

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента на диссертационную работу**

**Романова Андрея Владимировича**

**«Зарядовые процессы в МДП-структурах в условиях радиационных воздействий и сильнополевой инжекции электронов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».**

### **Актуальность темы**

Исследование радиационных воздействий на структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) и интегральные микросхемы (ИМС) на их основе интенсивно проводится начиная с 60-х годов прошлого века. Несмотря на относительно большое количество работ, посвященных этой тематике, интерес к ней не только не уменьшается, но и постоянно возрастает. Это связано со все более широким использованием микросхем, изготовленных по КМДП технологиям в космической технике, атомной энергетике, военных изделиях и т.д. Основная цель таких исследований – повысить радиационную стойкость и надежность ИМС, эксплуатируемых в условиях радиационных излучений. В современных ИМС уменьшение размеров элементов существенно опережает снижение питающих напряжений в результате происходит увеличение электрических полей, в том числе и прикладываемых к подзатворному диэлектрику, что часто приводит к возникновению инжекционных токов. Не меньший интерес представляет направление исследований, связанное с использованием МДП-сенсоров радиационных излучений. Такие сенсоры обладают малыми размерами, относительно невысокой стоимостью и хорошими метрологическими характеристиками. Следовательно, диссертационная работа Романова А.В., посвященная установлению физических закономерностей зарядовых явлений, 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, без сомнения является актуальной.

### **Новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

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,  $\alpha$ -частицами и  $\gamma$ -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/см<sup>2</sup> 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 радиационной 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 полевою зависимость выхода заряда при воздействии  $\alpha$ -излучения, в широком диапазоне электрических полей, в том числе и инжекционных.

#### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, заключений**

Достоверность полученных результатов подтверждается их воспроизводимостью, соответствием литературным данным и существующим теоретическим представлениям о свойствах тонких диэлектрических пленок МДП-структур и зарядовых процессов, протекающих в подзатворном диэлектрике и на границе раздела с полупроводником при радиационных облучениях и сильнополевой инжекцией электронов в диэлектрическую пленку.

#### **Значимость результатов для науки и практики**

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).

### **Оценка содержания**

Структура диссертации является традиционной. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения с основными результатами и выводами по работе, списка цитируемой литературы, приложений.

**В первой главе** представлен обзор научных публикаций, посвященных изучению физических закономерностей зарядовых явлений, протекающих в МДП-структурах при воздействии радиационных излучений и сильнополевой инжекции электронов. Рассмотрены и проанализированы методы контроля параметров радиационных излучений с использованием МДП-сенсоров. Дан обзор методов контроля и исследования электрофизических характеристик МДП-структур при сильнополевых и радиационных воздействиях.

**Вторая глава** посвящена разработке инжекционного метода исследования диэлектрических пленок МДП-структур при стрессовых и измерительных режимах в условиях сильнополевой инжекции электронов и ионизирующих излучений, позволяющего снизить длительность установления инжекционного режима за счет заряжения и разряжения емкости МДП-структуры током в  $n$ -раз больше измерительного. Показано, что для повышения быстродействия метода стрессовых и измерительных уровней тока и возможности исследования быстро релаксирующих зарядов, накапливаемых в тонком подзатворном диэлектрике в процессе сильнополевого стрессового воздействия, заряд и разряд емкости МДП-структуры, необходимый для контроля изменения зарядового состояния образца в измерительном режиме, предлагается проводить в ускоренном режиме при плотности тока большей плотности измерительного тока.

Описана разработанная автоматизированная установка для контроля характеристик МДП-структур, позволяющая реализовать метод сильнополевой инжекции носителей заряда в стрессовых и измерительных режимах, а также методы сильнополевой инжекции заряда в подзатворный диэлектрик в режимах протекания постоянного тока.

**В третьей главе** представлены результаты комплексного исследования зарядовых процессов в МДП-структурах в сильных электрических полях в условиях сильнополевой туннельной инжекции электронов в диэлектрик при облучении нейтронами,  $\alpha$ -частицами и  $\gamma$ -облучением, а также приводятся результаты

моделирования процессов изменения зарядового состояния МДП-структур, находящихся в режиме сильнополевой инжекции при радиационных воздействиях.

Показано, что ионизационный ток, возникающий в процессе облучения МДП-структуры, как  $\alpha$ -частицами, так и нейтронами в режиме протекания через диэлектрик постоянного тока, может существенно уменьшать электрическое поле в диэлектрической пленке. Показано, что из анализа временной зависимости напряжения, падающего на МДП-структуру в режиме протекания постоянного тока, можно определить величину ионизационного тока. Это явление можно использовать в сенсорах радиационных излучений, позволяющих контролировать как интенсивность радиационных излучений, так и величину интегральной поглощенной дозы ионизирующего излучения.

