передачи данных. Создание кремниевой фотоники позволяет сохранить действие закона Мура, составляющего основу развития информационных технологий. Кремний является основным материалом микроэлектроники, но практически не используется в оптоэлектронике из-за непрямозонного характера его запрещенной зоны. После обнаружения эффективных фото- и электролюминесценций в наноструктурированном кремнии появилась перспектива развития и кремниевой фотоники (оптоэлектроники).

В данный момент особенно остро стоит проблема создания скоростных оптических межсоединений в кремниевых чипах, так как используемые металлические межсоединения из-за резистивно-емкостных задержек не способны работать в гигагерцевом диапазоне частот. Основные трудности формирования кремниевых оптических межсоединений связаны с изготовлением эффективного источника светового сигнала. За последнее время был достигнут прогресс в увеличении эффективности и быстродействия светодиодов на основе кремния, но для их практического использования в качестве источников света необходимо дальнейшее совершенствование их параметров с учетом требований реальных устройств по их эффективности, стабильности и быстродействию. Для улучшения вышеотмеченных параметров светодиодов из наноструктурированного кремния необходимо проведение исследований влияния режимов формирования наноструктурированного кремния на физические явления и процессы при светоизлучении в формируемых наноструктурах.

Отдельно следует отметить проблемы интеграции создаваемых новых устройств с кремниевой технологией ИС. Используемые технологические операции при изготовлении светодиодных устройств не должны приводить к разрушению ранее сформированных кремниевых приборов, то есть должно выполняться требование совместимости используемых технологий.

Все вышесказанное определяет актуальность исследований, направленных на формирование наноструктурированного кремния и интегральных светодиодов на его основе.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с научными программами, темами

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» от 29.12.2017 № 843-о и соответствует подразделам 6 «Электроника и фотоника» и 8 «Многофункциональные материалы и технологии» приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь от 12 марта 2016–2020 гг., утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г., № 190.

Работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках Государственных программ научных исследований (ГПНИ) «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2016–2020 гг., подпрограмма «Микро- и наноэлектроника»: Задания 3.3.02 ГПНИ «Разработка и исследование физических процессов и технологических режимов создания высоколокальных структур на кремнии, обеспечивающих оптико-электронную передачу сигналов для производства конкурентоспособных изделий микро- и оптоэлектроники» (подзадание БГУИР: «Разработать оптический метод гальванической развязки кремниевых ИС на основе Si/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> светодиодов и фотоприемников» (с 2016 по 2018 г., № ГР 20162642); Задания 3.5.05 ГПНИ «Разработка и оптимизация технологии создания низкоразмерных структур на кремнии, обеспечивающих оптико-электронную передачу сигналов для производства конкурентоспособных изделий микро- и оптоэлектроники» (подзадание БГУИР: «Разработка и оптимизация технологии формирования гальванической развязки кремниевых ИС на основе Si/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> светодиодов и фотоприемников») (с 2019 г. по настоящий момент, № ГР 20192494).

### Цель и задачи исследования

*Целью диссертационной работы* является установление закономерностей формирования наноструктурированного кремния в матрице из оксида алюминия электрохимическим анодным окислением композитных пленок алюминий + кремний, исследование их структурных, электрофизических и оптических свойств и создание на их основе лавинных светодиодов для оптических межсоединений элементов интегральных микросхем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ исследований и разработок по формированию пористого кремния (ПК) и пористого оксида алюминия (ПОА) и перспективных областей их применения в твердотельной электронике.

2. Разработать методику формирования наноструктурированного кремния в матрице из анодного оксида алюминия.

3. Исследовать закономерности образования наноструктурированного кремния в матрице из анодного оксида алюминия (АОА).

4. Исследовать структурные, электрофизические и оптические свойства наноструктурированного кремния в матрице из анодного оксида алюминия.

5. Разработать, изготовить и исследовать лавинные светоизлучающие диоды на основе наноструктурированного кремния, встроенного в матрицу из анодного оксида алюминия.

**Объект исследования:** в качестве объекта исследования выбраны наноструктурированные пленки, полученные электрохимическим анодированием кремния, алюминия и композитных пленок алюминий + кремний.

**Предмет исследования:** структурные, электрофизические и оптические свойства наноструктурированного кремния в матрице из анодного оксида алюминия и закономерности изменения этих свойств в зависимости от условий изготовления и их эксплуатации в приборах интегральной электроники, а также лавинные светоизлучающие диоды на основе наноструктурированного кремния, встроенного в матрицу из анодного оксида алюминия.

### **Научная новизна**

1. Сформированы электролюминесцентные структуры на основе анодного оксида алюминия со встроенными кристаллическими наночастицами кремния с минимальным размером в диапазоне 3–5 нм, что обеспечивает стабильную электролюминесценцию (более 1000 ч непрерывного функционирования) с пиком в диапазоне от 560 до 670 нм, при этом размеры кремниевых наночастиц и положения пика электролюминесценции регулируются режимами формирования структур, а именно температурой подложек, на которые осаждаются нанокompозитные пленки.

2. Показано, что пористый оксид алюминия, сформированный в водном растворе (0,4–4) М ортофосфорной кислоты, имеет встроенный отрицательный заряд плотностью от  $1,2 \cdot 10^{-7}$  до  $2,3 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup>, что позволяет использовать его в качестве охранного диэлектрика лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния, что в конечном счете обеспечивает увеличение напряжения лавинного пробоя на 20–40 %, уменьшение барьерной емкости диодов и увеличение их быстродействия до гигагерцевого диапазона частот.

3. Разработана оригинальная конструкция оптических межсоединений, состоящая из лавинных светодиодов на основе наноструктурированного

кремния, сформированных на двух кремниевых кристаллах, расположенных напротив друг друга, в этом случае оптический сигнал от лавинных светодиодов первого кремниевого кристалла проходит через сквозные отверстия оптического интерпозера и регистрируется лавинными диодами второго кремниевого кристалла, функционирующими в режиме фотодетектора с коэффициентом передачи по току до 0,2 %, при импульсном режиме работы диодов.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Совместное осаждение алюминия и кремния при магнетронном распылении композиционных мишеней, содержащих 25–45 ат.% кремния, на кремниевые подложки, нагретые до 50–300 °С, и последующее электрохимическое анодное окисление образовавшейся композитной пленки в водных растворах неорганических кислот обеспечивают формирование оксида алюминия со встроенными в него кристаллическими частицами кремния с минимальным размером 3–5 нм и средним размером, увеличивающимся от 6 до 8 нм по мере повышения температуры подложки в процессе осаждения, что связано с ускоренной миграцией атомов кремния при более высокой температуре и их конденсацией на образовавшихся кристаллических кремниевых зародышах.

2. Пленки анодного оксида алюминия со встроенными кристаллическими наночастицами (кристаллитами) кремния демонстрируют фото- и электролюминесценцию с максимумом интенсивности при комнатной температуре, смещающимся от 670 к 560 нм по мере уменьшения размеров кремниевых частиц при понижении температуры подложки в процессе осаждения композитной пленки от 300 до 50 °С, что является следствием квантового ограничения движения электронов в этих кристаллитах, при этом воспроизводимость люминесцентных характеристик после хранения образцов в течение 1000 ч свидетельствует о стабильности их состава и структуры, что главным образом связано с отсутствием контакта кремниевых наночастиц с атмосферным кислородом.

3. Электрохимическое анодное окисление алюминия в электролитах на основе водного раствора ортофосфорной кислоты при ее концентрации (0,4–4) М обеспечивает формирование анодных оксидных слоев с отрицательным поверхностным потенциалом за счет встроенного отрицательного электрического заряда с плотностью от  $1,2 \cdot 10^{-7}$  до  $2,3 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup>, контролируемого анионными комплексами, попадающими в оксидный слой при анодировании, что позволяет использовать эти слои в качестве охранных областей лавинных светодиодов из наноструктурированного

кремния в матрице из анодного оксида алюминия, обеспечивающих увеличение напряжения лавинного пробоя на 20–40 %, уменьшение барьерной емкости диода и увеличение его быстродействия до гигагерцевого диапазона частот.

