

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.382.232

СОЛОДУХА
Виталий Александрович

**БЫСТРЫЕ ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ
СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ДЛЯ
АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

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

Минск 2020

Научная работа выполнена в Белорусском государственном университете и ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Научный консультант

Пилипенко Владимир Александрович, член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ»

Официальные оппоненты:

Лабунов Владимир Архипович, академик НАН Беларуси и РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий НИЛ «Интегрированные микро- и наносистемы» НИЧ БГУИР

Лыньков Леонид Михайлович, доктор технических наук, профессор

Мухуров Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией микро- и наносенсорики ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси

Оппонирующая организация

ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»

Защита состоится 29 октября 2020 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, 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 «28» сентября 2020 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций, кандидат
технических наук, доцент



И. В. Дайняк

ВВЕДЕНИЕ

Современная радиоэлектронная аппаратура предъявляет жесткие требования к качеству как электронной элементной базы, используемой в аэрокосмической технике, так и к системам преобразования энергии первичного источника. В связи с этим, в последнее время, в рамках научно-технического направления «Силовая электроника» большое внимание уделяется разработке преобразовательной техники и средств вторичного электропитания [1]. Особое место при этом уделяется разработке элементной базы радиоэлектронной бортовой аппаратуры, обеспечивающей ее надежную работу в различных экстремальных условиях [41]. Перед конструкторами радиоэлектронных систем для аэрокосмической техники стоят задачи по снижению электрических потерь радиоэлектронной аппаратуры, увеличению ее надежности, повышению частоты преобразователей элементной базы, снижению ее массы и габаритов, что позволит увеличить ресурс жизнедеятельности таких аппаратов при проведении различных исследований в условиях ближнего и дальнего космоса. Однако современные подходы, обеспечивающие решение данных задач, требуют проведения дальнейших работ в этом направлении на основе технологических, схемотехнических и конструктивных решений на этапе проектирования и производства специализированной электронной элементной базы стойкой к дестабилизирующим факторам космического пространства [1-3]. Несмотря на большое их разнообразие, данный вопрос и в настоящее время остается весьма актуальным.

Основными факторами, приводящими к выходу из строя изделий для аэрокосмической техники, являются нестабильность зарядовых свойств диэлектрических пленок и их границы раздела с полупроводником, а также повышенные токи утечки в контактах силицид-кремний. В связи с этим на первый план выдвигаются вопросы по модернизации и разработке новых технологических процессов, позволяющих уменьшить и стабилизировать заряд в диэлектрике и на границе раздела полупроводник-диэлектрик, а также снизить влияние границы раздела силицид-кремний на параметры создаваемой электронной элементной базы.

Основной причиной нестабильности электрофизических свойств диэлектрических пленок и их границы раздела с полупроводником является применение в технологическом процессе изготовления изделий силовой электроники длительных термических обработок. Они находят широкое применение при формировании подзатворного диэлектрика, омических контактов пленок металлов с кремнием, проведении процесса твердофазного синтеза силицидов для формирования барьеров Шоттки и других процессов,

требующих высоких температур. Однако данные обработки обладают рядом отрицательных явлений: при проведении процесса окисления происходит загрязнение кремния и слоев двуокиси кремния неконтролируемыми примесями, а также образование связей Si–ОН, оказывающих значительное влияние на их зарядовые свойства; в случае формирования омических контактов имеет место взаимодействие пленок металла с кремнием, приводящее к образованию развитого микрорельефа на границе с кремнием, вызывающего повышенные токи утечки в формируемых полупроводниковых приборах и ИМС, что уменьшает надежность изделий при эксплуатации в экстремальных условиях аэрокосмического пространства.

Одним из возможных путей решения данной задачи может явиться применение для создания элементной базы технологических процессов, оказывающих минимальную тепловую нагрузку как на полупроводниковую подложку, так и создаваемые на ней функциональные слои. Данные процессы могут быть реализованы с помощью быстрых термических обработок, позволяющих на несколько порядков уменьшить время воздействия высоких температур на создаваемые полупроводниковые структуры, тем самым повысить надежность и стойкость изделий электронной техники к дестабилизирующим факторам космического пространства. Широкое применение в микроэлектронике нашли быстрые термические обработки с использованием импульсных источников света, обеспечивающих получение требуемых температур нагрева кремниевых структур в секундном диапазоне длительностей. Анализ выпускаемого оборудования с применением таких источников излучения показал необходимость создания специализированной установки быстрой термообработки для реализации технологических процессов формирования подзатворного диэлектрика и силицидов различных металлов при изготовлении изделий электронной элементной базы для систем управления аэрокосмической техникой.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Тема диссертации в соответствии с решением Ученого совета факультета радиофизики и компьютерных технологий БГУ (протокол №4 от 28.11. 2017 г.) утверждена приказом по БГУ №Л/АД-113 от 30.11.2017 г. В 2019 году решением данного совета ее название скорректировано (протокол №12 от 25.06.2019 г.) и утверждено приказом по БГУ №Л/АД-63 от 18.07.2019 г. Работы, проведенные в рамках диссертации, соответствуют

приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь на 2016-2020 годы, утвержденному Постановлением Совета Министров Республики Беларусь 12.03.2015 г. № 190, п. 6 «Электроника и фотоника» и приоритетному направлению научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016-2020 годы, утвержденному Указом Президента Республики Беларусь 22.04.2015 г. №166, п. 3 «Промышленные и строительные технологии и производство: технологии электронного приборостроения, микроэлектроника, радиоэлектроника, СВЧ-электроника, электротехника».

Работа выполнялась на кафедре физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета и ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющей компании холдинга «ИНТЕГРАЛ» в рамках следующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ:

1. Государственная научно-техническая программа «Микроэлектроника», подпрограмма «Микроэлектроника электронной компонентной базы» (2016-2020 годы) задания №МЭКБ 18 «Разработать и освоить диоды Шоттки в малогабаритных корпусах поверхностного монтажа для радиоэлектронной аппаратуры специального и общего применения», срок реализации 11.2016-12.2017 г.г. (№ГР 20170051 от 17.01.2017 г.).

2. Государственная программа научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограмма «Микро- и наноэлектроника» (2016-2020 годы) задания: № 3.2.01 «Разработка методов создания, конструкции и исследование элементной базы кремниевых субмикронных интегрированных структур диодов Шоттки, высоковольтных и радиационно-стойких биполярных аналоговых микросхем и базовых матричных кристаллов с повышенным уровнем интеграции, включая разработку физико-технологических методов управления статическими и динамическими характеристиками барьерных структур, физических моделей и методов анализа эксплуатационных параметров элементов в расширенном диапазоне температур» (№ГР 20161762 от 19.05.2016 г.); № 3.5.02. «Разработка и внедрение новых методов исследований элементного состава, микроструктуры, электрофизических и геометрических параметров изделий опто-, микро- и СВЧ-электроники и их отдельных элементов на основе высоколокальных процессов пробоподготовки, нанозондирования, электрофизических комплексов, электронной и оптической микроскопии» (№ГР 20162399 от 21.06.2016 г.)

3. Совместный проект с Украиной в рамках Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований «Теоретическое и экспериментальное исследование механизмов токопереноса в омических контактах к n^+ и n^+-n -Si с сильным вырождением электронов в приконтактной области», 2016-2018 годы (№ ГР20164531 от 14.12.2016 г.).

4. План работ ОАО «ИНТЕГРАЛ» по новой технике: ОКР «Разработать и изготовить опытный образец установки быстрой термообработки кремниевых пластин и создать технологические процессы улучшения электрических параметров изделий интегральной электроники на их основе», 2018-2020 годы (№ ГР20181322 от 30.07. 2018 г.).

Цель и задачи исследования

Целью работы является установление закономерностей влияния быстрой термической обработки на поверхностные свойства кремния, диэлектрические и ионно-легированные слои, твердофазный синтез PtSi и разработка технологических процессов, обеспечивающих улучшение электрических характеристик элементной базы для аэрокосмической техники.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести моделирование и расчет температурных полей по площади пластины при быстрой термообработке световыми импульсами секундной длительности;
- разработать автоматическую установку быстрой термообработки пластин кремния диаметром 100 мм, обеспечивающую высокоточный нагрев в вакууме до 10^{-2} мм. рт. ст. и контролируемой среде в режиме теплового баланса;
- разработать метод контроля глубины нарушенного слоя на рабочей поверхности исходных кремниевых пластин на основе Оже-спектроскопии;
- исследовать структуру поверхностного слоя кремния после быстрой термообработки и его влияние на электрофизические свойства диэлектрических слоев, получаемых на нем путем термического окисления;
- установить особенности влияния быстрой термообработки на оптические и электрофизические свойства термической двуокиси кремния и ее границу раздела с кремнием, а также параметры ранее сформированных ионно-легированных слоев в кремнии;
- установить особенности влияния температурно-временных режимов быстрой термической обработки на структурно-фазовые изменения в системе платина-кремний при ее переходе к силициду платины и электрофизические параметры выпрямляющих контактов на его основе;
- разработать технологические процессы быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин, подзатворного диэлектрика, твердофазного синтеза силицида платины и установить их влияние на электрические параметры электронной элементной базы для систем управления аэрокосмической техникой.

Объектом исследования являются поверхностные слои кремния после химико-механической полировки и сформированные на них диэлектрические, ионно-легированные слои и пленки силицида платины.

Предметом исследования являются закономерности изменения структуры поверхности кремния, диэлектрических пленок и их границы раздела с кремнием, структурно-фазового состояния системы платина-кремний при их быстрой термической обработке, а также влияние таких изменений на электрические параметры электронной элементной базы для систем управления аэрокосмическими аппаратами.

Научная новизна

1. На основании моделирования равномерности облучения и температурных полей получены выражения, описывающие изменение температуры по площади пластины без учета теплообмена на ее торце, позволившие установить, что при оптимальных размерах камеры оно составляет менее 0,01 % для пластин диаметром 100 мм и не зависит от времени облучения, совпадая с неравномерностью светового потока.

2. Впервые установлено, что быстрый нагрев исходных кремниевых пластин до ~ 1100 °С световым импульсом длительностью ~ 7 с приводит к твердофазной рекристаллизации механически нарушенного слоя, вызывая смещение пика поглощения в области 3,43 эВ (Г-точка зоны проводимости) в сторону частот, соответствующих кремнию с совершенной кристаллической решеткой за счет уменьшения деформации его поверхностного слоя, обеспечивая формирование атомарно-плоской и чистой поверхности.

3. Установлено, что в двуокиси кремния, полученной пирогенным окислением, формирование заряда происходит за счет несовершенства ее поверхностной микроструктуры, обусловленной окислением нарушенного слоя кремния, а также всего объема пленки из-за невысокой температуры процесса окисления.

4. Установлены закономерности влияния быстрой термической обработки при температуре ~ 1100 °С на структуру и электрофизические параметры слоев двуокиси кремния, полученных пирогенным окислением, заключающиеся в перестройке ее микроструктуры за счет замены гидроксильных ионов ОН мостиковыми ионами кислорода, уплотнении объема, что обеспечивает уменьшение заряда на границе раздела Si-SiO₂ от 2,6 до 4,3 раза, напряжения плоских зон от 20 до 60 раз, поверхностного потенциала от 5 до 20 раз и увеличение наработки на отказ до 1,89 раза.

5. Выявлены закономерности структурно-фазовых изменений в системе платина-кремний при ее быстрой термообработке в интервале температур от 200 до 550 °С за 7 с в атмосфере N₂, приводящие за счет диффузии Pt в Si при T ≤ 300 °С и встречной совместной диффузии Si и Pt при T > 300 °С к последовательности фазовых переходов с образованием структуры PtSi при T = 450 °С и протекающих в 250 раз быстрее, чем при одностадийном (T = 550 °С, t = 30 мин) и в 1800 раз быстрее, чем при двухстадийном (T = 350 °С, t = 180 мин и T = 550 °С, t = 30 мин) процессах за счет снижения на 0,37 эВ энергии активации образования PtSi, обусловленного разрывом связей Si-Si и электронным возбуждением в кремнии под действием фотонного потока, с последующим формированием при 550 °С равновесной и низкодефектной структуры с микрорельефом границы с Si и размером зерен в 3-4 раза меньшим, чем при стандартных процессах его формирования.

6. Установлено, что быстрая термообработка подзатворного диэлектрика при температуре ~1100 °С и ~550 °С для формирования силицида платины повышает надежность электронной элементной базы в первом случае в 1,07-1,86 раза за счет увеличения заряда пробоя диэлектрика, обусловленного перестройкой его микроструктуры, а во втором – за счет повышения высоты барьера с 0,804 до 0,825 В и понижения в 1,57 раза тока утечки при комнатной температуре и до 1,25 раза при 125 °С, обусловленных как формированием равновесной и низкодефектной структуры силицида платины, так и малоразвитым рельефом его границы с кремнием.

Положения, выносимые на защиту

1. Неравномерность температуры по поверхности кремниевой пластины без учета ее края шириной менее 3 мм при оптимальных размерах камеры составляет не более 0,01%, не зависит от времени облучения и совпадает с неравномерностью светового потока, а скорость нагрева пластины и достигаемая температура зависят от ее кристаллографической ориентации.

2. Нагрев исходных кремниевых пластин световым импульсом длительностью 7с до температуры ~1100 °С вызывает за счет твердофазной рекристаллизации механически нарушенного слоя смещение пика поглощения в области 3,43 эВ (Г-точка зоны проводимости) в сторону частот, соответствующих кремнию с совершенной кристаллической решеткой.

3. Формирование заряда в двуокиси кремния, полученной пирогенным окислением, обусловлено несовершенством ее объема из-за низкой

температуры окисления и изменением поверхностной микроструктуры, сформированной за счет нарушенного слоя кремния, уменьшение которого улучшает ее зарядовые свойства, электрофизические параметры и надежность.

4. Нагрев слоев двуокиси кремния, полученных пирогенным окислением, световым импульсом длительностью 7 с до температуры ~ 1100 °С приводит за счет замены гидроксильных ионов ОН мостиковыми ионами кислорода, а также уплотнения объема к уменьшению заряда от 2,6 до 4,3 раза, напряжения плоских зон от 20 до 60 раз, поверхностного потенциала от 5 до 20 раз и увеличению наработки на отказ до 1,89 раза.

