

На правах рукописи

Романов Андрей Владимирович

**ЗАРЯДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МДП-СТРУКТУРАХ В УСЛОВИЯХ
РАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И СИЛЬНОПОЛЕВОЙ
ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2018

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Андреев Владимир Викторович

Официальные оппоненты: **Волков Николай Викторович**
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ),
доцент кафедры «Физические проблемы материаловедения»

Вишняков Николай Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет»,
доцент кафедры
«Микро- и наноэлектроника»

Ведущая организация
Лаборатория Космического материаловедения
ИК РАН – филиал Федерального
государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр
«Кристаллография и фотоника»
Российской академии наук»

Защита состоится «17» октября 2018 г. в 14 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.17 при ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу: 248000, Калуга, ул. Баженова, д. 2. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайтах <http://www.bmstu.ru>, <http://bmstu-kaluga.ru>.

Автореферат разослан «___» ____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
кандидат технических наук, доцент



С.А. Лоскутов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Последние несколько десятилетий интенсивно исследуются физические процессы в твёрдых телах при радиационных облучениях, в том числе в полупроводниковых структурах и различных приборах на их основе. Подавляющее большинство исследований связано с изучением деградационных процессов в МДП-приборах под действием различных видов облучений. Эти исследования направлены в первую очередь на повышение радиационной стойкости и надежности МДП-приборов, работающих в условиях космоса, военных применений, атомной энергетики и. т.д. Другое направление исследований связано с возможностью использования радиационных обработок для модификации МДП-структур с целью повышения надежности приборов и интегральных микросхем, а также коррекции их характеристик. Еще одно направление исследований посвящено возможности использования МДП-структур и приборов на их основе в качестве датчиков радиационных излучений. Для всех перечисленных направлений большой интерес представляет исследование радиационной ионизации в МДП-структурах в сильных электрических полях, приводящих к инжекции носителей заряда в диэлектрическую пленку, поскольку сильные электрические поля стимулируют процессы ионизации и ускоряют перемещение зарядов в объеме диэлектрической пленки. Уменьшение линейных размеров элементов современных интегральных микросхем приводит к тому, что сильные электрические поля и сильнополевая тунNELьная инжекция носителей заряда в диэлектрическую пленку становятся рабочими режимами эксплуатации таких приборов. Особый интерес представляет контроль изменения зарядовых характеристик МДП-структур непосредственно в процессе воздействия ионизирующего облучения и сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик.

В настоящее время МДП-транзисторы (RADFET – сенсоры) широко используются в качестве датчиков интегральной поглощенной дозы радиационных излучений. При воздействии радиационных излучений в подзатворном диэлектрике таких транзисторов наблюдается накопление положительного заряда, вызывающее изменение порогового напряжения, контролируя которое определяют интегральную поглощенную дозу. Аналогичные процессы накопления положительного заряда в подзатворном диэлектрике наблюдаются и в МДП-конденсаторах, использование которых дает возможность более детально исследовать зарядовые процессы, протекающие в диэлектрической пленке. Таким образом, использование сенсоров на основе МДП-структур может существенно расширить информативность контролируемых параметров. В настоящее время большинство интегральных микросхем, выпускаемых промышленностью, изготавливаются по МДП-технологии. Следовательно, использование в качестве радиационно-чувствительных сенсоров МДП-структур позволит создать на одном полупроводниковом кристалле как сам сенсор, так и устройство обработки сигналов.

Цель работы: исследование зарядовых процессов, протекающих в диэлектрических пленках МДП-структур под воздействием радиационных облучений и сильнополевой инжекции электронов и разработка на их основе метода контроля параметров радиационных излучений и активного чувствительного элемента сенсора радиационных излучений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести исследование зарядовых процессов, протекающих в подзатворном диэлектрике МДП-структур при радиационных воздействиях и сильнополевой инжекции электронов в том числе и непосредственно в процессе облучения;
- разработать метод контроля параметров МДП-структур в условиях сильнополевой инжекции и управления током, позволяющий уменьшить время установления инжекционного режима;
- разработать модель процессов изменения зарядового состояния МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой инжекции при радиационных воздействиях;
- исследовать процессы изменения зарядового состояния МДП-структур при радиационных воздействиях в условиях управляемого токового воздействия;
- разработать методы контроля параметров радиационного излучения на основе анализа зарядовых процессов, протекающих в МДП-структуре;
- разработать конструкцию и технологию изготовления активного чувствительного элемента сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур.

Научная новизна.

1. Проведено исследование зарядовых процессов, протекающих в подзатворном диэлектрике МДП-структур в сильных электрических полях до 8,5 МВ/см в условиях туннельной инжекции электронов в диэлектрик при воздействии нейтронами, α -частицами и γ -излучением, в том числе и непосредственно в процессе облучения. Показано, что из анализа временной зависимости напряжения, падающего на МДП-структуре в режиме протекания постоянного тока плотностью $10^{-8} \div 10^{-5}$ А/см² как в режиме заряда емкости, так и в режиме сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик, можно определять величину ионизационного тока.

2. Разработан инжекционный метод контроля параметров МДП-структур, позволяющий повысить информативность и точность определения параметров изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика при сильнополевых и радиационных воздействиях, за счет уменьшения длительности установления инжекционного режима.

3. Разработана модель процессов изменения зарядового состояния МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой инжекции при радиационных воздействиях, учитывающая взаимодействие инжектированных электронов с зарядами, возникающими в диэлектрической пленке вследствие радиа-

ционной ионизации. На основе проведенного моделирования исследованы процессы изменения зарядового состояния МДП-структур при радиационных воздействиях в условиях заряда емкости образца и протекания постоянного инжекционного тока.

4. С использованием разработанной модели определены параметры и расширены диапазоны применения модели, описывающей полевую зависимость выхода заряда при воздействии α -излучения, в широком диапазоне электрических полей, в том числе и инжекционных.

Практическая значимость работы.

1. Показано, что зарядовые процессы, протекающие в диэлектрических пленках МДП-структур при воздействии радиационного излучения и сильных электрических полей, можно использовать для регистрации радиационных излучений.

2. Разработана конструкция и технология изготовления чувствительного элемента сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур, совместимые с технологией производства КМДП ИС.

3. Разработана методика контроля параметров радиационных излучений с использованием сенсора на основе МДП-структур.