4. Два идентичных лавинных светодиода на основе наноструктурированного кремния в матрице из анодного оксида алюминия, расположенные напротив друг друга и разделенные микроканальной кремниевой пластиной со сквозными отверстиями диаметром 5–10 мкм, образуют оптоэлектронную пару для оптических межсоединений интегральных микросхем, в которой в зависимости от питающего напряжения один из диодов выполняет функцию источника оптического сигнала, а другой – функцию фотодетектора излучения, обеспечивая коэффициент передачи по току не менее 0,2 % при импульсном режиме работы диодов.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад автора, заключающийся в установлении закономерностей формирования наноструктурированного кремния в матрице из оксида алюминия электрохимическим анодным окислением композитных пленок алюминий + кремний, исследовании их структурных, электрофизических и оптических свойств и создании на их основе лавинных светодиодов для оптических межсоединений в интегральной электронике. Совместно со своим научным руководителем доктором физико-математических наук, профессором кафедры микро- и наноэлектроники С. К. Лазаруком определены структура, цель и задачи исследования, обобщены основные научные результаты. Совместно с соавторами публикаций осуществлялась подготовка и проведение исследований, обсуждались полученные результаты.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и республиканских научно-технических конференциях и семинарах: VI Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники» ГГУ им. Франциска Скорины, Гомель, Беларусь, 2017; X, XI Международные научно-технические конференции молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения» БНТУ, Минск, Беларусь, 2017, 2018; XV, XVI, XVII Белорусско-российские научно-технические конференции «Технические средства защиты информации», Минск, Беларусь, 2017, 2018, 2019; 17<sup>th</sup> International Workshop on New Approaches to High-Tech: Nano-Design, Technology, Computer Simulations –

NDTCS, Minsk, Belarus, 2017; 54-я, 55-я научные конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск, Беларусь, 2018, 2019; International Conferences Nanomeeting, Minsk, Belarus, 2017, 2019; Международная научно-техническая конференция «INTERMATIC – 2018» РТУ МИРЭА, Москва, 2018; 10-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники «Мокеровские чтения», НИЯУ «МИФИ», Москва, 2019.

Результаты диссертационных исследований использованы при выполнении ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника» на 2016–2020 годы, подпрограмма «Микро- и наноэлектроника»; внедрены в учебный процесс кафедры микро- и наноэлектроники БГУИР и Ханойского научно-технического университета (University of Science and Technology of Hanoi).

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 22 научных работах. Из них 5 статей объемом 2,5 авторского листа в рецензируемых научных журналах в соответствии с пунктом 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 6 публикаций в материалах и сборниках трудов научных конференций, 11 тезисов докладов на научных конференциях.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из оглавления, перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, библиографического списка и 1 приложение. Общий объем диссертационной работы составляет 120 страниц, из них 75 страниц основного текста, 42 рисунка на 41 странице, 4 таблицы на 7 страницах, библиографический список из 150 наименований на 12 страницах, список публикаций автора из 22 наименований на 4 страницах, 1 приложение на 4 страницах.

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Первая глава** содержит обзор литературы, в котором рассмотрены история получения, структурные и электрофизические свойства пористого кремния и анодного оксида алюминия, а также их применения в твердотельной электронике. Проведен анализ развития лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния, на основе которых разработаны оптопары для оптоэлектронных преобразований, что делает возможным создание оптических межсоединений как внутри кремниевых чипов, так и между соседними чипами. В этой же главе показано, что возможность управления



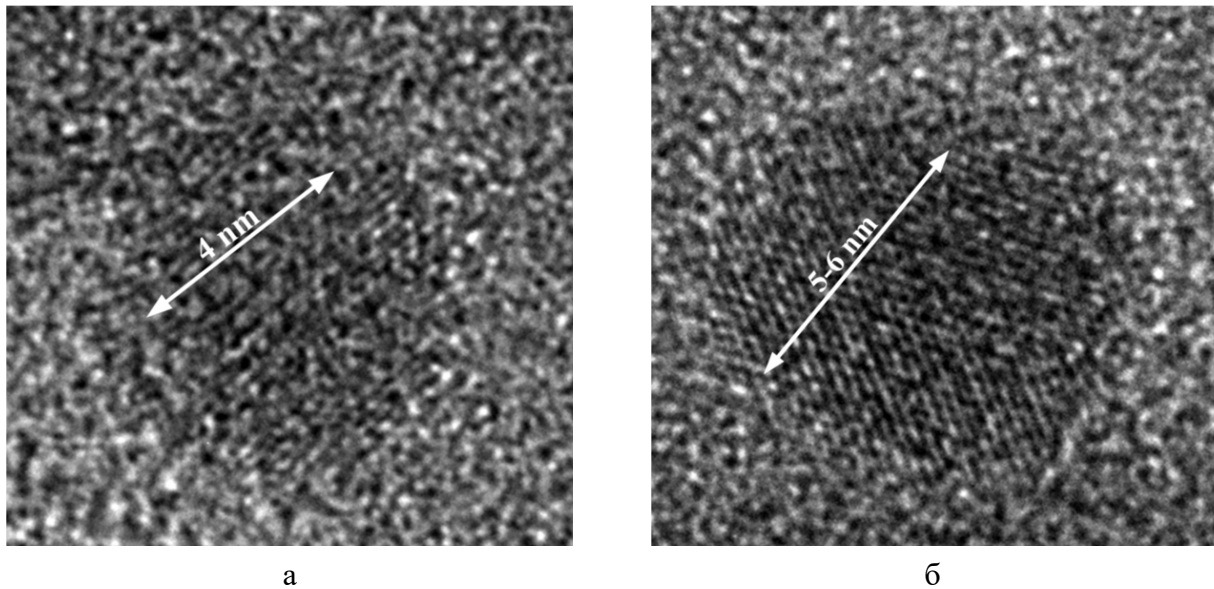
размерами нанометрового диапазона при электрохимическом анодировании кремния и алюминия делает этот метод перспективным для развития технологии формирования элементов и систем твердотельной электроники, в частности, появляются перспективы для развития кремниевой фотоники (оптоэлектроники).

Во **второй главе** предложены методики подготовки образцов и методы исследования структуры и свойств формируемых пленок на основе наноструктурированного кремния и анодного оксида алюминия.

Формирование наноструктурированного кремния, встроенного в матрицу анодного оксида алюминия, проводили при помощи магнетронного распыления композиционной мишени, содержащей алюминий и кремний. Содержание кремния варьировалось от 25 до 45 ат.%. Температура предварительного нагрева кремниевых подложек, на которые осаждали композитные пленки, варьировалась в диапазоне от 50 до 300 °С. Магнетронно-осажденные пленки, подвергали электрохимической анодной обработке, при которой за счет различия скорости анодирования алюминия и кремния формировали слои наноструктурированного кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу.