5. Нагрев системы Pt-Si световым импульсом длительностью 7 с в среде N_2 со стороны кремния приводит к последовательности фазовых переходов от Pt к двухфазной пленке Pt-Pt₂Si при $T \leq 250$ °С, однофазной Pt₂Si при $T = 300$ °С, двухфазной PtSi-Pt₂Si при 350 °С $< T < 450$ °С с формированием при 550 °С равновесной, низкодефектной структуры PtSi, имеющей размер зерен и микрорельеф границы с Si в 3-4 раза меньший, чем при длительных термообработках, и протекающим в 250-1800 раз быстрее за счет снижения на 0,37 эВ энергии активации образования PtSi из-за разрыва связей Si-Si и электронного возбуждения в кремнии под действием фотонного потока.

6. Повышение надежности электронной элементной базы для аэрокосмической техники обусловлено повышением заряда пробоя подзатворного диэлектрика до 2,55 раза в результате его нагрева световым импульсом до 1100 °С в течение 7 с, а также увеличением высоты барьера и понижением тока утечки в диодах Шоттки в температурном диапазоне $25-125$ °С в 1,57-1,25 раза за счет формирования PtSi при нагреве системы Pt-Si до 550 °С в течение 7 с.

Личный вклад соискателя ученой степени

В диссертационной работе изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований, лично выполненных автором. Им выбрано направление, сформулированы цели и задачи исследований, а также проведена интерпретация полученных результатов. Обсуждение и обобщение полученных результатов проводилось совместно с научным консультантом член-кор-респондентом НАН Беларуси д.т.н. В. А. Пилипенко. Соавторы член-кор-респондент НАН Беларуси д.ф.-м.н. Ф. Ф. Комаров, член-корреспондент НАН Беларуси д.т.н. А. И. Белоус, к.т.н. А. С. Ефименко, С. В. Шведов, к.т.н. Г. Г. Чигирь, к.ф.-м.н. В. В. Понарядов, д.ф.-м.н. В. М. Анищик, В. А. Горушко, к.ф.-м.н. А. Н. Петлицкий, к.т.н. Т. В. Петлицкая, А. А. Омельченко, В. А. Филипеня проводили численные расчеты и участвовали в измерениях и обсуждении результатов. Часть работ проводилась в сотрудничестве с институтом физики полупроводников им.

В. Е. Лашкарева НАН Украины. Помощь в подготовке части образцов, проведении отдельных измерений и обработке результатов оказывали сотрудники БГУ и ОАО «ИНТЕГРАЛ»: О. В. Мильчанин, Т. Б. Ковалева, О. Э. Сарычев, к.т.н. Я. А. Соловьев.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на XVI, XVIII, XIX, XX Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, Украина, 2015, 2017, 2018, 2019), XIV научно-технической конференции «Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА» (Москва, Россия, 2015), 2-ой Российско-Белорусской научно-технической конференции «Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение» (Нижний Новгород, 2015), XV International Conference «Physics and technology of thin films and nanosystems» (Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2015), Международной научно-практической конференции «Структурная релаксация в твердых телах» (Винница, Украина, 2015), 2-ой научной конференции «Интегральные схемы и микроэлектронные модули» Международного форума «Микроэлектроника-2016» (Алушта, 2016), XXVII, XXVIII, XXIX Международной конференции «Радиационная физика твердого тела» (Севастополь, 2017, 2018, 2019), 12-й, 13-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, РБ, 2017, 2019), 9th, 10th, 11th International Conference «New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation», (Zakopane, Poland, 2015, 2017, 2019), Proceedings of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Application & Properties (NAP-2017), (Zatoka, Ukraine, 2017), 43 EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA 2017) and the 20 EUROMICRO Conference on Digital System Design (DSD 2017) (Vienna, Austria, 2017), IX Международной научной конференции «Функциональная база наноэлектроники» (Харьков, 2017), 11-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2018» (Минск, 2018), VIII Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (Минск, 2018), VIII Международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, 2018).

Результаты диссертационной работы внедрены в серийное производство полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на Филиале «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (имеется акт внедрения, утвержденный 06.03.2020).

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 55 печатных работ: 4 монографии, 22 статьи в рецензируемых научных журналах, 11 статей в сборниках научных конференций, 14 тезисов докладов на научных конференциях, 4 заявки на изобретения РБ.

Общий объем публикаций по теме диссертации составляет по монографиям 118,2 печатных листа, по научным статьям в журналах и публикациям на конференциях 17,23 авторских листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, семи глав с выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертации составляет 229 страниц, включая 143 страницы основного текста, 92 рисунка на 51 странице, 13 таблиц на 5 страницах, библиографический список из 308 наименований, включая 55 публикаций соискателя, на 27 страницах, 1 приложение на 3 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** и **общей характеристике** работы обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** освещены особенности создания электронной элементной базы для систем управления бортовой аппаратурой в устройствах аэрокосмической техники. Рассмотрены требования к данной базе, проблемы радиационной устойчивости, технологические методы повышения ее надежности, обеспечивающие эксплуатацию аппаратуры в различных экстремальных условиях.

Показано, что важным условием создания надежных изделий микроэлектроники с требуемыми электрофизическими характеристиками является формирование однородного и воспроизводимого микрорельефа поверхности кремниевых пластин, обладающего заданным электронным спектром и необходимыми электрическими характеристиками, а также степень совершенства кристаллической решетки, чистота обрабатываемой

поверхности и качество границы раздела с диэлектрическими слоями и силицидами различных металлов. Это обеспечивается за счет применения новых эффективных конструктивно-технологических решений формирования полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Одной из возможностей создания высоконадежных изделий электронной техники является использование технологических процессов, оказывающих минимальную тепловую нагрузку как на полупроводниковый материал подложки, так и формируемые на ней функциональные слои. Данные процессы могут быть реализованы с помощью быстрых термических обработок, позволяющих на несколько порядков уменьшить время воздействия высоких температур на полупроводниковые структуры, тем самым повысить надежность и стойкость изделий электронной техники к дестабилизирующим факторам космического пространства.

Анализ работ показал, что исследования по применению быстрых термических обработок в технологическом процессе создания изделий микроэлектроники являются неполными. Остается открытым вопрос использования таких обработок для улучшения структурного совершенства поверхности кремния и стабилизации зарядовых свойств его границы раздела с диэлектрическими слоями, а также получение более совершенных барьерных слоев для диодов Шоттки. Показана необходимость разработки специализированной установки быстрой термообработки для реализации данных процессов.

На основании анализа литературных источников, рассмотренных в первой главе, сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во **второй** главе изложены методы подготовки образцов и исследования их структуры, фазового и элементного состава, а также электрофизических параметров.

Для исследования влияния быстрой термической обработки (БТО) на качество подзатворного диэлектрика толщиной 42,5 нм проводилось его формирование путем пирогенного окисления пластин кремния КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации $\langle 100 \rangle$ диаметром 100 мм при температуре 850 °С в течение 40 мин с использованием диффузионной системы ОКСИД 3 ПО.

С целью изучения влияния БТО на ранее созданные ионно-легированные слои их формирование осуществлялось путем легирования структур 18КДБ 6,0/КДБ 0,005 и 28КЭФ 5,5/КЭМ 0,01 ориентации $\langle 100 \rangle$ с подзатворным окислом толщиной 42,5 нм. Пластины 28КЭФ 5,5/КЭМ 0,01 легировались бором дозой 85 мкКл/см² и энергией 60 кэВ, а 18КДБ6,0/КДБ0,005 фосфором дозой 3 мКл/см² и энергией 75 кэВ с последующим отжигом в среде азота при 1150 °С в течение 270 и 90 мин

соответственно. Далее на части пластин, легированных как бором, так и фосфором, проводился БТО при $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 7 с.

Пленки платины толщиной 40 нм, осажденные на кремниевую подложку магнетронным методом путем распыления мишени из платины с чистотой 99,93 % на установке «MRC 603» с криогенной откачкой до давления не хуже 5×10^{-5} Па, использовались для анализа процесса формирования силицида платины при БТО.

Методами обратного резерфордского рассеяния, оже-спектроскопии, просвечивающей электронной микроскопии, электронографии, растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, Фурье-спектроскопии, эллипсометрии, атомно-силовой микроскопии исследовалось влияние БТО на структуру, фазовый и элементный состав исходных кремниевых пластин, диэлектрических пленок, ионно-легированных слоев и формируемых пленок силицида платины.

С использованием метода Кельвина-Зисмана, четырехзондового, измерения вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик, исследовалось влияние БТО на распределение контактной разности потенциалов по площади пластины в системе полупроводник-диэлектрик, а также электрофизические параметры исходных кремниевых пластин, ионно-легированных слоев, диэлектрических пленок, пленок силицида платины и границы раздела Si-SiO₂, PtSi-Si.

Поскольку в рамках данной работы проводились исследования влияния быстрой термообработки на рекристаллизацию механически нарушенного слоя на рабочей стороне пластины, то это потребовало разработки метода определения его толщины, который основан на использовании оже-спектрометрии с прецизионным распылением поверхностных слоев кремния и регистрацией интенсивности выхода оже-электронов.

Так как в нарушенном поверхностном слое количество кремния меньше, чем в объеме, то при его травлении по мере приближения к кремнию с ненарушенной кристаллической решеткой происходит увеличение его плотности, а следовательно, увеличивается интенсивность выхода оже-электронов. Для определения толщины нарушенного слоя снималась зависимость количества выходящих оже-электронов от времени распыления (рисунок 1). Выход на плато соответствует максимальной интенсивности регистрации оже-электронов. При этом на поверхности образца формируется ступенька, высота которой соответствует толщине нарушенного слоя и определяется с помощью профилометра Talystep, позволяющего достигать

максимального увеличения по вертикали 2000000^x , при котором цена деления составляет 0,5 нм/мм, что обеспечивает точность измерений не менее $\pm 1,0$ нм.

Данный метод позволяет также определять глубину нарушенного слоя по известной скорости распыления. Для этого необходимо предварительно выбрать оптимальные режимы распыления образца, определить данную скорость и в дальнейшем использовать фиксированные режимы распыления. В этом случае отсутствует необходимость в использовании профилометра, а достаточно настроить оже-спектрометр на необходимую скорость распыления и по снятому профилю выхода оже-электронов определить глубину нарушенного слоя. Разработанный метод позволяет проводить контроль толщины нарушенного слоя с разрешением 1 нм в диапазоне от 0,001 до 1 мкм.

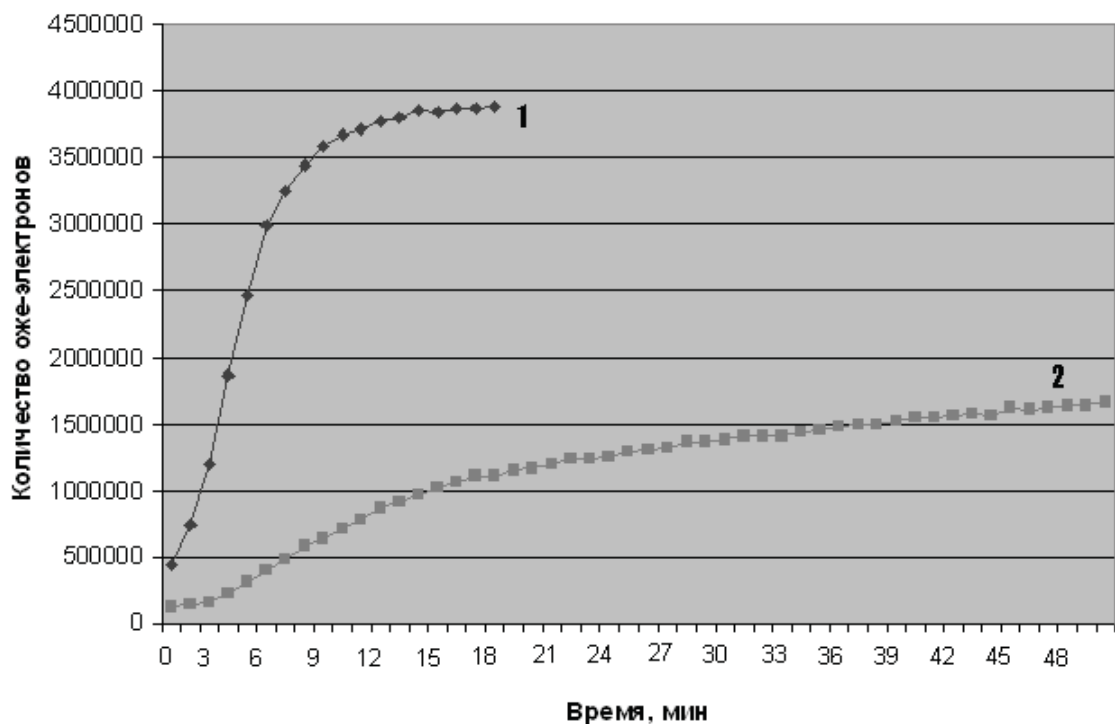


Рисунок 1. – Зависимость количества выходящих оже-электронов от времени распыления для пластины после полировки (1) и шлифовки (2)

В третьей главе представлены результаты по разработке установки быстрой термообработки кремниевых пластин диаметром 100 мм в контролируемой среде. Приведены данные по моделированию равномерности облучения и температурных полей по площади пластины, а также созданию камеры отжига, обеспечивающей минимизацию термических напряжений, возникающих в пластине при нагреве импульсным световым

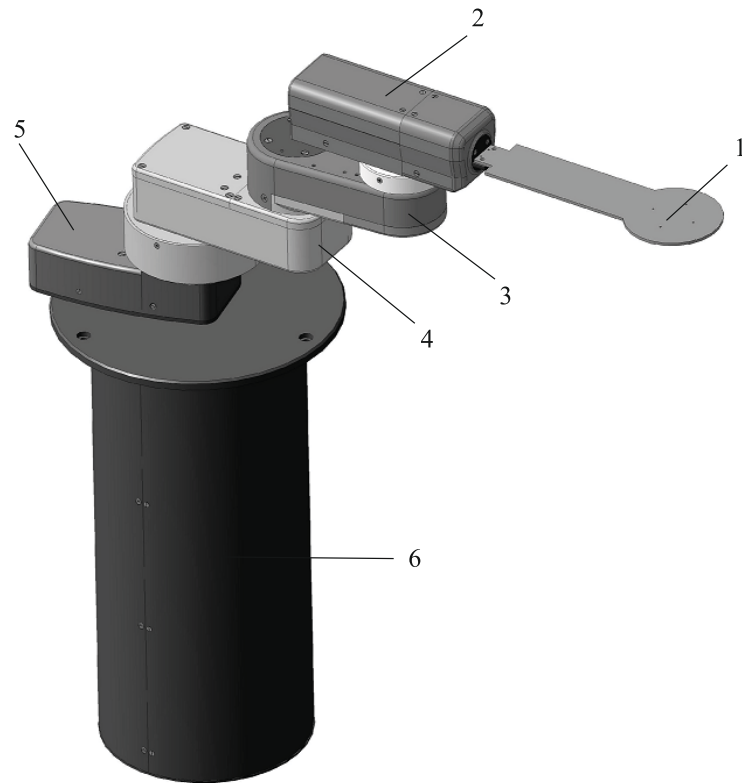
потоком. Обоснованы режимы облучения и контроля нагрева кремниевых структур при быстрой термообработке.