4. Разработан инжекционный метод контроля параметров МДП-структур в условиях сильнополевой инжекции электронов и радиационного облучения с использованием как стрессовых, так и измерительных режимов воздействия, позволяющий снизить длительность установления инжекционного режима.

5. Предложены рекомендации по повышению радиационной и инжекционной стойкости подзатворного диэлектрика МДП-приборов (МДП-транзисторы серии 2П7146, 2П7147, 2П769, 2П767 на АО «ВЗПП-Микрон», г. Воронеж).

6. Изготовлены опытные образцы сенсоров радиационных излучений на основе МДП-структур, а также даны рекомендации и выполнена корректировка технологического процесса формирования подзатворного диэлектрика в КМДП ИС серии 5559, направленная на повышение их радиационной стойкости (АО «ОКБ Микроэлектроники», г. Калуга).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- результаты исследования зарядовых процессов в подзатворном диэлектрике МДП-структур в сильных электрических полях до 8,5 МВ/см в условиях сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик при радиационном облучении, показывающие, что из анализа временной зависимости напряжения, падающего на МДП-структуре в режиме протекания постоянного тока $10^{-8} \div 10^{-5}$ А/см² как в режиме заряда емкости, так и в режиме сильнополевой инжекции электронов в диэлектрик, можно определять величину ионизационного тока;

- модель процессов изменения зарядового состояния МДП-структур на основе термических пленок SiO₂, находящихся в режиме сильнополевой инжекции при радиационных воздействиях, учитывающая взаимодействие ин-

жектированных электронов с зарядами, возникающими в диэлектрической пленке вследствие радиационной ионизации;

- результаты моделирования процессов изменения зарядового состояния МДП-структур в режиме управляемой токовой нагрузки при радиационных воздействиях в условиях заряда емкости образца и протекания постоянного инжекционного тока;

- методы инжекционного контроля параметров МДП-структур и определения параметров радиационных излучений на основе анализа зарядовых процессов, протекающих в диэлектрической пленке, а также конструкция и способ изготовления активного чувствительного элемента сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах: 22, 26 и 27 Международных конференциях «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, 2012 г., 2016 г., 2017 г.); 42, 43, 44 и 46 Международных Тулиновских конференциях по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, МГУ, 2012 г., 2013 г., 2014 г., 2016 г.); 12, 13 и 14 Международных конференциях «Физика диэлектриков» (Санкт-Петербург, 2011 г., 2014 г., 2017 г.); Всероссийских научно-технических конференциях «Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (Калуга, 2014 г., 2015 г., 2016 г.).

Личный вклад автора: проведено исследование ионизационных процессов в подзатворном диэлектрике МДП-структур в сильных электрических полях при сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик при облучении нейtronами, α -частицами и γ -излучением; разработана модель изменения зарядового состояния МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой инжекции при радиационных воздействиях; выполнены все аналитические и экспериментальные исследования характеристик МДП-структур при радиационных воздействиях; разработаны конструкция и технология изготовления чувствительного элемента сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур; проведена интерпретация экспериментальных результатов; сформулированы положения, выносимые на защиту.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением в работе комплекса взаимодополняющих методов исследований, использованием современного исследовательского оборудования и калиброванных источников радиационных излучений, а также достаточной статистикой экспериментальных исследований, коррелирующих с известными литературными данными.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, из которых 6 – в рецензируемых журналах перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы

130 страниц, включая 44 рисунка и 2 таблицы. Список литературы содержит 114 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены: основные зарядовые процессы, протекающие в МДП-структурах при воздействии радиационных излучений и сильнополевой инжекции электронов; методы контроля параметров радиационных излучений с использованием МДП-сенсоров; методы контроля и исследования электрофизических характеристик МДП-структур при сильнополевых и радиационных воздействиях.

Отмечается, что ионизационные процессы, происходящие в диэлектрических слоях МДП-структур и приборов на их основе при одновременном воздействии радиации и сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик исследованы в настоящее время недостаточно подробно. В большинстве работ, изучающих данную тематику, к диэлектрическим пленкам прикладывают электрические поля, далекие от пробивных величин и исключающие возникновение инжекции заряда.

Во второй главе разработан инжекционный метод исследования диэлектрических пленок МДП-структур при стрессовых и измерительных режимах в условиях сильнополевой инжекции электронов, позволяющей снизить длительность установления инжекционного режима за счет заряжения и разряжения емкости МДП-структуры током в n -раз больше измерительного. Показано, что при высоких значениях плотностей инжекционного тока контроль характеристик накапливаемого в подзатворном диэлектрике заряда предложенным методом следует проводить по изменению напряжения на МДП-структуре при величине измерительного инжекционного тока много меньшей величины стрессового инжекционного тока. Для повышения быстродействия разработанного инжекционного метода и возможности исследования быстро релаксирующих зарядов, накапливаемых в подзатворном диэлектрике в процессе сильнополевого стрессового воздействия и радиационных излучений, заряд и разряд емкости МДП-структуры следует осуществлять в ускоренном режиме при значении плотности тока большей величины плотности измерительного тока.

На Рис. 1 представлены временные зависимости токового воздействия (a) и напряжения, измеренного на МДП-структуре (b). В этом алгоритме предлагается использовать три уровня токового воздействия: I_s , соответствующий стрессовому режиму, при котором изучается изменение зарядового состояния МДП-структуры, I_m , соответствующий измерительному режиму, при котором не наблюдается заметных изменений зарядового состояния подзатворного диэлектрика (обычно $I_m \ll I_s$) и $n \cdot I_m$, при котором осу-

ществляются процессы заряда и разряда емкости МДП-структуры. Использование для заряда и разряда емкости МДП-структуры тока амплитудой $n \cdot I_m$ дает возможность существенно снизить время выхода на режим инжекции, что является важным при исследовании быстро изменяющихся радиационных воздействий.