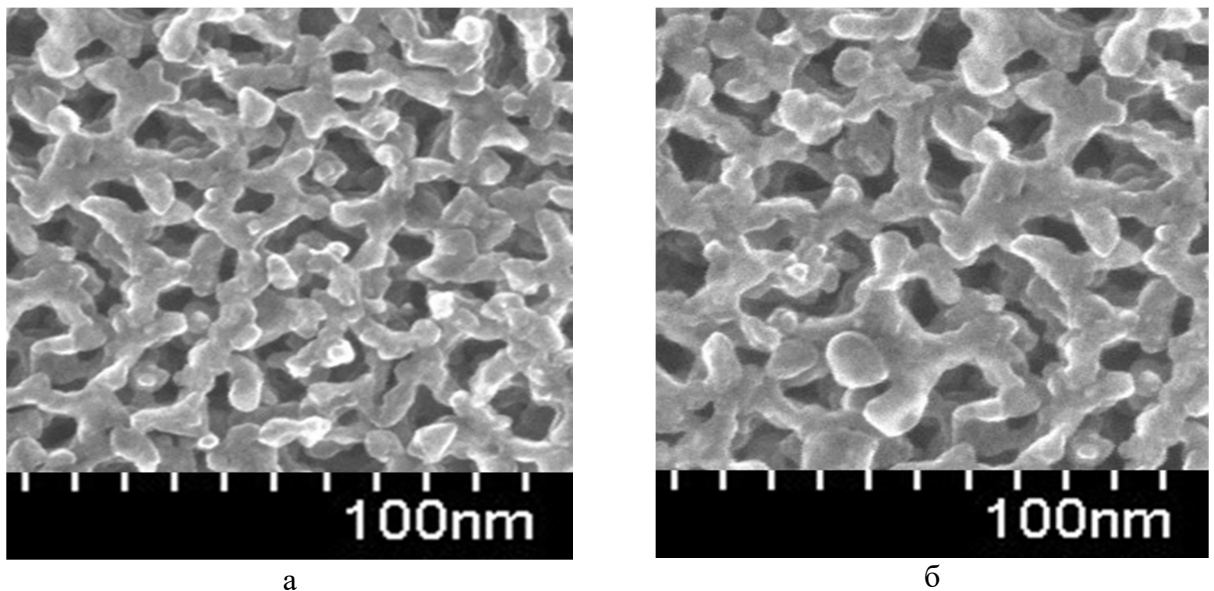
В **третьей главе** приведены результаты исследования структурных и электрофизических свойств слоев пористого кремния и пористого оксида алюминия. На рисунке 1 представлены фотографии кремниевых наночастиц, полученные при помощи просвечивающей электронной микроскопии. Рисунок 1, а соответствует нанокompозитным пленкам, осажденным на кремниевые подложки, нагретые до 100 °С, а рисунок 1, б – нанокompозитным пленкам, осажденным на подложки, нагретые до 300 °С. Кремниевые наночастицы в случае нагрева подложки до 100 °С имеют кристаллическую структуру с минимальным размером 4 нм, а в пленках, осаждаемых на подложки, нагретые до 300 °С, минимальные размеры кремниевых наночастиц составляют 5–6 нм.

Исследование структурных свойств нанокompозитных пленок, осажденных при температуре кремниевых подложек 50 °С, показало, что минимальные размеры кремниевых наночастиц достигали 3 нм, а максимальные 10 нм, при этом средний размер кремниевых наночастиц составлял 6 нм. Аналогичные размеры для нанокompозитных пленок, осажденных при температуре подложек 300 °С, составляли 5, 15 и 8 нм соответственно (рисунок 2).



а – 100 °С; б – 300 °С

**Рисунок 1. – ПЭМ-изображения кремниевых наночастиц, полученных при осаждении на подложки с различными температурами**

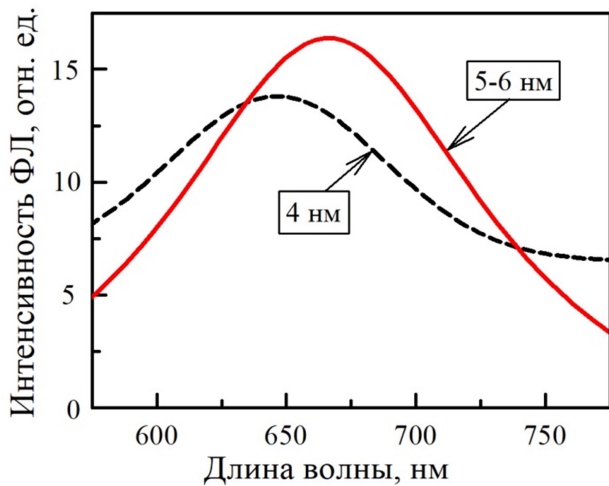


а – 50 °С; б – 300 °С

**Рисунок 2. – СЭМ-изображения кремниевых наноструктур в композитных пленках после селективного вытравления алюминиевой фазы при осаждении на подложки с различными температурами**

При уменьшении размеров кремниевых нанокристаллов происходит сдвиг максимума фотолюминесценции в область более коротких длин волн, так называемый «голубой сдвиг». Максимум спектра фотолюминесценции для структур с кремниевыми наночастицами меньшего размера (4 нм) соответствует 645 нм, аналогичный параметр для больших кремниевых наночастиц (5–6 нм) составляет 660 нм (рисунок 3).

Полученный результат объясняется тем, что атомы кремния, осаждаемые в процессе магнетронного распыления на более холодную подложку, менее



**Рисунок 3. – Спектры фотолюминесценции структур с кремниевыми наночастицами различных размеров**

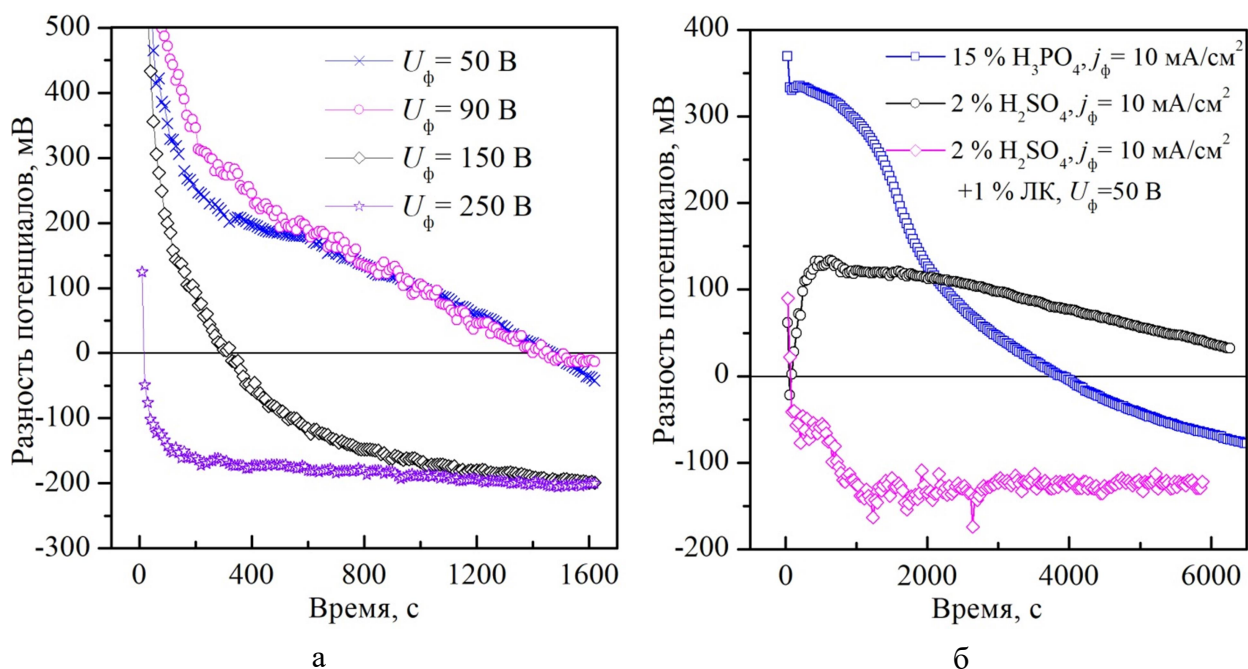
подвижны по сравнению с атомами на нагретой подложке. То есть пониженная температура подложек ограничивает миграционную активность кремниевых атомов, что приводит к образованию кремниевых наночастиц меньшего размера. Совместное магнетронное осаждение алюминия и кремния на подложки, нагретые до 50 °С, обеспечивает формирование кремниевых наночастиц размером до 3 нм и люминесценцию с пиком около 560 нм, однако такие пленки обладают недостаточной механической прочностью из-за низкой адгезии к подложке, что приводит к отслаиванию формируемых пленок при их толщинах более 1 мкм. Тем не менее при дальнейшей оптимизации технологии вполне возможно использование и этого температурного диапазона. Уменьшение длины волны фотолюминесценции в исследуемых структурах является следствием квантового ограничения движения электронов в формируемых кристаллитах (см. рисунок 3).