Известно, что наличие градиента температуры при нагреве кремниевой пластины до $T \geq 900-950$ °С приводит к возникновению в ней термических напряжений, которые при значении 50-80 МПа вызывают процесс пластического течения кремния. При температурах $T < 900-950$ °С имеет место упругая деформация, которая при напряжениях выше 100 МПа приводит к разрушению кремниевых пластин.

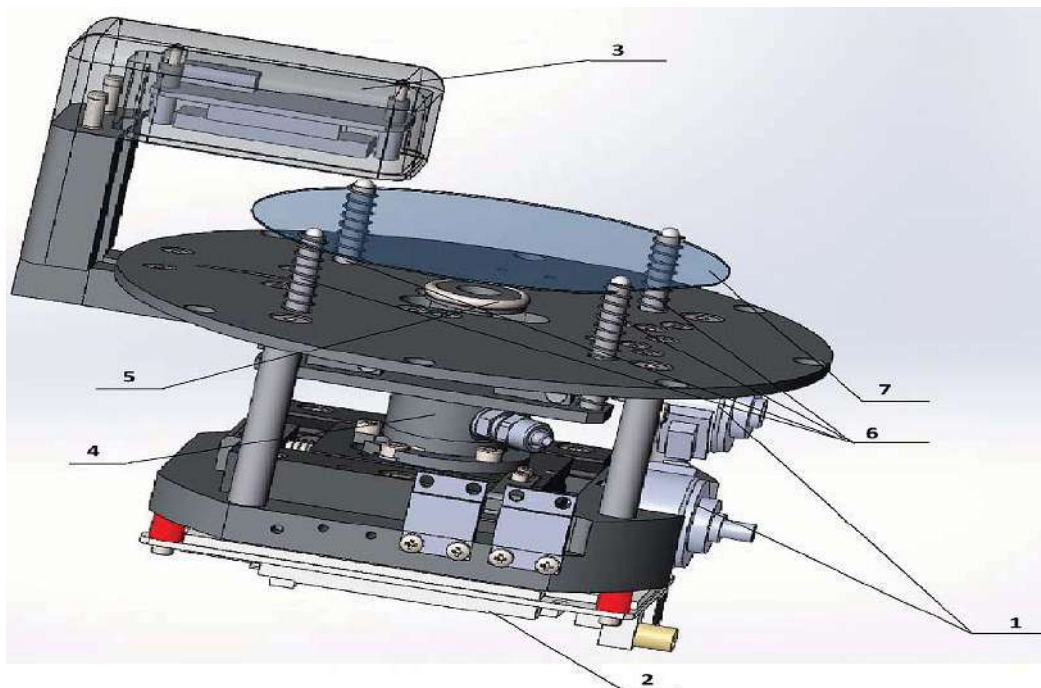
Расчет термических напряжений, возникающих за счет разброса температуры, позволил установить, что ее разрушение наступает при разбросе температуры по площади пластины 96 °С, а пластическое течение кремния происходит по достижению данного разброса 76 °С.

Для проведения моделирования равномерности нагрева кремниевых пластин и установления связи между равномерностью светового потока и разбросом температуры по площади пластины проводилась оценка допустимой неравномерности облучения пластины, при которой возникающий разброс температуры по площади пластины не превышает 76 °С при ее нагреве до 1000 °С. На основании уравнения теплопроводности и определения максимальной температуры нагрева кремниевой пластины в зависимости от плотности мощности светового потока, падающего на пластину, было установлено, что для достижения такого разброса температуры неравномерность облучения световым потоком не должна превышать 27,1 %.

Проведенные расчеты и анализ конструктивных особенностей оборудования для быстрой термообработки позволил разработать автоматическую роботизированную установку поштучной обработки кремниевых пластин диаметром 100 мм световыми импульсами длительностью от 0,1 до 600 с как в контролируемой среде (N_2 , NH_3 , HCl , Ar , O_2 , формовочный газ 10% H_2 и 90% Ar), так и в вакууме ($\sim 1,33$ кПа), обеспечивающую разброс светового потока по площади пластины 2,8 %, неравномерность температуры с учетом ее понижения в области торца пластины не более 0,4 % при нагреве до 1200 °С со скоростью набора 10-150 °С/с. Кинематическая производительность установки с учетом загрузки пластины, создания вакуума в камере, напуска в камеру требуемого газа и выгрузки составляет 60 пл./час. Отличительной особенностью установки является использование для перемещения и ориентации пластины относительно базового среза робототехнического комплекса, включающего робот манипулятор (рисунок 2) и устройство центрирования и ориентации (выравниватель) (рисунок 3). Робот манипулятор представляет собой роботизированную руку, состоящую из четырех частей: подложкодержателя,



1 – подложкодержатель, 2 – кисть, 3 – предплечье, 4 – плечо, 5 – планшайба, 6 – корпус
 Рисунок 2. – Робот манипулятор установки быстрой термообработки



1 – привод, 2 – плата управления, 3 – ПЗС-приемник, 4 – вакуумный прижим,
 5 – вакуумный захват, 6 – опорные ножки для полупроводниковой пластины,
 7 – полупроводниковая пластина

Рисунок 3. – Устройство центрирования и ориентации установки быстрой термообработки

кисти, предплечья и плеча. Конструкция манипулятора имеет 4 степени свободы и позволяет перемещать пластину диаметром 100 мм до 130 мм по вертикали и до 215 мм по горизонтали с возможностью ее поворота на 180° .

Известно, что температура нагрева кремниевых пластин при облучении во многом зависит от оптических характеристик облучаемой поверхности. При создании полупроводниковых приборов и интегральных микросхем на поверхности кремния с помощью фотолитографии формируются области, представляющие собой чистый кремний, диэлектрические пленки, поликремний, силициды, а также различные металлы. Данным областям присущи определенные механизмы поглощения светового потока, что приводит к неравномерному нагреву пластины кремния, а следовательно, возникновению градиентов температуры, приводящих к образованию в нем различных структурных дефектов, растрескиванию и отслаиванию пленок диэлектриков и металлов. Для исключения данных явлений обработку необходимо проводить с нерабочей стороны пластины, поскольку в этом случае имеет место облучение оптически однородной поверхности и разброс температуры по площади пластины будет определяться только неравномерностью светового потока, задаваемого геометрическими размерами камеры.

Установлено влияние кристаллографической ориентации кремниевой пластины на поглощение излучения галогенных ламп, связанное с их различной ретикулярной плотностью, приводящей к изменению интенсивности взаимодействия фотонов с атомами кремния для плоскостей $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$.

Показано, что коэффициент пропускания кремния КЭС 0,01 ($N = 4,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) ориентации $\langle 100 \rangle$ в спектральной области, соответствующей максимуму излучения галогенных ламп ($\nu = 7500 \text{ см}^{-1}$), составляет 22,4%, а для ориентации $\langle 111 \rangle$ – 19 %. Это означает, что поглощение фотонов плоскостью кремния ориентации $\langle 111 \rangle$ будет происходить интенсивнее, чем $\langle 100 \rangle$, а следовательно, при одинаковой длительности светового импульса в первом случае будет иметь место более интенсивный нагрев кремниевой пластины. Кроме того, показана роль специфики подготовки нерабочей поверхности кремния, уровня и типа его легирования на коэффициент пропускания в данной области спектра.

Поскольку температура нагрева пластины при БТО определяется уровнем легирования, коэффициентом отражения и кристаллографической ориентацией облучаемой поверхности, то для достижения необходимой температуры нагрева кремниевой пластины, необходимо задавать не длительность светового импульса и плотность мощности светового потока, а длительность и температуру нагрева, контролируруемую в процессе облучения.

В четвертой главе изложены результаты исследований влияния быстрой термической обработки при температуре ~ 1100 °С в течение 7 с на структуру рабочей поверхности кремниевой пластины. Приведены данные о воздействии такой обработки на процесс роста и параметры формируемой на ней двуокиси кремния, полученной пирогенным окислением, и границу раздела Si-SiO₂.

Анализ исходных кремниевых пластин методом оже-спектроскопии показал, что глубина нарушенного слоя на их рабочей поверхности составляет 3,8 нм. Данная величина в зависимости от фирмы изготовителя может лежать в пределах от 3 до 100 нм. Методом электронной микроскопии было установлено, что рабочая поверхность характеризуется гладким, практически без микронеровностей микрорельефом. Данные результаты полностью подтверждаются результатами исследований, проведенных методом атомно-силовой микроскопии. Однако сравнительный анализ кривых дифракционного отражения (КДО) от поверхности кремния после химико-механической полировки с эталонной поверхностью показал, что в первом случае имеет место уширение основания КДО, характерное для нарушенного слоя.

Важными параметрами, несущими информацию о состоянии поверхности кремниевой пластины являются ее оптические характеристики, а именно, коэффициент преломления и коэффициент поглощения. Для определения влияния БТО на структуру поверхностного слоя исходных кремниевых пластин методом спектральной эллипсометрии проводился анализ зависимости коэффициентов преломления и поглощения кремния от длины волны. Данные зависимости впервые позволили установить, что коэффициент поглощения оптического излучения имеет явно выраженное изменение в области 3,43 эВ, которое может быть связано с поглощением, соответствующим прямым переходам в сингулярности Ван Хова зоны проводимости, где располагается Г-точка, имеющая аналогичную энергию (рисунок 4).

Показано, что быстрая термическая обработка исходных кремниевых пластин при температуре ~ 1100 °С в течение 7 с позволяет получить атомарно-плоскую рабочую поверхность кремния и увеличить ее структурное совершенство за счет уменьшения глубины нарушенного слоя в результате его твердофазной рекристаллизации. Данный процесс обусловлен понижением деформационного потенциала кристаллической решетки при поглощении фотонного потока за счет последовательного электрон-электронного, электрон-фононного и фонон-фононного взаимодействий, передающих энергию решетке, тем самым повышая ее температуру и уменьшая энергию связи Si-Si. На это указывает анализ его толщины, которая уменьшилась в

4 раза, и появление на картине дифракции электронов непрерывных вертикальных стержней, являющихся результатом их двумерной дифракции от поверхностных атомных слоев. При этом имеет место уменьшение в 1,14–1,55 раза коэффициента экстинкции кремния на длине волны 632,8 нм, обусловленное удалением с рабочей поверхности кремниевой пластины влаги, групп ОН и сублимации органических и неорганических загрязнений.

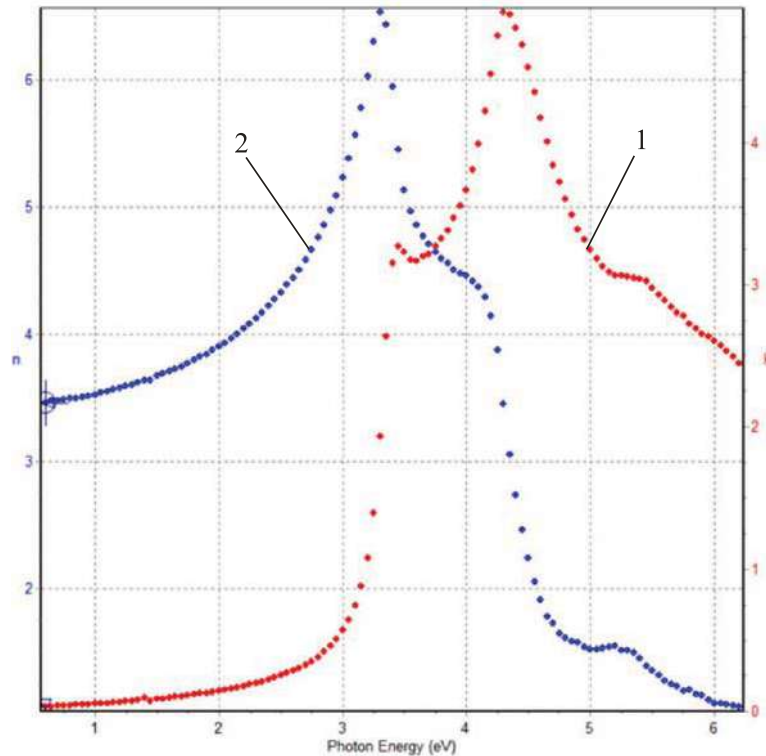


Рисунок 4. – Спектральная зависимость коэффициентов экстинкции (1) и преломления (2) исходного кремния КЭФ-4,5

На улучшение поверхностных свойств указывает также рост коэффициента поглощения кремния в области Г-точки зоны проводимости, величина которого во многом определяется деформацией кристаллической решетки. Эти результаты подтверждаются исследованиями, проведенными методом кривых дифракционного отражения (КДО), где после обработки наблюдается отсутствие уширения его основания, характерного для нарушенного слоя, и кривая приближается к эталонной поверхности.

Изучение влияния быстрой термообработки исходных кремниевых пластин на процесс формирования подзатворного окисла толщиной 42,5 нм методом пирогенного окисления показало, что такая обработка приводит к повышению его качества. Исследования методами Фурье спектроскопии и спектральной эллипсометрии позволили установить, что такое улучшение обусловлено уменьшением влияния нарушенного слоя на начальный этап

процесса окисления, приводя к образованию дополнительных Si-O-связей, увеличению их силы и уменьшению напряжений, обеспечивая снижение коэффициента преломления и формирование однородной микроструктуры двуокиси кремния по всей ее толщине. На основании полученных результатов предложен следующий механизм данного процесса.

