

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

диссертационного совета Д 212.141.17 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» Министерства образования и науки Российской Федерации по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15 июня 2016 г. № 14

О присуждении Андрееву Дмитрию Владимировичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Зарядовые явления в диэлектрических пленках МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти при сильнополевой инжекции электронов» по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния принята к защите 07 апреля 2016 года, протокол № 9 диссертационным советом Д 212.141.17 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» Министерства образования и науки Российской Федерации, 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, 5, приказ № 105/нк от 11.04.2012 г.

Соискатель Андреев Дмитрий Владимирович 1990 года рождения.

В 2013 году соискатель с отличием окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». С 2013 года по настоящее время соискатель обучается в аспирантуре по очной форме обучения по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния на кафедре конструирования и производства электронной аппаратуры Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

Диссертация выполнена на кафедре конструирования и производства электронной аппаратуры Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Столяров Александр Алексеевич, заместитель директора по научной работе Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

Официальные оппоненты:

Шерченков Алексей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», кафедра «Материалы функциональной электроники», профессор;

Литвинов Владимир Георгиевич – кандидат физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет», кафедра «Микро- и наноэлектроника», доцент
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Лаборатория Космического материаловедения ИК РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук, г. Калуга, в своем положительном заключении, подписанном Михеевым Николаем Николаевичем, кандидатом физико-математических наук, заведующим лабораторией структурных исследований и утвержденном руководителем Стреловым Владимиром Ивановичем, доктором физико-математических наук, указала, что диссертационная работа Андреева Дмитрия Владимировича «Зарядовые явления в диэлектрических пленках МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти при сильнополевой инжекции электронов» соответствует требованиям раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842. Значимость выводов и заключений диссертационной работы определяется возможностью их использования как в прикладных (практических) областях, так и для фундаментальных исследований. Метод стрессовых и измерительных уровней тока может быть использован как для получения новой и более точной информации о зарядовых ловушках в тех или иных диэлектрических пленках МДП-структур, что представляет из себя важную фундаментальную информацию, так и на микроэлектронных предприятиях, например, АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод, АО «ОКБ Микроэлектроники» и др. Результаты исследования элементов энергонезависимой памяти с различными гибридными плавающими затворами и с межзатворными диэлектриками на основе оксида гафния позволят создавать приборы флэш-памяти с проектными нормами 20 нм и менее.

Соискатель имеет 35 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 17 работ общим объемом 6,84 печатных листа, из которых на долю соискателя приходится 2,53 печатных листа, 9 опубликованных работ в рецензируемых научных изданиях, 8 из них входят в международные реферативные базы данных и сис-

темы цитирования. Требования п.п. 11 и 13 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемые к публикации основных научных результатов диссертации, выполняются. Требования, установленные п. 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней, соблюдаются. Сведения об опубликованных работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, достоверны.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А., Васютин М.С. Моделирование воздействия ионизирующих излучений на МДП-структуры с наноразмерными диэлектрическими пленками // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 5. С. 18–25.
2. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Зарядовые характеристики МДП-структур с термическими пленками SiO₂, легированными фосфором, при сильнополевой инжекции электронов // Перспективные материалы. 2015. № 11. С. 19–25.
3. Cerbu F., Andreev D.V., Lisoni J., Breuil L., Afanas'ev V.V., Stesmans A., Houssa M. Electron energy distribution in Si/TiN and Si/Ru hybrid floating gates with hafnium oxide based insulators for charge trapping memory devices // Phys. Status Solidi A. 2016. Vol. 213. No. 2. P. 265–269.
4. Андреев Д.В., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Модификация МДП-структур электронным облучением и сильнополевой инжекцией электронов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 4. С. 94–99.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы от: **Шешина Е.П.**, доктора физико-математических наук, профессора, профессора кафедры вакуумной электроники ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»; **Векслера М.И.**, доктора физико-математических наук, профессора РАН, ведущего научного сотрудника ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе»; **Барабана А.П.**, доктора физико-математических наук, профессора ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»; **Мошников В.А.**, доктора физико-математических наук, профессора, заместителя заведующего кафедрой микро- и наноэлектроники и **Александровой О.А.**, кандидата физико-математических наук, доцента кафедры микро- и наноэлектроники ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»; **Новикова Л.С.**, доктора физико-математических наук, профессора, заведующего отделом ядерных и космических исследований Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; **Есаулова Н.П.**, доктора технических наук, профессора, профессора кафедры метрологии и стандартизации ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»; **Волкова Н.В.**, кандидата технических наук, доцента, до-