На рисунке 4 представлены временные зависимости разности потенциалов между алюминиевыми электродами, покрытыми анодными оксидными пленками, и контрольными алюминиевыми электродами без анодных оксидов. Отсчет времени начинался сразу после окончания анодного процесса, который проводили в 1%-ном водном растворе лимонной кислоты. Как видно из рисунка 4, а, сразу после окончания процесса анодирования на алюминиевых электродах, покрытых анодными оксидами, имеется положительный электрический потенциал относительно контрольных алюминиевых электродов. Далее с течением времени наблюдается постепенное уменьшение этого потенциала с переходом в область отрицательных значений. Причем для оксидов большей толщины, сформированных при более высоких напряжениях формовки, переход к отрицательным значениям происходит быстрее, чем для анодных оксидов меньшей толщины.

Аналогичное поведение наблюдалось при исследовании вольт-временных характеристик пористых анодных оксидов, получаемых в электролитах на основе водных растворов серной и ортофосфорной кислот (рисунок 4, б). При этом для пленок, выращенных в электролите на основе ортофосфорной кислоты, конечное значение разности потенциалов составило – 100 мВ. Этот же

подвижны по сравнению с атомами на нагретой подложке. То есть пониженная температура подложек ограничивает миграционную активность кремниевых атомов, что приводит к образованию кремниевых наночастиц меньшего размера. Совместное магнетронное осаждение алюминия и кремния на подложки, нагретые до 50 °С, обеспечивает формирование кремниевых наночастиц размером до 3 нм и люминесценцию с пиком около 560 нм, однако такие пленки обладают недостаточной механической

параметр для пленок, выращенных в электролите на основе серной кислоты, уменьшался до нулевого значения.

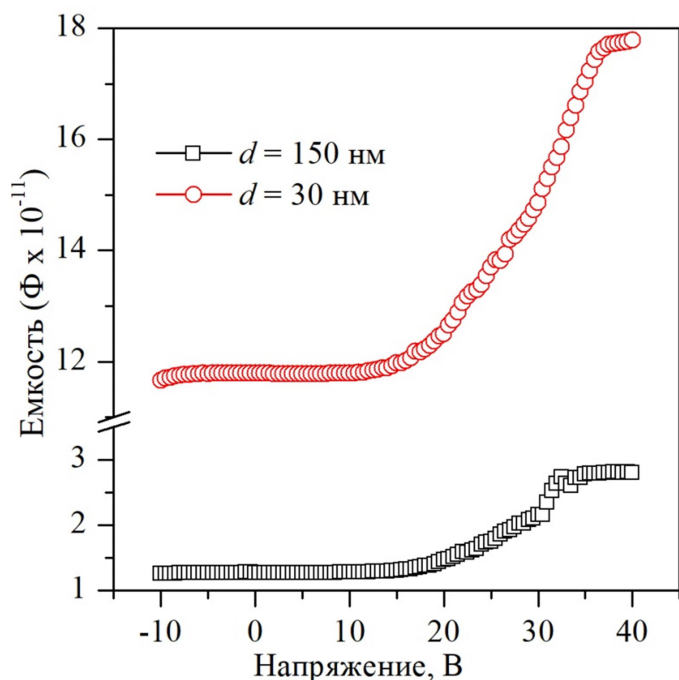


а – 1%-ный водный раствор лимонной кислоты;  
б – электролиты для пористого анодирования

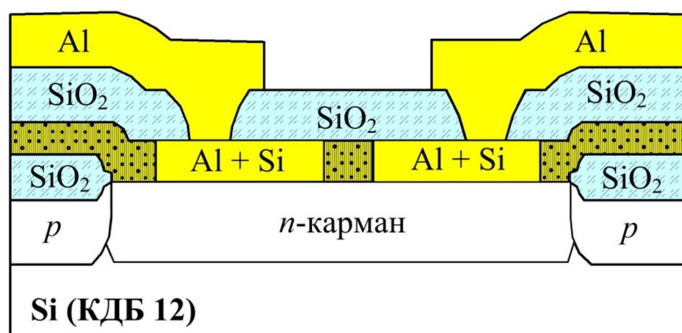
**Рисунок 4. – Вольт-временные характеристики между контрольным алюминиевым электродом и исследуемыми образцами анодных оксидных пленок, выращенных в различных электролитах, после окончания анодного процесса**

Особое внимание заслуживает кривая, которая описывает поведение поверхностного потенциала оксида, полученного при двухстадийном анодировании. На первой стадии анодный оксид формировали в электролите на основе водного раствора серной кислоты, на второй стадии проводили анодную обработку в электролите на основе водного раствора лимонной кислоты с достижением напряжения формовки в 50 В. При этом между пористым оксидом, сформированным на первой стадии, и алюминием формировали слой оксида барьерного типа. Поведение поверхностного потенциала в этом случае практически полностью повторяет поведение кривых, соответствующих оксидам, выращенным в водном растворе лимонной кислоты при одной стадии анодирования.

Чтобы оценить плотность этих зарядовых состояний, были проведены измерения вольт-фарадных характеристик анодных оксидов алюминия на кремниевых подложках *n*-типа проводимости. На рисунке 5 представлены вольт-фарадные характеристики анодного оксида алюминия, сформированного в водном растворе лимонной кислоты при различных напряжениях формовки. Как видно из рисунка, изменение емкости происходит при положительных напряжениях смещения, что свидетельствует об отрицательном электрическом заряде в сформированных анодных оксидах.



**Рисунок 5. – Вольт-фарадные характеристики анодных оксидов алюминия различной толщины на кремниевых подложках *n*-типа проводимости (алюмооксидные пленки формировались в 1%-ном водном растворе лимонной кислоты)**



**Рисунок 6. – Структура лавинных светодиодов, сформированных по технологии КМОП ИС**

здания *n*-карманов в окнах межкомпонентного диэлектрика  $\text{SiO}_2$ .

Ключевыми технологическими операциями, используемыми при формировании лавинных светодиодов, являются следующие: 1) осаждение алюминиево-кремниевой нанокompозитной пленки толщиной 1 мкм магнетронным распылением составной мишени, состоящей из 75 ат.% алюминия и 25 ат.% кремния; 2) фотолитография, определяющая геометрию электродов светодиодов и разделительного диэлектрика  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 3) локальное сквозное электрохимическое анодирование алюминиево-кремниевой пленки, при котором алюминий полностью переходит в оксид алюминия, а кремниевые

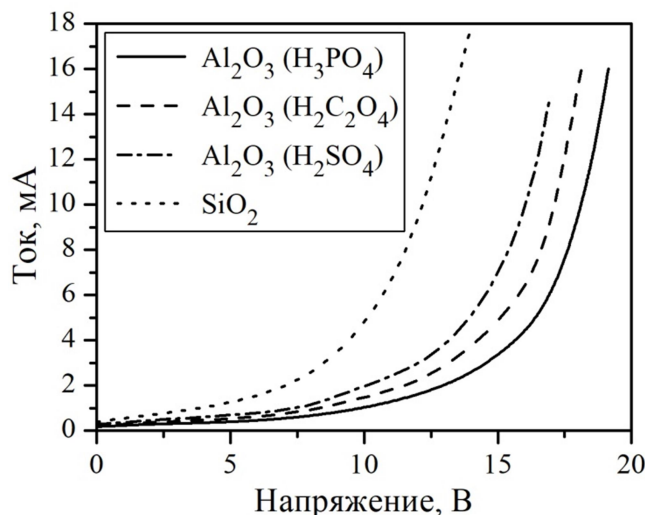
На основе полученных вольт-фарадных характеристик была рассчитана плотность зарядовых состояний в исследуемых оксидных пленках. Значение этого параметра находилось в диапазоне от  $1,2 \cdot 10^{-7}$  до  $2,3 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup>.