При окислении кремниевых пластин рост окисла на начальном этапе идет за счет нарушенного поверхностного слоя с деформированной кристаллической решеткой, толщина которого составляет около 5 нм. Поскольку формирование термического окисла на 44% идет за счет подложки кремния, то при толщине подзатворного диэлектрика 47–49 нм его верхняя часть толщиной 12,5 нм формируется за счет нарушенного слоя и микроструктура этой части окисла будет несовершенной. Она будет иметь напряженные связи Si-O, оборванные связи Si, незаполненные кислородом, а также уменьшенную силу связей Si-O с измененными углами. Следовательно, весь окисел можно рассматривать как двухслойную систему с различной микроструктурой по толщине. Так как быстрая термообработка приводит к уменьшению толщины нарушенного слоя до 1 нм и менее, то в процессе термического окисления будут участвовать поверхностные слои кремния, практически не испытывающие деформации кристаллической решетки, а, следовательно, формируемая пленка будет иметь более однородную микроструктуру по всей своей толщине.

Исследование влияния быстрой термообработки исходных кремниевых пластин на электрофизические свойства двуокиси кремния, сформированной на них, проводилось путем анализа ее пробивного напряжения, тока утечки, вольт-фарадных характеристик, контактной разности потенциала. Результаты исследования показали значительное улучшение данных параметров. Так, пробивное электрическое напряжение увеличилось в 1,03 раза, ток утечки уменьшился в 3,75 раза, в 1,54 раза снизился заряд на границе раздела кремний-двуокись кремния, в 1,03 раза уменьшилось механическое напряжение плоских зон, а также уменьшился разброс величины поверхностного потенциала в системе кремний-двуокись кремния по площади пластины.

Однако при этом имеет место образование инверсного слоя на границе раздела SiO₂-Si для кремния *p*-типа и обогащение поверхностного слоя кремния электронами для *n*-типа проводимости, приводящие к изменению пробивного электрического напряжения слоев двуокиси кремния. Наличие скачкообразного увеличения емкости для кремния *p*-типа проводимости, в области перехода от обеднения к инверсии при определенном пороговом напряжении, связано с изменением эффективного заряда за счет дрейфа ионов гидроксильных групп и водорода к границе раздела кремний-двуокись

кремния под воздействием положительного потенциала. В нашем случае это, по-видимому, обусловлено положительным зарядом, сформированным за счет быстрых поверхностных состояний, связанных с наличием оборванных связей кремния на границе раздела $\text{SiO}_2\text{-Si}$ и присутствием на ней, а также в объеме двуокиси кремния, гидроксильных групп и водорода, образованию которых способствует метод ее получения при низких температурах.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния быстрой термической обработки при температуре ~ 1100 °С на структуру подзатворного окисла, полученного пироженным окислением кремния. Приведены данные об изменении его электрофизических параметров и границы раздела с кремнием при такой обработке.

Изучение воздействия быстрой термообработки на структуру подзатворного окисла толщиной 42,5 нм, сформированного на пластинах КЭФ 4,5 и КДБ 12 ориентации $\langle 100 \rangle$ путем их пироженного окисления, проводилось методами спектральной эллипсометрии и Фурье-спектрометрии. Анализ полученных результатов показал, что распределение толщины пленки и коэффициента преломления по площади пластины после быстрой термообработки имеет аналогичный характер, как и до обработки. Однако при этом наблюдается значительное их уменьшение, которое свидетельствует об ее уплотнении и структурной перестройке (таблица 1). Проведение предварительной быстрой термообработки пластин перед окислением приводит к сдвигу гистограммы распределения коэффициента преломления в область меньших значений независимо от типа проводимости кремния, что указывает на более значительное изменение микроструктуры двуокиси кремния, выращенной на таких пластинах.

Данные результаты полностью подтверждаются спектрами пропускания пленок двуокиси кремния, которые показывают, что проведение их быстрой термообработки приводит к значительному изменению полосы поглощения, характеризующей в ней связь Si-O, независимо от типа проводимости кремния и наличия или отсутствия предварительной быстрой термообработки исходных кремниевых пластин. При этом имеет место как ее смещение в коротковолновую область, так и уменьшение полуширины. Для кремниевых пластин КЭФ 4,5, проходивших предварительную быструю термообработку, такое смещение составило $2,51 \text{ см}^{-1}$, а без обработки – $5,84 \text{ см}^{-1}$. В случае КДБ 12 данные величины составили $4,59\text{--}5,84 \text{ см}^{-1}$ соответственно.

Положение и полуширина полосы поглощения в области 1070 см^{-1} соответствуют основному валентному колебанию Si-O связи и характеризуют пористость и механические напряжения связей в пленке. Смещение в коротковолновую область спектра указывает на изменение в углах «мостиковой» связи Si-O-Si и снижение механических напряжений

связи Si–O, а уменьшение ее полуширины говорит об уплотнении объема двуокиси кремния и уменьшении ее пористости.

Таблица 1. – Параметры двуокиси кремния до и после быстрой термообработки, выращенной на кремнии с его предварительной быстрой термообработкой и без нее

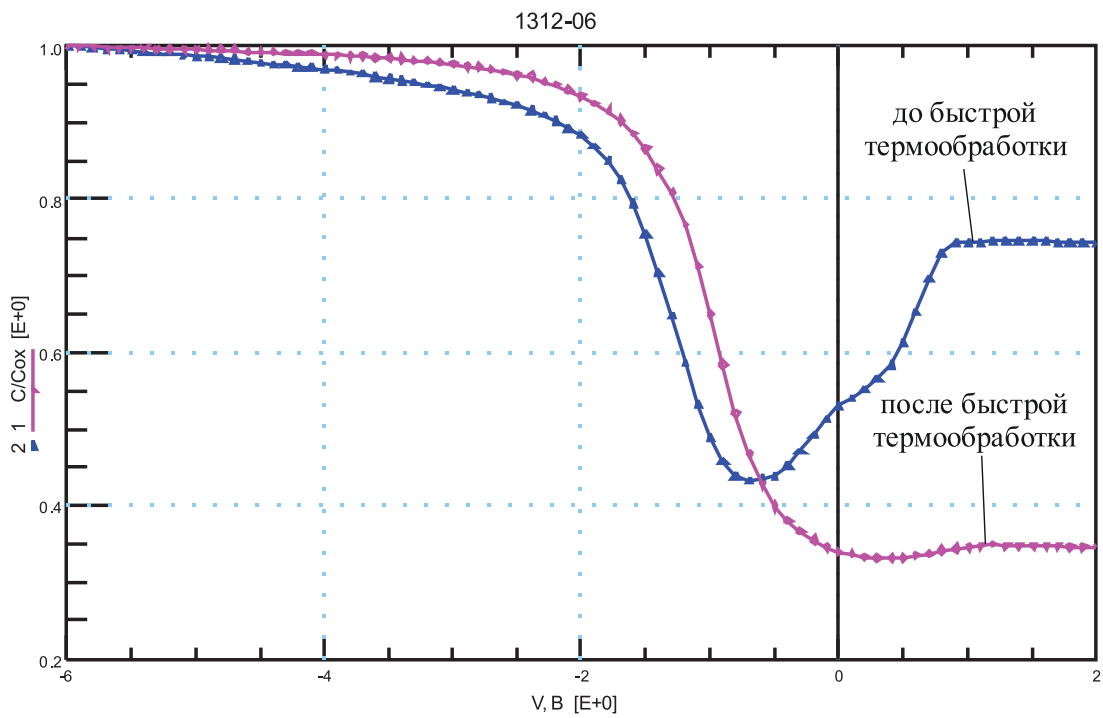
Параметры двуокиси кремния		Тип пластины			
		КЭФ 4,5		КДБ 12	
		Без обработки	С обработкой	Без обработки	С обработкой
Толщина пленки, нм	Исходная	48,05	48,13	48,42	48,48
	После обработки	45,74	45,92	45,88	45,55
Коэффициент преломления	Исходный	1,4926	1,4871	1,4883	1,4862
	После обработки	1,4812	1,4807	1,4807	1,4807

На основании приведенных данных можно утверждать, что быстрая термообработка пленок двуокиси кремния, полученных пирогенным окислением, приводит к значительной перестройке их микроструктуры: изменению механических напряжений, углов и силы Si–O-связей; образованию дополнительных Si–O-связей за счет замены гидроксильных ионов OH мостиковыми ионами кислорода; уплотнению объема и снижению пористости.

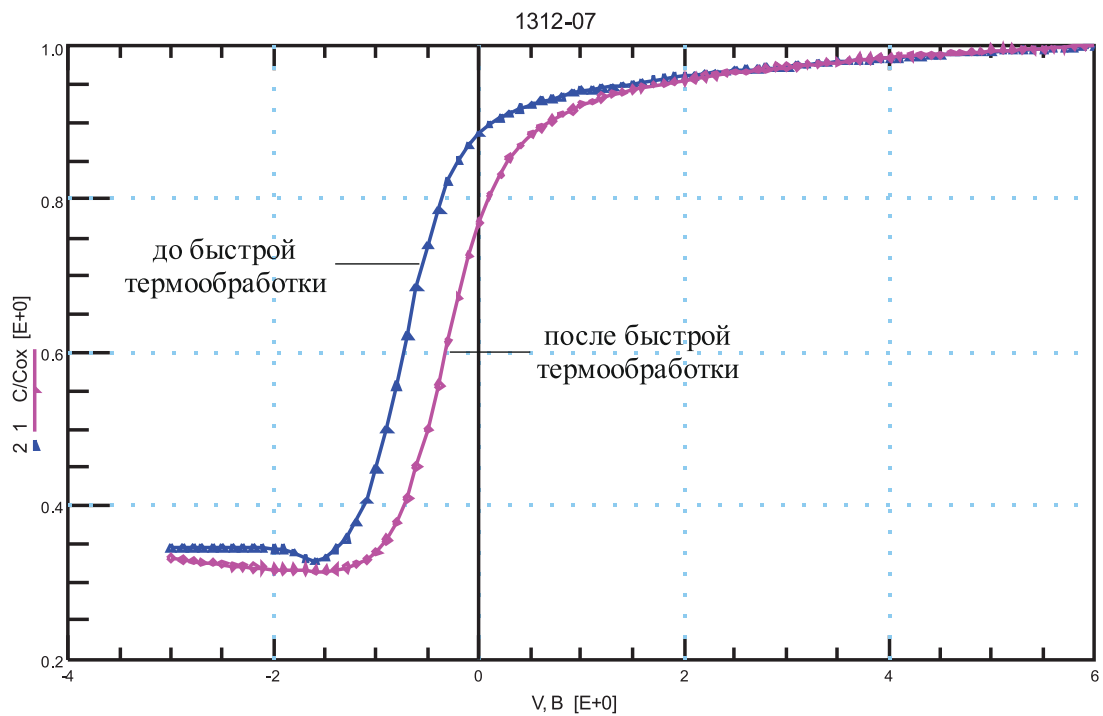
Для исследования влияния такой перестройки на параметры границы раздела SiO₂ с кремнием проводился анализ вольт-фарадных характеристик (рисунок 5) и контактной разности потенциалов данной системы. Результаты анализа показали, что проведение быстрой термообработки окисленных пластин приводит к уменьшению механических напряжений плоских зон более, чем на порядок для КЭФ 4,5 и в 1,5 раза для КДБ 12. При этом плотность заряда на границе раздела кремний-двуокись кремния уменьшается для кремния КЭФ 4,5 от 2,6 до 3,7 раз и для кремния КДБ 12 от 3,2 до 4,3 раза.

Как видно, после такой обработки на поверхности окисленной пластины кремния практически отсутствует инверсный слой и наблюдается существенное снижение величины положительного заряда на границе раздела. Несмотря на то, что в окисле остается остаточный фиксированный

заряд небольшой величины, полученные результаты свидетельствуют о значительном улучшении состояния границы раздела системы кремний-диоксид кремния после быстрой термообработки диоксида кремния.



а



б

а – КДБ-12 с предварительным БТО, б – КЭФ-4,5 с предварительным БТО
Рисунок 5. – Вольт-фарадные характеристики МОП-структур, полученных пирогенным окислением кремния, до и после быстрой термообработки

При этом проведение БТО кремниевых пластин перед окислением позволяет уменьшить остаточный фиксированный заряд в полтора раза. Это свидетельствует о том, что формирование фиксированного заряда в окисле, полученном путем пирогенного окисления кремния, происходит как за счет несовершенной микроструктуры ее поверхностного слоя, обусловленной наличием механически нарушенного слоя на поверхности исходного кремния, так и всего объема из-за низкой ($850\text{ }^{\circ}\text{C}$) температуры процесса окисления. При использовании таких температур формируются слои, имеющие напряженные связи Si-O, оборванные связи Si, незаполненные кислородом, уменьшенную силу связей Si-O, измененные углы связей Si-O, по сравнению со слоями диэлектрика, получаемого путем термического окисления кремния в сухом кислороде при температуре $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше.

Поскольку быстрая термическая обработка исходных кремниевых пластин приводит к уменьшению толщины поверхностного слоя окисла с нарушенной микроструктурой, а последующая обработка после окисления способствует фотоионизации и ускорению процессов диффузии под воздействием светового потока, приводящих к уменьшению концентрации междоузельных атомов кремния вблизи межфазной границы раздела, то это обеспечивает значительное снижение фиксированного заряда в пленке двуокиси кремния. Кроме того, она интенсифицирует процессы замены гидроксильных ионов мостиковыми ионами кислорода с высвобождением некоторого количества водорода.

Анализ распределения величины поверхностного потенциала по площади пластины показал, что проведение быстрой термической обработки пластин после окисления обеспечивает равномерное его распределение и не зависит от БТО исходных подложек. При этом имеет место значительное снижение его величины на границе раздела кремний-двуокись кремния. Для пластин КЭФ 4,5, не проходивших обработку перед окислением, величина поверхностного потенциала уменьшилась с $-1,21$ до $-0,22$ В, а для пластин прошедших ее – с $-1,13$ до $-0,05$ В. В случае пластин КДБ 12 эти изменения составили с $-0,73$ до $-0,21$ В и с $-0,36$ до $-0,28$ В соответственно. Данные результаты свидетельствуют о значительном улучшении свойств границы раздела кремний-двуокись кремния после быстрой термообработки за счет изменения микроструктуры двуокиси кремния по всей ее толщине.