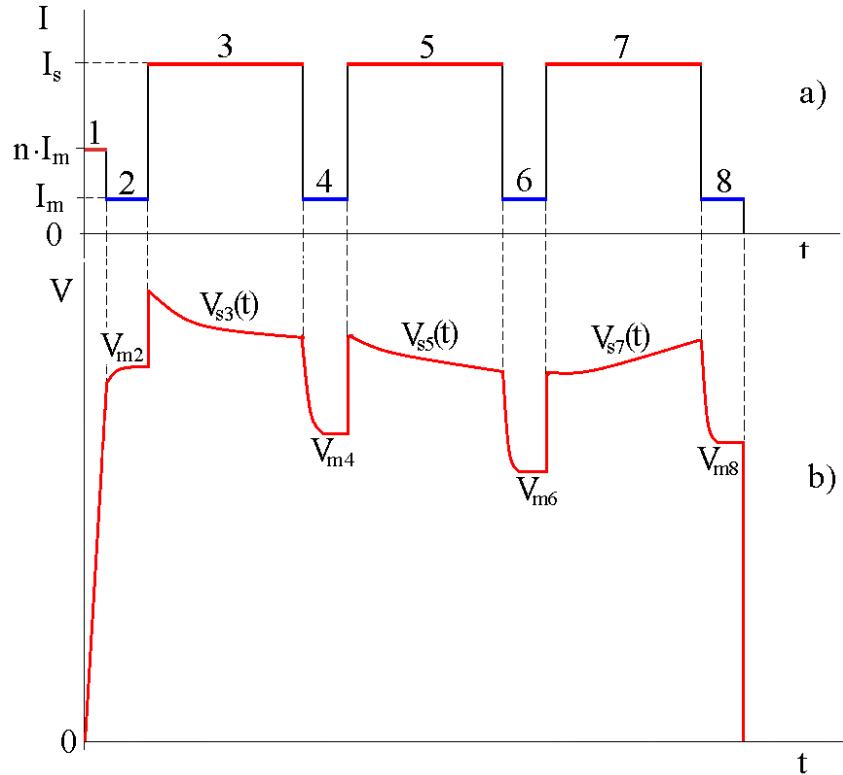


Рис.1. Временные зависимости токового воздействия (а) и напряжения, измеряемого на МДП-структуре (б)

В разработанном инжекционном методе при контроле параметров подзатворного диэлектрика сильнополевую инжекцию заряда в диэлектрик в стрессовом режиме предлагаются проводить частями Рис. 1 (участки 3,5,7). На Рис. 1 показаны только три участка, соответствующие стрессовому режиму. При практическом использовании предлагаемого метода количество и длительность стрессовых участков выбирается, исходя из задач исследований. После инжекции заряда на каждой части стрессового воздействия осуществляется переход в режимы инжекции током I_m . Измерение изменения напряжения на МДП-структуре при токе I_m позволяет учесть заряд, накапливаемый в подзатворном диэлектрике МДП-структуры, при установлении режима инжекции, соответствующего протеканию стрессового тока, и, в результате, значительно уменьшить погрешность, присущую методу постоянного тока.

Такой алгоритм подачи токового воздействия позволяет измерить изменение напряжения на МДП-структуре как при положительной, так и отрицательной полярности затвора при измерительной амплитуде инжекционного тока. Для этого перед началом измерений, а также после измерения V_m к МДП структуре прикладывается последовательность импульсов тока $-n \cdot I_m$,

а затем $-I_m$ и измеряется $V_m(-)$. Переключение полярности напряжения на затворе при инжекции для измерения $V_m(+)$ и $V_m(-)$ не должно оказывать влияние на процессы изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика, протекающие при инжекции стрессовым уровнем тока. С этой целью инжекция при отрицательной полярности затвора имеет минимальную длительность и проводится при измерительной амплитуде тока, которая много меньше амплитуды стрессового тока.

В третьей главе проведено исследование зарядовых процессов в МДП-структурах в сильных электрических полях в условиях сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик при облучении нейтронами, α -частицами и γ -облучением, а также приводятся результаты моделирования процессов изменения зарядового состояния МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой инжекции при радиационных воздействиях.

Исследуемые в работе МДП-конденсаторы изготавливались промышленным способом на пластинах КЭФ-4,5 кристаллографической ориентацией $<100>$. Низкоомный полупроводник n -типа был специально выбран для удобства создания сильнополевых инжекционных режимов при обогащении поверхности полупроводника основными носителями заряда, что облегчало исследование ионизационных процессов в подзатворном диэлектрике, стимулированных радиационным воздействием. Диоксид кремния толщиной 20÷100 нм получали термическим окислением кремния в атмосфере кислорода при температуре 1000 °C с добавлением 3% HCl. Верхние электроды формировались с использованием фотолитографии по алюминиевой пленке, напыленной магнетронным методом. После формирования Al-электродов проводили отжиг в среде азота при температуре 475 °C.

Во время исследования к МДП-структуре прикладывались импульсы постоянного тока, обеспечивающие заряд емкости структуры и установление режима сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик. Влияние радиационных воздействий изучалось как на участках заряда и разряда емкости МДП-структуры, так и в режиме сильнополевой туннельной инжекции электронов. Амплитуда импульса тока выбиралась, исходя из условия незначительной зарядовой деградации МДП-структуры, обусловленной инжекцией электронов в течение всего измерительного цикла, а также соизмеримостью токового воздействия с величиной ионизационного тока при радиационном излучении. Контроль зарядовых процессов осуществлялся по изменению временной зависимости напряжения, падающего на МДП-структуре в режимах заряда и разряда ее емкости, а также в режиме, обеспечивающем протекание через диэлектрическую пленку постоянного сильнополевого инжекционного тока.

Для исследования влияния облучения α -частицами на зарядовые процессы в МДП-структурах, находящиеся в режиме сильнополевой инжекции носителей в диэлектрик, экспериментальный образец подвергался воздействию излучения источника ^{239}Pu . Мощность потока α -частиц при облучении соответствовала $10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. В процессе облучения плотность инжекционно-

го тока, протекающего через подзатворный диэлектрик МДП-структур, составляла $10^{-8} \div 10^{-6} \text{ A/cm}^2$. Экспериментальные образцы, как правило, располагались на расстоянии нескольких миллиметров от источника излучения.

На Рис. 2 приведены временные зависимости напряжения, падающего на МДП-структуре, измеренные в режиме протекания постоянного инжекционного тока при воздействии α -частиц. Воздействие α -излучения приводит к существенному снижению напряжения при плотности инжекционного тока 10^{-8} A/cm^2 и к незначительному уменьшению напряжения при плотности тока 10^{-6} A/cm^2 . Снижение напряжения обусловлено возникновением под действием α -излучения ионизационного тока и, как следствие, уменьшением инжекционного тока.