В четвертой главе проведены исследования электролюминесцентных структур на основе наноструктурированного кремния, встроенного в матрицу анодного оксида алюминия. Разработаны экспериментальные образцы лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния, а также 3D оптоэлектронная пара для оптических межсоединений на его основе.

Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния формировали по технологии, интегрированной с технологией КМОП ИС (рисунок 6). В частности, диодные структуры формировали внутри *n*-карманов КМОП ИС. То есть предварительно кремниевые пластины прошли типовой маршрут изготовления КМОП ИС до операции со-



наноструктуры частично окисляются, в результате чего формируются кремниевые наночастицы, покрытые собственным окислом, встроенные в матрицу оксида алюминия. Далее сформированные светодиодные структуры на кремниевых подложках проводили по стандартному маршруту изготовления КМОП ИС с двухуровневой алюминиевой металлизацией и с межуровневым диэлектриком на основе  $\text{SiO}_2$  (см. рисунок 6).

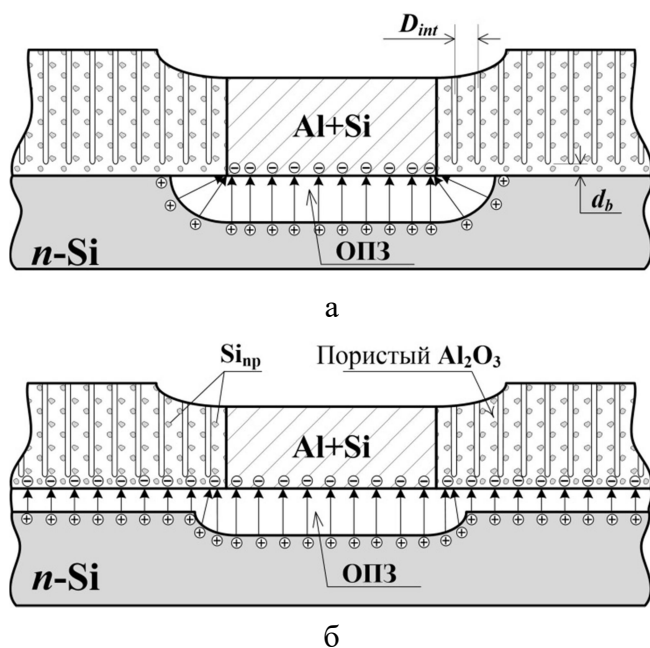


**Рисунок 7. – Вольт-амперные характеристики контакта алюминий – кремний с разделительным диэлектриком – оксидом алюминия, полученным анодированием в разных электролитах. Разделительный диэлектрик – оксид кремния приведен для сравнения**

На рисунке 7 представлены вольт-амперные характеристики контакта алюминий – кремний, когда металлические электроды разделены анодным оксидом алюминия со встроенными кремниевыми наночастицами, полученным анодированием в различных электролитах (растворы серной, щавелевой и ортофосфорной кислот). Как видно из графиков, наибольшее напряжение лавинного пробоя наблюдается в диодных структурах с анодным оксидом, сформированным в электролите на основе водного раствора ортофосфорной кислоты. В этих же структурах имеют место максимальные эффективность и интенсивность

светоизлучения, так как именно при увеличении обратного напряжения наблюдаются максимальные значения этих параметров.

Наблюдаемая зависимость объясняется влиянием встроенного электрического заряда в анодном оксиде алюминия на область пространственного заряда в кремнии. В планарных структурах при контакте металл – полупроводник по периметру контакта наблюдается эффект концентрации силовых линий электрического поля из-за пространственного заряда в кремнии (рисунок 8, а). Увеличение напряженности поля на краях планарного контакта приводит к тому, что пробойные эффекты начинаются на границе анодный оксид алюминия/алюминий. При этом встроенный отрицательный электрический заряд внутри анодного оксида создает также область пространственного заряда в кремнии, как это показано на рисунке 8, б.



**а** – встроенный заряд разделительного диэлектрика отсутствует;  
**б** – встроенный заряд разделительного диэлектрика отрицательный  
**Рисунок 8.** – Эффект концентрации силовых линий электрического поля из-за области пространственного заряда в кремнии

Наличие этого встроенного электрического заряда способствует уменьшению эффекта концентрации силовых линий на краях диодных структур (схематически показано на рисунке 8, б). Следует отметить, что ранее автором было установлено, что анодный оксид алюминия, сформированный в электролите на основе водного раствора ортофосфорной кислоты, имеет максимальную плотность встроенного отрицательного заряда по сравнению с оксидами, сформированными в электролитах на основе водных растворов щавелевой и серной кислот. Именно этим объясняется различие вольт-амперных характеристик, приведенных на рисунке 7. На этом же рисунке приведены вольт-

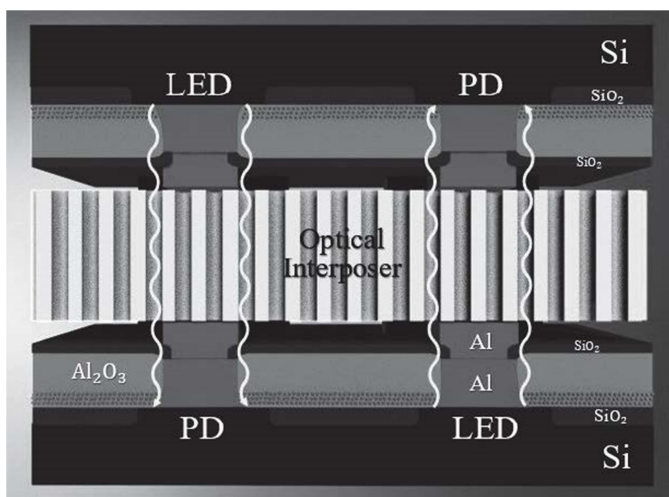
амперные характеристики диодов с разделительным диэлектриком на основе оксида кремния, имеющего положительный встроенный электрический заряд. Различия характеристик диодов еще раз подтверждают отмеченные выше закономерности влияния встроенного заряда на пробивное напряжение.

Таким образом, встроенный отрицательный электрический заряд на границе анодного оксида алюминия выполняет функцию защиты контакта Шоттки от краевых эффектов (по аналогии с охранными областями), что улучшает качество вольт-амперных характеристик контактов за счет увеличения напряжения лавинного пробоя и перехода от «мягких» пробойных характеристик к более «резким» (см. рисунок 7).

Экспериментальная структура системы оптических межсоединений представлена на рисунке 9. Конструктивно она состоит из двух контактов Шоттки, а также из слоя анодного оксида алюминия, разделяющего алюминиевые электроды. Светодиоды созданы на основе слоя анодного оксида алюминия, содержащего кремниевые наночастицы, излучающие свет в режиме лавинного пробоя контакта Шоттки (LED). Эти же контакты Шоттки при обратном смещении до напряжения пробоя, соответствующего 12 В, чувствительны к наружному световому сигналу, поэтому способны функционировать как фотодиоды (PD).