Результаты сравнительного анализа значений пробивного напряжения и тока утечки пирогенного окисла с его зарядовыми свойствами показали (таблица 2), что для кремния *n*-типа проводимости, несмотря на уменьшение заряда, который изначально имел небольшую величину, при проведении быстрой термообработки двуокиси кремния наблюдалось уменьшение ее пробивного напряжения. Такое поведение обусловлено тем, что в данном

случае механизм, связанный с изменением толщины окисла, приводящий к уменьшению значения пробивного электрического напряжения, оказал решающее воздействие на данный параметр. В то же время для кремния *p*-типа проводимости, несмотря на значительное уменьшение заряда, имеет место небольшое увеличение пробивного напряжения. Это связано как с изменением микроструктуры окисла в процессе обработки, так и устранением инверсного слоя, обусловленного данным зарядом, что оказало решающее воздействие на величину пробивного напряжения. Все это позволяет утверждать, что обработка диэлектрических пленок приводит к значительному улучшению электрофизических свойств слоев SiO₂ и данный фактор более весомый, чем выполнение предварительной обработки исходных кремниевых пластин. Такие изменения микроструктуры и электрофизических параметров двуокиси кремния и кремния при быстрой термической обработке значительно повышают время наработки на отказ подзатворного диэлектрика, которое увеличивается в 1,89 раза по сравнению со стандартным процессом его получения пирогенным окислением кремния.

Таблица 2. – Электрофизические параметры системы Si-SiO₂ до и после быстрой термообработки, выращенной на кремнии с его предварительной быстрой термообработкой и без нее

Параметры двуокиси кремния		Тип пластины			
		КЭФ 4,5		КДБ 12	
		Без обработки	С обработкой	Без обработки	С обработкой
Толщина пленки, нм	Исходная	48,05	48,13	48,42	48,48
	После обработки	45,74	45,92	45,88	45,55
Пробивное напряжение, В	Исходное	51,8	53,6	-60,5	-60,9
	После обработки	49,3	49,9	-62,9	-61,5
Ток утечки, нА (при U=20 В)	Исходный	0,622	0,536	0,712	0,632
	После обработки	0,550	0,490	0,538	0,190

Результаты исследования влияния такой обработки на ранее сформированные ионно-легированные слои показали, что она приводит к уменьшению на 1–2% их поверхностного сопротивления за счет

электрической доактивации введенной примеси. При этом глубина залегания примеси увеличивается для фосфора на 0,05 мкм и бора на 0,02 мкм за счет удвоения их коэффициентов диффузии из-за электрического поля, возникающего под воздействием фотонного потока.

В шестой главе приведены результаты по выбору режима быстрой термообработки для формирования силицида платины и исследования его влияния на структуру, фазовый состав, микрорельеф границы раздела с кремнием в процессе твердофазного синтеза силицида платины. Приведены результаты сравнительного анализа электрических характеристик силицида платины, сформированного с использованием быстрой термообработки и традиционным методом.

Температура, время и среда являются определяющими факторами в формировании фазового состава, кристаллической решетки, размера зерна, механических и электрических параметров получаемого силицида. В этом плане ключевую роль в диффузионном синтезе силицидов после нанесения пленки металла выполняет термообработка. В связи с этим для исследования процесса его формирования при быстрой термической обработке нагрев образцов проводился в режиме теплового баланса путем их облучения с нерабочей стороны пластины некогерентным световым потоком в атмосфере N_2 в течение 7 с. до температур от 200 до 550°С с шагом ее изменения 50°С. Выбор азота в качестве среды для обработки системы Pt-Si обусловлен необходимостью исключения процесса окисления кремния в пленке платины. С этой целью напуск азота в герметичную камеру осуществлялся после создания в ней вакуума 10^{-2} мм рт. ст. Такой режим обработки обеспечивал минимизацию влияния кислорода на процесс диффузионного синтеза силицида платины и исключал пластическое течение кремния.

Для изучения структурно-фазовых изменений, имеющих место при формировании силицида платины, и анализа морфологии его границы раздела с кремнием использовались пленки платины толщиной 43,7 нм и чистотой не хуже 99,95 %, напыленные на подложку монокристаллического кремния КЭФ 0,5 ориентации $\langle 111 \rangle$.

Оценка влияния температуры БТО на процесс твердофазного синтеза PtSi проводилась путем анализа спектров РОР (рисунок 6) и спектров рентгеновской дифракции (рисунок 7) после отжига системы Pt-Si при различных температурах. Полученные результаты показали, что увеличение температуры нагрева от 200°С до 550°С за 7 с. в атмосфере N_2 приводит за счет диффузии Pt в Si при $T \leq 300$ °С и встречной совместной диффузии Si и Pt при $T > 300$ °С к последовательности фазовых переходов от Pt к двухфазной пленке Pt-Pt₂Si при $T \leq 250$ °С, однофазной Pt₂Si при $T = 300$ °С, двухфазной PtSi-Pt₂Si при 350 °С $< T < 450$ °С и однофазной PtSi при $T = 450-550$ °С, что в 250-1800 раз

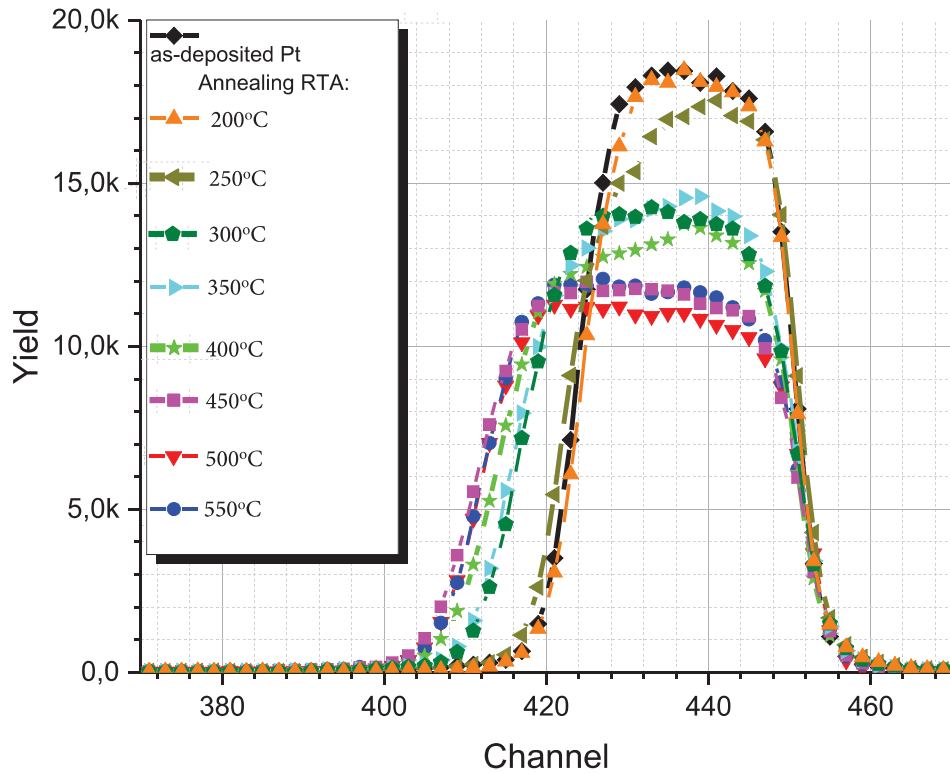
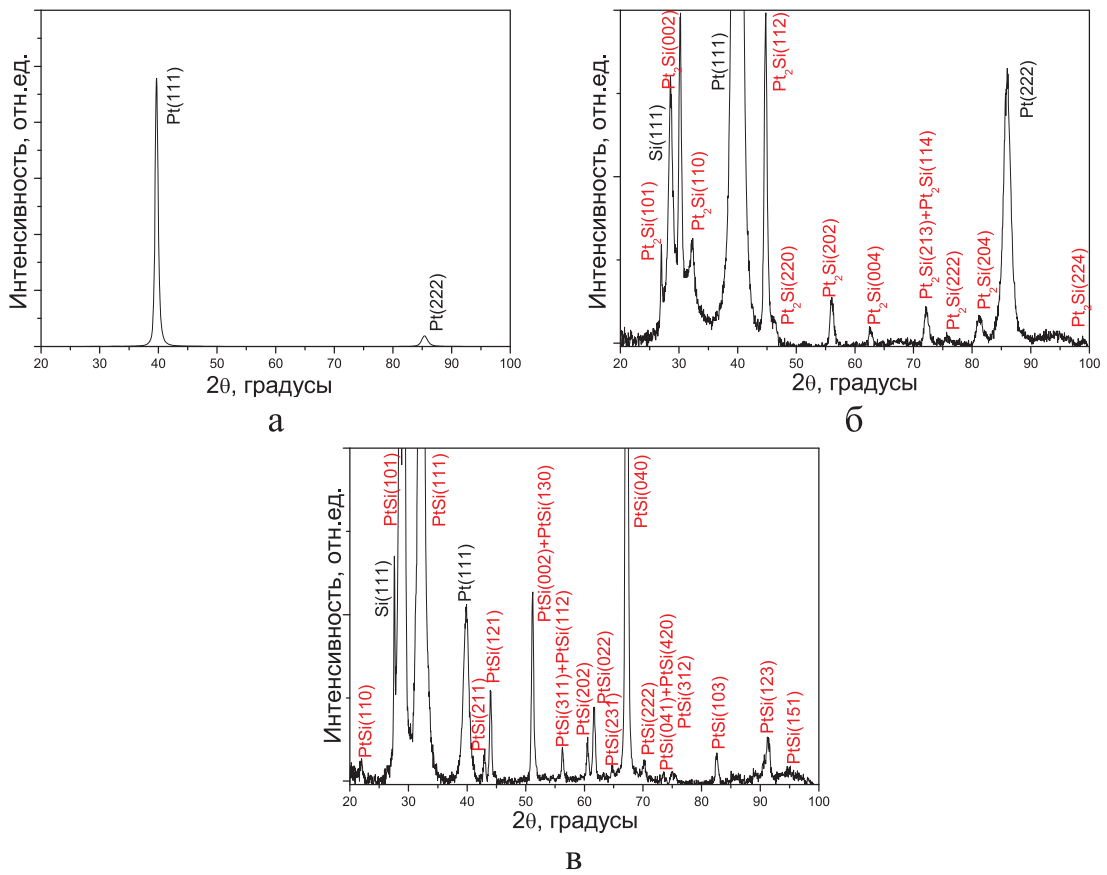


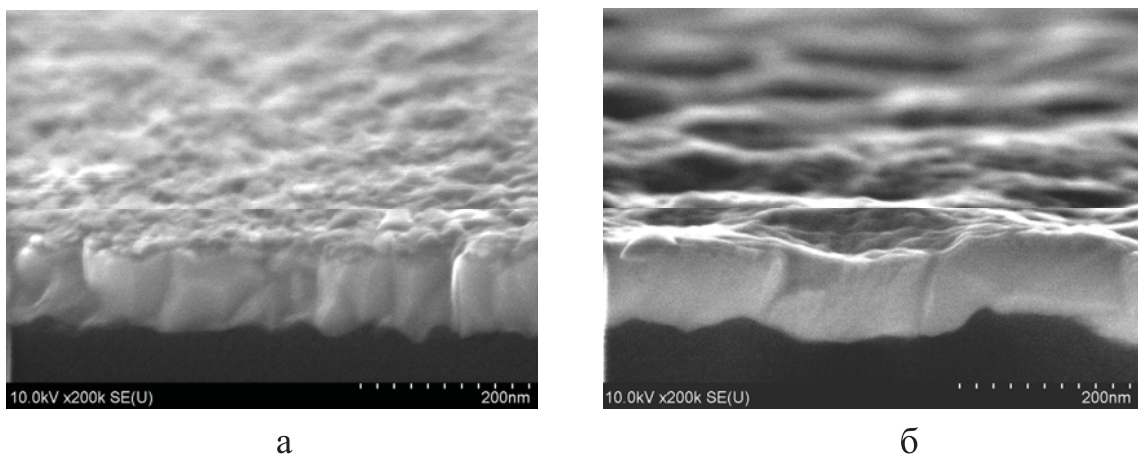
Рисунок 6. – ROP спектры ионов гелия с энергией 1,4 МэВ от пленки платины на кремнии после нанесения и быстрой термообработки



а – исходная пленка Pt, б – БТО пленки Pt при 250 °С, в – БТО пленки Pt при 450 °С
Рисунок 7. – Рентгенограммы слоев Pt на кремнии до и после БТО

быстрее, чем при длительных одностадийной ($T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=30\text{ мин.}$) и двухстадийной ($T=360\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=180\text{ мин.}$ первая стадия и $T=550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=30\text{ мин.}$ вторая стадия) термообработках соответственно. Анализ данных образцов методом просвечивающей электронной микроскопии, полностью подтверждает полученные результаты.

Исследования изменений размера зерен, проведенные методом ПЭМ, а также толщины формируемого силицида платины, микрорельефа его поверхности и границы раздела с кремнием, выполненные на сколах методом растровой электронной микроскопии, от температуры БТО системы Pt-Si позволили установить следующее. Применение БТО для твердофазного синтеза PtSi снижает энергию активации на 0,37 эВ и уменьшает время его протекания за счет разрыва связей Si-Si и электронного возбуждения под воздействием фотонного потока. Это обеспечивает уменьшение размера зерен пленки PtSi и микрорельефа на границе раздела PtSi-Si в 3–4 раза (рисунок 8). При этом микрорельеф поверхности силицида менее развит, чем при длительной термообработке. В целом, при БТО формируется более ранозернистая структура пленки PtSi с углами в тройных точках $\sim 120^{\circ}$, что указывает на ее равновесное состояние, которое в большей степени проявляется при температуре БТО $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, и значительно превосходит структуру пленки, сформированную при длительной термообработке (рисунок 9).