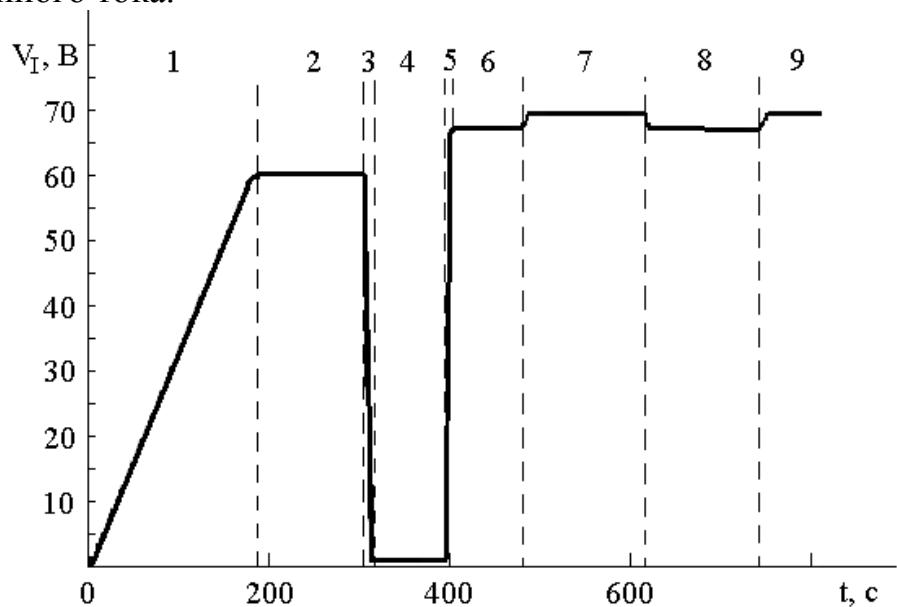


Рис. 2. Временная зависимость напряжения на МДП-структуре при заряде (участки 1,5) и разряде (участок 3) емкости МДП-структуры, а также при протекании через диэлектрик постоянного сильнополевого инжекционного тока (участки 2,6,7,8,9) различной плотности: 1,2,3,4 – 10^{-8} A/cm^2 ; 5,6,7,8,9 – 10^{-6} A/cm^2 ; на участках 3,4,5,6,8 проводилось облучение α -частицами

На Рис. 3 показана экспериментально полученная зависимость плотности тока ионизации в диэлектрической пленке исследуемых МДП-структур от напряженности электрического поля. Как видно из Рис. 3, плотность тока ионизации растет с увеличением напряженности электрического поля. После прекращения воздействия α -частицами контролировалось напряжение на МДП-структуре и по его величине определялось изменение зарядового состояния диэлектрической пленки.

При изучении влияния нейтронного излучения на зарядовые процессы в МДП-структурах, находящихся в режиме сильнополевой инжекции электропроводов в диэлектрик, исследуемые образцы облучались радионуклидным источником $^{238}\text{Pu-Be}$ со спектром нейтронов гомогенного типа (плавно изменяющийся спектр с энергией до 11 МэВ). Мощность потока нейтронов при облучении имела значение $4 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Во время облучения образцов плотность

туннельного инжекционного тока, протекающего через подзатворный диэлектрик, составляла 10^{-8} A/cm^2 .

Установлено, что при облучении МДП-структур, через которую протекает постоянный инжекционный ток, потоком нейтронов также наблюдается уменьшение напряжения, падающего на образце. Для исследования влияния дозовых зависимостей на изменение зарядового состояния подзатворного диэлектрика использовалось ионизирующее излучение гамма квантов (источник Co^{60}). Показано, что под действием всех видов исследуемых излучений в диэлектрике МДП-структур наблюдается накопление положительного заряда, и величина напряжения на МДП-структуре после облучения уменьшается по сравнению со значениями до облучения. На основе проведенных исследований установлена полевая зависимость фрактального выхода заряда для α -излучения, в том числе и в условиях сильнополевой инжекции электронов (Рис. 3, кривая 2).

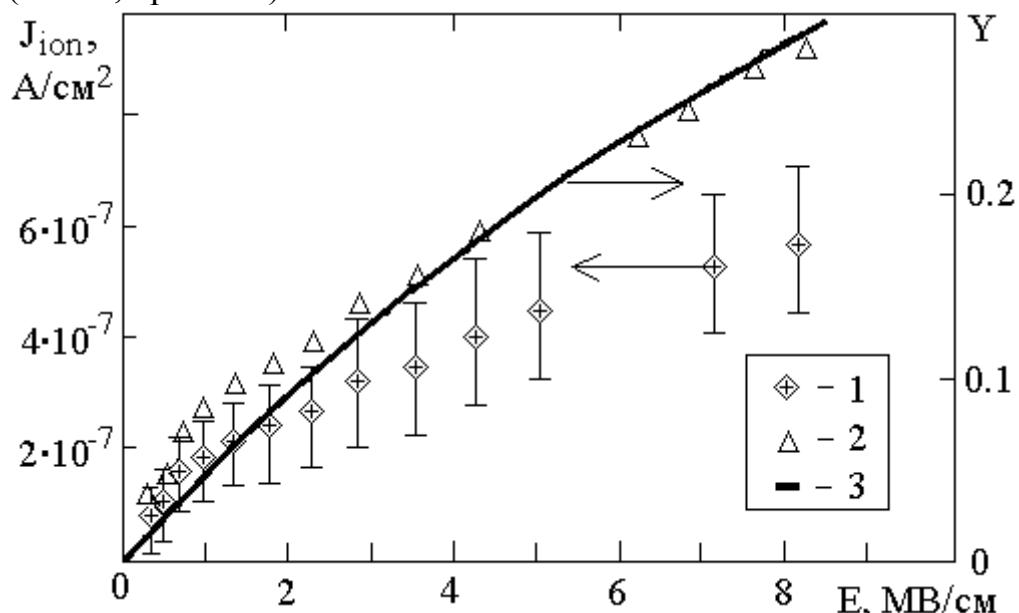


Рис.3. Зависимости плотности тока ионизации (1) и фрактального выхода заряда (2, 3) в диэлектрической пленке МДП-структур при воздействии α -излучения от напряженности электрического поля: 1 и 2 – экспериментальные результаты, 3 – расчетная кривая

Моделирование зарядовых процессов, протекающих в МДП-структурах при одновременном воздействии сильнополевой туннельной инжекции электронов постоянным током и радиационном облучении, осуществлялось на основе следующей системы уравнений:

- уравнение сдвига напряжения на МДП-структуре при инжекции электронов из кремния:

$$\Delta V_I (+) = \frac{q}{\epsilon \epsilon_0} \left[n_t (d_{\text{ox}} - x_n) - p (d_{\text{ox}} - x_p) \right]; \quad (1)$$

- уравнение для плотности тока Фаулера-Нордгейма:

$$J_{\text{inj}} = AE^2 \exp\left(-\frac{B}{E}\right); \quad (2)$$

- уравнение нейтральности зарядов:

$$Q_0 = Q_c + Q_{\text{inj}} + Q_{\text{ion}}; \quad (3)$$

- уравнение для плотности дырок, накапливаемых в пленке подзатворного диэлектрика при сильнополевой инжекции:

$$q \frac{dp}{dt} = J_{\text{inj}} \cdot \alpha \cdot \sigma_p \cdot (N_p - p) - J_{\text{inj}} \cdot \sigma_n \cdot p; \quad (4)$$

- уравнение для плотности дырок, накапливаемых в пленке подзатворного диэлектрика при радиационном облучении:

$$p = F_t \cdot Y(E_{\text{ox}}) \cdot K_g \cdot d_{\text{ox}} \cdot I_{\text{rad}} \cdot t; \quad (5)$$

- уравнение для плотности электронов, накапливаемых в объеме SiO_2 :

$$n_t = N_t \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_t \cdot Q_{\text{inj}}}{q}\right) \right], \quad (6)$$

где q – заряд электрона; $\epsilon\epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика; d_{ox} – толщина подзатворного диэлектрика; x_n , и x_p – положения центроидов (от границы Si-SiO_2) отрицательного и положительного заряда в SiO_2 соответственно; $A=1,54 \cdot 10^{-6} \cdot m_0/m^* \cdot \Phi_B^{-1}$ [A/B²] и $B=6,83 \cdot 10^7 \cdot m_0/m^* \cdot \Phi_B^{3/2}$ [B/см] – постоянные уравнения туннельной инжекции по Фаулеру-Нордгейму; m_0 и m^* – масса электрона в вакууме и эффективная масса электрона в диэлектрике; Φ_B – высота потенциального барьера на инжектирующей границе раздела; E – напряженность катодного электрического поля; Q_0 – заряд, подводимый к образцу ($Q_0=J_0 \cdot t$) в результате протекания постоянного тока плотностью J_0 ; Q_c – заряд, накапливаемый ёмкостью МДП-структурой ($Q_c = C_{\text{mos}} \cdot V_1(t)$), C_{mos} – ёмкость структуры, $V_1(t)$ – временная зависимость напряжения на образце; Q_{inj} – заряд, инжектированный в диэлектрик; Q_{ion} – заряд, созданный в диэлектрике ионизацией; N_p и σ_p – плотности и сечения захвата дырочных ловушек; σ_n – сечение захвата заполненными дырочными ловушками инжектированных электронов; N_t и σ_t – плотности и сечения захвата электронных ловушек в пленке SiO_2 ; α – коэффициент ионизации в пленке SiO_2 при сильнополевой инжекции; F_t – эффективность захвата дырок (доля захваченных дырок от их полного количества при ионизирующем излучении); $Y(E_{\text{ox}})$ – выход заряда при облучении (доля электронно-дырочных пар, избежавших рекомбинацию); K_g – количество электронно-дырочных пар на единицу дозы и объема SiO_2 ($\approx 8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3} \cdot \text{рад}^{-1}$ (SiO_2) пар); I_{rad} – интенсивность облучения. Ионизационный ток при воздействии радиационных излучений моделировался генератором тока. Система уравнений (1–6) решалась при следующих начальных условиях: $n_t(0) = p(0) = 0$.

Результаты моделирования радиационных воздействий на МДП-структуры с толщиной диэлектрической пленки 90 нм, которые находились в режиме сильнополевой инжекции электронов из кремния при поддержании постоянной плотности тока, приведены на Рис. 4 и 5. На Рис. 4 приведен вы-

соковольтный участок временной зависимости напряжения на МДП-структуре, при протекании через диэлектрическую пленку постоянного инжекционного тока плотностью $10^{-6} \text{ A}/\text{см}^2$. Для зависимостей, приведенных на Рис.4, плотность тока ионизации была меньше плотности постоянного тока, протекающего через диэлектрик. Анализируя данные, приведенные на Рис. 4, можно сделать вывод, что с увеличением амплитуды ионизационного тока уменьшается напряжение, падающее на структуре. На Рис. 5 представлены результаты, когда плотность дырок, генерируемых ионизирующим излучением (кривая 2), существенно ниже плотности дырок, генерируемых сильнополевой межзонной ударной ионизацией (кривая 1). Учет процесса аннигиляции части дырок при взаимодействии с инжектированными электронами приводит к значительному уменьшению общей плотности дырок, накапливающихся в подзатворном диэлектрике (кривая 4) по сравнению с простым суммированием захваченных дырок в результате сильнополевой и радиационной ионизаций (кривая 3). Для определения плотности дырок, накапливающихся в диэлектрической пленке, необходимо учитывать их взаимодействие с инжектируемыми электронами, приводящее к аннигиляции части дырок, захваченных в подзатворном диэлектрике.