Кроме кремниевых кристаллов с диодными структурами, способными излучать и регистрировать оптический сигнал, для реализации системы оптических межсоединений изготавливались кремниевые кристаллы со сквозными отверстиями диаметром 5–10 мкм. Такие кристаллы пропускают оптический сигнал через сквозные отверстия с коэффициентом пропускания 20–25 % (см. рисунок 9).

Разработанная экспериментальная структура работает следующим образом. Электрический сигнал обратного смещения на светодиодах величиной более 12 В вызывает излучение света вдоль алюминиевых электродов. Излучаемый свет проходит через сквозные отверстия в кремниевых кристаллах и далее регистрируется при помощи диодных структур, расположенных на противоположном кремниевом кристалле и функционирующих в режиме фотодиодов, как схематично показано на рисунке 9.

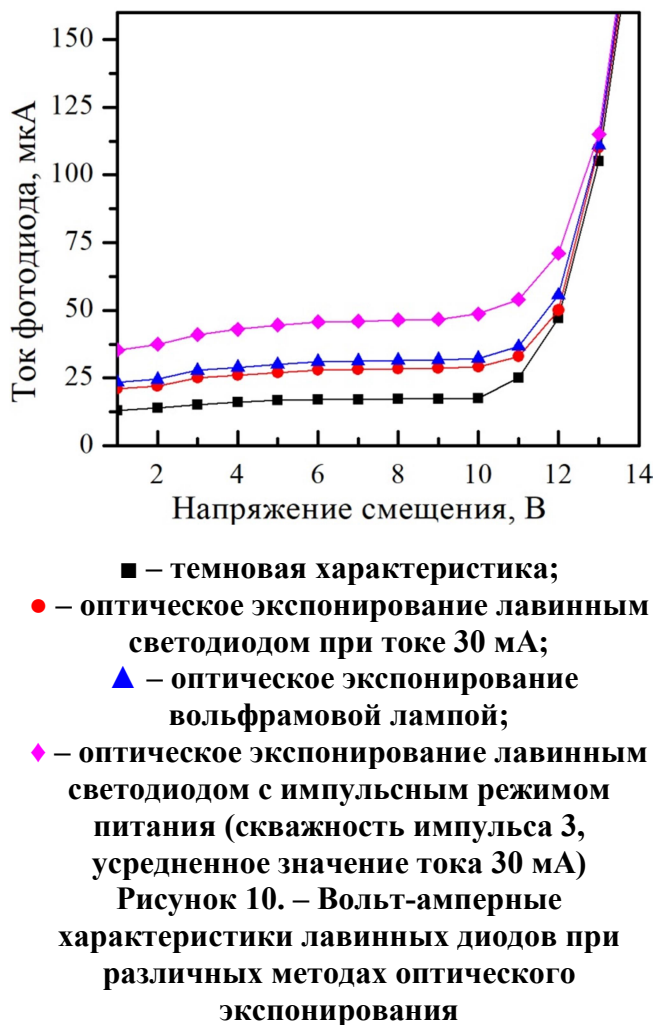


**Рисунок 9. – Схема функционирования междучиповых оптических межсоединений**

На рисунке 10 представлены вольт-амперные характеристики лавинных диодов, работающих в режиме фотодиодов. Как видно из характеристик, световой сигнал регистрируется в диапазоне обратного смещения от 0 до 12 В. После превышения величины обратного смещения 12 В вольт-амперные характеристики со световым экспонированием и без него практически не различаются, что может быть объяснено внутренним светоизлучением вследствие лавинного пробоя. Здесь же для сравнения представлена характеристика исследуемых структур при экспонировании от внешнего оптического источника – вольфрамовой лампы накаливания, обеспечивающей поверхностную плотность мощности излучения  $100 \text{ Вт/см}^2$ . Отклик исследуемых структур на свет вольфрамовой лампы практически не отличается от отклика на излучение лавинного светодиода при напряжении смещения 15 В и токе 30 мА, что позволяет говорить о соизмеримости оптического сигнала обоих источников света.

Как видно из рисунка 10, при импульсном режиме работы лавинного светодиода отклик фотодиода увеличивается более чем в два раза для одинаковых усредненных значений токов через светодиод. То есть эффективность оптопары увеличивается при увеличении амплитудного значения тока светодиода. При этом в интервалах между импульсами имеет место рассеивание джоулева тепла, что обеспечивает надежную работу всей системы.





Особое внимание следует уделить стабильности функционирования лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния, встроенного в алюмооксидную матрицу. Измерения интенсивности светоизлучения при напряжении 14 В и токе 40 мА (рабочая площадь диода  $0,01 \text{ мм}^2$ ) в течение 1000 ч непрерывного функционирования показали отсутствие заметных деградационных эффектов. При этом отклонение интенсивности светоизлучения от среднего значения не превышало 10 %, что лучше аналогичного параметра для светодиодов на основе пористого кремния. Далее следует отметить стабильность параметров и характеристик лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния при их хранении без электрического смещения. В

частности, измерение электрических и оптических параметров светодиодов после двух лет хранения не выявили их заметного изменения, что еще раз демонстрирует преимущество данных светодиодов по сравнению со светодиодами на основе пористого кремния.

Исследование предельной частоты функционирования лавинных светодиодов в зависимости от рабочей площади показали, что при уменьшении площади диодов до  $0,01 \text{ мм}^2$  исследуемые приборы способны работать в гигагерцевом диапазоне частот, что открывает новые возможности для развития кремниевой фотоники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработан метод формирования наноструктурированного кремния, встроенного в матрицу анодного оксида алюминия. Разработанный метод обеспечивает формирование кремниевых наночастиц с минимальным размером до 3 нм при минимальных температурах предварительного нагрева подложек 50 °С, аналогичный параметр при максимальных температурах подложек 300 °С составляет 5 нм [5]. При уменьшении размеров кремниевых наночастиц, встроенных в анодный оксид алюминия, происходит так называемый «голубой сдвиг» фото- и электролюминесценции исследуемого композиционного материала. В частности, уменьшение размеров кремниевых наночастиц от 5 до 3 нм обеспечивает смещение пика фото- и электролюминесценции от 670 до 560 нм [5, 6].

2. Результаты исследования влияния режимов анодирования на зарядовые свойства анодных пленок алюминия показали, что за счет выбора электролита и электрических режимов формовки можно формировать анодный оксид алюминия со встроенным отрицательным электрическим зарядом, при этом плотность электрического заряда может достигать от  $1,2 \cdot 10^{-7}$  до  $2,3 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup>. Использование анодного оксида алюминия со встроенным отрицательным электрическим зарядом в качестве охранного диэлектрика лавинного светодиода позволяет увеличить напряжение лавинного пробоя, уменьшает барьерную емкость диода, увеличивая его быстродействие до гигагерцевого диапазона частот [1, 3, 4, 5, 18, 19].

3. Разработана система оптических межсоединений между кремниевыми кристаллами. Разработанная система основана на кремниевых лавинных светодиодах, которые в зависимости от уровня смещения способны работать как в режиме светоизлучения, так и в режиме фотодетектора. Между кремниевыми кристаллами, на которых сформированы лавинные светодиоды, расположена микроканальная кремниевая пластина, выполняющая роль оптического интерпозера. Световой сигнал от лавинных светодиодов проходит через сквозные микроканальные отверстия оптического интерпозера и регистрируется на другом кремниевом кристалле, где лавинные светодиоды работают в режиме фотодетектора. Коэффициент передачи по току разработанной оптоэлектронной системы достигает  $2 \cdot 10^{-3}$  при импульсном режиме функционирования лавинных светодиодов [2, 5, 7–17, 20–22].

### Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработан метод защиты барьера Шоттки лавинных светодиодов от

краевых эффектов за счет охранного диэлектрика со встроенным отрицательным электрическим зарядом. Разработанный метод может быть использован как для дискретных диодов Шоттки, так и для интегральных диодов, работающих в качестве составных элементов интегральных схем [1, 3, 4, 5, 18, 19].