а

б

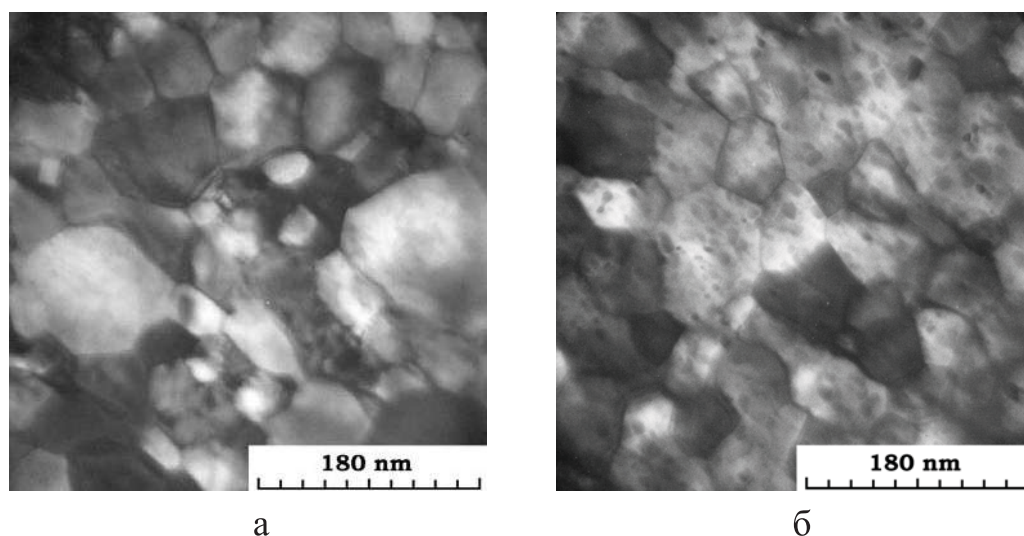
а – быстрая термообработка при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, 7 с;

б – длительная термообработка при $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, 30 мин

Рисунок 8. – Сколы структуры Pt-Si после быстрой и длительной термообработок в среде азота

Одной из важнейших электрических характеристик силицида платины является его удельное сопротивление, которое определяет быстродействие, потери мощности тока, нагревание и другие параметры приборов. Исследование изменения удельного сопротивления системы Pt-Si при формировании силицида платины с применением быстрой термообработки,

проведенные четырехзондовым методом, показало, что при температуре 450 °С, которая соответствует формированию моносилцида платины, его удельное сопротивление составляет 28,0 мкОм·см. Данная величина полностью соответствует справочным данным для силицида платины. Изменение удельного сопротивления пленки платины на кремнии при ее БТО от 200 до 450 °С обусловлено действием *d*-электронов металла при формировании высокоомной фазы Pt₂Si ($\rho=35,2$ мкОм·см), а в случае образования низкоомной фазы PtSi ($\rho=28,0$ мкОм·см) как *d*-электронов металла, так *s*- и *p*-электронов кремния.



а – длительная термообработка пленки Pt на Si при 550 °С в течение 30 мин,
б – быстрая термообработка пленки Pt на Si при 550 °С в течение 7 с

Рисунок 9. – Светлопольные ПЭМ-изображения пленки PtSi на кремнии сформированной методами длительной и быстрой термообработок

Основными параметрами контакта PtSi-Si являются величина барьера и его ток утечки. Результаты анализа ВАХ контакта PtSi-Si показали, что высота барьера PtSi на кремнии, сформированного быстрой термообработкой при 550 °С в течение 7 с., составляет 0,825 В при величине обратного тока $2 \cdot 10^{-6}$ А (обратное смещение 45 В). При длительной одностадийной и двухстадийной термообработках данные величины составили 0,805 В и $(3-6) \cdot 10^{-6}$ А, что значительно хуже параметров, полученным при быстрой термообработке. Это обусловлено менее развитым микрорельефом границы раздела PtSi-Si и более совершенной микроструктурой барьерного слоя в случае применения данной обработки.

В седьмой главе изложены результаты по применению быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика и формированию силицида платины в технологическом цикле создания электронной элементной базы для аэрокосмической техники.

Для исследования влияния быстрой термообработки ($T \sim 1100$ °C) подзатворного диэлектрика на параметры мощного p -канального транзистора были выбраны кремниевый эпитаксиально-планарный полевой транзистор КП7128Б (MOSFET транзистор) с изолированным затвором, обогащенным p -каналом и встроенным обратносмещенным диодом и мощный n -канальный полевой транзистор КП744 (MOSFET транзистор) с изолированным затвором, обогащенным n -каналом и встроенным обратносмещенным диодом. Данный выбор обусловлен их применением в источниках вторичного электропитания с бестрансформаторным входом, а также в регуляторах, стабилизаторах и преобразователях с непрерывным импульсным управлением и другой радиоэлектронной аппаратуре для аэрокосмической техники.

В качестве анализируемых параметров данных транзисторов были выбраны пробивное напряжение и ток утечки затвора, а также проведены термополевые испытания подзатворного диэлектрика. Установлено, что проведение быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на пластинах, прошедших удаление двуокиси кремния с нерабочей стороны, обеспечивает уменьшение токов утечки затвора в 14,59 раза, снижение зарядового состояния в 1,28 раза и повышение надежности подзатворного диэлектрика в 1,4 раза для p -канального транзистора. Для n -канального транзистора данные величины составили до $1,63 \cdot 10^3$, 1,27 и 2,55 раза соответственно.

Для исследования влияния быстрой термообработки подзатворного диэлектрика ($T \sim 1100$ °C) на параметры интегральных микросхем была выбрана микросхема программируемого временного устройства с коррекцией 512ПС8, которая предназначена для использования в радиоэлектронной аппаратуре специального назначения. Она имеет в своем составе как p -канальные, так и n -канальные транзисторы с толщиной подзатворного диэлектрика 75 ± 5 нм и включает 1400 элементов, выполненных по КМОП технологии с карманом p -типа.

В качестве анализируемых параметров данной микросхемы были выбраны пробивное напряжение и ток утечки затвора, величина заряда пробоя подзатворного диэлектрика, а также проведены его термополевые испытания. Данные параметры анализировались как для p -, так и n -канального транзистора. Как показали результаты проведенных исследований, быстрая термообработка подзатворного диэлектрика без наличия его с нерабочей стороны пластины уменьшает ток утечки затвора в 5,29 раза, зарядовые состояния в 3,50 раза и повышает надежность в 1,07 раза для p -канального транзистора, а для n -канального транзистора данные величины составили 10,67, 3,50 и 1,81 раза соответственно.

Повышение надежности MOSFET транзисторов и КМОП микросхем временных устройств при быстрой термообработке подзатворного диэлектрика обусловлено увеличением его заряда пробоя за счет формирования более совершенной микроструктуры, приводящей к перестройке зарядовых состояний как в его объеме, так и на границе с кремнием.

Наличие на облучаемой стороне пластины двуокиси кремния приводит к улучшению параметров как мощных *p*- и *n*-канальных MOSFET транзисторов, так и микросхем программируемого временного устройства в меньшей степени из-за снижения температуры нагрева и увеличения ее разброса, обусловленных увеличением коэффициента отражения и неравномерностью толщины пленки с облучаемой стороны.

На диодной сборке КДШ2932 с общим катодом, состоящей из двух кремниевых эпитаксиально-планарных диодов с барьером Шоттки, изготовленным с применением силицида платины, сформированного с использованием быстрой термообработки, проводился анализ ее тока утечки и высоты барьера Шоттки. Данные параметры сопоставлялись с аналогичными параметрами диодов, сформированных по традиционной технологии с применением длительной двухстадийной термообработки для получения силицида платины (I стадия 350 °С 180 мин в среде N₂, II стадия 550 °С, 30 мин в среде N₂). Результаты измерений показали, что применение БТО для формирования PtSi при температуре 550 °С увеличивает высоту его барьера в 1,026 раза и уменьшает ток утечки в 1,57 раза при комнатной температуре и в 1,25 раза при 125 °С. Такое поведение данных параметров обусловлено образованием при использовании быстрой термообработки барьерного слоя с равнотермической, равновесной и низкодефектной структурой, что повышает надежность ее работы в радиоэлектронной аппаратуре аэрокосмической техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана автоматическая установка поштучной быстрой термообработки кремниевых пластин диаметром 100 мм световыми импульсами длительностью от 0,1 до 600 с как в контролируемой среде (N₂, NH₃, HCl, Ar, O₂, формовочный газ 10% H₂ и 90% Ar), так и в вакууме (~1,33 кПа), обеспечивающая нагрев до 1200 °С со скоростью набора температуры 10-150 °С/с и учитывающая для достижения требуемой температуры и скорости нагрева их зависимость от уровня легирования

кремния, его типа проводимости и кристаллографической ориентации. Кинематическая производительность установки с учетом загрузки пластины, создания вакуума в камере, напуска в камеру требуемого газа и выгрузки составляет не менее 60 пл./час [4, 18, 48].

2. На основании результатов моделирования, проведенных расчетов и экспериментальных результатов показано, что геометрические размеры камеры отжига обеспечивают совпадение неравномерности светового потока с распределением температуры по площади пластины, которое без учета вклада ее торцевой области составляет не более $0,12\text{ }^{\circ}\text{C}$ при нагреве пластины диаметром 100 мм до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ при облучении пластины с нерабочей стороны [4, 5, 8, 9, 33].

3. Впервые методом спектральной эллипсометрии зарегистрирован пик поглощения, обусловленный сингулярностью Ван Хова в Γ -точке зоны проводимости при 3,43 эВ, и показано влияние деформации кристаллической решетки на коэффициент поглощения кремния в данной области спектра [4, 10, 11, 30, 31].

4. Быстрая термическая обработка исходных кремниевых пластин при температуре $\sim 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в результате последовательных электрон-электронного, электрон-фононного и фонон-фононного взаимодействий приводит к увеличению температуры и уменьшению силы связей Si-Si, вызывая твердофазную рекристаллизацию механически нарушенного слоя на рабочей стороне и уменьшение его коэффициента экстинкции на длине волны 632,8 нм в 1,14-1,55 раза за счет удаления влаги, групп ОН, а также сублимации органических и неорганических загрязнений [4, 6, 10-12, 31, 32, 40, 43, 44, 46, 47].

5. Быстрая термическая обработка подзатворного диэлектрика при температуре $\sim 1100^{\circ}\text{C}$, полученного пироженным окислением кремния, приводит к значительной перестройке его микроструктуры: изменению механических напряжений, углов и силы Si-O-связей; образованию дополнительных Si-O-связей за счет замены гидроксильных ионов ОН мостиковыми ионами кислорода; уплотнению его объема и снижению пористости. Это обеспечивает для кремния КЭФ 4,5 уменьшение напряжения плоских зон в 20-60 раз, поверхностного потенциала в 5-20 раз, заряда на границе раздела в 2,6-3,7 раза, а для кремния КДБ 12 данные значения составляют 1,5, 1,26-3,45 и 3,2-4,3 раза соответственно, при одновременном увеличении его пробивного напряжения и уменьшении тока утечки, что приводит к увеличению до 1,89 раза времени его наработки на отказ [2, 13, 14, 19, 27, 29, 32, 34, 45, 47, 49, 50].

6. Расчетным путем и экспериментально показано, что быстрая термообработка при температуре $\sim 1100^{\circ}\text{C}$ подзатворного диэлектрика приводит к увеличению глубины залегания примеси в ранее сформированных ионно-легированных слоях на 0,05 мкм для Р и 0,02 мкм

для В в результате удвоения их коэффициента диффузии за счет электрического поля, возникающего под воздействием фотонного потока, и обеспечивает уменьшение на 1-2% их поверхностного сопротивления, обусловленное электрической доактивацией введенной примеси [7, 20].

7. Выявлены закономерности структурно-фазовых изменений в системе платина-кремний при ее быстрой термообработке до 550 °С в течение 7 с в атмосфере N₂, приводящие за счет диффузии Pt в Si при T≤300 °С и встречной совместной диффузии Si и Pt при T>300 °С к последовательности фазовых переходов от Pt к двухфазной пленке Pt-Pt₂Si при T≤250 °С, однофазной Pt₂Si при T=300 °С, двухфазной PtSi-Pt₂Si при 350 °С<T<450 °С и однофазной PtSi при T=450 °С с формированием при 550 °С равновесной, низкодефектной структуры PtSi с размером зерен и микрорельефом ее границы раздела с Si в 3-4 раза меньшими, чем при стандартных одностадийном (T=550 °С, t=30 мин.) и двухстадийном (T=350 °С, t=180 мин. и T=550 °С, t=30 мин.) процессах его получения [3, 21, 23-25, 28, 36, 37].

8. Установлено снижение на 0,37 эВ энергии активации образования PtSi в процессе быстрой термообработки (T=450 °С, t=7 с.), обусловленное разрывом связей Si-Si и электронным возбуждением в кремнии под действием фотонного потока, приводящих к уменьшению времени его образования в 250-1800 раз относительно стандартных одностадийного (T=550 °С, t=30 мин.) и двухстадийного (T=350 °С, t=180 мин. и T=550 °С, t=30 мин.) процессов его формирования соответственно, обеспечивая получение пленки PtSi с высотой барьера 0,825 В при величине обратного тока 2,57·10⁻⁶ А, соответствующей напряжению обратного смещения 45 В в отличие от длительных термообработок, когда данные величины составляют 0,804 В и (6,58 – 3,77)·10⁻⁶ А соответственно [3, 17, 21-25, 36, 37].

9. Изменение удельного сопротивления пленки платины на кремнии при ее БТО от 200 до 450 °С обусловлено действием *d*-электронов металла при формировании высокоомной фазы Pt₂Si (ρ=35,2 мкОм·см), а в случае образования низкоомной фазы PtSi (ρ=28,0 мкОм·см) – действием как *d*-электронов металла, так *s*- и *p*-электронов кремния [3, 16, 35].

10. Быстрая термическая обработка подзатворного диэлектрика при температуре ~1100°С мощных *p*- и *n*-канальных транзисторов на пластинах, прошедших удаление двуокиси кремния с нерабочей стороны, обеспечивает уменьшение токов утечки затвора в 14,59 и 1,63·10³ раза, снижение зарядового состояния в 1,28 и 1,27 раза, повышение надежности подзатворного диэлектрика в 1,40 и 1,86 раза соответственно. В случае программируемых КМОП микросхем временных устройств данная обработка уменьшает ток утечки затвора в 5,29 раза, зарядовые состояния в 3,50 раза и повышает надежность в 1,07 раза для *p*-канального транзистора, а для

n-канального данные значения составляют 10,67, 3,50 и 1,81 раза соответственно [1, 3, 15, 26, 41, 51-53].