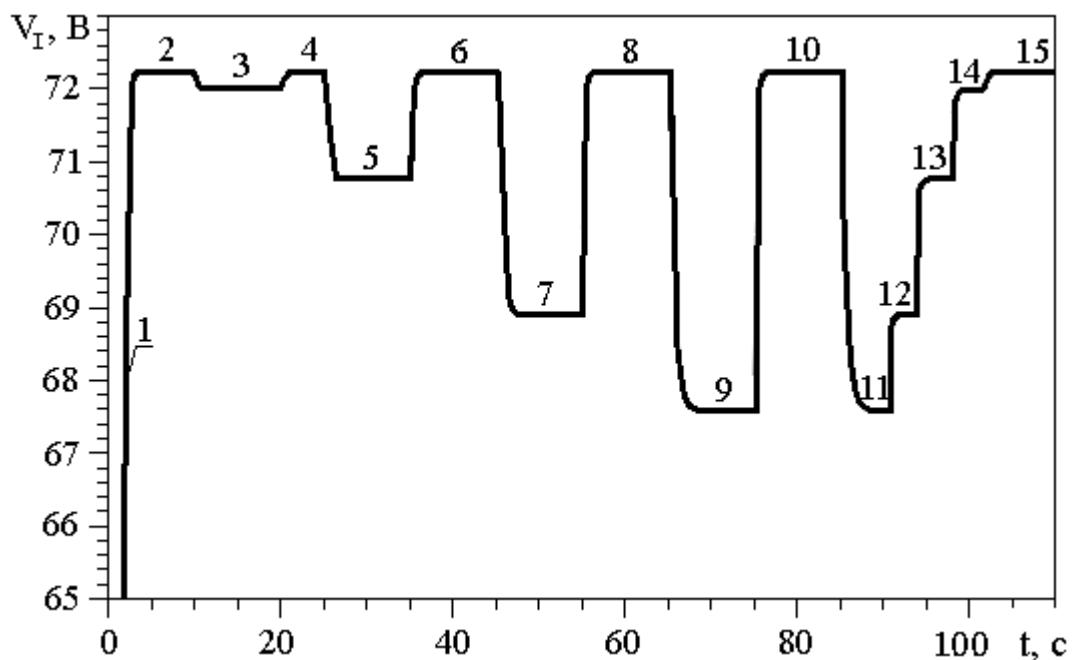


Рис. 4. Высоковольтный участок временной зависимости напряжения на МДП-структуре, при протекании через диэлектрическую пленку постоянного сильнополевого инжекционного тока плотностью $10^{-6} \text{ A}/\text{см}^2$. На участках 1,2,4,6,8,10,15 облучение отсутствует, а на участках 3,5,7,9,11,12,13,14 действует излучение различной интенсивности: 3,14 – $J_{\text{ion}} = 0,1 \cdot J_0$; 5,13 – $J_{\text{ion}} = 0,5 \cdot J_0$; 7,12 – $J_{\text{ion}} = 0,8 \cdot J_0$; 9,11 – $J_{\text{ion}} = 0,9 \cdot J_0$

На основе моделирования с использованием уравнений (1-6) было установлено, что протекание ионизационного тока в диэлектрической пленке может вызывать уменьшение или полное прекращение протекания инжекционного тока и, в результате, уменьшается величина напряжения, падающего

на МДП-структуре. Таким образом, радиационное воздействие вызывает уменьшение напряженности электрических полей в диэлектрической пленке. В результате снижается интенсивность деградационных процессов, обусловленных сильнополевой инжекцией электронов, и изменение зарядового состояния МДП-структур, в основном, определяется ионизационными процессами, обусловленными радиационным воздействием.

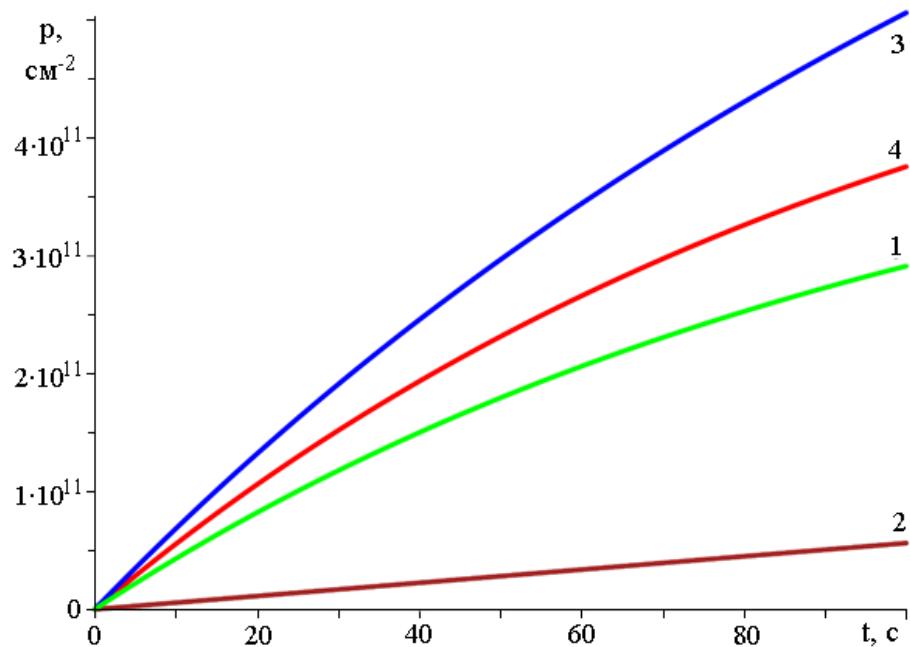


Рис. 5. Зависимость плотности захваченных в подзатворном диэлектрике дырок от времени воздействия при интенсивности ионизационного излучения 100 рад/с: 1 – сильнополевая инжекция электронов; 2 – гамма облучение при поле 0,5 МВ/см; 3 – гамма облучение при поле 7 МВ/см (сильнополевая инжекция электронов); 4 – гамма облучение при поле 7 МВ/см (сильнополевая инжекция электронов с учетом аннигиляции части дырок инжектированными электронами). Сильнополевая инжекция электронов при поле 7 МВ/см соответствовала плотности тока $J_0 = 10^{-6}$ А/см²

В четвертой главе описаны конструкция и технология изготовления разработанного в диссертационной работе активного чувствительного элемента детектора заряженных частиц на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник, реализующего принципиально новые способы регистрации радиационных излучений, а именно, с его использованием можно осуществить комплексный мониторинг как самих ионизирующих воздействий, так и облучаемых объектов в медицине, экологическом контроле, атомной и ядерной физике и т.д.

Разработанный элемент детектора заряженных частиц выполнен на кремниевой полупроводниковой пластине диаметром 100 мм и имеет размеры 4x4 мм. На его поверхности предусмотрены шестнадцать контактных площадок к структурам металл-диэлектрик-полупроводник различной площади. К контактным площадкам подключается контрольно-измерительная

аппаратура, позволяющая регистрировать параметры и характеристики радиационных излучений. Для изготовления активного чувствительного элемента сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур разработан технологический маршрут, максимально унифицированный с технологическим процессом изготовления КМДП ИС 564 и 1564 серий (международные аналоги CD4000 и SN54HC/SN74HC), что позволяет существенно упростить процесс изготовления чувствительных элементов, а также встраивать их в изделия микросистемной техники, изготавливаемые по КМДП технологии.