Определена полевая зависимость ионизационного тока, протекающего через подзатворный диэлектрик МДП-структуры, при воздействии  $\alpha$ -излучения, в том числе и в режиме сильнополевой инжекции электронов. Определены параметры и расширены диапазоны применения модели, описывающей полевую зависимость выхода носителей при воздействии  $\alpha$ -излучения в широком диапазоне электрических полей, в том числе и инжекционных.

**В четвертой главе** представлены 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.

Используя разработанные в диссертационной работе конструкцию и технологию изготовления активного чувствительного элемента детектора заряженных частиц на основе структур металл-диэлектрик-полупроводник изготовлены опытные образцы сенсоров радиационных излучений (АО ОКБ «Микроэлектроники», г. Калуга).

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).

Предложен метод контроля ионизирующих излучений сенсорами на основе МДП-структур, находящихся в режиме заряда и разряда емкости постоянным фиксированным уровнем тока в неинжекционном режиме.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы, которые являются новыми и имеют высокую научную и практическую ценность. Их достоверность не вызывает сомнений, так как они получены с применением надежных методов исследования и согласуются с современными представлениями об электронных свойствах диэлектрических пленок МДП-структур, как при радиационных облучениях, так и при сильнополевых воздействиях.

### **Соответствие автореферата основным идеям и выводам диссертации**

В автореферате в достаточном объеме отражено содержание диссертации, кратко изложены все основные результаты диссертационной работы. Выводы, представленные в автореферате, согласуются с выводами в диссертации.

В качестве **недостатков** диссертационной работы отмечу следующее:

1. В модели, описывающей процессы изменения зарядового состояния МДП-структур на основе термических пленок  $\text{SiO}_2$ , находящихся в режиме сильно полевой инжекции при радиационных воздействиях, генерация положительного заряда в сильных электрических полях описывается только межзонной ударной ионизацией и инжекцией дырок из анода, хотя положительный заряд может возникать и в результате протекания других физических явлений, например, освобождения и движения водорода.

2. В диссертационной работе исследование зарядовых явлений в диэлектрических пленках МДП-структур при радиационных воздействиях и сильнополевой инжекции электронов в основном проводилось при нормальных температурах. Однако, изменение температуры может оказывать существенное влияние на процессы накопления и хранения зарядов в диэлектрических пленках МДП-структур и исследование влияния температуры. позволило бы получить более общую информацию о протекающих зарядовых процессах.

3. В главе 4 разработан сенсор радиационных излучений на основе МДП-структуры, однако в диссертации не приведены его метрологические характеристики, что существенно затрудняет его сравнение с промышленно выпускаемыми сенсорами.

4. В работе имеются некоторые опечатки и неточности, в частности при оформлении списка литературы.

Сделанные замечания носят частный характер и не уменьшают научной и практической значимости диссертационной работы, не затрагивают научных положений и не влияют на достоверность полученных результатов. Структура работы является последовательной, отдельные части логически взаимосвязаны. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК Минобрнауки РФ.

Основные результаты работы опубликованы в 7 статьях в реферируемых отечественных и зарубежных журналах, входящих в перечень ВАК, доложены на Всероссийских и международных конференциях, что подтверждает научную новизну.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы**

Основные научные результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к использованию в производстве интегральных микросхем и МДП сенсоров радиационных излучений, научных и учебных организациях, занимающихся синтезом и диагностикой материалов, микро- и наноструктур электронной техники, а также контролем ионизирующих излучений и подготовкой высококвалифицированных кадров для данных областей науки и техники.

## **Заключение**

Диссертационная работа Романова А.В. «Зарядовые процессы в МДП-структурах в условиях радиационных воздействий и сильнополевой инжекции электронов» по актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости, достоверности полученных результатов и обоснованности выводов отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям ВАК Минобрнауки РФ и полностью соответствует требованиям раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (ред. от 28.08.2017), а автор диссертации, Романов Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент,

Волков Николай Викторович,

доктор физико-математических наук, доцент,

профессор кафедры «Физические проблемы материаловедения» Института ядерной физики и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

\_\_\_\_\_ Н.В. Волков

«26» сентября 2018 г.

Почтовый адрес:

115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31.

Тел.: +7 (495) 788–56–99, e-mail: [info@mephi.ru](mailto:info@mephi.ru), сайт: <https://mephi.ru>

моб. тел.: 8-903-507-6198)

E-mail: [nvvolkov@mail.ru](mailto:nvvolkov@mail.ru)

Подпись удостоверяю  
Заместитель начальника отдела  
документационного обеспечения  
НИЯУ МИФИ  
А.А. Абатурова