2. Измерения стабильности фото- и электролюминесценций наноструктурированного кремния, встроенного в матрицу анодного оксида алюминия не показали заметной деградации при хранении на воздухе в течение 2 лет. Также лавинные светодиоды на основе этого наноструктурированного материала при непрерывном функционировании в течение 1000 ч не показали заметных деградационных эффектов. Приведенные результаты открывают перспективы для использования исследуемого материала в кремниевой фотонике, в частности, для изготовления на его основе микродисплейных устройств и оптических межсоединений интегральных микросхем [5, 6].

3. Разработана конструкция оптических межсоединений на основе лавинных светодиодов, использующих наноструктурированный кремний, встроенный в матрицу оксида алюминия в качестве активного материала. Разработанная конструкция оптических межсоединений способна работать в гигагерцевом диапазоне частот, что может увеличить скорость обработки информации устройств интегральной электроники [2, 4, 5, 7–17, 20–22].

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**

### **Статьи в рецензируемых научных журналах**

1. Changes of surface alumina potential and alumina built-in charge after anodization process / Le Dinh Vi , V. V. Dudich, G. G. Rabatuev, A. S. Lazarouk, A. V. Korotkevich // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, № 3–4. – P. 1940058-1–1940058-3.

2. 3-D silicon photonic structures based on avalanche led with interconnections through optical interposer / S. K. Lazarouk, A. A. Leshok, T. A. Kozlova, A. V. Dolbik, Le Dinh Vi, V. K. Ilkov, V. A. Labunov // International Journal of Nanoscience. – 2019. – Vol. 18, № 3–4. – P. 1940091-1–1940091-5.

3. Влияние поверхностного потенциала анодных алюмооксидных пленок на их зарядовые свойства / Ле Динь Ви, О. В. Купреева, В. В. Дудич, В. А. Филипеня, С. К. Лазарук // Доклады БГУИР. – 2019. – № 5 (123). – С. 72–78.

4. Влияние анодного оксида алюминия, используемого в качестве разделительного диэлектрика кремниевых лавинных светодиодов, на их характеристики / Ле Динь Ви, А. Ю. Ключцкий, А. А. Долбик, А. А. Лешок, С. К. Лазарук // Доклады БГУИР. – 2019. – № 7–8 (126). – С. 165–172.

5. Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для оптических межсоединений / Ле Динь Ви, А. А. Лешок, А. В. Долбик, С. Л. Перко, С. К. Лазарук // Доклады БГУИР. – 2020. – Т. 18 (№ 3). – С. 63–71.

### **Статьи в сборниках материалов конференций**

6. Ле, Динь Ви. Формирование пористого кремния с пиком фотолюминесценции в зеленой области видимого диапазона / Ле Динь Ви, В. И. Грицков, Е. А. Масленкова // Актуальные вопросы физики и техники : материалы VI Республиканской науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, Беларусь, 26 апреля 2017 г. – Гомель, 2017. – С. 76–78.

7. Optical interconnects between silicon chips based on light-emitting diodes on nanostructured silicon / A. A. Leshok, A. V. Dolbik, Le Dinh Vi, A. I. Matskevich, V. A. Labunov, V. B. Vysotskii, S. V. Shvedov // Proceedings of International Conference Nanomeeting – 2017: Physics, Chemistry and Application of Nanostructures, Minsk, Belarus, 30 May – 2 June 2017. – Minsk, 2017. – P. 479–482.

8. Optical coupling of silicon chips by microchannel vias interposer / S. Lazarouk, A. Leshok, A. Dolbik, Le Dinh Vi, T. Kozlova, V. Vysotskii, S. Shvedov, V. Saladukha, V. Labunov // Nano-design, technology, computer simulations : proceedings of 17th International workshop on new approaches to high-tech, Minsk, Belarus, 26–27 October 2017. – Minsk, 2017. – P. 58–61.

9. Объемные оптические межсоединения на основе светодиодов из наноструктурированного кремния и микроканальной пластины / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, А. В. Долбик, Ле Динь Ви, А. Г. Черных, В. А. Лабунов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 85–88.

10. Кремниевые лавинные светодиоды и оптические межсоединения на их основе / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, Ле Динь Ви, В. В. Долбик, А. С. Лазарук, А. В. Клопоцкий, С. Л. Перко, В. А. Лабунов // Мокеровские чтения : сб. тр. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники, Москва, Россия, 15–16 мая 2019 г. – М., 2019. – С. 192–193.

11. Планарный алюмооксидный волновод для кремниевых оптических межсоединений / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, Ле Динь Ви, Т. А. Козлова // Мокеровские чтения : сб. тр. 10-й Междунар. науч.-практ. конф. по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ электроники, Москва, Россия, 15–16 мая 2019 г. – М., 2019. – С. 194–195.

### Тезисы докладов на научных конференциях

12. Ле, Динь Ви. Светодиоды на основе наноструктурированного пористого кремния / Ле Динь Ви // Новые направления развития приборостроения : материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, Минск, 26–28 апреля 2017 г. – Минск, 2017. – Т. 2. – С. 48.

13. Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для оптических межсоединений в интегральных схемах / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, Ле Динь Ви, А. С. Сычевич, В. И. Грицков // Технические средства защиты информации: тез. докл. XV Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 6 июня 2017 г. – Минск, 2017. – С. 92.

14. Оптические межсоединения на основе кремниевых светодиодов и микроканальной пластины / Ле Динь Ви, А. И. Мацкевич, С. Л. Перко, Т. А. Козлова, С. К. Лазарук // Новые направления развития приборостроения : материалы 11-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, Минск, 18–20 апреля 2018 г. – Минск, 2018. – С. 264.

15. Ле, Динь Ви. Светоизлучающие диоды на основе нанопористого кремния / Ле Динь Ви // Радиотехника и электроника : материалы 54-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 23–27 апреля 2018 г. – Минск, 2018. – С. 159.

16. Междучиповые оптические межсоединения на основе светодиодов из наноструктурированного кремния и оптического интерпозера из микроканальной кремниевой пластины / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, Ле Динь Ви, А. И. Мацкевич, А. Хиневич, А. Г. Черных // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVI Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 5 июня 2018 г. – Минск, 2018. – С. 55.

17. Перспективы использования светодиодов из наноструктурированного кремния как источников единичных фотонов / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, Ле Динь Ви, А. И. Мацкевич, А. Хиневич, А. Г. Черных // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVI Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 5 июня 2018 г. – Минск, 2018. – С. 55.

18. Ле, Динь Ви. Электретные свойства анодных амоксидных пленок после электрохимического анодирования / Ле Динь Ви // Радиотехника и электроника : материалы 55-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 22–26 апреля 2019 г. – Минск, 2019. – С. 177–178.

19. Зарядовые свойства пленок анодных оксидов вентильных металлов, используемых в мемристорных устройствах / Ле Динь Ви, В. В. Дудич, Г. Г. Рабатуев, А. С. Хиневич, С. Л. Перко, В. В. Фиалковский, Н. А. Григорук, Н. А. Казимиров, Л. П. Томашевич, Р. С. Макаров, С. К. Лазарук // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 11 июня 2019 г. – Минск, 2019. – С. 45.

20. Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для оптоэлектронной обработки информации / С. К. Лазарук, А. А. Лешок, Ле Динь Ви, А. И. Мацкевич, Н. А. Григоруц, С. Л. Перко, А. Ю. Ключцкий // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 11 июня 2019 г. – Минск, 2019. – С. 45.

21. Оптический интерпозер на основе микроканального кремниевого кристалла для оптических межсоединений между кремниевыми микросхемами / Ле Динь Ви, А. Ю. Ключцкий, А. В. Долбик, А. А. Лешок, С. К. Лазарук // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVIII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 09 июня 2020 г. – Минск, 2020. – С. 46.