Предлагается формировать МДП-сенсоры на слаболегированных кремниевых пластинах n-типа, а в качестве подзатворного диэлектрика использовать термические плёнки SiO_2 толщиной 20÷100 нм. В качестве верхних электродов используются плёнки алюминия. Алюминиевые затворы различной площади формируются с помощью фотолитографии. После формирования слоя металлизации проводится отжиг в среде азота при температуре 475 °C.

Для удобства контактирования и использования полученные кристаллы можно размещать в корпусе интегральной микросхемы. С этой целью все контактные площадки сформированы на толстой пленке SiO_2 , а также имеются планарные контакты к подложке. Фотографии полупроводниковой пластины (а) и кристалла сенсора, развернутого в корпус интегральной микросхемы (б), представлены на Рис. 6.

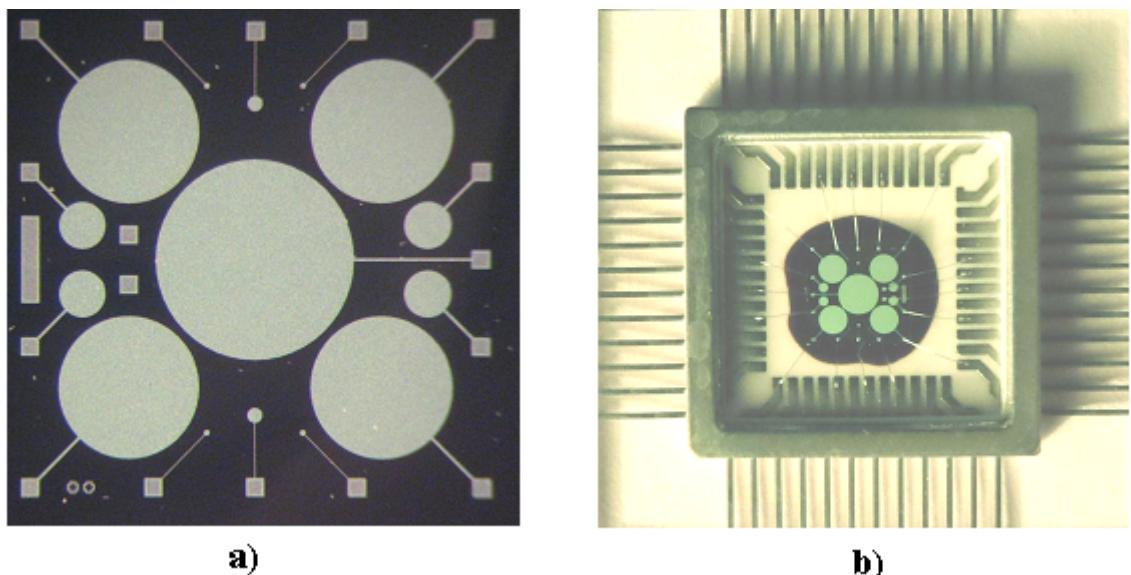


Рис. 6. Фотографии полупроводникового кристалла МДП-сенсора (а) и собранного сенсора радиационных излучений (б)

Показано, что из анализа временной зависимости напряжения, падающего на МДП-структуре в режиме протекания через подзатворный диэлектрик постоянного емкостного или инжекционного тока при облучении протонами, можно определить величину ионизационного тока. Разработан метод контроля радиационных излучений сенсорами на основе МДП-структур в неинжекционном режиме, когда структура находится в режимах заряда и разряда ее емкости постоянным заданным уровнем тока.

На основе комплексного исследования сильнополевой инжекционной деградации подзатворного диэлектрика МДП-структур были предложены рекомендации по повышению радиационной и инжекционной стойкости подзатворного диэлектрика МДП-приборов (МДП-транзисторы серии 2П7146, 2П7147, 2П769, 2П767 на АО «ВЗПП-Микрон», г. Воронеж). Используя разработанные в диссертационной работе конструкцию и технологию изготовления активного чувствительного элемента детектора заряженных частиц на основе МДП-структур, изготовлены опытные образцы сенсоров радиационных излучений (АО «ОКБ Микроэлектроники», г. Калуга).

В заключении обобщены результаты проделанной работы.

В приложении приведены акты об использовании результатов диссертационной работы на предприятиях АО «Воронежский завод полупроводниковых приборов – Микрон» и АО «ОКБ Микроэлектроники» (г. Калуга).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Исследованы зарядовые процессы, протекающие в подзатворном диэлектрике МДП-структур в условиях сильнополевой туннельной инжекции электронов в диапазоне плотностей тока $10^{-8} \div 10^{-5}$ А/см² при облучении нейtronами, α -частицами и γ -излучением. Показано, что зарядовые процессы, протекающие в диэлектрических пленках МДП-структур при одновременном воздействии сильнополевой инжекции и ионизирующих воздействий, можно использовать для регистрации радиационных излучений.

2. Разработан инжекционный метод контроля параметров МДП-структур, в том числе и при радиационных воздействиях, в котором для повышения быстродействия метода и возможности исследования быстро изменяющихся зарядовых процессов в подзатворном диэлектрике, заряд и разряд емкости МДП-структурь предлагается проводить в ускоренном режиме при плотности тока большей плотности измерительного тока.

3. Разработана модель процессов изменения зарядового состояния МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой туннельной инжекции электронов в подзатворный диэлектрик при радиационных воздействиях, учитывая взаимодействие инжектированных электронов с зарядами, возникающими в диэлектрической пленке вследствие радиационной ионизации.

4. На основе проведенного моделирования исследованы процессы изменения зарядового состояния МДП-структур при радиационных воздействиях в условиях заряда емкости образца и протекания постоянного инжекционного тока, а также определены параметры и расширены диапазоны применения модели, описывающей полевую зависимость фрактального выхода носителей при воздействии α -излучения, в широком диапазоне электрических полей, в том числе и инжекционных.

5. Разработаны конструкция и технология изготовления активного чувствительного элемента сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур, реализующего новые способы регистрации радиационных излучений, а именно, с его использованием можно осуществить комплексный мониторинг как самих ионизирующих воздействий, так и облучаемых объектов.

Разработана методика контроля параметров радиационных излучений с использованием сенсора на основе МДП-структур.

6. На основе комплексного исследования сильнополевой инжекционной деградации подзатворного диэлектрика МДП-структур были предложены рекомендации по повышению радиационной и инжекционной стойкости подзатворного диэлектрика МДП-приборов (МДП-транзисторы серии 2П7146, 2П7147, 2П769, 2П767 на АО «ВЗПП-Микрон», г. Воронеж).