цента кафедры физических проблем материаловедения ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Все отзывы положительные. В качестве замечаний отмечено, что: из автореферата не ясно, проводился ли в работе контроль элементного состава исследуемых диэлектрических пленок и если проводился, то каким методом (Шешин Е.П.); в автореферате, стр. 15, вообще нет цитирования литературы. Наверное, правильно было бы дать ссылки на 2-3-4 работы – хотя бы для того, чтобы иметь возможность акцентировать прогресс, достигнутый в диссертации. Величины заряда (charge-to-breakdown) на рис. 3 на стр. 11 примерно на два-три порядка ниже, чем интуитивно ожидается для SiO_2 в режиме Фаулера-Нордгейма при напряжениях немного выше выхода из режима прямого туннелирования. Скорее всего, автор изучал ситуацию гораздо более сильного поля. Этот момент следует прокомментировать. На стр. 7 вверху следовало бы привести принятые автором значения эффективных масс m^* для изучаемых материалов. Это почти не заняло бы места – а важность параметра такова, что точные величины оказались бы исключительно полезными даже в формате автореферата. Есть несколько мелких опечаток, например: «низкоэнергетическом электронами» (стр. 10, с 9 св.), «слой диоксид кремния» (стр. 9, с 18 сн.). (Векслер М.И.); к сожалению, в автореферате не приведена информация о механизмах потери заряда на плавающем затворе в предлагаемых автором структурах или сравнительных данных для существующих образцов флэш-памяти и предлагаемых автором, которые позволили бы оценить реальное время хранения информации в них. Приведённые на рис. 3 данные были бы более информативны, если бы были представлены в виде интегральных кривых распределения (стр. 13 автореферата). Термин «процесс заряда/разряда» более корректен, чем термин «процесс заряжения/разряжения» (стр. 2 автореферата), используемый автором (Мошников В.А., Александрова О.А.); из автореферата не ясно, почему автор использует для модификации МДП-структур только сильнополевую инжекцию электронов и облучение электронами, и возможно ли использование для этой цели других видов радиационных облучений (Новиков Л.С.); при изучении зарядовых явлений в диэлектрических пленках МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти при сильнополевой инжекции электронов практически не учитывалось влияние водорода, которое в ряде случаев может приводить к деградации подзатворного диэлектрика и границы раздела полупроводник-диэлектрик (Есаулов Н.П.); в работе не представлены результаты сравнения характеристик исходных (необработанных) и модифицированных МДП-структур (Волков Н.В.).

В отзывах сделан вывод о том, что диссертационная работа Андреева Дмитрия Владимировича отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Выбор официальных оппонентов обоснован тем, что официальные оппоненты являются компетентными учеными в области физики конденсированного состояния (теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических систем, физических процессов в элементах энерго-независимой памяти – Шерченков А.А., теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств неорганических соединений, диэлектриков и МДП-структур, технические и технологические приложения – Литвинов В.Г.).

Выбор ведущей организации обоснован тем, что Лаборатория Космического материаловедения ИК РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук проводит широкий круг фундаментальных и прикладных исследований в области космического материаловедения, используя различные методы структурного анализа материалов, и в частности, тонких диэлектрических пленок, в том числе и для объектов, изучаемых в диссертационной работе.

Диссертационный совет отмечает, что по результатам выполненных соискателем исследований:

разработаны теоретические основы метода исследования и модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур в условиях инжекции электронов в сильных электрических полях с использованием стрессовых и измерительных уровней тока, учитывающего процессы заряда емкости структуры и захвата заряда в подзатворном диэлектрике МДП-структур в инжекционном режиме. В рамках метода разработана модель, описывающая изменение зарядового состояния МДП-структур как в режиме заряда емкости, так и в режиме инжекции носителей заряда, позволяющая выбирать оптимальный алгоритм токового воздействия и повышать точность измерений;

предложено использовать отрицательный заряд, накапливающийся в плёнке ФСС в структурах с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO_2 -ФСС как в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов, так и при электронном облучении, для модификации МДП-приборов, при этом использование сильнополевой инжекции электронов позволяет получить большие плотности отрицательного заряда при меньших деградиационных процессах;

доказано, что применение подзатворного диэлектрика на основе пленки SiO_2 , легированной фосфором с образованием двухслойного стека SiO_2 -ФСС с концентрацией фосфора в пленке ФСС 0,4–0,9 %, позволяет залечивать «слабые места» в подзатворном диэлектрике за счет накопления в ФСС при сильнополевой инжекции отрицательного заряда, приводящего к увеличению потенциального барьера в месте дефекта и, как следствие, к уменьшению локальных токов;

введены новые принципы исследования и модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур в условиях инжекции электронов в сильных электрических полях с использованием стрессовых и измерительных уровней тока.

Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:

доказано, что энергетическое распределение электронов, захватываемых в пленке $\text{Hf}_{0,8}\text{Al}_{0,2}\text{O}_x$, лежит в диапазоне 1,5–3,5 эВ и, следовательно, на основе таких структур могут создаваться элементы флэш-памяти;

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, т.е. с получением обладающих новизной результатов) использован разработанный метод стрессовых и измерительных уровней тока для исследования и модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур, учитывающий процессы заряда емкости структуры и захвата заряда в подзатворном диэлектрике МДП-структур при установлении сильнополевого инжекционного режима, в котором контроль изменения зарядового состояния подзатворного диэлектрика проводят по изменению электрического напряжения на МДП-структуре, контролируемого при измерительной амплитуде инжекционного тока много меньшей амплитуды стрессового тока; **изложен** способ повышения средней величины заряда, инжектированного в диэлектрик до его пробоя, и уменьшения количества дефектных структур путем применения подзатворного диэлектрика на основе пленки SiO_2 , легированной фосфором с образованием двухслойного стека SiO_2 -ФСС, позволяющего залечивать «слабые места» в подзатворном диэлектрике, что приводит к уменьшению локальных токов;

раскрыты особенности энергетического распределения электронов в элементах энергонезависимой памяти с Si/TiN_x и Si/Ru гибридными плавающими затворами, что позволило определить, что оба типа образцов имеют близкую энергию фотоионизации, равную ~2,8 эВ;

изучены различные способы формирования high-k диэлектриков на основе оксида гафния и их влияние на плотность и энергетические распределения электронных ловушек в диэлектрической пленке;

проведена модернизация модели, описывающей изменение зарядового состояния МДП-структур как в режиме заряда емкости, так и в режиме инжекции носителей заряда, позволяющая выбирать оптимальный алгоритм токового воздействия и повышать точность измерений.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан и внедрен в практику новый метод стрессовых и измерительных уровней тока для исследования и модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур в условиях сильнополевой инжекции электронов, учитывающий процессы заряда емкости структуры и захвата заряда в подзатворном диэлектрике МДП-структур в инжекционном режиме, имеются акты об использовании результатов диссертационной работы;

определено, что применение сильнополевой инжекции электронов для модификации зарядового состояния МДП-структур предпочтительнее использования элек-

тронного облучения, поскольку появляется возможность индивидуальной коррекции характеристик каждого прибора и возможность снижения сопутствующих деградационных процессов;

представлены рекомендации по совершенствованию технологического процесса формирования подзатворного диэлектрика КМДП интегральных микросхем на АО «Восход» – Калужский радиоламповый завод и АО «ОКБ Микроэлектроники» (г. Калуга).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ: результаты были получены с применением апробированных методик исследования диэлектрических пленок и МДП-структур, они обладали хорошей воспроизводимостью. Показано, что результаты воспроизводятся при проведении независимых измерений различными методами;

идеи базируются на обобщении широкого спектра литературных данных;

использовано сравнение полученных экспериментальных и теоретических результатов с литературными данными других авторов (Векслер М.И., Барабан А.П., Гриценко В.А., Afanas'ev V.V., Cartier E., Degraeve R.);

установлено качественное и количественное совпадение полученных в работе результатов с результатами, полученными другими авторами;

использованы современные компьютерные методы сбора и обработки полученных экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя состоит в: разработке метода стрессовых и измерительных уровней тока для исследования и модификации тонких диэлектрических пленок МДП-структур; проведении исследования МДП-структур с двухслойным подзатворным диэлектриком SiO_2 -ФСС как в процессе сильнополевой туннельной инжекции электронов, так и при электронном облучении; предложении способа повышения средней величины заряда, инжектированного в диэлектрик до его пробоя, и уменьшения количества дефектных структур; выполнении аналитических и экспериментальных исследований энергетических распределений электронов, захватываемых в МДП-структурах на основе диэлектрических пленок SiO_2 - $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$ и SiO_2 - HfO_2 , а также в межзатворных диэлектриках на основе алюмината гафния и трёхслойного стекла $\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Hf}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{O}_x$; интерпретации экспериментальных результатов.

Диссертационная работа соответствует пунктам 1, 6, 7 паспорта научной специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертационная работа Андреева Дмитрия Владимировича «Зарядовые явления в диэлектрических пленках МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти при сильнополевой инжекции электронов» соответствует критериям, установленным п.п. 9 и 10 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. Она является самостоятельной

завершенной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение важной для физики конденсированного состояния научной задачи, связанной с установлением физических закономерностей зарядовых явлений при инжекции электронов в сильных электрических полях, включая накопление заряда и последующее его хранение, в диэлектрических пленках МДП-структур и элементов энергонезависимой памяти. Диссертация Андреева Д.В. обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

На заседании 15 июня 2016 года диссертационный совет Д 212.141.17 принял решение присудить Андрееву Д.В. ученую степень кандидата технических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 15 докторов наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета (дополнительно введены на разовую защиту 0 человек), проголосовали: за 15, против 0, недействительных бюллетеней 1.

Председатель

диссертационного совета



Коржавый Алексей Пантелеевич

Ученый секретарь

диссертационного совета



Лоскутов Сергей Александрович

Дата оформления Заключения

15 июня 2016 года