11. Показано, что быстрая термообработка подзатворного диэлектрика при температуре ~1100 °С и ее применение для формирования PtSi при температуре ~550 °С повышает надежность электронной элементной базы в первом случае за счет увеличения заряда пробоя подзатворного диэлектрика, обусловленного формированием более совершенной его микроструктуры с уменьшенными зарядовыми состояниями как в объеме, так и на границе с кремнием, а во втором – за счет повышения высоты барьера и понижения в 1,57 раза тока утечки диодов Шоттки при комнатной температуре и до 1,25 раза при 125 °С, обусловленных образованием барьерного слоя с равнозернистой, равновесной и низкодефектной структурой [3, 15, 17, 26, 38, 39, 42, 51-55].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанная автоматическая установка поштучной быстрой термообработки кремниевых пластин диаметром 100 мм световыми импульсами длительностью от 0,1 до 600 с в различных средах (N₂, NH₃, HCl, Ar, O₂, формовочный газ 10% H₂ и 90% Ar) и в вакууме (~1,33 кПа), обеспечивающая их нагрев до 1200 °С, внедрена в серийное производство полупроводниковых приборов и интегральных схем на Филиале «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». С ее применением разработаны технологические процессы модификации механически нарушенных слоев на планарной стороне кремниевых пластин и свойств подзатворного диэлектрика, полученного пирогенным окислением кремния, а также технологический процесс формирования барьерного слоя на основе силицида платины. Их использование позволило в 1,40-1,86 раза повысить надежность электронной элементной базы для аппаратуры, работающей в экстремальных условиях эксплуатации. Объем выпуска полупроводниковых приборов и интегральных микросхем в год, изготовленных с применением данных технологий, составил 162 967 шт. на сумму 7 513 177 BYN (приложение).

Результаты исследований рекомендуется использовать в электронной промышленности при создании новой электронной элементной базы для аэрокосмической техники, а также аппаратуры, работающей в экстремальных условиях эксплуатации.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монографии

1. Белоус, А. И. Космическая электроника : в 2 кн. / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М. : Техносфера, 2015. – Кн. 1. – 694 с.
2. Белоус, А. И. Космическая электроника : в 2 кн. / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М. : Техносфера, 2015. – Кн. 2. – 488 с.
3. Основы силовой электроники / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, А. И. Белоус, С. А. Ефименко. – М. : Техносфера, 2019. – 424 с.
4. Инновационные технологии и оборудование микроэлектронного производства / А. П. Достанко, С. М. Аваков, Д. А. Голосов, В. В. Емельянов, С. М. Завадский, В. В. Колос, В. Л. Ланин, С. И. Мадвейко, С. Н. Мельников, Ю. В. Никитюк, А. Н. Петлицкий, И. Б. Петухов, В. А. Пилипенко, В. И. Плебанович, В. А. Солодуха, С. И. Соколов, Е. В. Телеш, Е. Б. Шершнеф ; под ред. академика НАН Беларуси А. П. Достанко. – Минск : Беларуская навука, 2020. – 260 с.

Статьи в научных журналах

5. Оценка равномерности нагрева поверхности полупроводниковых пластин при быстрой термообработке / В. А. Горушко, В. А. Пилипенко, В. В. Понарядов, Т. В. Петлицкая, В. А. Солодуха, С. В. Шведов // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2015. – № 1. – С. 53–55.
6. Солодуха, В. А. Измерение глубины нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин методом оже-спектроскопии / В. А. Солодуха, А. И. Белоус, Г. Г. Чигирь // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 329–334.
7. Применение быстрой термической обработки для отжига ионно-легированных слоев в поликремнии / В. М. Анищик, В. А. Горушко, В. А. Пилипенко, В. В. Понарядов, В. А. Солодуха // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2017. – № 2. – С. 63–68.
8. Солодуха, В. А. Режимы быстрой термообработки системы Pt-Si для формирования силицида платины / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, В. А. Горушко // Доклады БГУИР. – 2018. – № 8(118). – С. 88–92.
9. Characteristic Features of Heating Semiconductor Silicon Structures during the Rapid Thermal Treatment in the VLSI Technology / V. Bondariev, V. Gorushko, V. Pilipenko, V. Solodukha // High Temperature Material Processes. – 2018. – V. 22, № 1. – P. 1–6.

10. Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке / В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горушко, А. А. Омельченко // Доклады национальной академии наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 347–352.

11. Re-crystallization of Silicon during Rapid Thermal Treatment / V. Gorushko, A. Omelchenko, V. Pilipenko, V. Solodukha // Przegląd Elektrotechniczny. – 2018. – V. 94, № 5. – P. 196–198.

12. Влияние быстрой термической обработки исходных кремниевых пластин на процесс их пирогенного окисления / В. М. Анищик, В. А. Горушко, В. А. Пилипенко, В. В. Понарядов, В. А. Солодуха // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2018. – № 2. – С. 81–85.

13. Пилипенко, В. А. Влияние быстрой термической обработки на электрофизические свойства двуокиси кремния / В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горушко // ИФЖ. – 2018. – Т. 91, № 5. – С. 1408–1412.

14. Экспрессный контроль надежности подзатворного диэлектрика в производстве полупроводниковых приборов / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, Г. Г. Чигирь, В. А. Филипеня, В. А. Горушко // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 306–313.

15. Солодуха, В. А. Влияние быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры мощных полевых MOSFET транзисторов / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, В. А. Горушко // Доклады БГУИР. – 2018. – № 5(115). – С. 99–103.

16. Электропроводность пленок силицида платины, сформированных с применением быстрой термообработки / В. М. Анищик, В. А. Горушко, В. А. Пилипенко, В. В. Понарядов, В. А. Солодуха // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2019. – № 1. – С. 27–31.

17. Влияние режимов формирования силицида платины методом быстрой термообработки на параметры диода Шоттки / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, В. А. Горушко, В. А. Филипеня // Доклады БГУИР. – 2019. – № 1(119). – С. 62–67.

18. Солодуха, В. А. Роботизированная установка быстрой термической обработки для создания изделий электронной техники / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, В. П. Яковлев // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4 (122). – С. 92–97.

19. Influence of the Rapid Thermal Treatment of the Initial Silicon Wafers on the Electro-physical Properties of Silicon Dioxide, Obtained with Pyrogenous Oxidation / Vladimir Pilipenko, Vitaly Solodukha, Anatoly Zharin, Oleg Gusev, Roman Vorobey, Andrei Tyavlovsky, Konstantin Tyavlovsky, Vitalii Bondariev // High Temperature Material Processes. – 2019. – V. 23, № 3. – P. 283-290.

20. Перераспределение примеси в ионно-легированных слоях при быстрой термообработке подзатворного диэлектрика / В. М. Анищик, В. А. Горушко, В. А. Пилипенко, В. В. Понарядов, В. А. Солодуха // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2019. – № 2. – С. 48–53.

21. Formation of platinum silicide layers during the rapid thermal treatment of the system platinum-silicon: structural-phase changes / V. A. Solodukha, V. A. Pilipenko, V. A. Gorushko, F. F. Komarov, O. V. Milchanin // High Temperature Material Processes. – 2019. – V. 23, № 3 – P. 195–208.

22. Formation of platinum silicide layers during the rapid thermal treatment of the system platinum-silicon: microstructure and electrophysical characteristics / V. A. Solodukha, V. A. Pilipenko, V. A. Gorushko, F. F. Komarov, O. V. Milchanin // High Temperature Material Processes. – 2019. – V. 23, № 3 – P. 255–273.

23. Структурно-фазовые переходы в системе Pt-Si при ее быстрой термообработке / В. А. Пилипенко, Ф. Ф. Комаров, В. А. Солодуха, В. А. Горушко // Доклады национальной академии наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 2. – С. 238–244.

24. Влияние временных режимов термообработки на микроструктуру системы Pt-Si / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, Ф. Ф. Комаров, В. А. Горушко // Доклады БГУИР. – 2020. – № 18(2). – С. 105–111.

25. Электронно-микроскопические исследования системы Pt-Si при ее быстрой термообработке / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, Ф. Ф. Комаров, В. А. Горушко // Доклады БГУИР. – 2020. – № 18(3). – С. 88–96.

26. Солодуха, В. А. Влияние быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры микросхем временных устройств / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, В. А. Горушко // Доклады БГУИР. – 2020. – № 18(3). – С. 20–27.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

27. Моделирование времени наработки до отказа подзатворного диэлектрика субмикронных микросхем по величине пробивного напряжения при различных скоростях развертки / Г. Г. Чигирь, А. И. Белоус, А. К. Панфиленко, А. Н. Петлицкий, В. А. Солодуха, С. В. Шведов // Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение : сборник трудов 2-ой Российско-Белорусской научно-технической конференции, Нижний Новгород, 17–19 ноября 2015. – Нижний Новгород. – 2015. – С. 223–226.

28. Особенности возникновения структурных дефектов в сильнолегированном Si при диффузии фосфора / А. Е. Беляев,

Н. С. Болтовец, Р. В. Конакова, В. П. Кладько, О. И. Любченко, А. В. Саченко, Н. В. Сафрюк, В. В. Шинкаренко, В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, А. А. Ходин, П. Н. Романец, Я. Я. Кудрик // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й Международной конференции, Минск, 19–22 сентября 2017 г. – Минск, Издательский центр БГУ, 2017. – С. 428–430.

29. Depth Measurement of Nanoscale Damage to the Surface of Silicon Wafers in the Production of Submicron Integrated Microcircuits by Auger Spectroscopy Method / V. A. Solodukha, S. V. Shvedov, R. R. Chyhir, A. N. Petlitsky // Proceedings of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials : Applications & Properties (NAP-2017), Zatoka, Ukraine, 10–15 September, 2017 / Sumy State University. – Sumy, 2017. – P. 02MAN08-1 – 02MAN08-4.

30. Применение метода спектральной эллипсометрии для контроля туннельного диэлектрика на основе оксида и нитрида кремния в микро- и нанoeлектронике / А. Н. Петлицкий, В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, Н. А. Кречотень, Н. С. Ковальчук, А. А. Омельченко // Функциональная база нанoeлектроники : сборник научных трудов IX Международной научной конференции, Харьков, 18–23 сентября 2017 г. / Харьковский национальный университет радиоэлектроники. – Харьков-Одесса, 2017. – С. 14–17.

31. Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя поверхности кремниевых пластин / В. В. Понарядов, В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горушко, А. А. Омельченко // Радиационная физика твердого тела : труды XXVII Международной конференции, Севастополь, 10–15 июля 2017 г. – Москва, 2017. – С. 147–155.

32. Стабилизация параметров границы раздела Si-SiO₂ с помощью быстрой термической обработки / В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горушко, В. А. Филипеня // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 12-й международной конференции, Минск, 19–22 сентября 2017 г. – Минск, Издательский центр БГУ, 2017. – С. 271–273.

33. Солодуха, В. А. Особенности режимов формирования силицида платины при быстрой термообработке / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, В. А. Горушко // Материалы и структуры современной электроники : сборник научных трудов VIII Международной научной конференции, Минск, 10–11 октября 2018 г. – Минск, Издательский центр БГУ, 2018. – С. 101–104.

34. Быстрый термический отжиг как метод улучшения электрических параметров подзатворного диэлектрика / В. В. Понарядов, В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горушко, А. А. Омельченко // Радиационная физика твердого тела : труды XXVIII Международной конференции, Севастополь,

9–14 июля 2018 г. – Москва, Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2018. – С. 330–337.

35. Пилипенко, В. А. Электропроводность пленок силицида платины сформированного с применением быстрой термообработки / В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горушко // Актуальные проблемы физики твердого тела : сборник докладов VIII Международной научной конференции, Минск, 24–28 сентября 2018 г. : в 3 т. – Минск, «Ковчег», 2018. – Т. 3. – С. 222–224.

36. Структурно-фазовые изменения в системе платина-кремний при быстрой термообработке / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, В. А. Горушко, В. В. Понарядов, Ф. Ф. Комаров, В. В. Углов // Радиационная физика твердого тела : труды XXIX Международной конференции, Севастополь, 8–13 июля 2019 г. – Москва, Издательство ФГБНУ «НИИ ПМТ», 2019. – С. 396–406.

37. Характеризация методом РОР процесса формирования слоев силицида платины при быстрой термообработке системы платина-кремний / В. А. Солодуха, О. В. Мельчанин, В. А. Пилипенко, И. В. Ушаков, В. А. Горушко // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 13-й Международной конференции, Минск, 30 сентября – 3 октября 2019 г. – Минск, Издательский центр БГУ, 2019. – С. 316–319.

Тезисы докладов на научных конференциях

38. The features of cleavages in Au–Ti–Pd–n⁺–n–Si ohmic contacts / A. E. Belyaev, N. S. Boltovets, A. O. Vinogradov, V. A. Pilipenko, T. V. Petlitskaya, V. A. Solodukha, R. V. Konakova, Ya. Ya. Kudryk, T. V. Korostinskaya // Physics and technology of thin films and nanosystems : Proceedings of XV International Conference, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 11–16 May, 2015. – Ivano-Frankivsk, 2015. – P. 72.

39. Структурная релаксация в контактной металлизации к кремниевым приборным структурам / А. Е. Беляев, Н. С. Болтовец, А. В. Саченко, Р. В. Конакова, Я. Я. Кудрик, Т. В. Коростинская, А. О. Виноградов, В. С. Слепокуров, А. Б. Атубаева, В. А. Пилипенко, Т. В. Петлицкая, В. А. Солодуха, А. А. Ходин // Структурная релаксация в твердых телах : материалы Международной научно-практической конференции, Винница, Украина, 26–28 мая 2015 г. – Винница, 2015. – P. 187.

40. Prefailure Life Time Simulation of the Submicron ICs' Gate Dielectric as per the Breakdown Voltage Value at the Various Sweep Rates / V. A. Solodukha, S. V. Shvedov, A. N. Petlitsky, R. R. Chyhir // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation : Proceedings of

9th International Conference, Zakopane, Poland, 23–26 June, 2015 / Lublin University of Techno-logy. – Lublin, 2015. – P. 20.