7. Используя разработанные в диссертационной работе конструкцию и технологию изготовления активного чувствительного элемента сенсора радиационных излучений на основе МДП-структур, изготовлены опытные образцы сенсоров радиационных излучений (АО ОКБ «Микроэлектроники», г. Калуга).

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Андреев Д.В., Столяров А.А., Романов А.В. Исследование процессов генерации и эволюции центров захвата носителей в диэлектрических плёнках МДП-структур // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2011. № 11. С.1–8. <http://technomag.edu.ru/doc/251437.html> (дата обращения 01.06.2018) (0,50 п.л. / 0,17 п.л.)

2. Инжекционные методы контроля подзатворного диэлектрика МДП-ИМС / А.В. Романов [и др.] // Наукоемкие технологии. 2012. Т. 13. № 10. С. 20–28 (0,56 п.л. / 0,14 п.л.).

3. Процессы радиационной ионизации в диэлектрических пленках МДП-структур в сильных электрических полях / А.В. Романов [и др.] // Перспективные материалы. 2015. № 12. С. 25–31 (0,44 п.л. / 0,11 п.л.).

4. Контроль радиационных излучений сенсорами на основе МДП-структур / А.В. Романов [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 8. С. 16–19 (0,25 п.л. / 0,06 п.л.).

5. Романов А.В. Инжекционный метод исследования диэлектрических пленок МДП-структур при стрессовых и измерительных режимах // Перспективные материалы. 2017. № 10. С.33–40 (0,50 п.л. / 0,50 п.л.).

6. Андреев В.В., Рыжов С.В., Романов А.В. Моделирование технологического процесса формирования быстродействующих диодов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2017. Т. 22. № 5. С. 34–39 (0,38 п.л. / 0,13 п.л.).

7. Сильнополевая инжекционная модификация наноразмерных диэлектрических пленок в МДП-приборах / А.В. Романов [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. Вып. 6. С. 1–14.

<http://engjournal.ru/catalog/nano/hidden/802.html> (дата обращения 31.05.2018) (0,88 п.л. / 0,22 п.л.).

8. Романов А.В. Моделирование изменения зарядового состояния МДП-структур в режиме сильнополевой инжекции при воздействии ионизирующих излучений // Электронный журнал: наука, техника и образование. 2017. №3 (14). С. 1–8.

<http://nto-journal.ru/uploads/articles/451b81078bf6f5aaa65fa61d5488d6c0.pdf>
(дата обращения 29.05.2018) (0,50 п.л. / 0,50 п.л.)

9. Романов А.В. Сенсор радиационных излучений на основе МДП-структур // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. Материалы Всероссийской конференции. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. Т. 1. С. 183–187 (0,31 п.л. / 0,31 п.л.).
10. Исследование чувствительности МДП-структур с различными диэлектрическими пленками к радиационным излучениям / А.В. Романов [и др.] // Тезисы докладов 46 Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2016. С. 29 (0,06 п.л. / 0,02 п.л.).
11. Радиационная ионизация в подзатворном диэлектрике МДП-структур в сильных электрических полях / А.В. Романов [и др.] // Труды 26 Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела». Москва. 2016. С. 490–497 (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).
12. Метод определения интегральной поглощенной дозы радиационного излучения с использованием МДП-сенсоров / А.В. Романов [и др.] // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. Материалы Всероссийской конференции. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. Т. 1. С. 147–151 (0,31 п.л. / 0,08 п.л.).
13. Измерение поглощенной дозы ионизирующих излучений с использованием инжекционно-модифицированных МДП-транзисторов / А.В. Романов [и др.] // Тезисы докладов 44 Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2014. С. 158 (0,06 п.л. / 0,01 п.л.).
14. Улучшение характеристик диэлектрических пленок МДП-структур инжекционно-термической обработкой / А.В. Романов [и др.] // Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2014): Материалы XIII международной конференции, Санкт-Петербург. 2014 Т. 2. С. 206–208 (0,19 п.л. / 0,04 п.л.).
15. Контроль интегральной поглощенной дозы ионизирующих излучений с использованием МДП-сенсоров / А.В. Романов [и др.] // Наукоемкие технологии в приboro- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе. Материалы конференции. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. Т. 1. С. 134–138 (0,31 п.л. / 0,06 п.л.).
16. Метод многоуровневой токовой нагрузки для исследования диэлектрических пленок МДП-структур / А.В. Романов [и др.] // Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2011): Материалы XII международной конференции, Санкт-Петербург. 2011. Т. 2. С. 288–291 (0,25 п.л. / 0,06 п.л.).
17. Метод контроля качества диэлектрических слоев МДП-структур после радиационных воздействий / А.В. Романов [и др.] // Труды 22 Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела». Москва. 2012. С. 337–342 (0,38 п.л. / 0,06 п.л.).
18. Учет плотности поверхностных состояний при контроле ионизирующих излучений сенсорами на основе МДП-структур / А.В. Романов [и др.] //

Труды 22 Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела». Москва. 2012. С. 343–347 (0,31 п.л. / 0,06 п.л.).

19. Измерение интегральной поглощенной дозы ионизирующих излучений с использованием МДП-транзисторов / А.В. Романов [и др.] // Тезисы докладов 43 Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2013. С. 122 (0,06 п.л. / 0,01 п.л.).

20. Исследование изменения зарядового состояния МДП-приборов при электронном облучении / А.В. Романов [и др.] // Тезисы докладов 42 Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 2012. С. 94 (0,06 п.л. / 0,01 п.л.).

21. Радиационная ионизация в диэлектрических пленках МДП-структур в условиях сильнополевой инжекции электронов / А.В. Романов [и др.] // Физика диэлектриков (Диэлектрики – 2017): Материалы XIV международной конференции, Санкт-Петербург. 2017. Т. 1. С. 172–174 (0,19 п.л. / 0,03 п.л.).

22. Сенсоры радиационных излучений на основе МДП-структур с модифицированными диэлектрическими пленками / А.В. Романов [и др.] // Труды 27 Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела». Москва. 2017. С. 412–419 (0,5 п.л. / 0,1 п.л.).

Романов Андрей Владимирович

**ЗАРЯДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В МДП-СТРУКТУРАХ В УСЛОВИЯХ
РАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И СИЛЬНОПОЛЕВОЙ
ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 04.07.2018 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 1. Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в Редакционно-издательском отделе
Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57-31-87