22. Светоизлучающие диоды на основе нанокристаллического кремния для перспективных квантовых устройств / А. А. Лешок, А. В. Долбик, Ле Динь Ви, С. К. Лазарук // Технические средства защиты информации : тез. докл. XVIII Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 09 июня 2020 г. – Минск, 2020. – С. 47.

## РЭЗІЮМЭ

Ле Дзінь Ві

### **Фарміраванне і ўласцівасці нанаструктураванага крэмнія ў матрыцы з аксіду алюмінія і інтэгральных лавінных святлодыёдаў на яго аснове**

*Ключавыя словы:* порысты крэмній, нанаструктураваныя крэмніевыя часціцы, анодны аксід алюмінія, электрахімічнае анадаванне, электралумінісцэнцыя, крэмніевыя лавінныя святлодыёды.

*Мэта працы:* ўстанаўленне заканамернасцяў фарміравання нанаструктураванага крэмнія ў матрыцы з аксіду алюмінія электрахімічным анодным акісленнем кампазітных плёнак алюміній + крэмній, даследаванне іх структурных, электрафізічных і аптычных уласцівасцяў і стварэнне на іх аснове лавінных святлодыёдаў для аптычных міжзлучэнняў элементаў інтэгральных мікрасхем.

*Метад даследавання:* электрахімічнае аноднае акісленне крэмнія і алюмінія, і іх кампазітных плёнак у электралітах на аснове водных раствораў арганічных і неарганічных кіслот.

*Атрыманыя вынікі і іх навізна:*

– фарміраванне наначасціц крэмнія ў матрыцы аноднага аксіду алюмінія з мінімальным памерам да 3–5 нм пры тэмпературах папярэдняга нагрэву пласцін 50–300 °С;

– распрацаваны метады абароны бар'ера Шотткі лавінных святлодыёдаў ад краевых эфектаў за кошт ахоўнага дыэлектрыка з убудаваным адмоўным электрычным зарадам. У прыватнасці анодны аксід алюмінія з шчыльнасцю адмоўнага электрычнага зарада ад  $1,2 \cdot 10^{-7}$  да  $2,3 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup> дазваляе павялічыць напружанне лавіннага прабою на 20 %, што спрыяе памяншэнню бар'ернай ёмістасці вобласці прасторавага зарада і дазваляе працаваць лавінным святлодыёдам у гігагерцовым дыяпазоне частот;

– распрацавана сістэма 3D-крэмніевай фатоннай структуры па традыцыйнай тэхналогіі КМОП для аптычных міжзлучэнняў паміж крэмніевымі крышталямі, пры гэтым каэфіцыент перадачы па току распрацаванай оптаэлектроннай сістэмы дасягае  $2 \cdot 10^{-3}$  пры імпульсным рэжыме функцыянавання лавінных святлодыёдаў.

*Рэкамендацыі па выкарыстанню і вобласці прымянення:* распрацоўка канструктыўных і тэхнічных рашэнняў оптаэлектроннай сістэмы на аснове лавінных святлодыёдаў, прызначаных для аптычных міжзлучэнняў паміж крэмніевымі крышталямі ў складзе сучасных інфармацыйных сістэм.

**РЕЗЮМЕ**

Ле Динь Ви

**Формирование и свойства наноструктурированного кремния в матрице из оксида алюминия и интегральные лавинные светодиоды на его основе**

*Ключевые слова:* пористый кремний, наноструктурированные кремниевые частицы, анодный оксид алюминия, электрохимическое анодирование, электролюминесценция, кремниевые лавинные светодиоды.

*Цель работы:* установление закономерностей формирования наноструктурированного кремния в матрице из оксида алюминия электрохимическим анодным окислением композитных пленок алюминий + кремний, исследование их структурных, электрофизических и оптических свойств и создание на их основе лавинных светодиодов для оптических межсоединений элементов интегральных микросхем.

*Метод исследования:* электрохимическое анодное окисление кремния и алюминия, и их композитных пленок в электролитах на основе водных растворов органических и неорганических кислот.

Полученные результаты и их новизна:

– формирование наночастиц кремния в матрице анодного оксида алюминия с минимальным размером до 3–5 нм при температурах предварительного нагрева пластин 50–300 °С;

– разработан метод защиты барьера Шоттки лавинных светодиодов от краевых эффектов за счет охранный диэлектрика со встроенным отрицательным электрическим зарядом. В частности, анодный оксид алюминия с плотностью отрицательного электрического заряда от  $1,2 \cdot 10^{-7}$  до  $2,3 \cdot 10^{-6}$  Кл/см<sup>2</sup> позволяет увеличить напряжение лавинного пробоя на 20 %, что способствует уменьшению барьерной емкости области пространственного заряда и позволяет работать лавинным светодиодам в гигагерцевом диапазоне частот;

– разработана система 3D-кремниевой фотонной структуры по традиционной технологии КМОП для оптических межсоединений между кремниевыми кристаллами, при этом коэффициент передачи по току разработанной оптоэлектронной системы достигает  $2 \cdot 10^{-3}$  при импульсном режиме функционирования лавинных светодиодов.

*Рекомендации по использованию и область применения:* разработка конструктивных и технических решений оптоэлектронной системы на основе лавинных светодиодов, предназначенных для оптических межсоединений между кремниевыми кристаллами в составе современных информационных систем.



**SUMMARY**

Le Dinh Vi

**Formation and properties of nanostructured silicon in an alumina matrix and integrated avalanche LEDs based on it**

*Key words:* porous silicon, nanostructured silicon particles, anodic alumina, electrochemical anodization, electroluminescence, silicon avalanche LEDs.

*The purpose of the work:* the establishment of the formation regularities of nanostructured silicon in an alumina matrix by the electrochemical anodic oxidation of aluminum + silicon composite films, the investigation of their structural, electrophysical and optical properties and the creation of avalanche LEDs based on them for optical interconnections of integrated circuits.

*Research method:* electrochemical anodic oxidation of silicon, aluminum and their composite films in electrolytes based on aqueous solution of organic and inorganic acids.

*The results obtained and their novelty:*

– the formation of silicon nanoparticles in an anodic alumina matrix with a minimum size of up to 3–5 nm at a preliminary heating temperature of the substrates of 50–300 °C;

– a protection method of the avalanche LEDs Schottky barrier from edge effects due to a protective dielectric with a built-in negative electric charge has been developed. In particular, anodic alumina with a negative electric charge density from  $1,2 \cdot 10^{-7}$  to  $2,3 \cdot 10^{-6}$  C/cm<sup>2</sup> allows to increase the avalanche breakdown voltage by 20 %, which helps to reduce the barrier capacitance of the space charge region and allows the avalanche LEDs to operate in the gigahertz frequency range;

– a construction of 3D-silicon photonic structure based on traditional CMOS technology for optical interconnections between silicon chips has been developed. The current transfer coefficient of the developed optoelectronic system reaches  $2 \cdot 10^{-3}$  with a pulsed operation mode of avalanche LEDs.

*Recommendations for use:* the development of constructive and technical solutions of avalanche LED based optoelectronic systems for optical interconnects between silicon crystals as part of modern information systems.

*Научное издание*

**Ле Динь Ви**

**ФОРМИРОВАНИЕ И СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО  
КРЕМНИЯ В МАТРИЦЕ ИЗ ПОРИСТОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ  
И ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ЛАВИННЫЕ СВЕТОДИОДЫ НА ЕГО ОСНОВЕ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.16.08 – Нанотехнологии и наноматериалы  
(материалы для электроники и фотоники)

---

Подписано в печать	Формат 60×84 1/16.	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 №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровка, 6, 220013, г. Минск