41. Солодуха, В. А. Новые разработки радиационно-стойкой ЭКБ холдинга «ИНТЕГРАЛ» / В. А. Солодуха, А. И. Белоус // Интегральные схемы и микроэлектронные модули : тезисы докладов 2-ой научной конференции Международного форума «Микроэлектроника-2016», Алушта, 26–30 сентября 2016. – Алушта, Техносфера. – 2016. – С. 33–38.

42. Technological and Electrical Characteristics of High Temperature Schottky / V. Solodukha, A. Belous, M. Kutas, S. Shvedou, I. Lovshenko, V. Stempitsky // The 43 EUROMICRO Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA 2017) and the 20 EUROMICRO Conference on Digital System Design (DSD 2017) : Proceedings of the Work in Progress Session, Vienna (Austria), August 30–September 1, 2017. – Vienna, 2017. – P. 17–18.

43. Влияние быстрой термообработки на оптические параметры кремния / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, А. А. Омельченко, Д. В. Жигулин, Т. В. Петлицкая, Я. А. Соловьев // Современные информационные и электронные технологии : труды XVIII Международной научно-практической конференции, Одесса, 22–26 мая 2017 г. – Одесса, Политехперіодика, 2017. – С. 73–74.

44. Silicon Recrystallization during Rapid Heat Treatment / V. A. Gorushko, A. A. Omelchenko, V. A. Pilipenko, V. A. Solodukha // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation : 10th International Conference, Zakopane, Poland, 27–30 June, 2017 / Lublin University of Technology. – Lublin, 2017. – P. 26.

45. Экспрессный контроль надежности подзатворного диэлектрика интегральных микросхем по величине пробивного напряжения при разной скорости развертки / В. А. Солодуха, С. В. Шведов, Н. С. Ковальчук, Г. Г. Чигирь, А. Н. Петлицкий // Современные информационные и электронные технологии : труды XIX Международной научно-практической конференции, Одесса, 28 мая–1 июня 2018 г. – Одесса, Политехперіодика, 2018. – С. 81–82.

46. Влияние быстрой термообработки исходных кремниевых пластин на их пирогенное окисление / В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха, В. А. Горущко, А. А. Омельченко // Современные информационные и электронные технологии : труды XIX Международной научно-практической конференции, Одесса, 28 мая–1 июня 2018. – Одесса, Политехперіодика. – 2018. – С. 77–78.

47. Контроль параметров границы раздела кремний-двуокись кремния после быстрой термообработки методами вольт-фарадных характеристик и зондовой электрометрии / А. Л. Жарин, О. К. Гусев, К. В. Пантелеев, А. К. Тявловский, К. Л. Тявловский, В. А. Пилипенко, В. А. Солодуха // Приборостроение-2018 : материалы 11-й Международной научно-

технической конференции, Минск, 14–16 ноября 2018 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2018. – С. 93–95.

48. Rapid Thermal Treatment Automated Unit for Creation of Semiconductor Devices and Integrated Circuits / V. A. Solodukha, V. A. Pilipenko, V. P. Ykovlev, V. A. Gorushko // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation : 11th International Conference, Zakopane, Poland, 25–28 June, 2019 / Lublin University of Technology. – Lublin, 2019. – P. 13.

49. Оперативный анализ качества диэлектрических слоев интегральных микросхем по вольт-амперным характеристикам / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, А. В. Кетько, Г. Г. Чигирь, В. А. Филипеня // Современные информационные и электронные технологии : труды XX Международной научно-практической конференции, Одесса, 27–31 мая 2019 г. – Одесса, Политехперіодика, 2019. – С. 114–115.

50. Quality Analysis of Dielectric Layers of Integrated Circuits as per the Breakdown Current Value / V. A. Solodukha, V. A. Pilipenko, A. V. Ketsko, R. R. Chyhir // New Electrical and Electronic Technologies and their Industrial Implementation : 11th International Conference, Zakopane, Poland, 25–28 June, 2019 / Lublin University of Technology. – Lublin, 2019. – P. 14.

51. Влияние быстрой термической обработки подзатворного диэлектрика на параметры микросхем временных устройств / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, В. А. Горушко В. А. Филипеня // Современные информационные и электронные технологии : труды XX Международной научно-практической конференции, Одесса, 27–31 мая 2019 г. – Одесса, Политехперіодика, 2019. – С. 116–117.

Заявки на изобретения

52-А. Способ формирования слоя силицида платины для диодов Шоттки : заявка МПК Н 01L 21/02, Н 01L 29/66 / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, Я. А. Соловьев, О. Э. Сарычев ; ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – Опубл. 30.10.2019.

53-А. Способ изготовления диода Шоттки : заявка МПК Н 01L 21/02, Н 01L 29/66 / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, Я. А. Соловьев, О. Э. Сарычев ; ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – Опубл. 30.10.2019.

54-А. Способ уменьшения плотности поверхностного заряда тонких слоёв диоксида кремния для интегральных схем : заявка МПК Н 01L 21/28 / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, Я. А. Соловьев, О. Э. Сарычев ; ОАО

«ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – Оpubл. 30.12.2019.

55-А. Способ изготовления интегральной схемы с МОП – транзисторами : заявка МПК Н 01L 27/088, 27/092 / В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко, Я. А. Соловьев, О. Э. Сарычев ; ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». – Оpubл. 28.02.2020.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

РЭЗІЮМЭ

Саладуха Віталь Аляксандравіч

Хуткія тэрмічныя працэсы ў тэхналогіі стварэння электроннай элементнай базы для аэракасмічнай тэхнікі

Ключавыя словы: хуткая тэрмічная апрацоўка, цвердафазная рэкрышталізацыя, падзатворны дыэлектрык, сіліцыд плаціны, зарад на мяжы раздзелу, дыёд Шоткі, ток уцечкі, напружанне прабою.

Мэта работы: устанаўленне заканамернасцяў уплыву хуткай тэрмічнай апрацоўкі на паверхневыя ўласцівасці крэмнія, дыэлектрычныя і іонна-легіраваныя слаі, цвердафазны сінтэз PtSi і распрацоўка тэхналагічных працэсаў, якія забяспечваюць паляпшэнне электрычных характарыстык элементнай базы для аэракасмічнай тэхнікі.

Метады даследавання: Фур'е- і ожэ-спектраскапія, растрвая і прасвечваючая электронная мікраскапія, рэнтгенаўскі мікрааналіз, рэзерфордаўскае зваротнае расейванне, спектральная эліпсаметрыя, кантактная рознасць патэнцыялаў, чатырохзондавы метады, $C-V$ -метрыя, вольтамперныя характарыстыкі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: упершыню паказана, што хуткая тэрмічная апрацоўка зыходных крэмніевых пласцін пры ~ 1100 °C прыводзіць да памяншэння таўшчыні механічна парушанага слоя крэмнія і забяспечвае фарміраванне атамарна-плоскай і чыстай паверхні за кошт яго цвердафазнай рэкрышталізацыі, забяспечваючы паляпшэнне уласцівасцяў SiO_2 , вырашчанай на ёй пірагенным акісленнем; хуткая тэрмічная апрацоўка пры ~ 1100 °C слаеў SiO_2 , атрыманых пірагенным акісленнем, выклікае змяненне яго структуры і электрафізічных параметраў, якое заключаецца ў перабудове мікраструктуры за кошт замены гідраксільных іонаў OH мосцікавымі іонамі кіслароду, ушчыльненні аб'ёму і зніжэнні порыстасці, што абумоўлівае памяншэнне зарада на мяжы раздзелу, токаў уцечкі і павелічэнне прабіўных напружанняў; устаноўлены заканамернасці ўплыву тэмпературы хуткай тэрмаапрацоўкі на структурна-фазавыя змены ў сістэме Pt-Si, абумоўленыя зніжэннем энергіі актывацыі фарміравання PtSi на 0,37 эВ з-за разрыву сувязей Si-Si і электроннага ўзбуджэння ў крэмніі, што памяншае час утварэння PtSi у 250-1800 разоў у параўнанні з стандартным аднастадыійным (550 °C, 30 хвілін) і двухстадыійным ($T=350$ °C, $t=180$ хвілін і $T=550$ °C, $t=30$ хвілін) працэсамі, забяспечваючы памяншэнне памеру зерняў у плёнцы, мікрарэльефу на мяжы з Si у 3-4 разы і фарміраванне бар'ера вышынёй 0,825 В з паменшаным да 1,57 разу токам уцечкі.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: у электроннай прамысловасці пры стварэнні новых вырабаў электроннай элементнай базы для аэракасмічнай тэхнікі, а таксама апаратуры, якая працуе ў экстрэмальных умовах эксплуатацыі.

Вобласць прымянення: вытворчасць вырабаў электроннай тэхнікі.

РЕЗЮМЕ**Солодуха Виталий Александрович****Быстрые термические процессы в технологии создания электронной элементной базы для аэрокосмической техники**

Ключевые слова: быстрая термическая обработка, твердофазная рекристаллизация, подзатворный диэлектрик, силицид платины, заряд на границе раздела, диод Шоттки, ток утечки, напряжение пробоя.

Цель работы: установление закономерностей влияния быстрой термической обработки на поверхностные свойства кремния, диэлектрические и ионно-легированные слои, твердофазный синтез PtSi и разработка технологических процессов, обеспечивающих улучшение электрических характеристик элементной базы для аэрокосмической техники

Методы исследования: Фурье- и оже-спектроскопия, растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновский микроанализ, резерфордовское обратное рассеяние, спектральная эллипсометрия, контактная разность потенциалов, четырехзондовый метод, *C-V*-метрия, вольтамперные характеристики.

Полученные результаты и их новизна: впервые показано, что быстрая термическая обработка исходных кремниевых пластин при ~ 1100 °C приводит к уменьшению толщины механически нарушенного слоя кремния и обеспечивает формирование атомарно-плоской и чистой поверхности за счет его твердофазной рекристаллизации, обеспечивая улучшение свойств SiO₂, выращенной на ней пирогенным окислением; быстрая термическая обработка при ~ 1100 °C слоев SiO₂, полученных пирогенным окислением, вызывает изменение его структуры и электрофизических параметров, заключающееся в перестройке микроструктуры за счет замены гидроксильных ионов OH мостиковыми ионами кислорода, уплотнении объема и снижении пористости, что обуславливает уменьшение заряда на границе раздела, токов утечки и увеличение пробивных напряжений; установлены закономерности влияния температуры быстрой термообработки на структурно-фазовые изменения в системе Pt-Si, обусловленные снижением энергии активации формирования PtSi на 0,37 эВ из-за разрыва связей Si-Si и электронного возбуждения в кремнии, что уменьшает времени образования PtSi в 250-1800 раз по сравнению со стандартным одностадийным (550 °C, 30 мин) и двухстадийным (T=350 °C, t=180 мин и T=550 °C, t=30 мин) процессами, обеспечивая уменьшение размера зерен в пленке, микрорельефа на границе с Si в 3-4 раза и формирование барьера высотой 0,825 В с уменьшенным до 1,57 раза током утечки.

Рекомендации по использованию: в электронной промышленности при создании новых изделий электронной элементной базы для аэрокосмической техники, а также аппаратуры, работающей в экстремальных условиях эксплуатации.

Область применения: производство изделий электронной техники.

SUMMARY

Solodukha Vitaly Aleksandrovich

Rapid Thermal Processes in the Technology of Creation of the Electronic Element Base in the Airspace Engineering

Key words: rapid thermal treatment, solid phase re-crystallization, gate dielectric, platinum silicide, boundary charge, Schottky diode, leakage current, breakdown voltage.

Purpose of work: determination of the influence regularities of the rapid thermal treatment on the surface properties of silicon, dielectric and ion-doped layers, solid phase synthesis of PtSi and development of the technological processes, ensuring enhancement of the electric parameters of the element base for the airspace hardware.

Methods of investigation: Fourier – and Auger - spectroscopy, Raster and transmission electron microscopy, X-ray microanalysis, Rutherford reverse dissipation, spectral ellipsometry, contact difference of potentials, quad-probe method, C - V -metering, volt-ampere characteristics.

Obtained results and their novelty: for the first time it was shown, that the rapid thermal treatment of the initial silicon wafers at ~ 1100 °C results in reduction of the mechanically disrupted silicon layer and ensures formation of the atomic – flat and pure surface at the expense of its solid phase re-crystallization, ensuring enhancement of the SiO_2 properties, grown on it by means of the pyrogenic oxidation; rapid thermal treatment at ~ 1100 °C of the SiO_2 layers, obtained by means of the pyrogenic oxidation, causes alteration of its structure and electrical physical parameters, constituting rearrangement of the microstructure at the expense of the substitution of the hydroxyl ions OH with the bridge ions of oxygen, compression of volume and reduction of porosity, which determines reduction of the charge on the boundary, of the leakage currents and the step-up of the breakdown voltages; there were established the temperature influence regularities of the rapid thermal treatment on the structural – phase alterations in the Pt-Si system, determined by the activation energy reduction of the PtSi formation by 0,37 eV due to rupture of the Si-Si bonds and the electronic excitation in silicon, which shortens the time for the PtSi formation 250-1800 times as compared with the standard single stage (550 °C, 30 min) and double stage ($T=350$ °C, $t=180$ min and $T=550$ °C, $t=30$ min) processes, ensuring reduction of the grain size in the film, of the micro-relief on the boundary with Si by 3-4 times and formation of the barrier with the height of 0,825 V with the reduced leakage current down to 1,57 times.

Recommendations on application: in the electronic industry during creation of the new devices of the electronic element base for the airspace hardware, as well as for the equipment, working under the extreme operational conditions.

Sphere of application: production of the electronic hardware devices.

Научное издание

Солодуха Виталий Александрович

**БЫСТРЫЕ ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ
СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ДЛЯ
АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

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

Подписано в печать 21 сентября 2020 г. Формат 60×84/16
Тип бумаги – офсетная. Гарнитура «Times». Печать офсетная.
Объем: 3,00 усл. печ. л., 2,37 уч.-изд. л.
Тираж 65 экз. Заказ 2135

Отпечатано УП «Интегралполиграф»
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 2/15 от 21.11.2013.
220108, г. Минск, ул.Корженевского, 16